

## Глава 7

---

# ПРОБЛЕМА РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

---

Радиоактивные отходы (РАО) образуются на всех этапах ЯТЦ (рис. 4.40). Состав и количество РАО на каждом из этапов цикла является специфическими (табл. 7.1).

Так, на стадии отработки урановых руд происходит пылеаэрозольное загрязнение атмосферы, почв, воды. За счет интенсивного радоновыделения происходит загрязнение атмосферы радоном. Масштабы этих загрязнений локальны, а сами образующиеся отходы могут быть отнесены к категории низкоактивных отходов, но среди них отмечается присутствие долгоживущих альфа-излучающих нуклидов.

По некоторым оценкам, на всех работавших до последнего времени предприятиях по добыче и переработке урановых руд в отвалах и хвостохранилищах находится  $10^8$  м<sup>3</sup> РАО с активностью  $1,8 \cdot 10^5$  Ки (Гупало, 2002).

Наибольшее количество опасных для биосферы техногенных радионуклидов, в том числе и долгоживущих альфа-излучателей (Pu, Am, Np и др.), образуется и содержится в отработанном ядерном топливе (ОЯТ) с атомных электростанций и на радиохимических производствах, где осуществляется выделение плутония, невыгоревшего урана-235 и других радионуклидов. Для выделения плутония из ОЯТ в России в 1976 г. был запущен в работу завод (РТ-1) в Челябинске-60 (г. Озерск), еще один завод (РТ-2) строится в Красноярске-26 (г. Железногорск).

На заводе РТ-1 облучается ОЯТ из реакторов АЭС типа ВВЭР-440; 5Н-350; БН-600 из реакторов подводных лодок и судовых реакторов с мощностью переработки около 400 т/год (Меньшиков и др., 1995).

Кроме того, оружейный плутоний производился на специальных ядерных комплексах (Челябинск-65, Томск-7, Красноярск-26), где работали 13 атомных реакторов специального типа, например АДЭ, из которых на радиохимических заводах (РХЗ) в больших количествах извлекался плутоний. Именно РХЗ являются основным источником радиоактивных отходов. Так, по расчетам В.Ф. Меньшикова и др. (1995), при переработке 1 тонны ОЯТ реакторов типа ВВЭР-400 в НПО "Маяк"

**Таблица 7.1.** Объем и активность РАО и ОЯТ на предприятиях ядерного комплекса России (по Ю.В. Чечеткин, А.Ф. Грачеву, 2000)

Предприятия	Вид отходов	Объем (масса)	Активность, Бк	Примечания
На предприятиях России	Всего	$6 \cdot 10^8 \text{ м}^3$	$5,6 \cdot 10^{19}$	
	жидкие		$4,7 \cdot 10^{19}$	
	твердые		$0,85 \cdot 10^{19}$	
	ОЯТ		$1,72 \cdot 10^{19}$	
Добыча и переработка руды	Жидкие + твердые	$1 \cdot 10^8 \text{ м}^3$	$6,66 \cdot 10^{15}$	
АЭС	Жидкие + твердые	$2,86 \cdot 10^5 \text{ м}^3$	$1,63 \cdot 10^{15}$	ВВЭР-440 + ВВЭР-1000
РБМК	ОЯТ	$(6,1 \cdot 10^3 \text{ т})$	$1,15 \cdot 10^{20}$	
ВВЭР	ОЯТ	$(1,1 \cdot 10^3 \text{ т})$	$3,33 \cdot 10^{20}$	
Комбинат "Маяк" (Озерск)	Жидкие стеклоблоки	$8,5 \cdot 10^5 \text{ м}^3$ $(1,6 \cdot 10^3 \text{ т})$	$7,8 \cdot 10^{18}$	Переработано в стеклоблоки
	Жидкие		$4,8 \cdot 10^{19}$	
Сибирский химический комбинат (Северск)	Жидкие	$2,5 \cdot 10^4 \text{ м}^3$	$2,1 \cdot 10^{19}$	В емкостях
	Жидкие	$4,1 \cdot 10^8 \text{ м}^3$	$2,6 \cdot 10^{19}$	Открытые водоемы и бассейны
Горнохимический комбинат (Железногорск)	Жидкие		$4,44 \cdot 10^{17}$	Приповерхностное хранение (оборудование, строительные конструкции)
Сибирский хим. комбинат, Горнохим. комбинат	Жидкие	$4,6 \cdot 10^7 \text{ м}^3$	$3 \cdot 10^{19}$	Подземное захоронение
Оборонные отрасли промышленности	Жидкие + твердые ОЯТ	$3,28 \cdot 10^4 \text{ м}^3$	$7,8 \cdot 10^{14}$ $1,2 \cdot 10^{18}$	В береговых хранилищах и на плавучих базах
Комбинат "Радон"		$2 \cdot 10^5 \text{ м}^3$	$7,4 \cdot 10^{16}$	
На предприятиях ядерного комплекса	ОЯТ	$(8500 \text{ т})$	$1,6 \cdot 10^{20}$	
На предприятиях отрасли	Источники ионизирующего излучения	$5,3 \cdot 10^4 \text{ шт.}$	$1,65 \cdot 10^{15}$	Отработали ресурс

образуется 45 м<sup>3</sup> высокоактивных отходов (ВАО), 150 м<sup>3</sup> среднеактивных отходов (САО) и около 2000 м<sup>3</sup> низкоактивных отходов (НАО). Кроме того, продуктами переработки являются 950 кг оксидов урана и несколько килограммов плутония, т.е. из 1 тонны ОЯТ образуется  $45 + 150 + 2000 = 2195$  м<sup>3</sup> жидких РАО, которые требуют специального обращения, переработки и хранения.

Это одна из причин того, что ряд стран (США, Канада, Швеция, Германия, Финляндия и другие) отказались от замкнутого ЯТЦ, т.е. ОЯТ дальнейшей переработке не подвергаются и идут на окончательное долговременное хранение, а затем захоронение.

Россия и ряд других государств (Япония, Великобритания, Китай и др.) придерживаются концепции замкнутого ЯТЦ, которая предусматривает полную переработку ОЯТ с выделением плутония, урана-235 и их возврат в энергетический цикл.

Дискуссия о реализации того или иного подхода широко ведется в печати и на многочисленных конференциях, семинарах, и в данной книге этот вопрос не рассматривается. Что касается радиоактивных отходов, то они образуются и в том, и в другом случае, но в разных количествах. Правда, относительно ОЯТ термин "отходы" в России не применяется, но это носит дискуссионный характер.

Кроме того, на данном этапе развития мировой цивилизации отпала необходимость в оружейном плутонии. США в 1988 г. (официально об этом объявили в 1991 г.) прекратили его производство вообще и, согласно подписанному договору о нераспространении ядерного оружия, производство плутония будет прекращено и в России. В связи с этим произошли и происходят остановки военных промышленных реакторов в Челябинске, Красноярске, Томске. А оставшиеся (например, два реактора в Томске) дорабатывают свой ресурс, поскольку они являются также источником теплового снабжения областного центра (реакторы двойного назначения). Демонтируются ядерные боеголовки и возникает острая проблема хранения и утилизации плутония.

