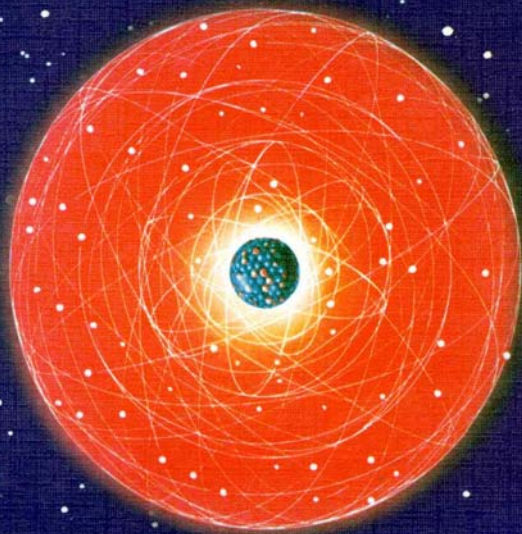




Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет)

А. Б. Колдобский В. П. Насонов

*Вокруг атомной энергии:  
правда и вымыслы*



Москва 2002

**А.Б. Колдобский В.П. Насонов**

**Вокруг атомной энергии:  
правда и вымыслы**

**Москва 2002**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А.Б. Колдобский В.П. Насонов

**ВОКРУГ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ:  
ПРАВДА И ВЫМЫСЛЫ**

Москва 2002

Колдобский А.Б., Насонов В.П. **ВОКРУГ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ: ПРАВДА И ВЫМЫСЛЫ.** М.: МИФИ, 2002. — 116 с.

В книге излагаются элементарные сведения по ядерной физике, необходимые для последующего рассмотрения вопросов, связанных с ионизирующими излучениями. В популярной форме 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 (концепция допустимого риска и линейная беспороговая гипотеза). Подробно анализируются вопросы бытовых радиационных рисков (в частности, воздействие радона). Даются ответы на наиболее часто встречающиеся вопросы по действию ионизирующих излучений и их последствиям. Поэтому первая глава построена по принципу «вопрос — ответ» и не предполагает обязательной последовательности при знакомстве с её материалом.

Вниманию читателей предлагается также популярное рассмотрение некоторых актуальных тем, связанных с ядерной и радиационной физикой. Анализируются проблемы ядерного и радиационного терроризма и возможности использования некоторых материалов для создания малогабаритных ядерно-взрывных устройств.

Книга предназначена для школьников старших классов и студенческой молодёжи.

Издание осуществляется при поддержке программы сотрудничества Минобразования России и Минатома России по направлению «Научно-инновационное сотрудничество», а также Информационной ассоциации предприятий атомной энергетики и промышленности «Информ-Атом».

Рецензент А.И. Ксенофонов

ISBN 5 – 7262 – 0455 – 7

© А.Б. Колдобский, В.П. Насонов, 2002

© Московский инженерно-физический институт  
(государственный университет), 2002

## СОДЕРЖАНИЕ

---

Предисловие .....	4
Глава 1. Ионизирующие излучения: вопросы и ответы.....	17
1.1.  Ядерная физика: необходимый минимум .....	17
1.2.  Действие ионизирующих излучений на организм. Радиационная физика и радиобиология .....	27
Глава 2. «Атомные дела» на гребне общественного интереса .....	83
2.1.  Ядерный и радиационный терроризм: между физикой и политикой .....	83
2.2.  «Ядерные сверхматериалы»: судьба неслучайных мифов .....	107
Заключение.....	115
Литература.....	115

---

## ПРЕДИСЛОВИЕ

«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 этот бред сочинили авторы — так сказать, в полемическом задоре — то Вы ошибаетесь. Это — дословные цитаты из вполне конкретных средств массовой информации (СМИ), взятые наудачу в том смысле, что таких цитат можно без труда привести и три, и тридцать три, и сто тридцать три.

Как профессионалам-ядерщикам (авторам в том числе) реагировать на подобную чепуху? Смеяться, покручивая пальцем у виска? Можно, конечно... Но это будет смех сквозь слёзы.

Ибо этот (и подобный) бред, растиражированный в сотнях тысяч экземпляров печатных изданий и на миллионах телеэкранов, становится сильнейшей информационной заразой, формирующей у общества неосознанный, интуитивный страх перед всем «атомным».

Ибо, используя этот страх, люди, предельно далекие в своих побуждениях от объективных интересов страны и её жителей, пытаются истерическим охаиванием отечественной атомной техники и энергетики нажить себе политический и моральный капитал. Или же просто «освоить средства», щедро выделяемые для такой борьбы из-за рубежа через посредство фондов, «союзов» и «общественных организаций».

Ибо (и это, может быть, самое печальное) агрессивный напор потоков «антиатомной» чепухи не встречает почти никакого информационного противодействия. Нельзя же всерьёз считать таковым робкие оправдания специалистов-атомщиков, почти неслышимые на фоне ревущей антиядерной свистопляски.

Но дело здесь не только в «слабости голоса». Все гораздо сложнее и печальнее для атомщиков.

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 естественно-научной и инженерной средах) 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 думало об интересах страны и народа сталинское окружение, 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 кожи 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-то 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 современной информационной войной против атомной энергетики? Аналогий именно в смысле многократного наступания на одни и те же грабли.

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 дантиста, и наверняка плотно захлопнем рот, если бормашина окажется в руках даже сверхпопулярного артиста. Мы доверяем опытному водителю и, скорее всего, как ошпаренные выскочим из автобуса, если узнаем, что по слож-

ной дороге его будет вести даже сверхобаятельная телеведущая. Мы шьем костюмы у портного и в страшном сне не рискуем натянуть на себя наряд, сработанный даже суперрейтинговым политиком. И т. д.

Атомная техника и энергетика, увы, — исключение. При их обсуждении артисту, телеведущей и политику слишком часто доверяют больше, чем профессионалу-атомщику. Случайно ли, что именно атомную технику и энергетику постигла столь злая судьба?

Конечно же, нет. В вопросах такого масштаба случайностей не бывает, и сходство «идеологических платформ» для нападков на атомную энергетику в различных странах мира лишь подчеркивает это. Налицо как минимум две важнейшие 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, освещенной злобещим заревом страшного оружия, обеспечившего человечеству, в первый раз за всю его историю, возможность самоуничтожения. В данном случае совершенно неважно, что атомная энергетика как таковая никакого отношения к ядерному оружию не имеет. Как известно, серы боятся не потому, что она опасна сама по себе, а потому, что ею чёрт пахнет...

Но есть и другое обстоятельство, которое также, отнюдь, не добавляет популярности атомной энергетике. Именно в силу столь своеобразного генезиса она до недавних пор была окутана столь же непроницаемой завесой секретности, как и ее прародитель — военно-ядерный комплекс. С точки зрения открытого информационного общества в этом уже хорошего мало. Однако ситуация многократно усугубилась тем, что эта завеса тайн прорывалась лишь тогда, когда атомные 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. А вкуче с почти всеобщим незнанием важнейших обстоятельств событий, непониманием существа произошедшего и массивированной ложью большую и малую власть имущих это привело к тяжелейшему для атомной энергетике 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 — ведь тоже 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 сосчитает 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 устоявшаяся «цена» в угольной отрасли — один погибший шахтер на каждый миллион тонн угля?

Этот список можно и продолжить, но не в этом суть. Авторы отнюдь не призывают закрыть химические заводы и угольные шахты, а автомобили утопить в море (тем более, что они сами автолюбители). 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. Но подробнее рассмотрим этот вопрос несколько позже, а сейчас продолжим обсуждение в рамках несколько лирического понятия «опасность» — лирического в том смысле, что оно не подразумевает количественной интерпретации. Вообще-то это, конечно, нехоро-

шо — вспомним Канта: «В любом знании столько истины, сколько математики». Сколько раз придется еще нам вспоминать мудрость философа...

Теперь — в продолжение темы: а что сумела (реально говоря) натворить в ущерб человечеству атомная энергетика?

Из отчёта Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР) «Международные оценки последствий аварии на Чернобыльской АЭС», выпущенного в 2000 г.: «... диагноз острой лучевой болезни был подтверждён у 134 пациентов... Из них 28 наиболее тяжёлых, ... несмотря на активное лечение, ... умерли в первые четыре месяца после аварии, двое погибли от вторичных инфекций и один — от почечной недостаточности. Впоследствии, с 1987 по 1998 годы среди перенёсших острую лучевую болезнь по разным причинам умерло ещё 11 человек».

Даже допуская (чисто гипотетически), что все эти 11 человек, как и 3 человека в 1999 – 2000 годы (о чём также упоминается в отчёте НКДАР), умерли от отдалённых последствий переоблучения (хотя это наверняка не так) и, добавляя к этому двоих погибших в здании разрушенного блока в момент взрыва реактора, мы получаем 44 погибших. И это — в самой тяжёлой аварии на АЭС за всё время существования атомной энергетики!

Другие же аварии на АЭС и вовсе обошлись без человеческих жертв. Самое время отметить: на фоне иных технологических опасностей наших дней (хотя бы упомянутых ранее) слепить из атомной энергетики врага рода человеческого объективно никак не получается. Но авторы хотя бы переводить диалог с ее противниками на рельсы «сам дурак», а добиваться для атомной энергетики в её общественном восприятии равноправия с иными современными технологиями. Не больше — но и не меньше. И воспрепятствовать надуванию в ее лице исчадия ада из ничего, коли уж не получается сотворить его из фактов.

Может показаться, что, упоминая выше о неблагоприятных (в обсуждаемом смысле) исторических особенностях атомной техники и энергетики, авторы противоречат сами себе. Конечно же, это не так. Во-первых (и это необычайно важно в разговоре с людьми именно сейчас), всё ранее сказанное — правда. И скрывать правду в данном случае — то же самое, что сказать неправду. Обсуждение вопросов технологического развития общества (а этим мы и занимаемся) неминуемо предполагает дискуссии и столкновения мнений, но лишь в рамках классического платоновского «в споре рождается истина», что, помимо прочего, безусловно предполагает научную и человеческую честность. А ложь любой из спорящих сторон немедленно выводит эти дискуссии в иную плоскость, где, может быть, возможно рукоприкладство, но вот рождение истины — вряд ли. И, во-вторых, — что, собственно говоря, предметно кошмарного сказали авторы об атомной энергетике? Да ничего, поскольку такого в ней и нет — из сказанного никоим образом не следует какой-либо особой, аномальной опасности ядерных технологий (да и следовать не может). А при отсутствии доказательств априорная вера в такую опасность называется просто и ёмко — предрассудки.

Психологам же хорошо известно: предрассудок сам по себе иррационален, но в его основе обычно лежит рациональная подоплека (в данном случае — историческая), дополненная порочной логикой. Осознав эту порочность, человек обычно избавляется и от самого предрассудка — чего и хотят добиться авторы.

Но уж коль скоро мы заговорили о психологии, то в этом смысле у ядерных технологий есть специфическая особенность, кардинально ухудшающая их «общественное лицо». Эта особенность сконцентрирована в слове, ставшим не только одним из главных ужасиков 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 обоснования упомянутого выше отношения к радиации. Поэтому сюда добавляется обычно еще «...и от нее нельзя ничем защититься» (что уже неправда). Часто готовый образ ужасика окончательно оформляется высказыванием типа: «И все это атомщики придумали» — должен же быть кто-то виноват в таком кошмаре. Но вот это — уже злонамеренная ложь.

Здесь предмет разговора, однако, меняется. От общих слов, аналогий, исторических экскурсов мы переходим к обсуждению конкретного естественно-научного 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, авторы вовсе не собираются отказываться от только что написанного ими — такое доверие действительно есть единственно возможный принцип существования современного общества. И всё же, всё же...



Попробуйте выучить два стихотворения (и заодно оценить их художественные достоинства). Одно — «Мело, мело по всей земле...». Забавляющая 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 даже с заучиванием возникнут большие проблемы, ибо 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, ибо 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 формированием общественного отношения к той или иной технологии. Одно дело — если человек, разбираясь в главном, в существе дела, доверяет профессионалам в анализе и реализации его конкретных аспектов. И совсем другое — 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 в этих условиях общественность в своем отношении к атомной технике и энергетике нередко оказывалась (и оказывается) в роли старухи — святой простоты, подкладывающей сушняк в костер Яна Гуса?!

Однако безропотно разделять судьбу Яна Гуса сотрудники атомной отрасли не хотят. Слишком хорошо понимают они, что в данном случае речь идёт не только (и не столько) об их корпоративных интересах, а о судьбе страны.

Что в наши дни только наличие у России ядерного щита делает невозможным военное давление (а то и военное вмешательство) извне.

Что без масштабной атомной энергетики у России нет не только долгосрочных перспектив, но даже и текущих шансов на выживание.

Что атомная отрасль, которой (в отличие практически от всех высокотехнологичных отраслей бывшего СССР) удалось сохранить организационное единство, кадровый потенциал, высокую наукоёмкость и надёжную управляемость, осталась одной из очень немногих российских структур, способных участвовать (и побеждать!) в жестоких схватках на мировых технологических рынках.

Что по этой причине слишком многим, в том числе очень богатым и влиятельным кругам и лицам за пределами нашей страны, она — как кость в горле, и что слишком часто интересы этих лиц и кругов проглядываются за шумными антиядерными акциями и кампаниями.

Наконец, что никакие громогласные проклятия и анафемы со стороны некоторых современных «экологов» в адрес атомщиков в ходе этих акций и кампаний не смогут ни на миллиметр продвинуть практическое решение действительно серьёзнейших экологических (в том числе и радиоэкологических) проблем страны — просто потому, что антиатомные вопли не приносят требуемых для этого очень немалых средств. И что атомщики вполне способны заработать их сами, им только палки в колёса не надо ставить.

Кстати говоря, понятие «эколог» не случайно взято чуть раньше в кавычки. Экология 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 она не имеет ничего общего с шумной и агрессивной деятельностью «упёртых» и обычно технически безграмотных противников современных технологий, адептов «зелёной пустыни».

Как же быть?

Ответ и прост, и сложен — и обращён он к атомщикам в первую очередь.

Во-первых, дорогие коллеги, давайте осознаем вполне очевидный факт: времена, когда люди молчали, вообще, и молчали по поводу «атомных дел», в частности, ушли безвозвратно. Теперь люди говорят и будут говорить. Да ещё как громко, да ещё то, что в наибольшей мере отвечает их убеждениям в дан-

ный момент. И согласовывать с нами это они не собираются. И не только говорить будут, а и действовать соответственно.

Так вот, если убеждения большинства людей сложатся не в нашу пользу — мы проиграем всерьёз, невзирая ни на какие научно-технические, экономические и социальные достижения. Печальная судьба атомной энергетики в Швеции, Германии, Австрии, Италии не оставляет нам на этот счёт никаких иллюзий.

Кроме того, пора всем понять, что борьбу за убеждения людей и их доверие можно сразу проиграть (тому пример — Чернобыль), но вот выиграть её, по крайней мере, в обозримое время, одним ударом, «нокаутом», нельзя. Идёт упорная, вязкая борьба «по очкам», где противники могут получить такие очки не в последнюю очередь благодаря нашим ошибкам в общении с людьми. Из практики этого общения нам надо категорически исключить формализм, бюрократические штампы и приёмы, неумение вести полемику (порой и жёсткую), нежелание обсуждать острые, волнующие людей вопросы, касающиеся нашей отрасли.

Далее, надо не только просто разговаривать с людьми, но и внимательно, терпеливо, умело учить их. Надо помочь им 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 убеждённости других в том, что они, лишь только на основе высказываний и суждений, вроде приведённых в самом начале, уже понимают в этом деле всё или почти всё.

Это непросто. Но что делать! Надо уметь, уважаемые коллеги, описывать ядерную и радиационную физику, радиобиологию и радиоэкологию такими, как они есть — в основе своей понятными большинству людей и описываемыми вполне предсказуемые явления. 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 изложении) такова: атомная энергия в добрых, сильных и умелых руках до невиданных ещё пределов увеличивает созидательные возможности Человека, но способна принести неисчислимы беды, оказавшись в руках неуча, растяпы или злодея.

И это ещё не все. Надо учитывать, что обязать людей учиться этому нельзя — следовательно, их надо ещё и заинтересовать. Для чего такую учёбу нужно 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 оплёвывания профессионалов и специалистов.

Что же, делайте Ваш выбор, дорогой читатель. Очень хочется надеяться, что наша книга поможет Вам в этом.

Авторы, разумеется, не стремились охватить в ней все вопросы, связанные с атомной техникой и энергетикой. Их цели были иными. Во-первых, они хотели снять налёт сатанизма со всего, связанного с радиацией и ионизирующими излучениями. Они исходили из того, что это позволит Вам, читатель, и к атомной энергетике в целом отнестись с большим пониманием.

Первая глава книги не случайно построена по принципу «вопрос — ответ», хоть такой подход в определённой мере и нарушает логическую целостность материала. Ведь авторы вполне допускают, 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 вот вторая глава книги и написана иначе, и назначение имеет другое. И вот какое.