Радиоактивные отходы классифицируются по агрегативному состоянию, по виду радиоактивного излучения, по продолжительности жизни радионуклидов, величине активности. Одна из возможных схем приведена на рисунке 7.1.

"Основными санитарными правилами обеспечения радиационной безопасности" (ОСПОРБ-99) предусматриваются следующие классификации радиоактивных отходов при неизвестном (табл. 7.2) и известном радионуклидных составах (табл. 7.3).

"Санитарными правилами обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2000)" различают отходы радиоактивные и ядерные.

**Отходы радиоактивные** – не предназначенные для дальнейшего использования вещества в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами и правилами.

**Отходы ядерные** – радиоактивные отходы, в которых возможно возникновение цепной реакции деления ядер при достижении критической массы.

Следует отметить, что для РАО установлен ряд ГОСТов, санитарных норм, правил и других нормативных документов, подробный перечень которых рассмотрен



Рис. 7.1. Классификация РАО

Таблица 7.2. Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов при неизвестном радионуклидном составе (по ОСПОРБ-99)

Категория РАО	Удельная активность, КБк/кг		
	бета-излучающие радионуклиды	альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	трансурановые радионуклиды
НАО	Менее 104	Менее 103	Менее 102
САО	104–107	103–106	102–105
ВАО	Более 107	Более 106	Более 105

Г.И. Россманом и др. (2004). Особо следует обратить внимание, что существует ГОСТ на термины и определения (ГОСТ Р 50996-96).

Для твердых радиоактивных отходов (ТРО), наиболее характерных для горнодобывающей урановой отрасли, может быть предложена своя классификация (табл. 7.4).

Гамма-излучающие отходы считаются радиоактивными, если мощность экспозиционной дозы (МЭД) у их поверхности (на расстоянии 0,1 м) превышает 100 мкР/ч (Россман и др., 2004).



**Таблица 7.3.** Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов при известном радионуклидном составе (по СПОРО-2000)

Категория РАО	Уровень активности в величинах 10УВ для жидких и МЗУА для твердых РАО	Годовая эффективная доза, полученная населением от излучения незащищенных РАО, мЗв	Вероятный уровень риска без мер защиты, число смертельных исходов в год	Тепловыделение, кВт/м <sup>3</sup>
НАО	$> 1$ и $\leq 100$	$\geq 0,01-1,0$	$> 10^{-6}$ и $\leq 10^{-4}$ (эффекты только стохастические)	$\leq 2$
САО	$> 10^2$ и $\leq 10^4$	$\geq 1,0-100,0$	$> 10^{-4}$ и $\leq 10^{-2}$ (возможны эффекты детерминированные, легкой тяжести)	
ВАО	$> 10^5$	$\geq 100,0$	$> 10^{-2}$ и $\leq 1,0$ (эффекты детерминированные, включая смертельный исход для всех пострадавших)	$> 2$

**Таблица 7.4.** Классификация твердых радиоактивных отходов АЭС по С.Н. Смирнову, 2000

Вид излучения	Единица измерения	Категория РАО		
		I низкоактивные	II среднеактивные	III высокоактивные
$\gamma$	мр/ч	0,03–30	$30 - 1 \cdot 10^3$	более $1 \cdot 10^3$
$\beta$	мкКи/кг	2–100	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^5$	более $1 \cdot 10^5$
$\alpha$	мкКи/кг	0,2–10	$10 - 1 \cdot 10^4$	более $1 \cdot 10^4$
$\beta$	см <sup>-2</sup> мин <sup>-1</sup>	$5 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^4 - 1 \cdot 10^7$	более $1 \cdot 10^7$
$\alpha$	см <sup>-2</sup> мин <sup>-1</sup>	$5 - 1 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$	более $1 \cdot 10^6$

Технология обращения с радиоактивными отходами на разных этапах становления атомной промышленности имела свои особенности, обусловленные, прежде всего, решаемыми геополитическими стратегическими задачами (кто быстрее сделает оружие возмездия и устрашения), отсутствием опыта и знаний по поведению малоизученных химических соединений радиоактивных элементов. На первых этапах жидкие радиоактивные отходы групп ВАО и САО хранились в естественных или искусственных прудах-отстойниках, специальных инженерных сооружениях – емкостях из бетона и/или стали (баки, танки), а отходы групп НАО,

как правило, разбавлялись и рассеивались путем сбрасывания по системам трубопроводов и каналов в Мировой Океан, открытые водные системы, где происходило естественное разбавление до приемлемо безопасных уровней (табл. 7.5).

По мере накопления информации по поведению техногенных радионуклидов становилось понятным, что такой способ избавления от отходов не совсем приемлем, т.к. создается угроза существованию биологических видов и самого человека. В этом плане наглядным примером может служить сброс слаборадиоактивных жидких отходов в Ирландское море с заводов Уиндскейла (в других транскрипциях – Виндскейла) на северо-западном побережье Великобритании (рис. 7.2).

Оказалось, что часть отходов с приливами и течениями возвращается обратно к берегу и накапливается в съедобной морской водоросли *Porphira Umbilicalis*, используемой для приготовления местного деликатеса "Лавербреу".

В результате этого около 26 000 человек в Южном Уэльсе, находящемся в сотнях километров южнее, подверглись большой радиоактивной опасности (Холл, 1992).

Для уменьшения такой опасности во многих странах жидкие отходы стали концентрировать методами химического осаждения, выпаривания и сорбции на ионообменных смолах, после чего они связывались каким-либо материалом в труднорастворимую матрицу (цемент, битум, полимеры, бетон и т.д.), устанавливались в металлические контейнеры и захоранивались.

**Таблица 7.5.** Данные об удалении жидких отходов с некоторых предприятий атомной промышленности в Великобритании (по В.П. Шведову, 1968)

Место сброса	Тип отходов	Количество и радиоактивность	Место удаления
Спрингфилдс	Жидкие	$2,5 \cdot 10^6$ м <sup>3</sup> /год; 50 Ки/год $\alpha$ ; 1500 Ки/год $\beta$	Трубопровод к границе приливов и отливов
Кейпен-Херст	Жидкие	$2 \cdot 10^6$ м <sup>3</sup> /год; 1 Ки/год (уран)	Открытый ручей в зоне приливов и отливов
Уиндскейл и Колдер-Холл	Жидкие	$8 \cdot 10^5$ м <sup>3</sup> /год; 90 000 Ки/год $\beta$ ; 40 000 Ки/год Ru; 1500 Ки/год Sr-90; 70 Ки/год Sr-90	Трубопровод в открытое море
Чапен-Кросс (1960 г.)	Жидкие	$3 \cdot 10^4$ м <sup>3</sup> /год; 4,5 Ки/год $\alpha$ и $\beta$ ; 80 Ки/год Sr-90	Трубопровод к границе приливов и отливов
Даунри (1959–1960 гг.)	Жидкие	$1 \cdot 10^5$ м <sup>3</sup> /год; 40 000 Ки/год $\beta$ ; 20 Ки/год Sr-90; 5 Ки/год $\alpha$	Трубопровод в открытое море
Харуэлл	Жидкие	$7 \cdot 10^5$ м <sup>3</sup> /год; 15 Ки/год $\beta$ ; 0,5 Ки/год Sr-90; 0,02 Ки/год $\alpha$	Трубопровод в Темзу



**Рис. 7.2.** Приблизительная зона (заштрихована) в Южном Уэльсе, где регулярно употребляют лавербреу. Этот деликатес готовят из морской водоросли, собираемой вблизи северо-западного побережья Великобритании, где прибывают к берегу радиоактивные отходы, сбрасываемые в море заводом по переработке ядерного топлива, расположенным в г. Виндскейл: **1** – район расположения предприятия ЯТЦ в г. Виндскейл, с которого производится сброс отходов в море; **2** – зона повышенного внутреннего облучения человека за счет потребления морских водорослей (по Э.Дж. Холлу, 1992)

Следует обратить внимание на то, что термины "захоронение" и "хранение" отходов – не идентичные понятия (Закон РФ "Об отходах производства и потребления", 1998).

**Захоронение отходов** – это изоляция отходов, не подлежащих дальнейшему использованию, тогда как **хранение отходов** – это содержание отходов в объектах их размещения в целях их последующего использования, обезвреживания или захоронения.

За всю историю развития атомной промышленности были апробированы сле-

дующие методы захоронения и удаления радиоактивных (как правило, САО и НАО) отходов:

- 1) удаление отходов на дно Мирового Океана;
- 2) удаление в стационарные наземные и приповерхностные хранилища;
- 3) удаление в полости скальных пород;
- 4) закачка жидких РАО в горные породы с большой открытой пористостью (пески, гравелиты, кавернозные известняки и т.д.).

Для высокоактивных отходов (ВАО), а также для хранения ОЯТ (относящегося к категории специальных ВАО) использовались следующие методы хранения и захоронения:

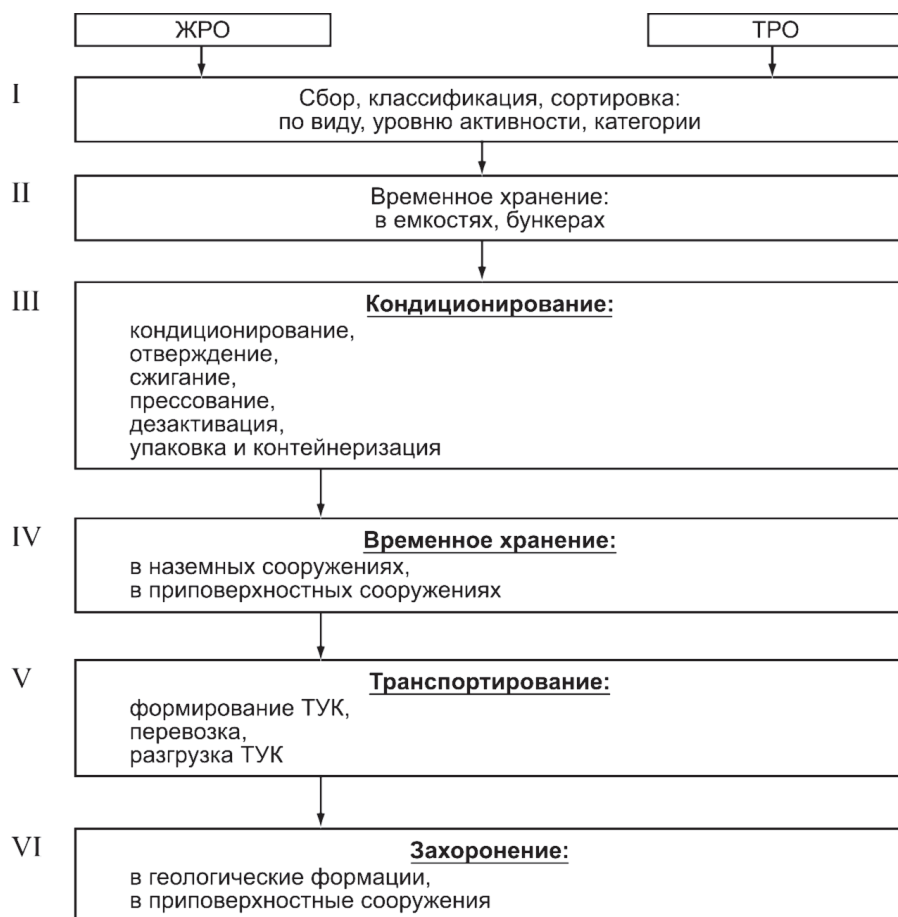
- 1) удаление на дно Мирового Океана;
- 2) хранение в сухих приповерхностных или подземных специально сооруженных хранилищах;
- 3) хранение в водных приреакторных бассейнах либо в автономных водных хранилищах (подземное водное хранилище CLAB);
- 4) закачка жидких ВАО в подземные горизонты горных пород с большой открытой пористостью (в России этот способ получил название закачки в глубокие геологические формации).

Специфичность хранения ВАО и ОЯТ заключается в следующем:

1. Эти продукты из-за присутствия делящихся материалов (урана, плутония и др.) имеют способность к разогреванию до высоких температур (сотни градусов). Высокая радиоактивность способствует радиолизу (разложению под воздействием радиоактивного излучения) воды и других химических компонентов с образованием высоко взрывчатых азотистых, водородных и других соединений. Недоучет этого фактора может привести к весьма сложным аварийным ситуациям с выбросами радионуклидов в окружающую среду. Такой случай был зарегистрирован в 1957 г. в Челябинске-65, когда разогрев отходов в баке привел к парогазовому взрыву большой мощности. Таким образом, хранение ВАО, ОЯТ, а также демонтаж ядерных материалов (плутоний, высокообогащенный уран) требует создания специальных инженерных сооружений, позволяющих контролировать и регулировать температурный режим хранения.
2. Эти материалы образуют специфичное техногенное месторождение, к разработке которого можно вернуться при возникновении потребности или появлении новых технологий.
3. К этим материалам должен быть закрыт несанкционированный доступ, так как они могут послужить основой для производства ядерного и радиологического оружия, проведения террористических актов и шантажа (Макхиджани и др., 1995, 2000; и др.).

Принципиальная концепция обращения с жидкими и твердыми радиоактивными отходами приведена на рисунке 7.3.

При хранении и захоронении радиоактивных отходов используется принцип



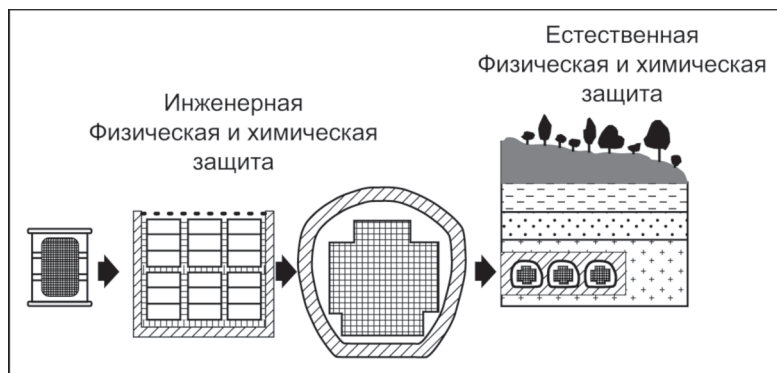
**Рис. 7.3.** Концепция обращения с жидкими и твердыми радиоактивными отходами (Энергетика в цифрах и фактах // Бюллетень ЦОИ, 1992, №4)

многобарьерной защиты, включающий в себя искусственные (инженерные) и естественные барьеры физической и химической защиты (рис. 7.4).