Одним из наиболее распространённых в наши дни пропагандистских приёмов «зелёных» движений, СМИ и отдельных активистов является использование против ядерной техники и атомной энергетики информационных аналогий, пусть даже весьма далёких от неё по смысловому содержанию. При этом выбор конкретного предмета такой аналогии не очень важен — лишь бы он был на всеобщем слуху.

Примеры — пожалуйста.

Обрушила банда нелюдей варварский удар на Нью-Йорк — и в воплях хорошо известных изданий и отдельных деятелей наиболее опасным для мира и общества представляются не кровожадные мерзавцы (в том числе орудующие и в некоторых регионах России), а атомные электростанции как якобы наибо-

лее опасный объект возможной террористической атаки. Тут же следует вывод о чрезвычайной желательности их закрытия. Главное — не с террористами бороться, а атомные электростанции закрыть!

Разгорелась в прессе шумиха о якобы кошмарном воздействии на природу и людей обедненного урана при его использовании в бронебойных сердечниках боеприпасов современных артиллерийских систем — и по забавной логике «там уран, и тут уран» крайней оказалась атомная энергетика.

Организовали иностранные спецслужбы шумный (впоследствии, правда, с еще большим шумом лопнувший) скандал с контрабандой, якобы, российского оружия плутония — и вот конечный итог визгливой информационной свистопляски: российских атомщиков надо разогнать, российские АЭС надо закрыть.

Начались (и продолжают до сих пор) вялотекущие, но настойчивые кампании о «бегстве» российских ядерщиков в страны с «проблемными» режимами (хотя ни одного такого случая достоверно зафиксировано не было) и о «проходном дворе на российских ядерных арсеналах» — и столь же настойчивые выводы: ядерное оружие и атомная энергетика для современной России неприемлемы, атомщиков надо переучивать или вообще платить им пожизненную пенсию, но нельзя позволить им заниматься своим делом. И т. д., и т. п.

Откуда растут уши этих кампаний — выше уже говорилось. Реальная ядерная, радиационная, экологическая или военная безопасность тут не при чём. Здесь работают своекорыстные экономические и/или политические интересы их организаторов, от национальных интересов России и россиян весьма далекие. Но вопрос-то в другом: дорогие коллеги-атомщики, а где в этих случаях наши голоса, наше мнение? Почему мы, отдавая обсуждение актуальных вопросов по профессионально близкой нам проблематике на откуп нашим противникам, тем самым по существу безропотно уступаем им очки в борьбе за общественное мнение? Очки, которые мы могли бы набрать сами!

Вот некоторые из таких вопросов и собраны нами во второй главе книги. В ней, как правило, не преследуются цели скрупулёзно точного научно-технического анализа обсуждаемых проблем, но ставится задача возможно более полного их рассмотрения в сочетании с проблемами сопутствующими — социальными, военными, политическими и другими. В данном случае широта, по нашему мнению, важнее глубины. Ведь по замыслу писалась всё-таки общедоступная книга, а не научная монография — что не исключает, разумеется, безусловного соблюдения научной достоверности обсуждаемых вопросов.

И если, прочитав эту книгу, Вы при знакомстве с очередным «околоядерным бредом» вместо прежнего чувства испуга в смеси с неприязнью к атомщикам недоумённо воскликнете: «Да что за чепуху он (она) несёт?» — нашу цель мы можем считать достигнутой.

### ***Знаете ли Вы, что :***

- Энергопотребление в богатых странах ежегодно увеличивается на 1 – 2 %. В некоторых густонаселенных развивающихся государствах этот показатель достигает 13 %. По прогнозам специалистов, в ближайшие тридцать лет потребность в топливно-энергетических ресурсах возрастет в два раза.

- Одна ТЭС мощностью 1000 МВт, работающая на угле с содержанием серы около 3,5 %, несмотря на применение средств очистки, выбрасывает в атмосферу 140 тыс. т сернистого ангидрида в год, из которого образуется около 280 тыс. т серной кислоты.

- Кислотные дожди (основным источником которых является угольная энергетика) в следующем столетии станут причиной уничтожения 118 млн м<sup>3</sup> строевого леса в Европе в год, из них около 30 млн м<sup>3</sup> — в европейской части России (если, конечно, не будут приняты меры по ограничению выбросов сернистого газа и оксидов азота). Ежегодные экономические потери от кислотных дождей в Европе составят 16 млрд фунтов стерлингов.

- При «сжигании» 1 кг урана выделяется столько же энергии, сколько при сжигании 2,5 млн кг каменного угля.

## **Г л а в а 1. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ: ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ**

### **1.1. 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. Ядра, имеющие одинаковый нуклонный состав, но разные энергетические состояния, называются ядерными изомерами. Ядра, 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 ( $A$ ) нуклонов (протонов и нейтронов) в его ядре. С округлением до целого число  $A$  совпадает с массой ядра в атомных единицах, поэтому оно часто и называется массой ядра, или массовым числом ядра. Снизу ставится заряд  $Z$  ядра нуклида 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, символ N (азот, седьмой по счету элемент в таблице Менделеева) соответствует числу  $Z = 7$  и никакому иному. Число нейтронов ( $N$ ) в символьном обозначении нуклида отсутствует, так как  $N = A - Z$ .

Приведем для примера символьное обозначение урана-235 —  $^{235}\text{U}$ .

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). Например, водород имеет три изотопа, все ядра которых имеют по одному протону, однако разное количество нейтронов: обычный водород ( $^1\text{H}$ , протий) не имеет нейтронов вовсе, водород-2 ( $^2\text{H}$ , 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 дальше).

#### 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 килогеккерель (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).

Следует иметь в виду, что активность радионуклидного источника, разумеется, зависит от времени, изменяясь в соответствии с периодами полураспада входящих в его состав радионуклидов и их генетическими связями. Общая активность многокомпонентной смеси радионуклидов со временем может лишь уменьшаться, однако парциальная активность некоторых ее компонентов в отдельные периоды времени может и возрасти, а также оставаться почти неизменной (так называемые равновесные активности).

Величины активностей, характерных для некоторых естественных и техногенных объектов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Активность некоторых естественных и техногенных объектов

Объект	Активность, Бк
Воздух на открытой местности	15 (на 1 м <sup>3</sup> )
Воздух в помещениях	50 – 1000 (на 1 м <sup>3</sup> )
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 АЭС	$10^{18} - 5 \cdot 10^{19}$
Радиоактивные вещества и материалы на крупном радиохимическом заводе	$10^{19} - 10^{20}$
Общая активность Мирового океана	$10^{23}$

### 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. 1 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.

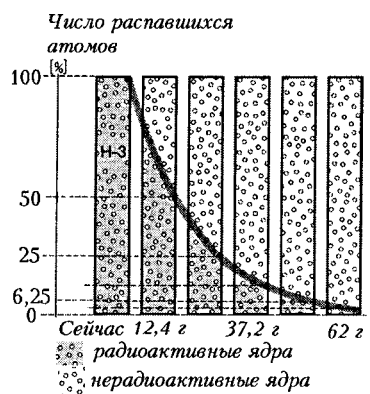


Рис. 1. Изменение количества ядер трития со временем (период полураспада 12,4 года)

**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 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 или протекания иных (инициируемых извне) ядерных реакций.

**Почему ядерное излучение (радиацию) называют ионизирующим? 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 оболочки 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 радиоэкологией, существенны следующие типы ядерных ионизирующих излучений.

1. Альфа ( $\alpha$ )-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  $\alpha$ -частиц — около  $10^7$  м/с, ионизирующая способность очень велика.

2. Бета ( $\beta$ )-излучение — испускание электронов и позитронов, движущихся с очень высокими (около световыми) скоростями. Оно возникает в результате радиоактивного распада ядер. Ионизирующая способность существенно ниже, чем у  $\alpha$ -излучения.

3. Рентгеновское и гамма ( $\gamma$ )-излучение — электромагнитное излучение очень малой длины волны и, соответственно, большой энергии кванта излучения (от 1 кэВ до десятков МэВ). Источники — радиоактивный распад, ядерные реакции и электродинамические процессы. Ионизирующая способность еще ниже, чем у  $\beta$ -излучения.

4. Поток нейтронов — нейтральных нуклонов, входящих в состав всех ядер, кроме легкого изотопа водорода. Он возникает в основном в результате ядерных реакций, а также при распаде некоторых радионуклидов. Ионизирующая способность несколько ниже, чем у  $\beta$ -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  $\alpha$ - и  $\beta$ -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 около 12 мин и образованием протона, электрона и антинейтрино.

### **Что такое проникающая способность излучения?**

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

$\alpha$ -Излучение — наименее проникающее. Оно эффективно поглощается слоем воздуха толщиной несколько сантиметров, слоем воды толщиной около 0,1 мм или, например, листом бумаги.  $\beta$ -Излучение обладает существенно большей проникающей способностью; чтобы его задержать, нужен, например, слой алюминия толщиной в несколько миллиметров, а пробег  $\beta$ -частиц в биологической ткани достигает нескольких сантиметров. Для  $\gamma$ -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).

Сказанное иллюстрируется рис. 2. Нетрудно увидеть, 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 расходуется именно на ионизацию — первичную (для заряженных частиц) или вторичную (для нейтральных).

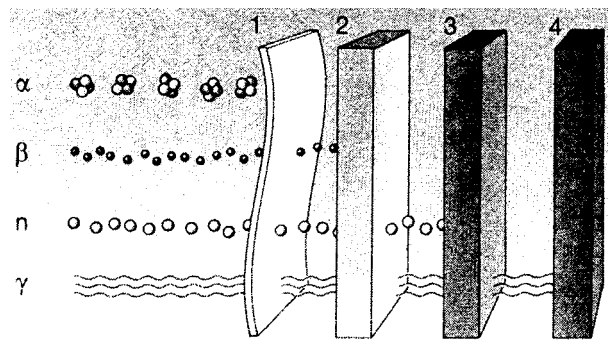


Рис. 2. Проникающая способность излучений

Проникающую способность излучения не следует путать с его биологической опасностью. Анализ последней, как 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 « $\nu$ ») 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 ядерным, или расщепляющимся, материалом, а с учетом необходимых добавок и технологического исполнения — ядерным топливом. Однако для протекания реакции нужно соблюдение многих условий, и в первую очередь достижение некоторого порогового значения компактной массы ядерного топлива — критической массы. Для изолированной сплошной сферы из плутония-239 чистотой около 90 % значение критической массы составляет несколько килограммов, для урана-235 при аналогичных условиях — в несколько раз больше. 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 вероятностью 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 ядерного материала (урана, плутония) не имеет ни малейшего отношения к их использованию в качестве ядерного материала. Заметим, что вещества на основе элементов легче тория ядерным 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 краже, 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, множество вторичных нейтронов), она тем не менее считается одним из типов уже знакомого нам ра-

диоактивного распада и характеризуется тем же экспоненциальным законом. Для  $\alpha$ -активного урана спонтанное деление — явление исключительно редкое: в уране-238 статистически один такой случай приходится почти на  $5 \cdot 10^8$  «нормальных»  $\alpha$ -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 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 источниками именно нейтронов (а на исследовательских ядерных реакторах интенсивные потоки и пучки нейтронов вообще являются единственной продукцией), что позволяет наращивать искусственные радионуклиды в значительных (промышленных) количествах. Продуктом нейтронной активации является, например, широко используемый в изотопных технологиях кобальт-60 ( $\gamma$ -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  $\beta$ -частиц, восемьдесят пять  $\gamma$ -квантов с энергией 662 кэВ и семь  $\gamma$ -квантов с энергией 32 кэВ. Все, ничего больше. Не могут при распаде этого нуклида образоваться ни  $\alpha$ -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.

### **1.2. 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 законодательству является обязательным для граждан, индивидуальных предпринимателей и юридических лиц.

**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 метрологической 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 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 Дж энергии в 1 кг вещества. Используемая 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  $\alpha$ -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 собой 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. 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  $\gamma$ -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).

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 приведенные 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 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 дозиметрических единиц нет. В качестве утешения можно лишь добавить, что специалистам в области радиационной физики, радиобиологии и медицины, работавшим с рентами, 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 реальную опасность представляют мощные источники нейтронов и  $\gamma$ -излучения. Внешнее  $\beta$ -излучение при особо неблагоприятных условиях может лишь привести к лучевому ожогу кожных покровов; исключение — его воздействие на хрусталик глаза. В этом случае последствия (лучевая катаракта) могут быть значительно более серьезными (что особо и учитывается НРБ-99). Внешнее  $\alpha$ -излучение вполне безопасно, так как поглощается уже тонким слоем воздуха и наружным слоем кожи.

Защита от 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  $\beta$ -излучения обычно вполне хватает сантиметрового слоя органического стекла или еще более тонкого слоя алюминия. Для защиты от  $\gamma$ -излучения, как мы уже говорили, эффективны слои металла возможно более высокой плотности (железо, свинец). 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  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений, возникающих в материале легкого поглотителя вследствие ядерных реакций, инициируемых нейтронами. Специальной защиты от внешнего  $\alpha$ -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,  $\alpha$ -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 предопределенных 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 осаждаёт 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 избираемому радионуклиду (рис. 3). Есть радионуклиды, которые распределяются в организме более или менее равномерно (калий-40, цезий-137); для них критическим органом является тело в целом.

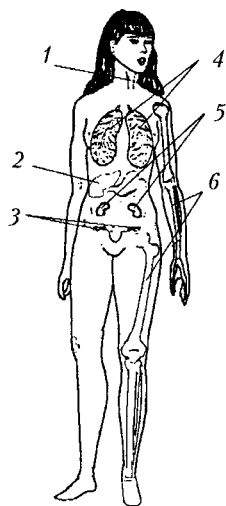


Рис. 3. Критические органы по различным радионуклидам: 1 — щитовидная железа (йод-131); 2 — печень (кобальт-60, цезий-137, плутоний-239); 3 — яичники (калий-40, кобальт-60, цезий-137); 4 — легкие (полоний-210, радон-222, плутоний-239); 5 — почки (цезий-137); 6 — костная ткань (стронций-90, радий-226, 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 известно, для большинства типов излучений примерно одно и то же.

Мы, однако, уже знаем, что мерой вероятности наступления неблагоприятных последствий является не поглощенная, 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 внутрь 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  $\gamma$ -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 радом: 1 Гр = 100 рад. А поскольку в старой системе радиационных единиц рад увязывался с рентгеном (Р), то такая возможность открывается и для последнего. Именно, можно считать, что 1 Зв эквивалентной дозы в обсуждаемом случае с хорошей точностью соответствует 100 Р.

И, наконец, последний шаг. Вспомним, что при внешнем воздействии на организм обширных полей излучения с высокой проникающей способностью (как  $\gamma$ -излучение) 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  $\gamma$ -излучения в Москве, измеренной старым дозиметром и равной, по его шкале, 12 мкР (микрорентген)/ч, соответствует значение мощности эффективной дозы 0,12 мкЗв/ч.

**Каковы дозы, получаемые от различных источников в обыденной жизни?**

Вот некоторые данные:

Ежедневный трехчасовой просмотр цветного телевизора

в течение года, мЗв .....	0,001
Годовая доза для местного населения при штатном режиме эксплуатации АЭС, обусловленная её работой, мЗв.....	0,0012
Годовая доза от естественного радиационного фона, мЗв .....	1,5 – 2
Средняя доза при флюорографическом осмотре легких, мЗв.....	1,2
Однократное облучение при рентгенографии зубов, мЗв .....	30
Допустимое облучение персонала АЭС в нормальных условиях за год, мЗв .....	50
Однократное местное облучение при рентгеноскопии желудка, мЗв .....	300

### **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 формируется постепенно, при длительном облучении дозами, значительно превышающими предельно допустимые для профессионального облучения. Эта форма болезни может возникнуть как при общем (внутреннем или внешнем) облучении, так и при преимущественном поражении отдельных органов.

Существуют три степени хронической лучевой болезни:

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 хронической лучевой болезни является исключение превышения дозовых нагрузок, характерных для населения в целом. Восстановительный период, как правило, очень долг (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 хронической лучевой болезни и стохастических эффектов явились интенсивные потоки внешних нейтронных и/или  $\gamma$ -излучений. Именно от огромных (свыше 10 Зв) доз внешнего  $\gamma$ -излучения 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 хронической ее формы и стохастических эффектов — печальная реальность, и наиболее угрожаемый в этом смысле регион в России (возможно, и в мире) — Уральская зона радиаци-

онно-экологического бедствия в бассейне р. Течи. По данным крупного российского специалиста А. К. Круглова, хроническая лучевая болезнь 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) объемов радиоактивных 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 лучевая катаракта (помутнение хрусталика глаза с ухудшением зрения), проявляющаяся у всех без исключения пострадавших при получении одноразовой дозы (доза 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, загрязненных 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 сут на 0,01 чел. · Зв.

**Но если негативные стохастические эффекты облучения не имеют дозового порога, то сколько 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 — важнейшая часть книги. 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 или индивидуальным влиянием природных, технологических и социальных факторов. Он, в рассматриваемом смысле, определяется как вероятность гибели человека за один год вследствие воздействия некоторого фактора угрозы или 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 или 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 приходящих 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 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 двум очень важным следствиям анализа (пусть очень упрощённого) понятия риска. Во-первых, существует граничный уровень риска, который, если он не превышен, принимается обществом без необходимости планирования и проведения мероприятий по его уменьшению. Таким уровнем на практике является величина порядка  $10^{-6}$  (один смертельный случай в год на миллион людей), и область рисков ниже этой величины называется областью безусловно допустимого риска.

Во-вторых, уровень приемлемого технологического риска должен анализироваться, исходя не только из особенностей рассматриваемой технологии, но и возможности полного отказа от неё. Например, мы можем не только ценой определённых затрат применить более совершенные технологии угольного энергообеспечения, снижая при этом риски (например, добыча угля открытым способом, его подземная газификация, снижение уровня токсичности выбросов и др.), но и, по крайней мере в принципе, вообще отказаться от угля как энергоресурса — для несуществующих технологий (и только для них!) риск равен нулю. Однако мы должны при этом считаться с резким (в нашем случае катастрофическим) увеличением иных рисков — вполне очевидным, если учесть, что сжигание угля обеспечивает 16 % российской выработки электроэнергии.

В корректном учёте всех этих факторов и принятием по его результатам разумных, адекватных решений состоит одна из важнейших задач цивилизованного общества — оптимизация рисков.

#### **А 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 индивидуального 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. 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 высокие дозовые пределы, что приводит, естественно, к некоторому увеличению уровня риска. Для этой категории он составляет величину порядка  $1,5 \cdot 10^{-4}$ . Однако 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 пропорциональную зависимость между этими двумя величинами в любом интервале мощностей доз.

#### **А воздействие упомянутого ранее природного 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)химическими 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 нормирования уровней техногенного облучения, вдвое уступающих уровням физически однотипных естественных.

Дело, однако, не только (и даже не столько) в общеполитических 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 ранее 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 «зеленых 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 уже упоминалось, 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, много раз.

Из сказанного очевидно, что в области околофоновых 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 уже знаем, дозы такого порядка величины вызывают детерминистские эффекты, т. е. ОЛБ различных степеней тяжести. Соответственно, и экспериментальная информация для анализа упомянутой 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 см<sup>3</sup> (10<sup>-4</sup> 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 (что авторы и делали), 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 определённую философию радиационной защиты, главная суть которой — «лучше многократно перестраховаться». А такая философия вовсе не безобидна.

Крупный радиобиолог, эксперт МАГАТЭ Дж. Джованович говорит: «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 её достичь, очень дорогостоящая цель».

Ладно, в конце концов, для хорошего дела и денег не жалко. Но вот выкидывать их просто во имя душевного спокойствия наиболее озабоченных «борцов с ужасной радиацией» 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.

Но 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 представляют средства массовой информации и «зеленые» всех мастей и оттенков), а 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 оказать 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 гормезисными).

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, к изумлению врачей, устойчивую обратную зависимость. 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.

**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 сбить цену. Другое дело, что, вопреки распространенным 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 контроля концентраций радионуклидов, сопоставимых с пределами годового поступления по НРБ-99, 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 гг. 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?**

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 акульей 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 дозу от йода-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 одного из авторов, это, разумеется, не «Сникерс», но требование водки «на запив» определяется иными обстоятельствами...

### **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-238 и уран-235. Их периоды полураспада 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 соответственно 13, 20 и 17. Среди них, вероятно, наиболее известен один из членов ряда урана-238 (именно, уже упоминавшийся ранее радий-226), а особое место в смысле радиационного воздействия занимает дочерний продукт распада последнего — радон-222 (о нем дальше). В природе радионуклиды этой группы находятся в равновесных количествах (сколько атомов в единицу времени возникает, столько и распадается). При этом относитель-

ное равновесное количество ядер любого члена ряда пропорционально его периоду полураспада, а абсолютное равновесное количество 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.

В зависимости от конкретных условий, перечисленные радионуклиды вызывают как внешнее, так и внутреннее облучение организма. Для источников земного происхождения доза от внутреннего облучения, ввиду вовлечения этих радионуклидов в обменные процессы экосферы человека, почти в 4 раза больше, чем от внешнего.

Космическое облучение обусловлено воздействием на человека частиц очень больших энергий, приходящих из космоса (в основном это протоны (92 %) и  $\alpha$ -частицы (~ 6 %), а также нейтроны,  $\gamma$ -кванты и др.), и радиоактивных продуктов активации этими частицами стабильных нуклидов в атмосфере (среди этих продуктов главную дозобразующую роль играют долгоживущий углерод-14 с периодом полураспада 5630 лет). Космическая радиация также может быть источником как внешнего, так и (за счет включения продуктов активации в обменные процессы организма) внутреннего облучения. Однако, поскольку значимые концентрации этих продуктов наблюдаются лишь в верхних слоях атмосферы, доза от внутренней компоненты космического излучения в среднем почти в 20 раз меньше, чем от внешней.

Таблица 2

**Средние ежегодные дозы, приходящиеся на взрослого человека, от естественных источников облучения, мЗв**

Вид излучения	Область с нормальным естественным фоном	Область с повышенным естественным фоном по данной компоненте
Космические лучи	0,30	2,0
Наземное $\gamma$ -излучение	0,34	4,3
Внутреннее облучение (без радона)	0,16	0,6
$\alpha$ -Излучение радона и продуктов его распада	1,20	10,0
Суммарно	2,0	—

Среднегодовые дозы, получаемые взрослым человеком от естественных источников ионизирующего излучения, представлены в табл. 2. 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. 4). Причина заключается в том, что хотя интенсивность и физическая сущность естественных источников ионизирующей радиации как таковые не зависят 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 (альпинизм) — 0,2 мкЗв/ч, на высоте 10 км (дальний авиаперелет) — 5 мкЗв/ч, на высоте 220 км (космонавтика) — 13 мкЗв/ч.

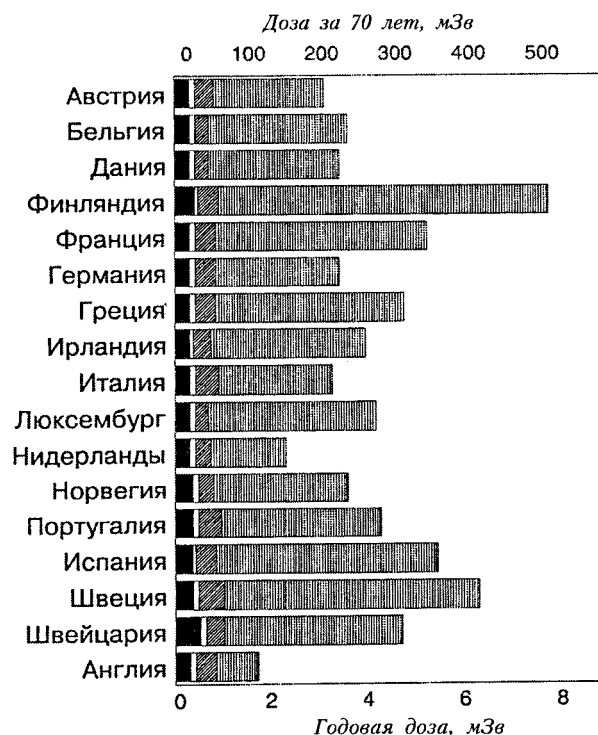


Рис. 4. Средние значения годовых доз и доз на протяжении жизни от естественных источников ионизирующей радиации для населения различных стран Западной Европы: ■ — космические лучи; □ — внешнее (наземное)  $\gamma$ -излучение; ▨ — внутреннее  $\gamma$ -излучение; ▩ — радон

И более половины всей среднегодовой дозы от естественных источников излучения обусловлено одним-единственным фактором — воздействием радона.

#### 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 (остальное — 0,7 % урана-235 и следовые количества урана-234). 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. Ну а где гранит — там всегда и уран, и в количествах иногда немаленьких.

На открытой местности радон, в определенном количестве испускаемый в атмосферу любым ураносодержащим 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 объемной активности в воздухе свыше  $100 \text{ Бк/м}^3$  радон, согласно НРБ-99, уже представляет значимую радиационную опасность. Именно эта величина является пороговой допустимой концентрацией при проектировании новых зданий. Для старых построек допустима объемная активность до  $200 \text{ Бк/м}^3$ . 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, увы, 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  $\alpha$ -

излучатель, достаточно опасен при внутреннем облучении. Однако по-настоящему страшны радиоактивные продукты его распада, в особенности  $\alpha$ -активные полоний-218 и полоний-214. 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  $\alpha$ -излучением. Таким образом, собственно 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 объемной активностью радона свыше  $100 \text{ Бк/м}^3$  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, объемная активность радона в воздухе жилых помещений, равная  $400 \text{ Бк/м}^3$  (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. 2). Он есть и в природном газе, откуда при его сжигании переходит в воздух помещений, правда, в существенно меньшем количестве (рис. 5). И совсем уже мало радона в осадочных породах (мел, мрамор, известняк) и сухих органических материалах (дерево, солома). Тем не менее авторы просят не трактовать эти сведения как призыв ко всеобщему переселению в шалаши, а обратиться к рассмотрению защитных мер в жилищах, достойных человека начала XXI столетия.

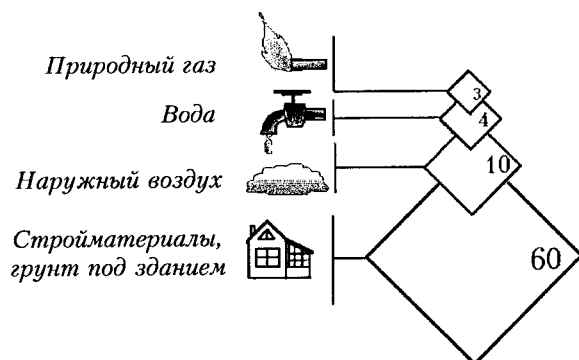


Рис. 5. Поступление радона в помещение от различных источников

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. Печальный пример массовости таких последствий чернобыльской катастрофы, инициированных именно безграмотной пропагандистской истерией, тому наилучшее доказательство.

А самой простой и самой эффективной мерой снижения радоновой опасности является вентиляция. На рис. 6 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.

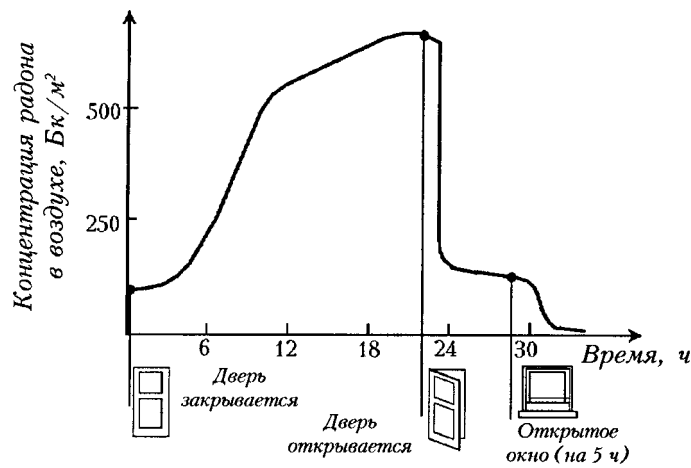


Рис. 6. Изменение концентрации радона в помещении в зависимости от режима вентиляции

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, заодно и мыши переведутся. 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 строительных материалов для сооружения дома. Особая роль при этом принадлежит сертификации как гарантии качества, имеющей юридическую силу. В любом случае следует знать, что наиболее радоноопасны строительные материалы на основе зол и шлаков, а также фосфогипса. Безответственность при выборе строительных материалов 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.

А самое 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» (часто «зеленого» оттенка), пробравшихся, увы, и в эту сферу, обходите за версту. Самодеятельность 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 строительных материалов 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 и 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, яв-

ляется естественным, но в качестве дозообразующего фактора оно начинает быть значимым лишь при цивилизационном освоении больших высот (авиация, космонавтика).

Авторы не рискуют ввязываться в этот спор, напоминающий известную 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. 3 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. 3, именно этот фактор определяет различие средней годовой дозы для жителей развивающихся и индустриальных стран), во многом, несомненно, обусловлена лишь несколькими лечебными процедурами. Так, 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 гастроскопических и стоматологических исследований. 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.

Таблица 3

**Средние годовые дозы, приходящиеся на взрослого человека,  
от постоянных источников облучения**

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	0,023	0,63
Космические лучи (при высотных полетах)	0,001	0,04	0,002	0,05
Радиолуминесцентные 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	3,6	100

Примечание: суммарные дозы даны с округлением до двух значащих цифр.

Огромные различия природных и социальных условий жизни россиян могут обусловить принадлежность той или иной группы населения России 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 (радиоактивность 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. Добавим к этому, что АЭС лишены, что называется, по определению, всего «букета» не из пальца высосанных, а вполне реальных и очень значимых экологических угроз (таких, как токсичные газы и пылевые выбросы, кислотные дожди, «серая листва» и «черный снег»).

**А каковы вообще сравнительные уровни риска промышленных методов получения энергии?**



По оценке Международного энергетического агентства, около 80 % мировой потребности энергии для производства электричества удовлетворяется за счет ископаемых энергоресурсов (урана в том числе). Уровни риска для энерготехнологий, реализующих эти ресурсы (в потерянных годах жизни человека из контингента населения в целом), показаны на рис. 7 (источник: Бюллетень МАГАТЭ. 1999. Т. 41. № 1. С. 24).

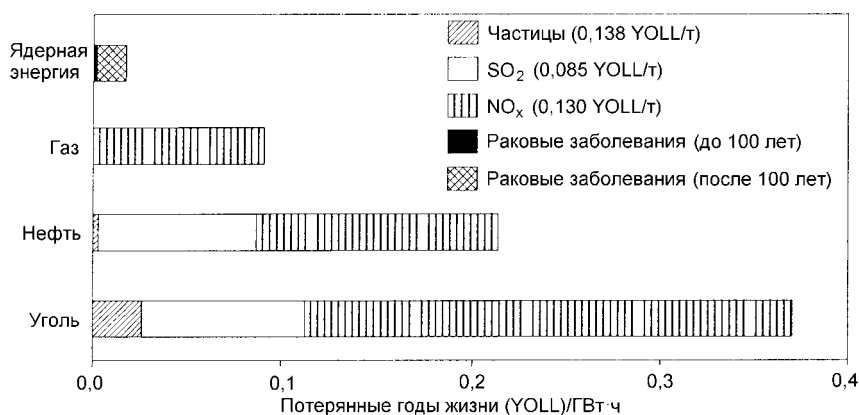


Рис. 7. Сравнение рисков для здоровья от энергетических систем

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 преувеличению. 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. 7, 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 оно еще более существенно из-за чрезвычайно высоких профессиональных рисков на начальном этапе угольного топливного цикла — в угледобывающей промышленности, где они приближаются к области общественной неприемлемости.

Так что реальных конкурентов у атомной энергетики, с точки зрения безопасности для населения, нет. Спорьте с этим, господа «зеленые», если сможете. Только с аргументами в руках — ругань и перепалки не в счет.

**А ввоз в Россию облучённого ядерного топлива (ОЯТ) с зарубежных АЭС, о чём было так много шума? Является ли он источником дополнительной радиобиологической и/или радиоэкологической угрозы?**

Повторять «с обратным знаком» идиотизмы «непримиримых борцов с этим страшным злом» авторы не собираются — ни методически, ни по существу. Методически — потому, что разрывание на себе рубашек, изобретение громких, но абсолютно бессодержательных лозунгов и фраз типа «ядерная помойка», «убийство внешней среды» и др., развешивание плакатов на зданиях госучреждений и приковывание себя цепями к чему попало не заменят главного — аргументации. А когда до неё всё же доходит дело, то ничего, кроме подмены понятий, передёргивания фактов и антинаучного бреда (типа приведённого в самом начале книги), в ней нет.

Теперь — по существу. Говорить об «абсолютной безопасности» ввоза ОЯТ нельзя просто потому, что абсолютная безопасность соответствует, как мы знаем, нулевому риску, свойственному только и исключительно несуществующим технологиям. Если же технология существует — любая! — то уровень риска по определению отличен от нуля. Но каков он для совокупности мероприятий по ввозу ОЯТ?

В данном случае подлежит оценке лишь верхний предел уровня риска (т. е. наибольшая его величина). Это, как правило, происходит при оценке уровня риска уже достаточно «продвинутой» и имеющей некоторый опыт развития технологии, при реализации которой, тем не менее, не зафиксировано каких-либо проявлений фактора угрозы. Именно такая ситуация и наблюдается для совокупности технологий обращения с ОЯТ. Все её элементы реализуются в СССР и впоследствии в России уже в течение десятков лет, и ни одного происшествия, влияющего на оценку уровня радиационного риска, за всё время зафиксировано не было. При этом следует отметить, что это распространяется, естественно, и на транспортировку ОЯТ, о «страшной опасности» которой неустанно верещат «защитники природы».