В качестве инженерной, физической и химической защиты выступают:

- оболочка ТВЭЛов или остеклованной массы, оболочка контейнера, накопитель между стеклблоком (например, полиэтилен, который поглощает нейтроны и тем самым снижает тепловой разогрев и уровень радиационного воздействия на материал контейнера);
- оболочка инженерного сооружения (каньон, бункер, траншея, шахта, скважина и т.д.).

В качестве естественной физической и химической защиты используются гор-



**Рис. 7.4.** Принципиальная схема многослойного подземного хранилища высокоактивных отходов. Проект Великобритании

ные породы различных типов, почва, толща воды. Эта мультибарьерная стратегия захоронения РАО должна способствовать их надежной изоляции.

В каждом конкретном случае, в зависимости от типа отходов, их объемов и т.д., используются или планируются для использования те или иные способы захоронения.

Так, например, для временного сухого хранения ОЯТ, по данным О.Г. Лебедева и др. (1992), имеются четыре конструктивных разновидности сухого хранения (в воздухе, углекислом газе, азоте, гелии и т.д.):

- 1) шурфо-скважины на 1–2 кассеты, закрываемые массивной бетонной крышкой;
- 2) бетонные каньоны;
- 3) силос (бетонный цилиндр, устанавливаемый на поверхности земли и закрываемый крышкой);
- 4) металлические контейнеры.

Так, в 1988 г. в мире имелись следующие сухие хранилища:

- шурфо-скважины – 3 места;
- металлические контейнеры – 10 мест;
- силос – 3 места;
- каньон – 7 мест хранения (участков недр).

Проект хранилища ОЯТ в шурфо-скважинах на 10 тыс. тонн топлива в штате Невада (США) представляет собой площадку в аллювиальной почве, на которой по квадратной сетке с шагом 3 м будет расположено 23 500 шурфо-скважин. Поле хранения сможет принимать кассеты с ОЯТ с тепловыделением не более 1 кВт и будет расширяться по мере надобности. Предполагаемый срок хранения – 100 лет. После чего ОЯТ будут либо захораниваться в специально сооруженных к тому времени хранилищах, либо, если появятся приемлемые технологии, перерабаты-

ваться. Ориентировочная стоимость этого самого экономичного способа хранения составляет 289 млн долларов по курсу на 1981 г.

Недостатком такого способа хранения является слабая защищенность от чрезвычайных внешних воздействий. Например, падение авиалайнера на поле хранения с последующим пожаром может привести к выбросу нескольких сотен килограммов радионуклидов из пеналов на поверхность земли и переходу в аэрозольную форму с активностью  $10^3$ – $10^5$  Ки.

Нечто близкое к этому предлагается реализовать в России. Так, сотрудниками ВНИПИ протехнологии и других проектных центров предложен тип хранилища в вертикальных скважинах большого диаметра (СБД), который частично уже реализован в ГУП МосНПО "Радон".

С 1946 г. удаление радиоактивных отходов, переведенных в твердое состояние и упакованных в контейнеры из химически стойких материалов, на дно Мирового Океана осуществлялось весьма длительное время в различных точках земного шара (рис. 7.5).

Сбросы РАО в море осуществляли многие государства, и общий объем радиоактивных отходов, сброшенных в море, составляет более 200 000 Ки (табл. 7.6).

Основными критериями при выборе площадок для сброса радиоактивных отходов являлись: глубина (> 4000 м), отдаленность от основных морских путей, отсутствие районов промышленного лова рыбы, большое расстояние от континентов и островов.

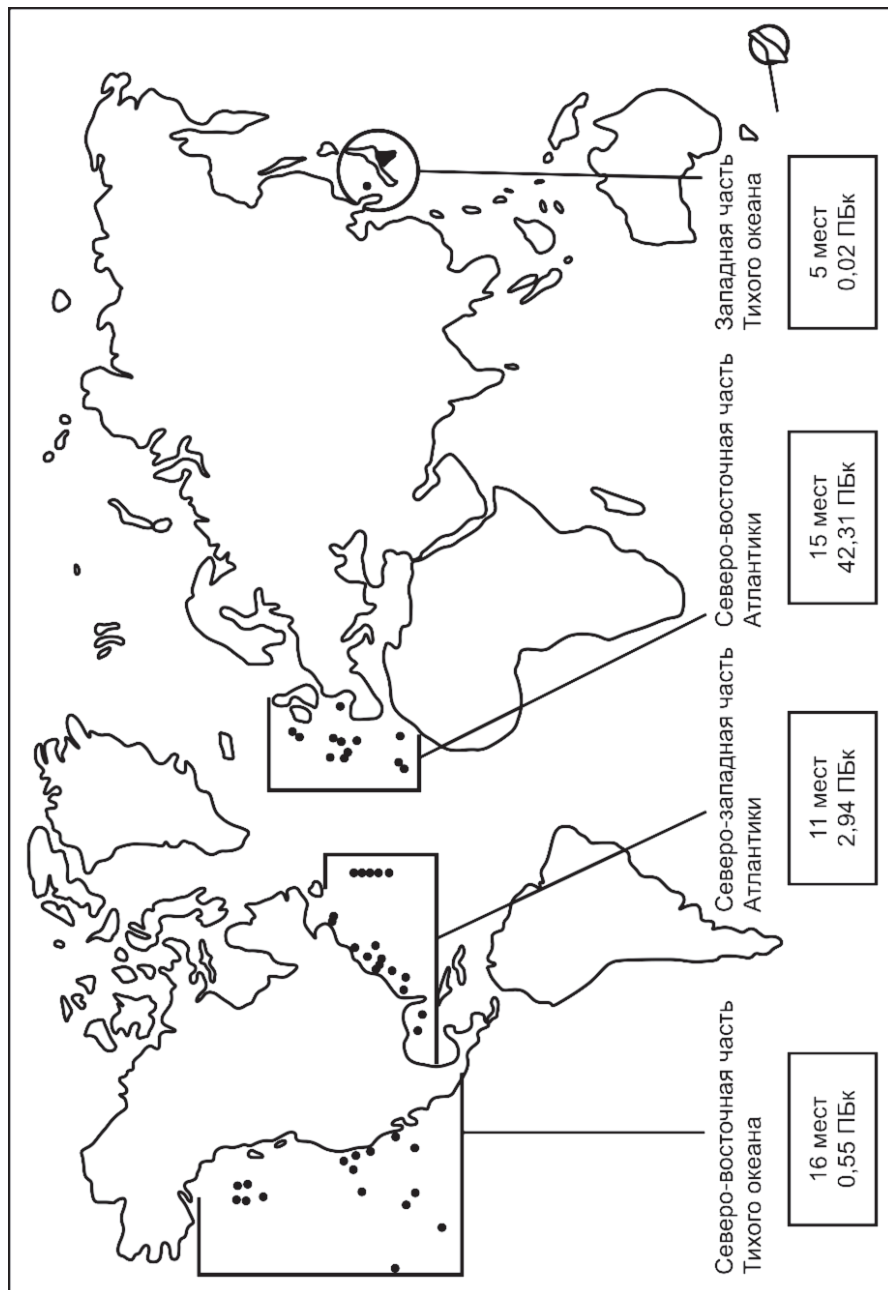
Согласно Лондонской конвенции 1972 г., было выделено две категории высокоактивных материалов: запрещенные и разрешенные для удаления на морские глубины.