Не обсуждая здесь детали технологий, обеспечивающих обращение с ввозимыми в Россию ОЯТ зарубежных АЭС, приведём лишь оценочное значение верхней границы уровня радиационного риска для населения в целом, сопутствующего их реализации — порядка  $10^{-8}$ . Сравним его с приведёнными ранее уровнями риска, характерными для быта и деятельности современного общества — и мы поймём, чего стоят упомянутые выше разглагольствования.

На том, собственно говоря, разговор о ввозе зарубежного ОЯТ по существу рассматриваемых в этой книге проблем можно было бы и закончить — по отсутствию предмета обсуждения (тем более, дискуссии). Однако именно этот вопрос надо, видимо, обсудить и в иных контекстах — и вот по каким причинам.

Вспомним, о чём говорилось ещё в предисловии. Атомная техника и энергетика существуют и развиваются не в безвоздушном пространстве. Они являются, помимо прочего, очень прибыльным (если правильно организовать дело) бизнесом, а, поскольку это так, — полем жесточайших конкурентных битв между современными промышленными и экономическими гигантами. И предполагать, что эти гиганты в сражениях за сверхвыгодные заказы откажутся от информационных и пропагандистских кампаний, направленных на дискредитацию конкурентов, на вытеснение их с рынков, на недопущение на новые рынки — очень уж наивно. А приобрести рычаги для реализации этих кампаний — в современном мире (в том числе и, к сожалению, в современной России) лишь вопрос денег, на которые, в данном случае, не скучаются.

Как в капле воды, отразились эти жёсткие реалии нашего времени в истории со ввозом зарубежного ОЯТ. Бизнес это не просто прибыльный, а сверхприбыльный — за сравнительно короткие сроки он может принести нашей стране миллиарды долларов. Валяются ли в наше время такие «бесхозные» деньги на современных высокотехнологичных (а технологии утилизации ОЯТ — это высокие технологии) рынках — да ещё при столь малых (как мы видим) уровнях риска при реализации? Знаете, не будем, как говорят американцы, «беби в очках, с национальной премией в кармане!». Борьба идёт за каждую тонну, за каждый килограмм ОЯТ. И в этой борьбе наши конкуренты, в первую очередь европейские атомные гиганты БНФЛ (Англия) и «Кожема» (Франция), не гнушаются довольно некорректных методов. Пример тому мы рассмотрим чуть дальше.

А здесь отметим любопытнейший эпизод «битвы за ОЯТ», т. е. за законодательную отмену запретов на его ввоз из-за рубежа на временное хранение и переработку. Пока эти запреты не были отменены, разношёрстная компания «борцов за чистоту внешней среды» с трибуны парламента, телеэкранов и газетных страниц представляла дело так, что границы России уже прогибаются под давлением извне тысяч тонн ОЯТ. И они хлынут в нашу страну, как (далее уже известные нам термины-ужастики типа «реки смерти», «адские потоки» и т. п.), стоит только им, борцам, потерпеть поражение. Вот потерпели борцы поражение — и что? Вместо желания отдать России на хранение и переработку как можно больше ОЯТ на Западе наблюдается прямо противоположное — именно, развёртывание кампании «Ни грамма ОЯТ России!». Вот так...

Вопрос не ограничивается, однако, ввозом ОЯТ на хранение и переработку как таковым. Нельзя не учитывать, что в мировой ядерной энергетике действует так называемый принцип преференции передачи ОЯТ изготовителю топлива. Он гласит: после временного нахождения ОЯТ в пристанционном хранилище АЭС (оно необходимо, чтобы активность облучённых топливных сборок снизилась до уровней, допускающих их транспортировку) оно должно быть либо помещено в длительное хранилище в стране нахождения АЭС (а такие хранилища представляют собой сложные и дорогие высокотехнологичные предприятия, и лишь немногие страны, Россия в том числе, их имеют), либо возвращено для этого в страну, изготовившую топливо, но не может быть передано на хранение и переработку третьей стране без разрешения страны-изготовителя. Это означает, что законодательный запрет на ввоз ОЯТ из-за рубежа резко снижал конкурентоспособность российской атомной промышленности в целом, поскольку под этот запрет формально попадало и российское топливо, поставляемое за рубеж — как на АЭС, строящиеся с помощью России (что в данном случае особенно важно), так и на иные. А ведь Минатом России является крупнейшим в мире строителем АЭС за рубежом (в настоящее время с его помощью сооружаются шесть реакторных энергоблоков) и одним из основных мировых поставщиков ядерного топлива (в 2001 г. этот сектор ядерного бизнеса принёс нашей стране около 2,5 млрд дол.). На мировом ядерном рынке — конкурент страшный, могучий. В борьбе с таким всё средства хороши.

Вот и приходится Минатому вывозить ОЯТ на длительное хранение в Железногорск (Красноярск-26) с построенной при помощи СССР болгарской АЭС «Козлодуй» буквально за несколько дней за того, как оно отправилось бы во Францию, на завод фирмы «Кожема» по переработке ОЯТ на мысе Аг. И вывозить снова в условиях разнузданной антиатомной кампании, развязанной «друзьями природы». Даром, что «Кожема» в данном случае позарилась «на чужое» — на АЭС «Козлодуй» стоят реакторы ВВЭР со-

ветского производства, работающие на нашем топливе, и речь шла об откровенном нарушении указанного выше принципа международных ядерных отношений. Даром, что ОЯТ с этой АЭС Россия могла ввезти на хранение и переработку и вовсе без обсуждаемого нами изменения российского атомного законодательства, опираясь на соответствующее российско-болгарское соглашение 1995 г. — задержка ввоза была, помимо прочего, своеобразным жестом «доброй воли» со стороны Минатома России, стремившимся придать «операции Козлодуй» максимально возможную юридическую легитимность.

Но и это ещё далеко не всё. Ведь значительная доля средств, которые Минатом планирует получить от ввоза ОЯТ, будет целевым образом направлена на решение совершенно неотложных задач в области радиационной безопасности и радиоэкологии России. В тревожном списке этих задач — ликвидация радиационных последствий создания советского ядерного оружия в конце 40-х — начале 50-х годов на Урале (в первую очередь в бассейне р. Теча) и тяжелых ядерных и радиационных аварий (на Урале в 1957 и 1967 гг. и на Чернобыльской АЭС в 1986 г.), утилизация выводимых из состава ВМФ атомных подлодок, реконструкция (во многих случаях — коренная) спецкомбинатов «Радон» по захоронению общепромышленных радиоактивных отходов, вывод из эксплуатации устаревших и отработавших ресурс ядерно-технических установок и многое другое.

Всё это стоит огромных денег. Заявка, полученная Минатомом России в 2001 г. из 41 субъекта Российской Федерации, где радиоэкологические проблемы стоят наиболее остро, требует выделения для их решения примерно 170 млрд руб. в год. Бюджетные возможности финансирования необходимых для этого мероприятий (около 1,4 млрд руб. в 2001 г.) составляют примерно 0,8 % от требуемой суммы, и вряд ли они сколько-нибудь существенно возрастут в будущем.

Откуда же взять эти деньги, если отказаться от возможности заработать их на ввозе, хранении и последующей переработке ОЯТ из-за рубежа?

Задайте этот вопрос нашим «борцам за экологию». Поскольку их вопли как таковые не приносят для решения этой проблемы (как, впрочем, и любых других) ни копейки, ответы сводятся по существу к трём вариантам.

1. Это — не наше дело (чьё — не уточняется).
2. Пусть с этим разбираются потомки (в каком колене — не говорится).
3. Попросим денег у Запада. Будем хорошо себя вести. Атомную промышленность и энергетику закроем (зарубежные проекты — в первую очередь), ядерное вооружение поставим под международный (читай — западный) контроль, о сколько-нибудь заметной роли и влиянии России в современном мире забудем и ещё кое-что в том же направлении. Тогда наверняка дадут немного от щедрот.

Опустим два первых варианта как не требующие комментария вовсе. А вот третий, по нашему мнению, в кратком обсуждении нуждается.

Обратим внимание на три общеизвестных факта, касающихся атомной промышленности и энергетики. Первый: атомная промышленность есть одна из наиболее эффективных высокотехнологичных сфер человеческой деятельности, перспективнейшая область для наиболее передовых научных, инновационных и образовательных проектов. Второй: развитие атомной энергетики в России по существу не имеет разумных альтернатив — не только научно-прогностические оценки, но и печальный опыт замерзающих городов и посёлков, другие вполне реальные тяжелейшие проблемы энергообеспечения уже современной России говорят об этом однозначно. И третий: расширение влияния страны на международном рынке ядерных технологий является мощной предпосылкой для упрочения её не только экономических, но и политических позиций в соответствующем регионе, да и в мире в целом.

А теперь сопоставим факты, приняв в качестве таковых призывы «борцов за природу».

Нас призывают отказаться от ввоза ОЯТ из-за рубежа, резко ограничивая тем самым конкурентоспособность российской атомной промышленности на международных рынках. Нас призывают этого не делать, тормозя тем самым развитие высоких технологий в самой России. Взывая к несуществующим опасностям, нас призывают отказаться от эффективного способа обеспечить возможность устранения опасностей вполне реальных. И, наконец, в качестве альтернативы этой возможности нашу страну снова призывают войти в уже осточертевшую ей (и, слава Богу, уже ею забываемую) роль международной побирушки, забывшей своё прошлое, не знающей, что делать со своим настоящим и плюющей на своё будущее — вспомним, какую цену России придётся за это платить.

Называйте это любовью к природе. Авторы назовут это совсем по-другому. Вам, дорогой читатель, решать, кто прав в этом споре о технологиях, рисках, политике и средствах.

Кстати, о средствах. Вот вопрос: а откуда берутся деньги на визгливые антиатомные кампании? Деньги, между прочим, очень немалые — только вывешивание дурацких лозунгов на здании Государственной Думы в день голосования по законопроектам о ввозе ОЯТ обошлось, по разным оценкам, от 10 000 до 30 000 дол. (кстати, где были и что делали в этот момент службы безопасности российского пар-

ламенты?). А ведь было и ещё полным-полно часто не менее дорогостоящих (и ничуть не более умных) акций. А заказ многочисленных антиатомных телепередач? А издание антиатомной печатной чепухи?

Бюджетного финансирования за «зелёными» организациями не водится. Пожертвования «честных россиян, озабоченных состоянием родной природы?» Ну-ну... А тогда — откуда дровишки (рублишки, а точнее — долларышки)?

Оттуда, вестимо... Можно лишь догадываться, сколькими иностранными фондами финансируется антиатомная деятельность в России. А за ними кто стоит? Как говорится, угадайте с трёх раз. Во всяком случае, авторы надеются, что эта книга подскажет Вам, дорогой читатель, где стоит поискать.

**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  $\gamma$ -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?**

Ответ дан. в табл. 4. 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 радиационной аварии.

**Какова статистика российских радиационных аварий и пострадавших в них?**

По данным Государственного научного центра «Институт биофизики Минздрава РФ», являющегося ведущей организацией нашей страны по этой проблеме, за всё время развития атомной техники и энергетики в СССР/России произошло 385 радиационных инцидентов, сопровождавшихся пострадавшими с диагнозом ОЛБ, из них хотя бы с одним смертельным исходом — 22. Количество пострадавших в этих инцидентах составило 684 человек, из них умерло — 56. Здесь учтены лишь случаи, когда причинно-следственная связь между сверхнормативными облучением и заболеванием и/или преждевременной смертью была достоверно установлена. Поскольку для упомянутых выше 14 пострадавших в Чернобыльской аварии с диагнозом ОЛБ, скончавшихся в 1987 – 2000 гг. от различных причин, такая связь отсутствовала, последним показателем (56) они здесь и далее не учитывались.

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; $\beta$	НА, УТ	Очень высокая	ЯО	Отсутствует	Средняя
Кобальт-60	5,27 года; $\beta$ , $\gamma$	НА	Высокая	РТ, М	Очень высокая	Средняя
Стронций-90	29,1 года; $\beta$	Д	Высокая	ИИЭ	Низкая	Высокая
Йод-131	8,04 дня; $\beta$ , $\gamma$	Д	Ограниченная	М	Средняя	Высокая
Цезий-137	30 лет; $\beta$ , $\gamma$	Д	Высокая	РТ, М	Высокая	Средняя
Полоний-210	138 дней; $\alpha$	Е, УТ	Средняя	ЯО, ИИЭ	Низкая	Очень высокая
Радон-222	3,8 дня; $\alpha$	Е	Ограниченная	М	Отсутствует	Очень высокая
Радий-226	1640 лет; $\alpha$ , $\gamma$	Е	Ограниченная	РТ, М	Высокая	Очень высокая
Уран-235	$7 \cdot 10^8$ лет; $\alpha$	Е	Очень высокая	ЯЭ, ЯО	Отсутствует	Низкая
Уран-238	$4,5 \cdot 10^9$ лет; $\alpha$	Е	Средняя	ЯЭ	Отсутствует	Низкая
Плутоний-239	$2,4 \cdot 10^4$ лет; $\alpha$	ЯТЦ	Очень высокая	ЯО, ЯЭ	Низкая	Очень высокая
Америций-241	433 года; $\alpha$ , $\gamma$	ЯТЦ	Средняя	РТ	Средняя	Очень высокая

\* НА — нейтронная активность; 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.

## **А какое место в этом списке занимает Чернобыльская авария?**

Совершенно исключительное.

Международная шкала событий на ядерных объектах (INES), введенная в действие в 1990 г., относит любое нерегламентное событие на них к одной из семи категорий: от первой (незначительное происшествие) до седьмой (глобальная авария). Именно к седьмой, последней, категории и отнесена чернобыльская авария; до сих пор в этой категории она — единственная в мире.

Исключительность чернобыльской аварии иллюстрируется, в частности, активностью суммарного выброса радиоактивных веществ во внешнюю среду. К шестой, предпоследней, категории по шкале INES (тяжелая 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 инцидента близка к чернобыльской, но была ее «сильно уменьшенной моделью» — суммарная активность выброса йода-131 в Чернобыле составила около 50 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, опасная для окружающей среды). 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 ранее статистики пострадавших при радиационных авариях. Чернобыльская авария — лишь одна из 385 (0,26 %). Однако она «обеспечила» 134 пострадавших с клиническими симптомами ОЛБ (19,6 %) и 28 погибших (50 %). 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, проведенных после Чернобыля в отечественной атомной энергетике, неизмеримо повысил уровень безопасности эксплуатации АЭС. По мнению экспертов МАГАТЭ, в настоящее время безопасность российских АЭС 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  $\gamma$ -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.

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 аэрогаммасъемку). Эти результаты приведены в табл. 5. Следует иметь в виду, что, хотя цезий-137 является чисто 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/км<sup>2</sup>.

**Площади, загрязненные цезием-137 вследствие аварии на ЧАЭС,  
в областях и республиках России, км<sup>2</sup>  
(надфоновые уровни)**

Область, республика	Уровень загрязнения, Ки/км <sup>2</sup>			
	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	10 320	1271	—	—
Ульяновская	1100	—	—	—
Мордовия	1900	—	—	—
Татарстан	110	—	—	—
Чувашия	80	—	—	—
Итого	49 760	5450	2130	310

Данные табл. 5 однозначно говорят о том, что в пределах России главный удар радиоактивных чернобыльских туч пришелся по Брянщине.

#### **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  $\gamma$ -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 дозообразующим фактором на загрязненных территориях является внутреннее (в большей мере) и внешнее (в меньшей мере) воздействие излучения 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  $\gamma$ -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, двадцать восемь человек (в основном пожарные и сменный персонал) умерли в специализированном стационаре от ОЛБ в наиболее тяжелой форме. К 2001 г. от различных причин умерли, как уже упоминалось, ещё 14 человек из 106, перенёсших ОЛБ и оставшихся в живых к началу 1987 г. Необходимо, однако, отметить, что как минимум в половине этих случаев непосредственная причина смерти, несомненно, не связана с переоблучением как таковым, а имеет, с большой вероятностью, психосоциальную природу (об этом дальше).

Вторую группу пострадавших в медицинском смысле образуют лица, которым к моменту аварии не исполнилось 18 лет и у которых, вследствие воздействия осколочных радиоизотопов йода (в первую очередь йода-131) развился радиогенный рак щитовидной железы. Имея в виду, с одной стороны, уже отмеченную выше радиационную специфику чернобыльской аварии (подавляющий вклад радиойодной 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, всё этого 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 СМИ 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? 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 600 000 человек (из них примерно 240 000 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 гг. (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 тыс. жителей (273 и 117 тыс. 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... Авторам и самим 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, бесспорен. Однако вопрос в том, каковы были смертность и заболеваемость за этот же срок среди условной группы населе-



ния, 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?

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 соответственно 502, 449 и 431. 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, которые действительно идут на благо общества. В отличие от затрат на организацию антиатомных референдумов...

**Следует ли ожидать 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 раковых заболеваний, однако их число будет заведомо ниже минимального уровня статистической достоверности.

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

А вот по другим заболеваниям...

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

Вне всякого сомнения. Более того, по мнению подавляющего большинства специалистов (всецело разделяемому авторами), 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 «пожизненной 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 – 1,2 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 % против 60,9 % у населения загрязненных территорий России и 42,0 % у контрольной группы (населения «чистых» территорий).

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. 8 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 законодательства и лишении 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.

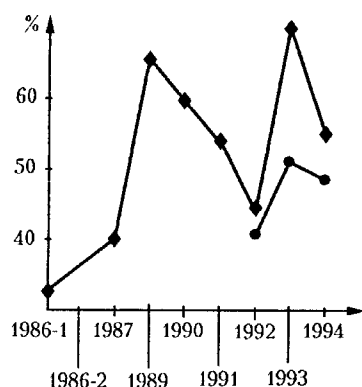


Рис. 8. Уровень стрессовых расстройств (в процентах к уровню в контрольной группе) среди населения по годам: ♦ — загрязненная территория; • — «чистая» территория (масштаб не соблюден)

Вот когда и как «аукнулась» обществу уже упомянутая нами 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.

### **Знаете ли Вы, что :**

- В 1 т золы ТЭС содержится до 100 г радиоактивных урана и калия-40.
- В почве всюду содержится плутоний, возникающий при взаимодействии космических лучей с природным ураном-238, содержание которого в среднем составляет порядка трех граммов на тонну породы. Можно подсчитать, что в цветочном горшке, содержащем килограмм земли, находится несколько миллиграммов урана и несколько десятков миллионов атомов плутония. Прекрасный повод собирать митинги!
- «Каждый раз, когда вместо атомной станции строится угольная, еще около 1000 человек обрекаются на раннюю смерть» (Бернард Коэн, проф. Питтсбургского университета США).

## **Глава 2. «АТОМНЫЕ ДЕЛА» НА ГРЕБНЕ ОБЩЕСТВЕННОГО ИНТЕРЕСА**

### **2.1. Ядерный и радиационный терроризм: между физикой и политикой**

Одним из наиболее опасных противоречий современного мира является уже сейчас огромный и постоянно увеличивающийся разрыв между степенью развития технологий, с одной стороны, и уровнем жизнеобеспечения, культуры, морали и нравственности значительных масс людей — с другой. Этому противоречию до недавних пор не уделялось должного внимания, хотя в его мутных глубинах уже некоторое время назад начали прорисовываться контуры чудовища, способного реально угрожать самому существованию человечества. Имя ему — технологический терроризм.

После сентябрьского кошмара в Нью-Йорке ситуация изменилась кардинально — менее всего терроризм и террористы могут сейчас пожаловаться на недостаток внимания. Однако в этой новой ситуации следует помнить о двух важных обстоятельствах.

Во-первых, абсолютно необходимой предпосылкой для принятия эффективных мер против терроризма любой разновидности (технологического в том числе) является адекватность оценки ситуации, связанной с его проявлениями. Иными словами, переоценка степени опасности и ошибки в анализе реальной значимости источников угрозы столь же вредны, как и её недооценка.

И, во-вторых, не следует всё-таки забывать, что линия раздела «террористы — нетеррористы» не является в современном мире единственной. Что существуют национальные границы и национальные интересы. Что никто ещё не отменял долгосрочных и текущих геополитических и геостратегических целей больших и малых государств. Что абсолютной реальностью современности являются жёсткая экономическая и торговая конкуренция на мировых сырьевых и технологических рынках. Что надо очень чётко отслеживать ту грань, за которой действия государств и организаций под бесспорно справедливым и похвальным лозунгом «Сотрём террористов с лица земли!» переходят в плоскость защиты лишь их собственных национальных интересов. И, осознавая это, не стоит обижаться на партнёров, ибо таковы реалии наших дней, а оптимальным образом сочетать совместную эффективную борьбу против терроризма с твёрдой защитой своих национальных интересов.

И, ограничиваясь в этой книге рассмотрением лишь физико-технических аспектов двух потенциально опаснейших разновидностей технологического терроризма — ядерного и радиационного, — не будем забывать только что сказанное. А также логику и здравый смысл.

Прежде чем начинать обсуждение любой проблемы (тем более, как в нашем случае, многогранной, сложной и во многом не бесспорной), надо договориться по основным дефинициям, относящимся к

предмету обсуждения. Вспомним Декарта: «Мы избежем половины разногласий, если сойдёмся в определениях». И второе: рассуждения о предмете, имеющем в первооснове (как опять-таки в данном случае) физико-техническую суть, должны вестись на некотором минимально допустимом уровне компетентности по существу этого предмета и понимания естественно-научной методологии.

При несоблюдении любого из этих принципов (а тем более обоих сразу) обсуждение превращается в говорильню, в спор ни о чём. И это ещё полбеды, а настоящая беда начинается, когда этот спор ни о чём прорывается на страницы и экраны. Тогда, если речь идет об опасных вещах (а ядерный и радиационный терроризм, стань они реальностью, — вещи бесспорно кошмарные), напуганное и дезориентированное общество часто начинает искать методы противодействия опасности на заведомо тупиковых путях. Лучшего подарка гипотетическим технологическим террористам, чем отвлечение общественного внимания, а как следствие — сил и средств от действительно эффективных способов борьбы против этого зла, не придумать.

Итак, начнём с определений. Будем понимать под ядерным терроризмом совокупность намерений и действий отдельных лиц или групп лиц по приобретению работоспособного ядерного взрывного устройства (ЯВУ) с последующим его применением или угрозой применения для достижения декларируемых ими политических, социальных и иных целей и намерений.

Из этого определения следует важнейшее следствие: государство при реализации этих целей выводится за скобки, оно, в самом благоприятном для террористов случае, их не замечает (или старается не замечать), а в худшем — преследует с большей или меньшей настойчивостью и последовательностью. Это имеет, помимо очевидных социальных и политических, и немаловажные технические последствия.

Разумеется, вопрос о таком ядерном терроризме, когда государство само начинает играть роль террориста, также не лишен права на постановку. Однако при этом акценты рассмотрения сильно меняются, выводя на первое место не физико-технические проблемы, а политические, юридические, экономические и социальные аспекты дела. С проблемами, обсуждаемыми в настоящей книге, они, конечно, коррелируют — и всё же вопрос о государственном ядерном терроризме является предметом особого рассмотрения, выходящим за пределы данной книги.

При этом, правда, возникает вопрос: насколько возможны (и вероятны) исключения из сформулированного принципа «недоброжелательной невовлечённости» государства в дела ядерных террористов? С точки зрения авторов — да, возможны (хотя и маловероятны), и очень опасны. А реализоваться они могут в «молодых» (или ближайших будущих) членах «ядерного клуба», на руководство которых в большей или меньшей мере имеют влияние экстремистские политические или религиозные течения, организации и движения.

Между прочим, такая поддержка опасна в первую очередь для этого руководства — «экипированные» с его помощью ядерные террористы вполне могут нанести первый удар именно по нему, с учётом внутренней слабости таких режимов и политической нестабильности, характерной для руководимых ими стран. Но всё это в любом случае — вопрос более для политолога, чем для физика. Самое время к физике и перейти.

Главное, без чего ЯВУ не создать, — расщепляющийся материал, вещество, в достаточно компактном объёме которого можно при определённых условиях вызвать взрывную цепную реакцию деления. Без расщепляющегося материала любые планы создания ЯВУ — лишь досужие разговоры, и не более того. Периодически мелькающие в СМИ сведения о создании ЯВУ, не использующих реакцию ядерного деления, имеют неясные перспективы даже в отдалённом будущем, а сейчас это — очевидные страшилки. Добавим к этому, что инициировать и взрывную термоядерную реакцию без делительного запала в наши дни никто ещё не научился.

Таких расщепляющихся материалов в рамках нашего рассмотрения два — уран-235 и плутоний-239, оба — оружейной чистоты (> 90 % и > 94 % соответственно по основному материалу). Всё, ничего больше. А из этого факта следует три важных следствия.

Первое: наработка минимально необходимых для создания хотя бы одного ЯВУ количеств расщепляющегося материала силами самих ядерных террористов (отдельных лиц или тайных организаций) с «нуля» или даже с использованием ранних промежуточных технологических продуктов — это фантастика, которую даже научной не назовёшь. А сообщения об этом в СМИ в контексте реальной опасности или, возможно, даже свершившегося факта — заведомый бред, им интересен лишь его генезис, но не существо.

Второе: все сообщения о кражах и пропажах иных материалов, кроме указанных выше двух, не имеют ни малейшего отношения к проблеме ядерного терроризма. Разумеется, в похищении или утере естественного или низкообогащённого урана (топлива для энергетических реакторов в том числе) и радиоизотопной продукции (радиостронция, радиоцезия, радиокобальта и др.) ничего хорошего нет (и очень

скоро мы в этом убедимся при обсуждении радиационного терроризма), но обретение всего этого добра ни на миллиметр не приблизит ядерных террористов к созданию ЯВУ. К слову сказать, радиоактивность какого-либо вещества и его пригодность в качестве расщепляющегося материала — абсолютно разные вещи. Собственная (очень незначительная) радиоактивность плутония-239 и, тем более, урана-235 никак не связана с их использованием в качестве ядерной взрывчатки, но даже и она (в случае с плутонием-239 оружейной чистоты) доставляет немало хлопот (а, отнюдь, не помогает) конструкторам оружия.

Наконец, третье следствие: ядерная энергетика как таковая, за крайне незначительным исключением, интереса для ядерных террористов не представляет. Из низкообогащённого (до 5 % урана-235) урана в свежем ядерном топливе для подавляющего большинства энергетических реакторов создать ЯВУ принципиально нельзя, а из реакторного плутония, содержащегося в облучённом топливе, вероятно, возможно, но эта возможность имеет чисто умозрительный характер. Даже если не обсуждать практически непреодолимых для террористов физических и технических трудностей по выделению, очистке, металлургии и конструктивному оформлению плутония, при конструировании такого ЯВУ даже у профессионала-ядерщика возникают серьёзнейшие проблемы. Тут и значительное содержание балластных материалов, и интенсивный нейтронный фон, и высокие собственные радиоактивность и тепловыделение, и ещё кое-что. В результате даже высококлассный профессионал не создаст из реакторного плутония ничего, кроме громоздкого, маломощного уroda, к тому же очень сложного в эксплуатации. Для террориста такой урод неинтересен.

Впрочем, ограничивать обсуждение отношений атомной энергетики и ядерного терроризма лишь только сказанным нельзя — по той очевидной причине, что в физической основе производства энергии на АЭС и наработки оружейного плутония лежит одна та же установка (ядерный реактор), а точнее — рождаемые в нём интенсивные нейтронные потоки. В этой связи уместно сделать несколько замечаний.

Прежде всего, особое внимание, в обсуждаемом контексте, должно уделяться энергетическим ядерным реакторам с графитовым или тяжёловодным замедлителем, допускающим перегрузку топлива «на ходу», без снятия реактора с мощности (типа российского РМБК и канадского CANDU). Реакторы такого типа имеют две особенности, благоприятствующие (по крайней мере, в принципе) наработке оружейного плутония. Во-первых, они используют в качестве топлива уран низкого обогащения (тяжёловодные CANDU — вообще естественный уран), а эффективность накопления плутония в облучаемом уране находится в сильной обратной зависимости от степени обогащения. Во-вторых, они открывают принципиальную возможность тайной реализации оптимального времени облучения урана для наработки оружейного плутония — около месяца, в то время как типичные для ядерной энергетики времена облучения (годы) сильно «портят» оружейный плутоний, превращая его в реакторный.

Впрочем, таких реакторов в мировой ядерной энергетике немного — по мощности лишь несколько процентов. Её основу составляют другие реакторы — корпусные легководные (типа российских ВВЭР). Перегрузить топливо «на ходу» у них нельзя, к тому же высокое, в сравнении с тяжёловодными и графитовыми реакторами, обогащение топлива по урану-235 делает его малоприспособленным для наработки оружейного плутония. Но на них (как, впрочем, и на всех других ядерных реакторах) нельзя полностью исключить вероятность в высшей степени экзотической кражи — экзотической в том смысле, что её предметом является не материальный объект (даже не оружейный плутоний), а поток реакторных нейтронов.

Представим себе, что какому-нибудь криминальному Кулибину удалось обеспечить возможность тайного облучения объектов в активной зоне любого реактора (например, установкой дополнительного канала или нештатным использованием каналов системы управления и защиты). Тогда часть нейтронов реактора можно направить на «неправое дело» — облучение блочков из естественного урана в режиме, оптимальном для накопления и последующего выделения оружейного плутония.

Развитие событий по такому варианту не исключено для любого реактора в том смысле, что оно не запрещено законами физики и технически не выходит за рамки возможного. Впрочем, рецепты его предотвращения также хорошо известны — прежде всего постановка под международный контроль и инспекции МАГАТЭ. В первую очередь это должно касаться высокопоточных реакторов, поскольку в них существенно повышается как эффективность наработки плутония, так и его чистота по основному материалу (плутонию-239).

Другое дело, насколько вероятен начинающийся с таких событий сценарий обретения плутониевого ЯВУ ядерными террористами. По мнению авторов, в высшей степени маловероятен. И не только потому, что «украсть нейтроны» — это, как говаривал некий современный персонаж, «не лобио кушать». И даже не потому, что мы выводим за скобки уже упомянутые ранее колоссальные трудности с выделением, очисткой, металлургией и конструктивной технологией плутония (даже непонятно, с какой стороны

здесь подступиться группе частных лиц). Главные проблемы поджидают террористов дальше — на этапе конструирования и изготовления собственно ЯВУ. Об этом речь впереди.

Здесь же отметим, что плутоний-239 — материал, в общем, чисто «бомбовый». Почти нигде, кроме ядерных боеприпасов, он не применяется, степень его вовлечения в мирные ядерные топливные циклы в настоящее время весьма ограничена. Соответственно, и больших вопросов, где его искать, не возникает. Террористам, однако, от этого ничуть не легче — с учётом того, как организована охрана вооружённых складов, арсеналов и перевозок. В общем, здесь злодеям можно лишь посочувствовать.

Ситуация с ураном-235 оружейной чистоты несколько иная. С одной стороны, его, кроме как на специализированных промышленных комплексах, получить нельзя даже в принципе. Не помогут ни «кража нейтронов», ни другие ухищрения. Террористы могут отдыхать.

Однако, в отличие от плутония, ядерное оружие и связанная с ним инфраструктура — не единственное место, где можно встретить высокообогащённый уран-235. Он является также топливом для некоторых типов ядерных установок — исследовательских и транспортных реакторов.

Отсюда возникает некоторая ситуационная альтернатива возможных действий ядерных террористов по захвату расщепляющихся материалов (и, соответственно, наиболее целесообразная совокупность мер по противодействию им). Однако наш анализ не может быть полным без рассмотрения ситуации, если террористы всё же каким-либо способом (не будем пока дискутировать, насколько это реально) разжигают некоторым количеством этих материалов, достаточным для изготовления примитивного (но работоспособного!) ЯВУ.

Принцип действия ЯВУ в наши дни общеизвестен (кстати, именно это обстоятельство часто выпячивается в качестве главного обоснования реальности угрозы ядерного терроризма). Но именно — принцип. Дьявол, как известно, сидит в деталях, и этих его убежищ в конструкциях реальных (а не книжно-абстрактных) ЯВУ сколько угодно.

В основе действия ЯВУ деления, как уже упоминалось, лежит понятие критической массы — определённой совокупности массы, плотности и конструктивного оформления расщепляющегося материала, при превышении некоторых нейтронно-физических параметров которой цепная реакция на вторичных нейтронах деления приобретает лавинообразный, взрывной характер. Такое состояние называется надкритическим, следствием его намеренного достижения в ЯВУ в необходимый момент и является ядерный взрыв.

Критическая масса может быть достигнута либо увеличением массы расщепляющегося материала при неизменной плотности, либо увеличением плотности при неизменной массе. Первый путь реализуется в зарядах пушечного (ствольного) типа. В них одна подкритическая масса направляется в другую такую же, как снаряд (отсюда и название), после чего состояние образовавшейся системы становится надкритическим. Так была устроена, например, бомба, сброшенная на Хиросиму.

Второй путь лежит в основе действия имплозионных зарядов. В них надкритичность достигается при взрыве заряда из химического вещества, особым образом размещённого вокруг подкритической сферы из расщепляющегося материала. Под действием ударной волны этого взрыва, направленной к центру системы (слово «имплозия» означает «взрыв внутрь») расщепляющийся материал равномерно и очень быстро обжимается, что вызывает скачкообразное повышение его плотности и переход в надкритическое состояние с последующим ядерным взрывом. Имплозионный принцип был использован, например, в бомбе, сброшенной на Нагасаки, а также в первом советском ЯВУ, испытанном в 1949 г.

Для нашего рассмотрения очень существенен тот факт, что для использования в пушечной схеме плутоний-239 штатной оружейной кондиции непригоден. Существенно меньшая, в сравнении с имплозионной, скорость формирования критической массы, свойственная этой схеме, приводит к тому, что, из-за наличия в нём заметного количества плутония-240, испускающего нейтроны вследствие спонтанного деления, цепная реакция начинается чересчур рано. Поэтому силы гидродинамического разлёта преждевременно разрушают заряд, и вместо полноценного взрыва получается маломощный «хлопок».