К категории запрещенных к удалению были отнесены отходы, если их усредненная удельная активность на массу отходов превышала:

- 1,4 Ки/т для  $\alpha$ -излучателей;

**Таблица 7.6.** Сбросы РАО в море (по Е.К. Горловой и др., 1994)

Страна	Годы	Океан	Число контейнеров (оценка)	Уровень радиоактивности, Ки
США	1946–1969	Тихий	55 389	14 766
	1949–1967	Атлантический	34 083	79 507
Великобритания	1949–1966	Атлантический	117 544	143 200
	1968–1970			
Япония	1955–1969	Тихий	1661	452
Нидерланды	1965–1972	Атлантический	2365	62
Итого:			211 042 контейнера общим весом 99 255 т	263 967



**Рис. 7.5.** Мировое распределение сообщенных мест морских захоронений радиоактивных отходов с низкими уровнями активности (по Д. Калмету и др., 1993)



- 500 Ки/т для  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучателей с периодом полураспада больше 1 года (исключая тритий);
- 80 000 Ки/т для трития и  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучателей с периодом полураспада меньше 1 года.

К категории запрещенных материалов были также отнесены ОЯТ, жидкие радиоактивные отходы, образующиеся в процессе переработки ОЯТ, и отвержденные формы таких отходов.

С 1983 г. этот способ удаления РАО был прекращен, объявленный мораторий действует и в настоящее время.

Россия также практиковала удаление радиоактивных отходов на дно Мирового Океана как в жидком виде, так и в виде твердых радиоактивных отходов и даже отдельных ядерных реакторов с остатками топлива (рис. 7.6).

Общая активность жидких РАО, по имеющимся данным, составляет 24 кКи, в том числе по отдельным морям (Ки):

- Балтийское – 0,2;
- Белое – 100;
- Баренцево – 12 153;
- Карское – 8 500.

Западные исследователи (Т. Нилсен, Н. Бемер, 1994) отмечают, что Советский Союз, несмотря на подписание Лондонской конвенции, производил захоронение РАО севернее 50° широты на небольшой глубине и в пределах континентального шельфа, что являлось нарушением конвенции. Более того, в 1988 г. СССР в анкете участника конвенции указывал, что **никогда не производил захоронений в морях и не собирается этого делать в будущем** (Нилсен и др., 1994).

Практически все специалисты, занимающиеся проблемами обращения с РАО, считают наиболее приемлемой концепцию удаления радиоактивных отходов в глубокие геологические формации.

При этом для обоснования безопасности используется метод аналогий с существованием урановых месторождений в недрах планеты, в т.ч. и таких, на которых протекали ядерные процессы (природный ядерный реактор на месторождении Окло).

Само определение "глубинная геологическая формация" в литературе отсутствует (Лаверов и др., 1991, 1994; и др.). По-видимому, под этим понимают такие глубины захоронения в геологические недра и такие горно-геологические условия захоронения, которые обеспечивают хранение высокоактивных отходов на многие тысячелетия без воздействия на экосферу.

Чаще всего в литературе обсуждаются приемлемые глубины захоронения 500–1000 м, что, прежде всего, определяется фактором экономичности строительства такого рода сооружений (Кочкин и др., 1994).

Реализация данной концепции в практическом плане – весьма ответственное, дорогостоящее и длительное дело.

В таблице 7.7 показана эволюция такой программы в США.

Главной проблемой, которую необходимо решить, является проблема предот-

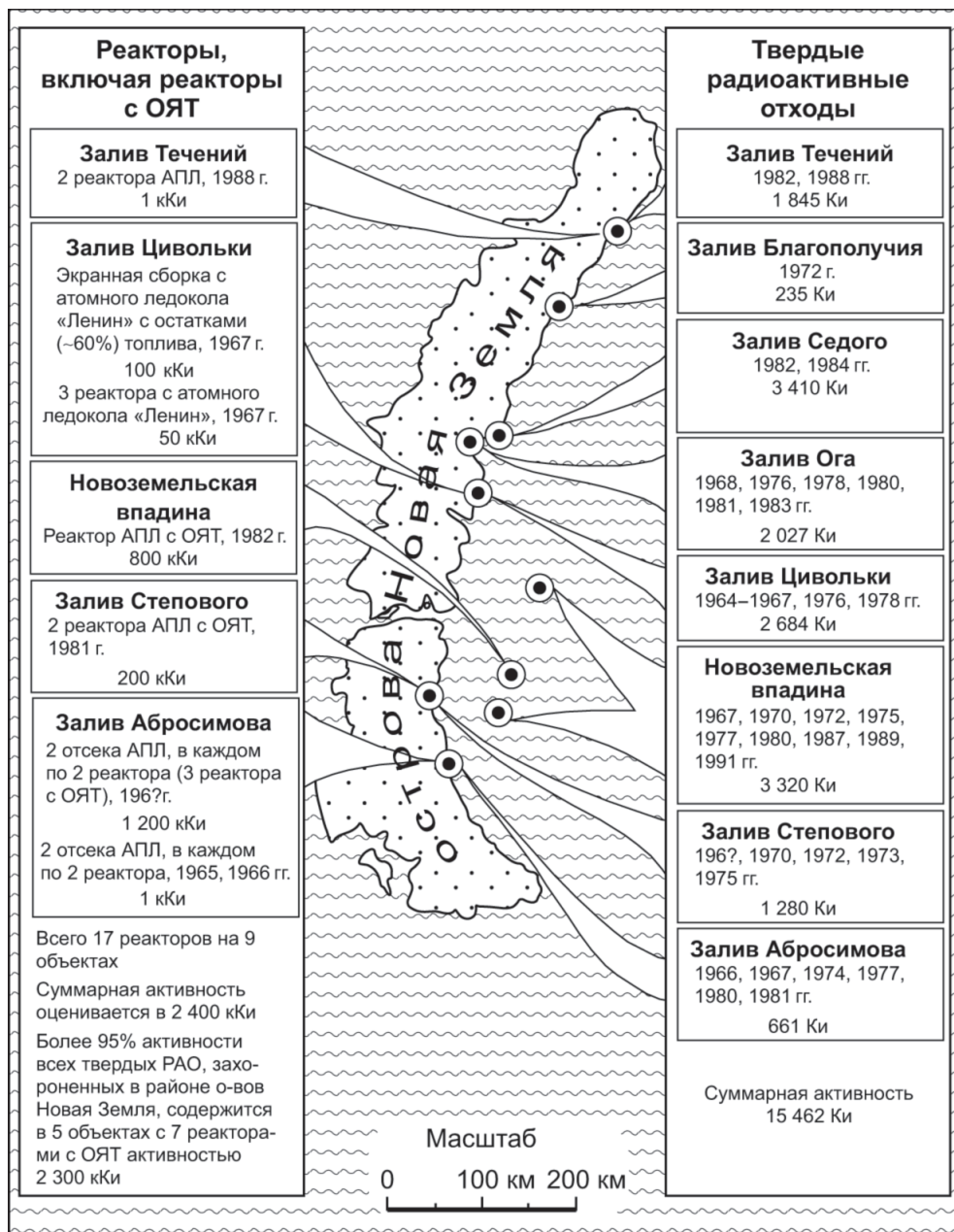


Рис. 7.6. Суммарная активность РАО, захороненных бывшим СССР в Карском море (в районе островов Новая Земля). Все значения радиоактивности приведены на момент затопления объектов (по Е.К. Горловой и др., 1994)