С другой стороны, уран-235 почти не применяется в современном ядерном оружии — уже слишком очевидны преимущества плутониевых ЯВУ перед урановыми. Да и имплозионная схема сама по себе (кстати, она «всеядна» и допускает применение как урана, так и плутония) в сравнении с пушечной намного более совершенна. К числу главных её достоинств принадлежит возможность существенно уменьшить количество расщепляющегося материала — ведь величина критической массы обратно пропорциональна квадрату его плотности. Например, для урана-235 обогащением 93,5 % критическая масса (без отражателя) равна 30 кг при нормальной (естественной) плотности; 7,5 кг — при удвоенной и 3,3 кг — при утроенной.

Здесь, между прочим, возникает любопытный вопрос, также являющийся сейчас предметом многочисленных спекуляций — и часто именно в контексте ядерного терроризма. Именно: а если сжимать

дальше? Не открывается ли здесь возможность, хотя бы принципиальная, собрать ЯВУ на основе лишь нескольких граммов (а то и миллиграммов) плутония? Их-то террористу несравненно проще раздобыть, чем 6 – 8 кг плутония-239 для снаряжения «нормального» имплозионного ЯВУ. А ведь расчётное взрывное энерговыделение при полном делении всего 1 г плутония-239 эквивалентно (по порядку величины) 10 т тротила! Совсем неплохо...

Увы... Первую «подножку» ставит химия. Элементарные расчёты показывают, что добиться таких степеней сжатия с помощью химических взрывчатых веществ (ВВ) невозможно из энергетических соображений.

А нельзя ли как-нибудь иначе? Собственно, и основополагающий принцип известен. Это — сжатие излучением. Именно на нём основано современное термоядерное (водородное) оружие. Но в термоядерных ЯВУ источником излучения является... делительное иницирующее устройство на основе плутония! Того самого, количество которого мы собрались уменьшать.

В принципе, огромные степени и скорости сжатия достаточно малых масс вещества можно обеспечить излучением мощного лазера — причём чем меньше масса, тем выше достигаемая степень сжатия. Однако тут «подножку» ставит уже нейтронная физика. Дело в том, что само по себе достижение надкритического состояния есть лишь создание условий для лавинообразного роста числа нейтронов, волной накрывающего всё новые и новые ядра делящегося материала. Но что от этого толку, если таких ядер просто мало. Пусть Вы — любитель крепко выпить, и однажды волею судьбы попали в идеальную ситуацию, когда вместо каждой выпитой маленькой рюмки Вам немедленно приносят три новых (надкритичность достигнута). Однако если водки в заведении мало и такая смена произойдёт только один раз, то Ваше желание уйти домой «на бровях» не осуществится — четырёх рюмок для этого мало! Аналогия довольно близкая с тем, что происходит в ЯВУ. Количество таких «смен» в нейтронной физике называется числом поколений нейтронов. Начало ядерного взрывного процесса (разлёта вещества) в имплозионной бомбе соответствует его значению 40 – 45. А при малой массе расщепляющегося материала и очень высокой скорости его сжатия поколения не набираются вовсе, хотя надкритичность достигается.

По оценке академика РАН Л.П. Феоктистова, для осуществления таким образом взрывной цепной реакции потребуется не менее 10 г плутония при мощности лазеров обжатия в десятки мегаджоулей. Таких лазеров в мире ещё нет, а если бы и были? Террорист, вероятно, лишится дара речи от одной лишь мысли, что ему вместе с малогабаритным ЯВУ придётся захватить «на дело» как минимум грузовик с лазерной аппаратурой плюс передвижную электростанцию приличной мощности.

Вернёмся теперь к анализу возможных конструкций ЯВУ в контексте ядерного терроризма. Итак, у имплозионной схемы перед пушечной все преимущества, кроме одного, но в нашем случае, скорее всего, решающего — имплозионная схема несравненно сложнее в практической реализации. Надо точно определить состав, количество и размеры обжимающих линз из химического ВВ, надо гарантировать идеальную синхронизацию их подрыва, надо в строго определённый момент обеспечить включение иницирующего нейтронного источника... Стоит не выполнить хотя бы одно из этих условий (а есть и другие), как ЯВУ попросту не сработает.

Вот тут-то упомянутый ранее дьявол показывает зубы из каждой мелочи. А ведь всё это, наряду с конструктивно оформленным расщепляющимся материалом, надо ещё достать, изготовить, смонтировать, проверить. Короче говоря, вероятность того, что террорист (или террористы) сумеют сконструировать, укомплектовать, собрать и проверить работоспособное имплозионное ЯВУ на основе плутония, по мнению авторов, столь же невелика, как и того, что они сумеют накопить необходимое его количество — о чём уже говорилось.

А вот урановое ЯВУ пушечного типа по конструкции и технологии сборки гораздо проще. Тот же факт, что по эффективности использования расщепляющегося материала оно сильно уступит имплозионному плутониевому, вряд ли сильно взволнует террориста — факт реального наличия работоспособного ЯВУ в его руках гораздо важнее, чем его тактико-технические характеристики. Но вот такое качество уранового пушечного ЯВУ, как компактность, наверняка заинтересует ядерных мерзавцев. А ведь известно, что в военно-ядерной технике уран-235 как раз и применяется в специальных конструкциях, где малогабаритность важнее большого расхода расщепляющегося материала и относительно низкого удельного энерговыделения.

Несомненно, одним из главных препятствий на пути создания террористической группой такого ЯВУ является весьма значительное количество необходимого для этого урана-235. С учётом неизбежных технологических потерь потребуется не менее 40 – 45 кг в пересчёте на чистый материал, а это — очень много. Хотя, разумеется, и процедура проектирования и изготовления пушечного уранового ЯВУ также имеет много коварных «подводных камней». Но вот обсуждать их здесь (и вообще обсуждать открыто)

авторы, во-первых, не желают сами и, во-вторых, категорически против того, чтобы это делали другие. Надо отчётливо понимать, что секретность технологий создания ЯВУ и их конкретных конструкций является сейчас одним из главных препятствий, стоящих перед ядерными террористами. Никакие требования и призывы к рассекречиванию этих сведений не должны приниматься во внимание — слишком серьёзными (если не сказать страшными) последствиями чреват такой «ядерный стриптиз». Да и специалистам, пишущим на «ядерные» темы (авторы здесь имеет в виду и себя самих) ни в коем случае нельзя переступать ту грань, за которой образовательный или информационный материал может превратиться в пособие для начинающих террористов.

Кстати, о специалистах. Вот ещё одна проблема для ядерных террористов — не будут специалисты сотрудничать с ними. И не только потому, что фундаментальная внутренняя взаимосвязь между культурой, образованием и моралью по существу исключает для высококлассных профессионалов (а другие тут не нужны) возможность «поступления на службу» к кровожадным ядерным мерзавцам. Даже помимо сказанного, абсолютное большинство профессионалов прекрасно понимает, что сотрудничество с террористами рано или поздно будет иметь для любого из них одинаковый конец — на дне какого-нибудь болота с камнем на шее и девятью граммами свинца в умной, но недалёкой голове. Неплохо зная среду российских атомщиков, авторы берут на себя смелость утверждать: в ней террористам «нечего ловить». А ведь, кроме ядерщиков, нужны химики, электронщики, металлурги, материаловеды, конструкторы, технологи — и не просто россыпью, а в виде сплочённого коллектива со способным руководителем, безупречной организацией дела, работоспособной внутренней иерархией и др. И совсем не бесспорно, что этот коллектив долго будет лоялен к своим криминальным хозяевам.

Обо всём этом следует помнить, когда в газете или эфире появляется очередной жуткий рассказ о сборке ЯВУ в старом сарае по соседству с собачьей будкой двумя гениальными студентами под надзором мрачного бородатого брүнета.

Такова физика ядерного терроризма (хотя, конечно, далеко не вся). Она, в изложении авторов, не лишена некоторых субъективных оттенков в оценках и суждениях. Иначе, наверное, и быть не могло при анализе событий, которые никогда не происходили (очень хочется надеяться, что и не произойдут).

Но авторы, вспоминая сказанное чуть ранее, позволят себе и ещё более субъективное суждение, выходящее за пределы собственно физики. Именно: при оценке кампаний, заявлений и публикаций по обсуждаемому вопросу необходимо, в первую очередь, отсеять «политические уши», за которыми отчётливо просматриваются не желание бороться с ядерным терроризмом (он в данном случае играет роль заклинания), а весьма эгоистические политические и экономические интересы вполне конкретных лиц, организаций и кругов. Другими словами, если со ссылкой на опасность ядерного терроризма выдвигаются, например, требования поставить под международный контроль именно российский военно-ядерный комплекс, остановить строительство объектов атомной энергетики в России и за её пределами силами именно российских организаций, задавить именно российский ядерный экспорт и т. п., то не надо быть излишне наивным. Ядерный терроризм в этих требованиях — не более чем сатана у старых богословов: никто его не видел, но всё равно очень страшно, а потому рекомендации по борьбе с ним лучше выполнять, не очень вникая в их смысл и суть.

По существу же, из того, что ни одного достоверного факта ядерного терроризма до сих пор не зафиксировано, следует важнейший вывод: барьер противодействия ему в настоящее время выше, чем возможности потенциальных террористов. Будь это не так, нелюди, готовые не только помахать самодельной ядерной дубинкой, но и, не колеблясь, опустить её на головы тысяч, если не миллионов, людей, наверняка нашлись бы — сентябрьский кошмар в Нью-Йорке тому наглядное и страшное подтверждение. Слишком уж сильно прогресс науки и техники в современном мире обогнал развитие морали и нравственности.

А поэтому причин для нагнетания паники и истерии вокруг проблемы ядерного терроризма нет, кто бы и как бы не пытался это делать. Кстати, паника и истерия — вообще наихудшие советчики, решения, продиктованные ими, никогда не бывают продуктивными.

Другое дело, что высота упомянутого барьера ни в коем случае как минимум не должна снижаться — пусть даже его поддержание и обходится очень недёшево. Конечно, во многом он обусловлен неумолимыми законами природы и объективными закономерностями развития науки, техники и общества, о чём здесь и рассказывалось. Но нельзя забывать и о том, что значительная его часть построена многотрудными и благородными усилиями людей — учёных, инженеров, политиков, социологов, военных, сотрудников специальных служб.

Ослаблять эти усилия нельзя. В условиях, когда мы не можем достаточно точно оценить разницу между барьером противодействия ядерным террористам и их реальными возможностями, риск слишком велик.



В отличие от ядерного терроризма, при обсуждении терроризма радиационного речь пойдет о веществах и материалах, за единственным исключением (плутоний-239 оружейной чистоты) абсолютно непригодных для создания ЯВУ — непригодных не по технологическим, а по фундаментальным физическим причинам. Радиационный терроризм основан на угрозе использования радиоактивных веществ для нанесения физического и/или экономического ущерба за счет их способности испускать ионизирующее излучение, неощутимое органами чувств человека, но, в значительных дозах, опасное для его жизни и здоровья.

Оценка реальной опасности такой угрозы весьма специфична для каждого конкретного случая. Она зависит от целого ряда обстоятельств — в первую очередь от физических и биохимических свойств радиоактивных материалов (РМ), способов их получения и применения в современных технологиях, возможности их несанкционированного распространения, а также от особенностей их применения террористами — тактики радиационной атаки.

Из гл.1 мы уже знаем, что степень радиационной опасности РМ количественно характеризуется рядом нормативов, учитывающих как физические, так и биохимические их свойства. Для внутреннего облучения это — допустимые объёмные активности радионуклида в воздухе и допустимые поступления в организм с воздухом, водой и пищей; для внешнего — допустимые плотности потоков излучения и допустимые уровни загрязнения поверхностей. Все эти нормативы имеют силу закона. Как увидим, это обстоятельство играет чрезвычайно существенную роль при оценке ситуационных сценариев радиационного терроризма.

Эту оценку следует начать с важнейшего предварительного замечания. Именно: вплоть до настоящего времени достоверно не зафиксировано ни одного случая радиационного (как, впрочем, и ядерного) терроризма, и речь идет лишь об угрозах его реализации, каждая из которых вызывает почти всеобщий страх и озабоченность. В этом смысле их следует рассматривать не только в качестве угроз как таковых, но как неотъемлемую часть тактики террористических акций в целом, как разновидность психологического терроризма, теснейшим образом связанного с терроризмом технологическим. Классический пример — случай с так называемыми «контейнерами Басаева», связанный с находкой, по предварительному оповещению (что очень существенно) в Измайловском лесопарке г. Москвы защитного контейнера с небольшим, не представляющим реальной опасности количеством цезия-137. Несомненно, главным в этой истории был не РМ как таковой, а угроза его террористического применения.

Современное общество, включая его руководящие и информационные структуры, в этом случае (и подобных ему) проявило и проявляет не только резонную озабоченность, но и элементы откровенной паники (что и лежит в основе тактики террористов). Такую отрадную для них и прискорбную для общества неадекватность можно было, впрочем, ожидать с учетом массовой некомпетентности и, как следствие, отсутствия обоснованных рекомендаций по ответным действиям в подобных ситуациях. Однако главные корни такой реакции лежат гораздо глубже и имеют в первооснове искаженную временем и обстоятельствами общественную память о реальных ядерных и радиационных катастрофах, не имевших, разумеется, никакой связи с радиационным терроризмом — начиная с Хиросимы и кончая Чернобылем. Обусловленное этим почти уже на генетическом уровне чрезвычайно преувеличенное представление широких масс населения о степени реальной опасности воздействия радиации вкупе с ужасающей специалистов почти всеобщей технической безграмотностью приводят, к сожалению, не только к неадекватности восприятия информации о «радиоактивных делах». Налицо вполне реальная, часто очень агрессивная, радиофобия, охватившая к настоящему времени значительные количества людей в индустриально развитых странах — об этом уже говорилось в предисловии. Несомненно, что именно такое положение дел является питательной средой психологического терроризма в сочетании с угрозой терроризма радиационного.

В обсуждаемом смысле нет иных способов и методов борьбы с последним, кроме длительной, кропотливой и настойчивой работы по распространению в широких массах людей объективных научно-технических знаний, при полном понимании своей ответственности со стороны как учебных и просветительских организаций, так и СМИ. С другой стороны, как уже было сказано, такая деятельность ни в коем случае не должна служить «учебным курсом» для начинающих террористов.

Первое, что необходимо иметь в виду при анализе проблем радиационного терроризма — существенная замедленность (латентность) негативных последствий воздействия радиации на человеческий организм. Техническое обеспечение условий быстрого уничтожения человека ионизирующим излучением с полной очевидностью лежит за пределами возможностей террористов.

Сказанное, разумеется, не следует смешивать с общей возможностью нанесения таким путем тяжелого, а при определенных условиях и уровне воздействия — и неминуемого смертельного ущерба здоровью людей. Однако даже в наиболее тяжелых мыслимых случаях в этом смысле речь идет о днях и месяцах (вспомним гл.1), если не о годах. В этом принципиальное отличие РМ в руках террориста от взрывчатки,

сильнодействующих отравляющих веществ (ОВ), да и обычного огнестрельного оружия — все перечисленное действует очень быстро, если не мгновенно.

Далее, характерной чертой «обычного» терроризма является относительная кратковременность активной стадии террористической акции в сочетании с немедленным наступлением долгосрочных и часто необратимых её последствий. Следует также учитывать, что эта стадия никогда (или почти никогда) не бывает тайной акцией. Она становится известной либо по немедленным проявлениям (взрыв, газовая или огнестрельная атака), либо, часто наряду с перечисленным, вследствие обращения террориста (террористов) в СМИ и иные органы и структуры с выдвижением требований и условий. Последнее, кстати говоря, не только становится тактическим приемом террористической деятельности, но и является ее немаловажным психологическим фактором — совершенно правы исследователи, проводящие параллели между терроризмом и театром.

Эффективное же применение РМ для нанесения реального ущерба жизни и здоровью людей предполагает реализацию абсолютно противоположной тактики, основанной на длительном сохранении в тайне фактора радиационного воздействия, — иначе оно, с точки зрения достижения таких целей, просто теряет смысл. Поэтому открытая предварительная угроза террористов такого применения РМ (или, тем более, их сообщение об этом как о свершившемся факте) является с большей вероятностью блефом, а с меньшей — следствием «добросовестного заблуждения» относительно действия излучений на человеческий организм. В принципе ситуационные сценарии такого рода существуют, однако при основанной на этом тактике РМ заведомо уступает со всех точек зрения даже обыкновенному стрелковому оружию.

Существует, однако, другое обстоятельство, превращающее радиационный терроризм в фактор вполне обоснованной озабоченности. Имеется в виду относительная простота нанесения с помощью РМ огромного материального ущерба при минимальной непосредственной угрозе жизни и здоровью людей. В большинстве ситуационных сценариев именно такая тактика может оказаться наиболее предпочтительной для террориста — в том числе и с точки зрения наступления для него возможных юридических последствий. Основой для ее реализации служат, как ни парадоксально, упомянутые ранее нормы радиационной безопасности.

В этом смысле, например, гипотетическая радиационная атака с распылением РМ по внутренним помещениям большого здания или даже радиоактивным заражением питьевого источника, вопреки широко распространенному заблуждению, практически не представляет, в большинстве сценариев, прямой опасности для жизни и здоровья людей (в особенности при немедленном постакионном предупреждении со стороны террористов, что, как указывалось, более отвечает их интересам, нежели отсутствие такового). Однако материальный ущерб от такой акции, если она предпринята в одном из узловых пунктов инфраструктуры современного общества, может быть огромным — именно за счет необходимости принятия немедленных мер по обеспечению соблюдения норм радиационной безопасности.

Наиболее вероятными целями радиационного терроризма могут быть:

- административные, деловые, финансовые, информационные и телекоммуникационные центры;
- подземные транспортные коммуникации (метро);
- продовольственные склады и базы;
- источники водоснабжения.

Если радиационная атака стала реальностью, становятся необходимыми следующие мероприятия:

- немедленное прекращение эксплуатации атакованного объекта вплоть до гарантированного выполнения норм радиационной безопасности;

- установление санитарно-защитной зоны особого режима с непрерывным дозиметрическим контролем;

- работы по дезактивации оборудования и помещений, при необходимости — и прилегающих территорий;

- сбор и уничтожение (или захоронение) загрязненных субстанций и объектов, не подлежащих или не поддающихся дезактивации;

- организация работы альтернативных объектов инфраструктуры на время прекращения деятельности атакованных или системное перераспределение их функций между действующими;

- медицинское обследование пострадавших и, по необходимости, проведение лечебных и профилактических мероприятий;

- информационные и разъяснительные мероприятия с целью минимизации морального, социального и психологического ущерба.

Конкретный объем и относительная значимость этих мероприятий зависят от особенностей создавшейся ситуации. В частности, большое значение имеют два технических аспекта, находящихся в тесной

взаимосвязи: выполнение каких радиационных нормативов поставлено под угрозу и какие РМ и в каком количестве использованы для этой цели.

Измеримого, с точки зрения успешности радиационной атаки, превышения допустимых уровней внешнего излучения можно добиться лишь использованием значительных количеств  $\gamma$ -излучателей (таких, как радий-226, цезий-137, кобальт-60). При этом технические трудности очень велики как на стадии подготовки, так и при выполнении радиационной атаки. Главными из них являются две: проблема обеспечения безопасности исполнителей (что, впрочем, с учетом своеобразия нравов террористов не является вполне бесспорным обстоятельством) и сохранение в тайне этапа её подготовки (поскольку именно  $\gamma$ -излучение проще всего регистрируется даже простейшими приборами). Далее, дезактивировать поверхности, загрязненные  $\gamma$ -излучающими РМ, обычно проще и поэтому дешевле, нежели при наличии лишь  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучателей, опять-таки из-за относительной простоты радиационного контроля как неотъемлемой части работ по дезактивации на всех этапах. Наконец, применение  $\gamma$ -излучателей существенно снижает величину важного тактико-технического параметра акции — времени сохранения в тайне воздействия излучения (интервал между актом радиационной атаки и её обнаружением). Как уже указывалось, эта тайна, отнюдь, не всегда выгодна террористу (в большинстве ситуационных сценариев радиационного терроризма дело обстоит как раз наоборот), но сама возможность (или невозможность) ее сохранения заметно расширяет (соответственно, сужает) спектр доступных ему тактико-технических «параметров» нормативами радиационной безопасности являются предельно допустимые концентрации РМ в воздухе и воде. В этих случаях обычно доминирует уже фактор опасности внутреннего облучения, и речь идет о количествах РМ, в тысячи и миллионы раз меньших, чем для создания наднормативных полей облучения внешнего. Использование для обсуждаемого типа радиационной атаки излучателей со слабым  $\gamma$ -излучением (изотопы плутония) или вовсе не имеющих такового (стронций-90) часто даже более эффективно, чем  $\gamma$ -излучателей. Однако в этом случае для потенциальных террористов не возникает только что перечисленных технических трудностей и тактических ограничений, связанных с применением  $\gamma$ -излучающих РМ.

Возвращаясь к оценке последствий обсуждаемой тактики радиационного терроризма — нанесение значительного материального ущерба при минимуме ущерба физического («нейтронная бомба наоборот») — следует признать, что этот ущерб может быть весьма значителен даже в случае одиночной радиационной атаки такого рода. Если же речь пойдет о заранее спланированной их серии с поражением, в определенной последовательности, некоторых узловых объектов инфраструктуры, то ситуация, в предельном случае, может стать тяжелейшей.

Способы противодействия такой тактике будут рассмотрены позже. Здесь же отметим, что применительно к ней существует, по крайней мере в принципе, столь же специфичный (и парадоксальный) способ такого рода, сколь специфична и парадоксальна сама обсуждаемая разновидность технологического терроризма. Речь идет о временном и/или местном смягчении норм радиационной безопасности, которые, как указывалось ранее, во многом и обуславливают принципиальную возможность радиационного терроризма как криминального метода социального и политического насилия.

Такое смягчение в некоторых пределах вовсе не означает детерминированной неизбежности нанесения ущерба жизни и здоровью людей — оно лишь повышает статистическую вероятность наступления нежелательных последствий такого рода, причем, в определенных границах, повышает очень незначительно — если повышает вообще. Мы уже отмечали в гл.1, что действующие нормы радиационной безопасности по их смыслу и существу являются не границами безусловного наступления опасных последствий, а многократно гарантированными, с точки зрения современных научных представлений, условиями их отсутствия, что вовсе не одно и то же. С другой стороны, даже весьма незначительное их смягчение на практике вызывает существенное ослабление ограничений на эксплуатацию объекта и использование загрязненных субстанций, а следовательно, и резкое снижение нанесенного ущерба и стоимости работ по ликвидации последствий радиационной атаки.

Конечно, вопрос о возможности (и целесообразности) такого смягчения выходит за рамки данной книги. Но, по мнению авторов, такой шаг в любом случае крайне нежелателен — не в последнюю очередь потому, что он находится в очевидном противоречии с общей логикой развития отношений между обществом и технологиями. В качестве же штатного административного решения при ликвидации последствий террористической радиационной атаки такое решение тем более трудно признать целесообразным. Большей уступки террористам со стороны общества и государства, лучшей пропаганды их идей, более сильной мотивации для повторения подобных преступных акций трудно придумать.

Приступая к рассмотрению способов противодействия радиационному терроризму, следует сделать важное замечание. Именно, их разработка и реализация ни в коей мере не исключает «традиционных» антитеррористических действий спецслужб, а на стадии собственно обезвреживания террористов прак-

тически не добавляет к этим действиям ничего нового. Методы ликвидации последствий радиационной атаки как таковых (деактивация, захоронение и/или уничтожение загрязненных субстанций, санитарно-гигиенические и лечебные мероприятия, организация радиационного контроля и т. д.) также является вполне рутинными — их техника, последовательность и взаимосвязь подробно разработаны и являются компетенцией соответствующих государственных служб с использованием имеющих обязательную силу методик.

Главная цель обсуждаемых ниже способов противодействия радиационного терроризма — их предотвращение и минимизация нанесенного ущерба. Ключевыми же для анализа проблемы и разработки соответствующих рекомендаций являются два вопроса:

велика ли вероятность того, что опасные количества РМ уже находятся в распоряжении потенциальных террористов;

возможна ли активизация незаконного оборота РМ как важнейшая предпосылка радиационного терроризма.

Первая группа мероприятий основывается на предположении о высокой вероятности того, что потенциальные террористы уже обладают опасными количествами РМ. (Как увидим, такое предположение, к сожалению, имеет под собой реальную основу.) Прежде всего должны быть определены и ранжированы по приоритетам жизненно важные объекты инфраструктуры, наиболее чувствительные к радиационной атаке и ее последствиям; некоторые из них уже были перечислены.

Далее речь идет собственно о защите. Наиболее эффективным ее способом является полный входной радиационный контроль. Имеется в виду, что контролироваться должно по возможности всё: посетители и персонал, их личные вещи, входящие почтовые и грузовые отправления, а также коммуникации жизнеобеспечения (втяжная вентиляция, водо- и газоснабжение). Для крупных продуктовых баз и складов и систем водоснабжения должна функционировать и система непрерывного выходного радиационного контроля.

Разумеется, организация системы контроля, наряду с совершенно необходимым широким внедрением новой техники (в первую очередь — высокоэффективных регистрирующих установок непрерывного действия), должна опираться на профессиональные, хорошо обученные и оплачиваемые службы безопасности и охраны с особыми, в критических ситуациях, полномочиями и, в этой связи, — на адекватную юридическую базу.

Ясно, однако, что достижение гарантированной эффективности системных мероприятий обсуждаемого рода, по-видимому, иллюзорно, — не только в силу огромных материальных затрат, но и потому, что их реализация в объеме сверх некоторого технически и организационно разумного может привести к полному параличу функциональной деятельности защищаемых объектов. В этой связи представляется необходимой разработка сетевых комплексов принятия решений, позволяющих, в условиях вывода из инфраструктуры (временного или долгосрочного, частичного или полного) объекта или объектов, оптимальным образом осуществлять передачу их функций иным объектам — с учетом объемов поражения, требуемых действий по ликвидации последствий радиационной атаки, необходимости и объема привлечения силовых служб, органов управления и информации и т. д. Такие комплексы должны создаваться в виде математических моделей с параметризацией, которая с максимально возможной адекватностью описывала бы вероятный ход развития событий. Не следует забывать, что потери от хаоса и дезорганизации, порожденные несистемными и неоптимальными действиями в такой ситуации, могут быть как минимум сравнимы с ущербом от радиационной атаки как таковой, и, в конечном счете, именно расчет на хаос и дезорганизацию может быть главным элементом тактики террористов.

Обратимся теперь ко второй группе защитных мероприятий, направленных, главным образом, на предотвращение попадания опасных количеств РМ в руки потенциальных террористов. С этой целью необходимо в первую очередь выявить наиболее доступные им каналы такого рода утечки.

Речь идет именно об утечках, поскольку самостоятельное изготовление РМ «с нуля» в неких «тайных лабораториях» совершенно невозможно. В этом, кстати говоря, состоит существенное отличие радиационного терроризма от «химического» — сильнодействующее ОВ в количествах, достаточных для террористической атаки, вполне может быть, к сожалению, получено в весьма примитивной, по научным меркам, подпольной лаборатории. Печально знаменитая газовая атака в токийском метро — лучшее тому доказательство.

Далее, реальная опасность канала утечки РМ вовсе не находится в прямом соответствии с количеством РМ на объекте или в регионе, но на практике в значительной мере свойственна (либо несвойственна) определенным технологиям и областям их использования. Рассмотрим этот вопрос, ввиду его важности, подробнее.

Бесспорно, наиболее масштабным источником наработки РМ в качестве как отходов, так и полезной продукции, является атомная промышленность и энергетика, а также пункты захоронения радиоактивных отходов. Однако своеобразие функциональных структур соответствующих производств и объектов (как гражданских, так и военных), высокий образовательный и культурный уровень обслуживающего персонала, многоуровневая система технических, административных и правовых мер противодействия делают обсуждаемые объекты сравнительно малоуязвимыми для хищений РМ. Свообразными дополнительными барьерами таким попыткам на них являются также огромные мощности внешних радиационных полей, значительные габариты и практическая нетранспортабельность большинства технологических веществ, узлов и элементов, представляющих интерес в контексте радиационного терроризма. Сообщения же о них со стороны СМИ нуждаются, как минимум, в серьезной проверке и существенно более веских доказательствах, нежели обычно представляются, — не говоря уже о публикациях, где технически безграмотный бред, порожденный погоней за сенсацией или политическими устремлениями, вполне очевиден с самого начала.

Несравненно большую опасность в этом контексте представляют общепромышленные, медицинские и исследовательские технологии, основанные на применении изотопных источников излучения. Круг их использования в настоящее время весьма широк — радиоизотопные генераторы, радиационные дефектоскопы, геофизический каротаж, промышленная радиография, лучевая терапия, стерилизация семян, научно-исследовательские работы и др. Несмотря на то, что изотопные источники для этих технологий в ряде случаев обладают огромными активностями, организация их учета, контроля и списания, а также надежность физической защиты не идут ни в какое сравнение с применяемыми в атомной энергетике и промышленности. С достаточной уверенностью можно утверждать, что число неучтенных и безвозвратно утерянных изотопных источников излучений (в особенности устаревших) значительно. Значит, велика вероятность и того, что они могут попасть (или уже попали) в руки потенциальных террористов. А путь от получения РМ до практической возможности организации террористической радиационной атаки, к сожалению, довольно короток.

В этом, кстати говоря, заключается главное различие между ядерным и радиационным терроризмом с точки зрения их реальной опасности. Именно, радиационный терроризм несравненно более реален (хотя, разумеется, уступает ядерному по вероятному объёму ущерба, нанесённому единичной акцией). Вспомним о колоссальных, практически непреодолимых трудностях, которые придётся преодолеть банде мерзавцев, чтобы добыть ядерные материалы и комплектующие для создания ЯВУ, организовать и провести работы по его конструированию, изготовлению, сборке и проверке. Вовсе не случайно ядерное оружие даже в малой серии, даже в единичных образцах называют «оружием сильного», недоступным не то что группе частных лиц (пусть и очень плохих), а и большинству государств.

Иное дело — РМ и, соответственно, возникновение предпосылок для подготовки и проведения радиационной атаки. Конечно, это — не то чтобы совершенно уже общедоступное и элементарное дело, но при известных технических знаниях, организационных навыках и финансовых возможностях гораздо более реальное, чем организация акта ядерного терроризма. В этом смысле РМ как своеобразное оружие (в контексте радиационного терроризма) — «оружие слабых» с относительно высокой степенью доступности. И мы уже видели, что использование современными вырожденками именно этой разновидности технологического терроризма может показаться им, по совокупности всех соображений относительно подготовки и проведения террористического акта и с учётом его желаемой цели и вероятных последствий, предпочтительным.

В связи с изложенным настоятельно необходимы следующие меры:

- резкое ужесточение режимов производства, хранения, эксплуатации, транспортировки и, в особенности, списания изотопных источников;

- активизация работ по замене радиотоксичных материалов, используемых в радиационных технологиях, на вещества с меньшей радиотоксичностью;

- развитие радиационных технологий на основе неизотопных (в частности, электрофизических) источников излучений;

- неукоснительное соблюдение принципа предпочтения нерадиационных технологий радиационным в любых случаях, когда обеспечивается сравнимый целевой и экономический эффект.

Но есть здесь и ещё одно важнейшее обстоятельство.

Чуть раньше мы уже упоминали о таком неотъемлемом компоненте практически всех ситуационных сценариев радиационного терроризма, как расчёт террористов на массовую панику. И этот расчёт будет вполне обоснованным до тех пор, пока общество не расстанется с надуманными (с немалой помощью

политиков и журналистов) ужасами при одном упоминании о радиоактивности и радиационных технологиях.

Впрочем, и об этом мы раньше уже говорили, поэтому смысла повторяться не видим.

## **2.2. «Ядерные сверхматериалы»: судьба неслучайных мифов**

Чем мощнее оружие, чем более непонятны для большинства людей базовые физические принципы его действия, чем больший общественный и политический резонанс имеют реальные или надуманные опасения относительно возможностей его несанкционированного создания и/или использования, тем сильнее оно обрастает мифами и легендами.

Ядерное оружие — яркий тому пример. Оружия мощнее, чем оно, вообще не существует, угроза его попадания в руки «плохих парней» принадлежит к числу главных страхов современности, а массовая физико-техническая некомпетентность вызывает к жизни удивительные небывальщины, часто представляемых СМИ в контексте чуть ли не оружия нового тысячелетия.

Однако едва ли не меньший интерес, чем сами мифы, представляет подоплёка их возникновения в каждом конкретном случае. Наивно думать, что они — лишь шедевры журналистской изобретательности в неуёмной погоне за сенсациями (хотя без газеты и экрана мифы, вообще, и мифы военнотехнические, в частности, не имеют, разумеется, никаких шансов на массовое распространение). Нет, не всё так просто...

**МИФ ПЕРВЫЙ. «Красная ртуть»: невежество в эпоху «первоначального накопления».** Первые публикации о «сверхматериале», якобы позволяющем собрать на его основе ядерный боеприпас размером чуть ли не с апельсин, появились во второй половине 80-х годов, а к началу 90-х они просто заполнили страницы и экраны. Дело при этом, отнюдь, не ограничивалось лишь советскими (позже российскими) СМИ. Не меньшее усердие в этом вопросе проявляли и СМИ Запада, и уже подавно удивительным (впрочем, лишь на первый взгляд) кажется участие, пусть косвенное, в сочинении этих легенд видных западных учёных. Ничуть не меньшее число статей описывало совершенно безумные сделки, политические и экономические скандалы и иные невероятные — иногда комичные, а порой и драматические — истории, связанные с «красной ртутью». В грандиозную аферу по международной торговле, якобы производимой на «секретных заводах Средмаша», «красной ртутью» по цене 300 – 400 тыс. дол. за килограмм в 1992 г. были вовлечены высшие государственные лица России того времени (вспомним нашумевшее дело концерна «Промэкология»).