**Таблица 7.7.** Эволюция программы США по удалению высокоактивных ядерных отходов в части выбора приемлемых геологических формаций (по В.П. Копухину и др., 1995)

Год	Этап программы
1957	Национальная академия наук рекомендует изучение соляных месторождений
1963–1967	Проект "соляная шахта", штат Канзас
1968	Начало оценки базальтовой формации в Ханфорде, штат Вашингтон
1970	Предложение о создании опытно-промышленной установки в штате Канзас (соль)
1972	Отказ от площадки в штате Канзас, изучение соляных куполов на побережье Мексиканского залива, начало изучения бассейна Парадокс в штатах Юта и Колорадо
1974	Предложение о строительстве опытной установки по изоляции отходов (WJPP) от военных программ на площадке штата Нью-Мексико (соль)
1976	Начало оценки геологических формаций на полигоне в штате Невада и бассейна Пермиан в Техасе
1977	Начало оценки соляного бассейна Салина Солт в штатах Мичиган, Нью-Йорк и Огайо, а также пород района Пало Дюро
1979	Продолжение работ на площадках WJPP, на полигоне в Неваде, по базальтам в Ханфорде и четырем соляным бассейнам. Начало оценки других (несоляных) горных пород
1980	Завершение предварительного изучения данных по кристаллическим породам
1981	Интенсивное изучение площадок в трех районах посредством буровых работ. Начало широкого национального изучения геологических формаций и их геологических и гидрогеологических свойств
1983	Разрешено хранение военных отходов в коммерческих хранилищах, размещаемых в разных геологических формациях

вращения контакта РАО в какой-либо матрице или контейнере с водой, которая выступает главной транспортирующей средой по переносу радионуклидов в область обитания человека.

Наиболее полно геоэкологический подход к выбору районов захоронения РАО рассмотрен в российской литературе Н.П. Лаверовым и др. (1994), Б.Т. Кочкиным (2005), Г.И. Россманом и др. (2004).

Выбор площадки под строительство ВАО определяется многими факторами. Так, в США, согласно требованиям закона и федеральным правилам, выясняются

117 факторов по оценке площадки, на которой будет вестись строительство такого сооружения (Дикова, 1992), в том числе такие, как:

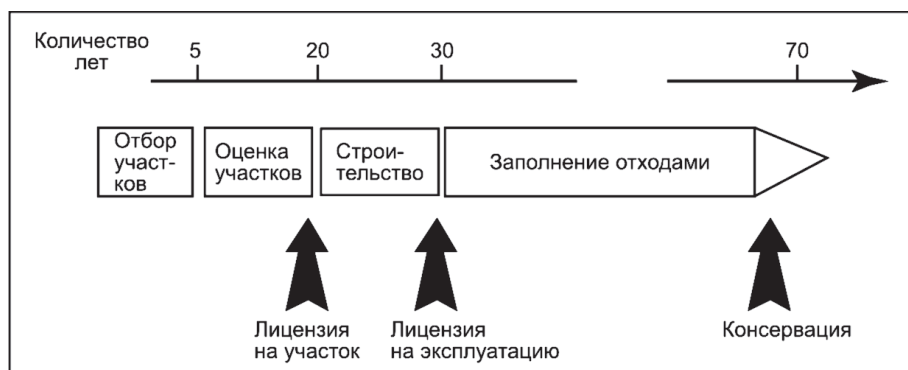
- сейсмическая активность и тектоническая стабильность;
- химический состав вод, интенсивность водообмена, скорость движения водного потока, расстояние до зоны разгрузки подземных вод и ряд других гидрогеохимических показателей;
- наличие типов пород, пригодных для строительства постоянного сооружения, с учетом их экранирующих свойств;
- близость водных и минеральных ресурсов, которые могут вовлекаться в эксплуатацию и могут стать причиной непреднамеренного проникновения человека в могильник в будущем;
- близость к системе национальных парков, населенным пунктам и т.д.

Чтобы избежать неумышленного вторжения в далеком будущем на эту площадку (территорию), предусматривается система постоянных маркеров и памятников для предупреждения будущих поколений о нахождении места захоронения.

Указатели планируется разместить на поверхности участка так, чтобы они были видны с земли и воздуха. Специальные записи будут оставлены в публичных библиотеках, в центрах компьютерной информации, помещены в капсулы и т.д. и будут широко распространены по всему миру, чтобы снизить вероятность утери всех записей об этом месте.

Все эти мероприятия будут спланированы с участием археологов, лингвистов и т.д.

Длительность выбора и обоснования безопасности места заложения таких площадок и последующего строительства весьма значительна и составляет несколько десятков лет (рис. 7.7), а стоимость затрат может составлять сотни млн долларов только на стадии инженерно-геологических изысканий.



**Рис. 7.7.** Временные затраты на реализацию программы создания канадской подземной лаборатории URL и хранилища топлива (по В.П. Копухину и др., 1995)

Даже при наличии такого рода сооружений существует проблема хранения ВАО в твердом состоянии. Прежде всего это обусловлено интенсивным термическим разогревом. Так, по проекту строительства хранилища в районе Юкко-Мадитин, температура вблизи контейнера составит около 230 °С и будет выше температуры кипения воды более 300 лет.

В ряде проектов эта особенность даже используется как фактор последующего уплотнения материала засыпки между контейнерами и стенками сооружения, например, поваренной солью.

Детальный мониторинг геологической среды в экспериментах по созданию хранилища РАО в соляных куполах (соляные толщи считались одной из самых благоприятных для захоронения геологических толщ) показывает, что по истечению 25–30 лет их опытной эксплуатации возникают серьезные проблемы по безопасности их функционирования ("Сообщение..."), что ставит под сомнение возможность создания в них хранилищ для долговременного хранения ОЯТ и облученного топлива, несмотря на то, что соляные толщи обладают многими преимуществами по сравнению с другими типами пород (Кедровский, 2001).