Сведения о «контрабандно вывезенной» из России «красной ртути», или «вещества RM 20/20», то в виде фантастического материала с невиданной в природе плотностью более  $23 \text{ г/см}^3$ , то «высокорadioактивного препарата, исключающего таможенную проверку» и т. д., множились, как кролики, вплоть до примерно 1994 г., когда началось отрезвление. Стало известно, что «контрабандный товар» на проверку оказывался то ртутной амальгамой золота, то обычной ртутью с подмешанным в неё молотым кирпичом (!), то препаратом высокорadioактивного, но тем не менее вполне банального цезия-137 и т. п. Выяснилось также, что тогдашний руководитель Минатома России (на «секретных предприятиях» которого, якобы, и производилась «красная ртуть») академик В. Михайлов не имеет представления не только об её производстве, но и о «красной ртути» вообще. Из деловой переписки Михайлова (кстати говоря, в недавнем прошлом одного из ведущих конструкторов советского и российского ядерного оружия): «Министерство ... сообщает, что указанный продукт («красная ртуть» — Авт.) на подведомственных предприятиях и организациях не производился, не производится и специалистам атомной промышленности как таковой неизвестен». По поводу же создания «бомбы-апельсина» реакция Министерства обороны России была краткой, но категоричной: «... полный абсурд, даже комментировать стыдно».

С некоторым запозданием высказались, наконец, учёные. Специалисты РНЦ «Курчатовский институт»: «... увидеть её («красную ртуть» — Авт.), «пощупать» её ещё никому не удавалось, потому что вещества с такими характеристиками не существует в природе ...».

Вероятно, именно с этого и стоит начать ретроспективный анализ этой легенды. С точки зрения физика-ядерщика, все разговоры и слухи о «красной ртути» — полная и бесповоротная чушь. Не вдаваясь в профессиональные тонкости, авторы призывают в этой связи различать два вида явлений и событий: неизвестные на нынешней стадии развития естествознания или невозможные на современном технологическом уровне, с одной стороны, и невозможные в принципе как противоречащие основным законам природы, с другой. Использование в качестве ядерной взрывчатки веществ тяжелее лития, но легче урана (ртути и её соединений любого цвета — в том числе) устойчиво относится именно ко второй категории — оно ничуть не более реально, чем, например, падение яблока не вниз, а вверх, или бесперебойная

работа вечного двигателя. Добавление же каких-либо ртутных соединений к «нормальным» ядерным материалам (уран, плутоний) никоим образом не улучшает — напротив, резко ухудшает их функциональные свойства.

Казалось бы, тут и обсуждать нечего. Но откуда же тогда «растут уши» упомянутой информационной свистопляски?

Это уже не физика, и здесь можно лишь строить предположения. Но вовсе игнорировать этот аспект дела нельзя — такие легенды возникают отнюдь не на пустом месте, и вроде бы уже пройденные грабли можно ещё не раз подкинуть на тропу технологической истории, пользуясь массовой естественно-научной слепотой. Была бы конкретная заинтересованность, а она в истории с «красной ртутью» проглядывается достаточно отчётливо — и внутри России, и вне её.

Далеко не случайно рождение этого мифа совпало по времени с «этапом первоначального накопления» в новой истории российского капитализма, которому сопутствовали и иные, иногда не менее масштабные, коммерческие аферы. Этому способствовало и появление тогда же сонмища «посреднических структур», всегда готовых не только впарить легковозному покупателю (в том числе и на Западе) под видом «супервзрывчатки» прошлогодний и даже позапрошлогодний снег, но и организовать для этого соответствующую «рекламную компанию».

Это — внутри России. А вспоминая об интересах и связанных с ними информационных кампаниях вне её, нельзя не заметить удивительно точного совпадения по времени двух таковых — «краснортутной» и кампании яростных атак на российскую атомную промышленность, направленной как минимум на её расчленение (с вполне понятными смертельными для неё последствиями) и постановку под «международный» (а по существу — западный) контроль российского военно-ядерного комплекса как «опасного источника мировой угрозы» и «сочного пастбища для ядерных террористов». В таком контексте и высказывания западных специалистов вполне понятны — если на этом «пастбище» растут ещё и «ядерные апельсины» на основе «сверхматериала»...

Ну как не вспомнить в этой связи Маяковского с его объяснением механизма зажигания звёзд!...

**МИФ ВТОРОЙ. Тяжёлые трансураны: очевидность полужизни и вероятность дезинформации.** Жизнь легенды о «красной ртути» оказалась скоротечной. Вспыхнув, как метеор, она столь же быстро сходила на нет (хотя авторы не исключают в этом вопросе и рецидивов, не имеющих, впрочем, никаких перспектив). Да иначе и быть, пожалуй, не могло. Ведь в её физической основе лежало даже не физическое заблуждение, не ложная научная концепция (как, например, в проектах «вечного двигателя», чем и объясняется их удивительная живучесть). Здесь в основе, если убрать всю обсуждённую ранее нефизическую шелуху, — пустота, вакуум. Подобно тыняновскому поручику Кижю, этот миф «фигуры не имеет».

А вот другой рассматриваемый здесь миф совсем иного рода. Во-первых, он гораздо старше — соответствующие публикации попадались авторам ещё в 70-х годах. Там взахлёб обсуждались подвиги, которые будут совершать в недалёком будущем на полях сражений спецподразделения, вооружённые «микроскопическими» ядерными боеприпасами с массой порядка 100 г на основе далёкого трансурана калифорния («калифорниевыми пулями»). Во-вторых, он живучее — подобные публикации приходится встречать и в наши дни. Наконец, в-третьих, он, в отличие от царившего в атмосфере массовой физикотехнической невежественности «краснортутного» мыльного пузыря, имел (и имеет) в первооснове вполне разумные физические аргументы. Таковыми являются некоторые ядерные свойства тяжёлых трансуранов.

Действительно, эффективность ядерного материала при его использовании для создания боеприпасов деления во многом определяется, во-первых, сечением деления (вероятностью захвата нейтрона с последующим развалом тяжёлого ядра на два осколка с вылетом вторичных нейтронов) и, во-вторых, количеством этих вторичных нейтронов на акт деления. Чем выше эти величины (их называют ядерными константами), тем более эффективен рассматриваемый материал как ядерное горючее. И вот они-то для тяжёлых трансуранов очень хороши — в том числе и для тех трёх, которые, по совокупности своих свойств, чаще всего упоминались (и упоминаются до сих пор) в качестве «сверхвзрывчатки будущего». Таковыми являются кюрий-245, калифорний-249 и калифорний-251, периоды полураспада которых равны 8530, 350 и 900 лет соответственно. Другие трансураны либо делятся плохо, либо распадаются быстро.

Казалось бы, даёшь полки и батальоны, вооружённые АКМ с калифорниевыми пулями! Но ... гладко было на бумаге. Калифорний-249 и, тем более, калифорний-251 отпали на самом начальном этапе инженерной проработки вопроса. Дело в том, что технические трудности при наработке весовых количеств трансуранов, в общем, лавинообразно нарастают с удалением от урановой области. Например, отношение нарабатываемых в промышленном реакторе количеств плутония-239 и калифорния-249 составляет

$10^5 - 10^6$ , т. е. на тонну плутония в облучённом топливе реактора нарабатывается лишь несколько граммов калифорния-249 (а калифорния-251 — ещё гораздо меньше). С учётом же неминуемых огромных затрат на выделение чистого материала становится понятным, почему суммарные мировые «запасы» калифорния-249 заведомо меньше, чем требуется для изготовления из него хотя бы одной «пули», а о калифорнии-251 и говорить нечего. Да и как конструировать эту пулю, ясно не вполне — малые, в сравнении с ураном или плутонием, периоды полураспада рассматриваемых изотопов калифорния вызвали бы столь значительное тепловыделение в активной части заряда, что известные компоновочные схемы наверняка негодились бы.

А вот с кюрием-245 дело обстояло несколько иначе. Если наработка изотопов калифорния ограничилась очень малыми (индикаторными) количествами, позволяющими в лучшем случае определить их ядерные константы, то кюрия-245 было наработано существенно больше, хотя это влетело в немалую копейку. Насколько известно авторам, эти исследования были во многом инициированы ажиотажными слухами и «утечками» из США. Это наводит на определённые размышления, но о них — позже.

Однако нет худа без добра. Наработанные количества кюрия-245 позволили надёжно определить не только его ядерные константы, но и макроскопические свойства. Тогда-то и выяснился главный недостаток кюрия как ядерной взрывчатки — довольно низкая плотность (около  $13 \text{ г/см}^3$  вместо  $18,3$  у урана и  $19,6$  — у плутония). Хорошо известно, что критическая масса ядерной взрывчатки обратно пропорциональна квадрату плотности, так что почти весь «выигрыш» кюрия у плутония по совокупности нейтронно-физических констант обесценивается его «проигрышем» по плотности. При этом кюрий намного дороже плутония, обладает высокой собственной радиоактивностью (откуда снова проблемы тепловыделения, а также сборки и обращения с боеприпасом) и имеет неприятных и трудноотделимых от основного материала «балластных» соседей, играющих в данном случае ту же роль, что плутоний-240 для плутония-239. Это — кюрий-242 и кюрий-244. Мало того, что они плохо делятся, — обусловленный ими нейтронный фон за счёт интенсивного спонтанного деления до предела усложняет и без того непростое проектирование и изготовление гипотетического кюриевого боеприпаса.

Спрашивается — а зачем тогда огород городили? И кто первый сказал, что изгородь нужна?

Перед нами — пример полужнания, которое пытаются применить там, где нужно знание полное. А так поступать в обращении с высокими (или высочайшими — как современное ядерное оружие) технологиями нельзя. Никто ведь не возьмётся конструировать автомобиль лишь на основе характеристик его фар (хотя, конечно, и хорошие фары ему необходимы).

Интересен, однако, генезис этого мифа. Видимо, правы те специалисты, которые считают упомянутую «трансурановую» шумиху и «информационные утечки», пришедшие из-за океана, отнюдь не случайными. Надо отдавать себе отчёт в том, что отвлечение усилий (а тем более значительных усилий) научно-технического потенциала возможного противника на разработку заведомо тупиковой ветви развития систем оружия является серьёзным успехом для страны-инициатора этой акции. Идеализму и прекраснотушности в таких делах решительно не место, как и излишней доверчивости. Чтобы проиллюстрировать эту мысль, авторы позволяют себе привести выдержку из статьи легендарного Первого Конструктора советского ядерного оружия академика Ю. Б. Харитона. Речь идёт о «стратегической оборонной инициативе» Р. Рейгана, техническая нереалистичность большинства ключевых элементов которой была ясна специалистам практически с самого начала. А упомянута она здесь постольку, поскольку именно в отношении этой «инициативы» спустя некоторое время стало известно, что реально она преследовала совсем иные цели, нежели создание сказочного «противоракетного щита». Итак, говорит Ю.Б. Харитон: «Только теперь [в начале 90-х годов — Авт.] появились признания бывших высокопоставленных должностных лиц США, что СОИ была сознательно запущенной грандиозной дезинформацией. Целью её было склонить нашу страну к бессмысленным затратам в десятки миллиардов долларов. Министр обороны США того периода К. Уайнбергер недавно заявил в связи с этим, что обман противника — вещь естественная, и добавил: «Вы всегда работаете на обман, вы всегда стараетесь ввести противника в заблуждение, чтобы быть уверенным, что реальная информация ему неизвестна».

У вас, читатель, не возникло аналогий?.. Если возникли, то их можно подтвердить мнением виднейшего конструктора советского ядерного оружия академика Л.П. Феокистова, высказанным именно по поводу «ядерной пули»: «...хорошо поданная информация на деле оказалась умело сфабрикованной фальшивкой».

Нет, не годятся и «ядерные сверхматериалы» в качестве основы оружия XXI в. Но можно ли исключить в недалёком будущем какой-то качественный прорыв, который приведёт к созданию новых сверхмощных систем оружия — таких, перед которыми термоядерное оружие покажется игрушкой?

Вот тут авторы воздержатся от категорических высказываний — наука принципиального запрета на создание таких систем не содержит. Переход от физики электронных оболочек атома к физике измене-



ний состояния атомного ядра обеспечил освобождение в миллионы раз большей энергии — таков физический смысл перехода от химической взрывчатки к ядерной. Современная физика уже даёт достаточно ясные намёки на то, что изучение внутринуклонных, кварковых структур выводит нас на энергии, на несколько порядков превышающие и ядерные — хотя технические способы их обуздания пока даже не проглядываются.

Вот только стоит ли применять эти великолепные достижения физики для создания новых средств уничтожения людей, отвлекая такой деятельностью колоссальные средства от обеспечения благополучия людей живущих? Ведь современное ядерное оружие — уже оружие абсолютное, и даже лишь существующих его арсеналов достаточно, чтобы уничтожить человеческую цивилизацию не один раз. Так зачем же уничтожать её сотни, тысячи раз?

К сожалению, авторы в ответе и на этот вопрос вынуждены воздержаться от категоричности — слишком много примеров иной логики накопила история. Но если всё-таки такая извращённая логика реализуется и на этот раз, то вряд ли человек заслуживает высокого звания *homo sapiens*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и закончилась наша экскурсия в мир ядерной и радиационной физики и техники, в лабиринт хитросплетений новейших технологий и связанной с ними истории людей и общества. Авторы надеются, что эта экскурсия заинтересовала Вас, дорогой читатель.

Если это так — они уже считают это своей удачей. Но ещё большее спасибо — читателю неудовлетворённому, который, закрыв последнюю страницу этой книги, воскликнет: «А где ?..»

Каковы роль и значение атомной энергии в современном мировом и российском энергетическом комплексе? Каковы её перспективы в различных сценариях развития человеческой цивилизации? Где и как будет развиваться атомная энергетика в нашей стране, чем она сможет помочь жителям России в их непростой судьбе? Насколько тяжелы реальные радиационные и экологические последствия ядерных испытаний и мирных ядерных взрывов, о чём так много говорилось и говорится в СМИ? Что стоит за скандалом с обеднённым ураном, потрясшим Европу (и не только)? Жду ответа, уважаемые авторы!

Справедливо. Прощаясь с читателями, авторы, отнюдь, не считают свою работу законченной.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мухин К.Н. Занимательная ядерная физика. М.: Атомиздат, 1969.
2. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). Издание официальное. М.: Минздрав России, 1999.
3. Ядерная энергетика: вопросы и ответы. Вып. 1 – 7. М.: ИздАТ, 1991 – 1994.
4. Seidel Jürgen. Kernenergie. Fragen und Antworten. Dьsseldorf – Wien – New York: ECON Verlag, 1990.
5. Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. М.: ЦНИИАтоминформ. 1994. № 1; 1995. № 1, 2, 9, 10.
6. Бюллетень по атомной энергии. М.: ЦНИИАтоминформ. 2001. № 3, 4, 7, 8; 2002. № 4, 5, 8.
7. Радиация и здоровье. М.: ГНЦ «Институт биофизики», 2001.
8. Радиационная безопасность. Вена: МАГАТЭ, 1996.
9. Радиация. Дозы, эффекты, риск. М.: Мир, 1988.
10. Зеленков А.Г. Некоторые вопросы радиационной экологии. М.: МИФИ, 1990.
11. Круглов А.К. Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
12. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001.
13. Ильин Л.А. Реалии и мифы Чернобыля. М.: ALARA Limited, 1994.
14. Медицинские последствия аварии на ЧАЭС: прогноз и фактические данные национального регистра. Медицинский радиологический научный центр РАМН. Обнинск: ООО «Комтехпринт», 2001.
15. Международные оценки последствий аварии на Чернобыльской АЭС: Отчёт научного комитета по действию атомной радиации ООН-2000. Специальное приложение к журналу «Медицинская и радиационная безопасность». Обнинск: ООО «Комтехпринт», 2000.
16. Иванов Е.В., Шубик В.М. Медицинские последствия Чернобыльской аварии. Факты и размышления 15 лет спустя. С.-Пб., 2001.
17. Шмелёв А.Н., Куликов Г.Г., Апсэ В.А. Физические факторы и свойства ядерных материалов, влияющие на их защищённость. М.: МИФИ, 2001.
18. Феоктистов Л.П. Физические основы ядерной бомбы. Препринт МИФИ 003-99. М.: МИФИ, 1999.
19. Создание первой советской атомной бомбы / Под ред. В.Н. Михайлова. М.: Энергоатомиздат, 1995.
20. Феоктистов Л.П. Из прошлого в будущее. Снежинск: РФЯЦ – ВНИИТФ, 1998.
21. Аналитическая справка об экологической безопасности обращения с облучённым ядерным топливом. М.: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2001.

Редактор и технический редактор *М.В. Макарова*  
Оригинал-макет изготовлен *М.В. Макаровой*

Подписано в печать 27.09.2002. Формат 60х84 1/16.  
Печ.л. 7,25. Уч.-изд.л. 7,25. Тираж 500 экз.  
Изд. № 009-3. Заказ №

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