Проблемы безопасного хранения и утилизации ОЯТ, наработанного оружейного и энергетического плутония могут быть в общем виде рассмотрены на примере плутония. Так, американские исследователи (Т. Кохран и др., 1992; А. и Э. Макхиджани, 1995; и др.), обосновывая экономическую неэффективность использования плутония как энергетического сырья, предлагают различные варианты обращения с плутонием:

- "бессрочное" хранение;
- "минимальная доступность" в целях уменьшения возможности использования плутония при создании оружия;
- уничтожение плутония такими методами, как трансмутация, при которых плутоний превращается в продукты деления.

Вариант "бессрочного" хранения предполагает сооружение специальных складов, где плутоний будет храниться в виде, пригодном для изготовления оружия или МОХ-топлива. Именно такой вариант обращения со снятыми с вооружения плутониевыми материалами предполагается в России, в том числе на территории СХК.

Этот вариант обращения с делящимися материалами не отвечает критериям, которые должны быть заложены при обращении с ОЯТ, плутонием, ураном-235.

Приемлемость какого-либо варианта хранения такого рода материалов должна оцениваться, как считают А. и Э. Макхиджани (1995), следующими критериями:

- 1) **аспект безопасности:** переработка, складирование и утилизация должны быть таковыми, чтобы исключить повторное извлечение делящихся материалов (уран-235, плутоний-239 и др.) из продуктов их хранения (отходов, материалов и т.д.);
- 2) **риск аварий:** должна учитываться вероятность катастрофических инцидентов вследствие распыления плутония или случайных ядерных или неядерных взрывов;

- 3) **здоровье, защита окружающей среды и безопасность:** выбирается вариант, соответствующий законам и нормативным актам по охране окружающей среды, здравоохранению и безопасности;
- 4) **временные рамки:** в возможно более короткие сроки превратить плутоний в форму, непригодную для военного пользования;
- 5) **потенциал для стимулирования производства плутония:** выбрать такой вариант утилизации, который бы максимально способствовал предотвращению его получения и использования;
- 6) **стоимость:** этот фактор, безусловно, важный, но второстепенный, если учитывать опасность плутония.

Национальная академия наук США среди вариантов обращения с плутонием наиболее часто рассматривает технологии, обеспечивающие "минимальную доступность" к делящимся материалам, ВАО.

При этом наиболее часто обсуждаются и находят практическое применение методы остекловывания, упаковки в керамическую матрицу и использование смешанного плутониево-уранового оксидного топлива (МОХ-топливо).

Среди вариантов остекловывания рассматривается возможность использования различных видов стекол (боросиликатное, сильнопористое кварцевое, керамическое и др.), в которых может быть три варианта остекловывания:

- остекловывание плутония, смешанного с гамма-излучающими компонентами деления так, чтобы полученные стеклянные блоки соответствовали Стандарту ОЯТ;
- остекловывание плутония с обедненным ураном или иными подобными альфа-излучающими элементами;
- остекловывание плутония, смешанного с нерадиоактивными химическими элементами, близкими по свойствам (например, редкоземельными элементами: европием, самарием и т.д.).

В первом случае образуется продукт высокой степени радиоактивности, требующий специальной технологии защиты от излучения и специальных дорогостоящих технологических линий для извлечения плутония. Во втором и третьем – образуются материалы, из которых извлечение плутония практически невозможно без создания высокотехнологических производств типа СХК или НПО "Маяк".

На сегодняшний день варианты остекловывания ВАО в промышленных масштабах реализуются во Франции и России (НПО "Маяк"). По оценке российских специалистов, реализуемая технология с использованием фосфатного стекла вряд ли будет пригодна для остекловывания плутония в силу низких его качеств и, прежде всего, в связи с его слабой устойчивостью к температурному разогреву, химической устойчивостью при взаимодействии с растворами и из-за ряда других свойств, которые являются весьма важными при длительном хранении РАО (Игнатов и др., 1994, 2005; и др.).

Весьма обнадеживающим материалом для этих целей может быть керамический материал "Синрок" (Synrock – синтетическая порода), предложенный профессором Ринг Вудом, в матрицу которого входят минералы титана (рутил, перов-



скит, голландит, цирконолит) с добавками тантало-ниобатов и некоторых других компонентов.

Считается, что этот материал с его уникальными свойствами наиболее перспективен для создания матрицы с высокой емкостью радионуклидов (особенно плутония и урана), имеющей весьма высокую устойчивость. В Австралии с 1988 г. функционирует опытный завод по выпуску 10 кг препарата "Синрок" в час. Это эквивалентно захоронению РАО, вырабатываемых из 400 т ОЯТ (Игнатов и др., 1994, 2005; и др.).

Затем "Синрок" размещается в специальные канистры из нержавеющей стали и поступает на хранение в специально оборудованные складские помещения.

Обращает на себя внимание тот факт, что даже хорошо спроектированные специальные инженерные сооружения, в которых ВАО хранятся в остеклованной массе, упакованной в контейнеры, размещаются на значительной глубине от дневной поверхности. Например, в районе Селлафилда (Англия) хранилище планируют расположить на глубине ~800 м (Тарараева и др., 1993) или на еще больших глубинах (2000–4000 м) в специально пробуренные скважины большого диаметра либо шахты.

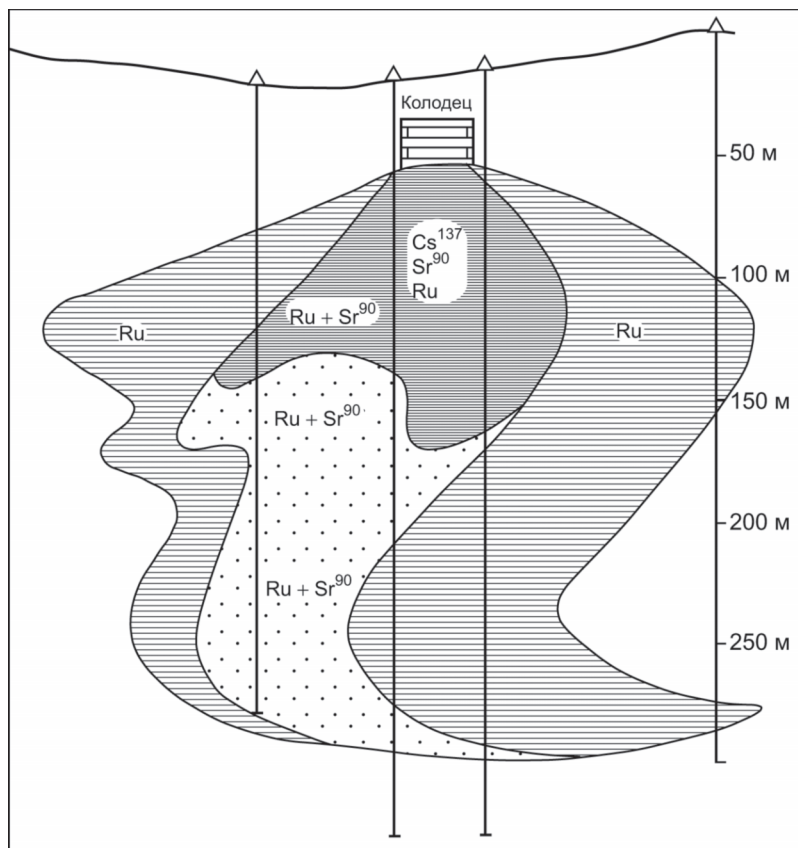
Ни в каких вариантах проектов обращения с РАО для длительного их хранения не рассматривается возможность их закачивания в виде жидких радиоактивных отходов в проницаемые горизонты геологических недр, тогда как в России на сегодняшний день это один из самых распространенных способов обращения с радиоактивными отходами (Дмитровград, Северск, Железногорск).

На первых этапах развития атомной промышленности США начинали реализовывать проект по удалению ЖРО Хэнфордского ядерного комплекса в проницаемые породы. В один из колодцев на глубину около 48 м было закачено около 150 000 м<sup>3</sup> кислотных растворов, содержащих 753 000 Ки по  $\beta$ -радиоактивности грубых продуктов деления (Эйзенбад, 1967). Радиоактивные отходы распространились на площадь равную 8000 м<sup>2</sup> на уровне грунтовых вод. Подвижность радионуклидов в этих условиях была весьма различной (максимальной у рутения-106). Оценить скорость распространения радионуклидов в данном случае не представляется возможным, т.к. неизвестна длительность закачки и горизонтальный масштаб изображения на представленном М. Эйзенбадом рисунке (рис. 7.8).

В последующем эти эксперименты с ЖРО в США были прекращены, хотя практика закачки химических отходов в геологические формации в США широко распространена.

Наш опыт общения с зарубежными коллегами показывает, что российская практика обращения с радиоактивными отходами, реализуемая в ряде предприятий Росатома, представляется им совершенно неприемлемой, тем не менее, остается фактом, что в России идет крупнейший эксперимент по обращению с радиоактивными отходами, который рассматривается рядом специалистов как один из самых перспективных методов захоронения. Действительно, в природе есть аналоги захоронения радиоактивных отходов на миллиарды лет (природные реакторы Окло и др. в Габоне).

Тем не менее, в условиях функционирования такого объекта в непосредствен-



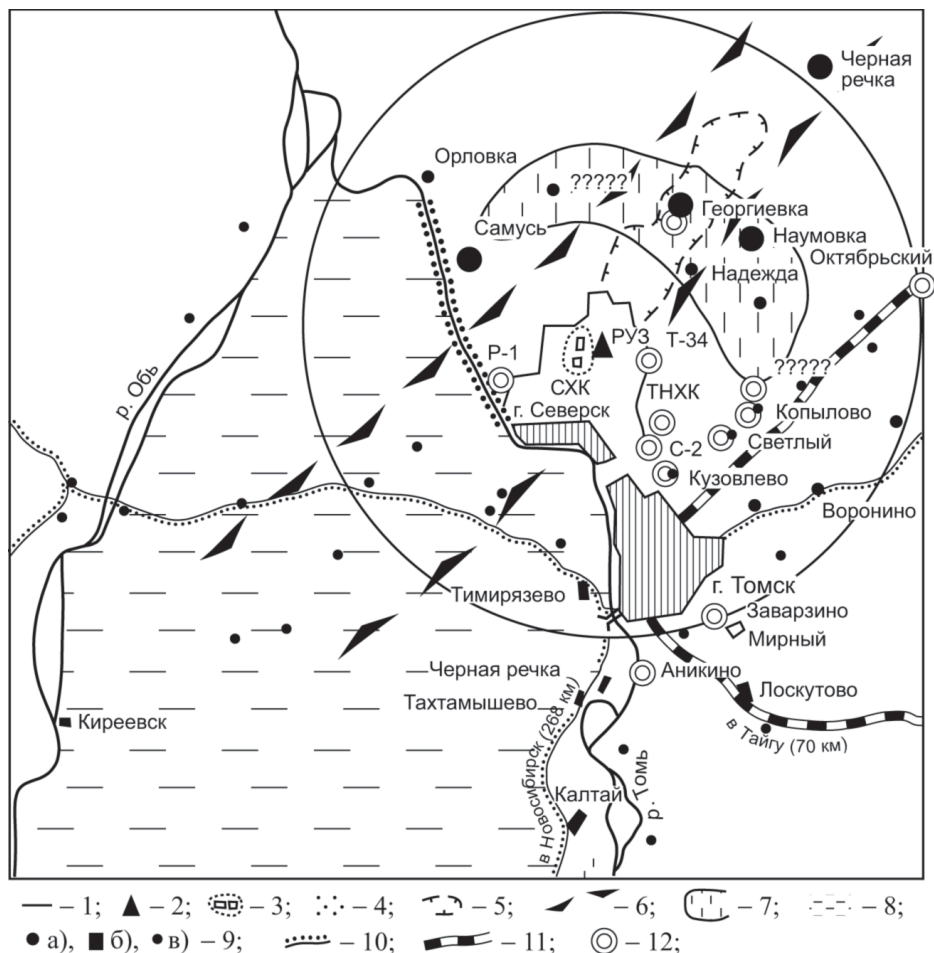
**Рис. 7.8.** Миграция радиоизотопов от колодца, содержащего кислотные радиоактивные отходы (по М. Эйзенбаду, 1967)

ной близости (10–12 км) от Томска, где проживает более 500 тыс. человек, на промышленной площадке Сибирского химического комбината (СХК) проводится один из длительных экспериментов по закачке жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в глубинные геологические формации (рис. 7.9). Общая активность ЖРО (BAO + CAO + HAO) составляет более 1 млрд Ки (Кузнецов, 2003).

Закачка отходов производится в отложения мелового возраста, так называемые "водоносные горизонты" 2 и 3. Эти пласты-коллекторы находятся на глубине 280–460 м, и в данной ситуации их вряд ли можно рассматривать как типичные глубинные геологические формации (рис. 7.10).

От вышележащих палеогеновых водоносных горизонтов, которые являются единственным источником водоснабжения Томска, воды мелового возраста, в которые происходит закачка, отделены так называемым горизонтом "Д", который сложен, по оценкам проектировщиков, глиной мощностью 20–40 м (рис. 7.10).





**Рис. 7.9.** Ситуационная схема обстановки в районе г. Томска:

**1** — территория СХК; **2** — радиохимическое производство; **3** — площадка глубинного (подземного) и поверхностного захоронения ЖРО; **4** — ореол радиоактивного загрязнения воды и донных отложений от сбросов производств СХК по данным АГС-съемки; **5** — контур радиоактивного загрязнения территории от выброса 06.04.93 по состоянию на 20.10.93; **6** — зона повышенного значения МЭД с превышением фона естественного содержания естественных радионуклидов в 1,5–2 раза; **7** — ореол загрязнения поверхностных и подземных вод радионуклидами и сопутствующими им компонентами (нитраты, трибутилфосфаты, гелий, фтор и т.д.); **8** — территория Томского водозабора; **9** — населенные пункты: **а)** — в зоне воздействия СХК, в которых производились комплексные медико-биологические исследования с определением дозовых нагрузок, **б)** — населенные пункты, являющиеся контрольными пунктами для медико-биологических исследований, **в)** — прочие населенные пункты; **10** — автомагистраль Томск–Новосибирск; **11** — однопутная железная дорога; **12** — места отбора биологических проб для изучения накопления в них радионуклидов. Окружностью выделена 30-километровая зона

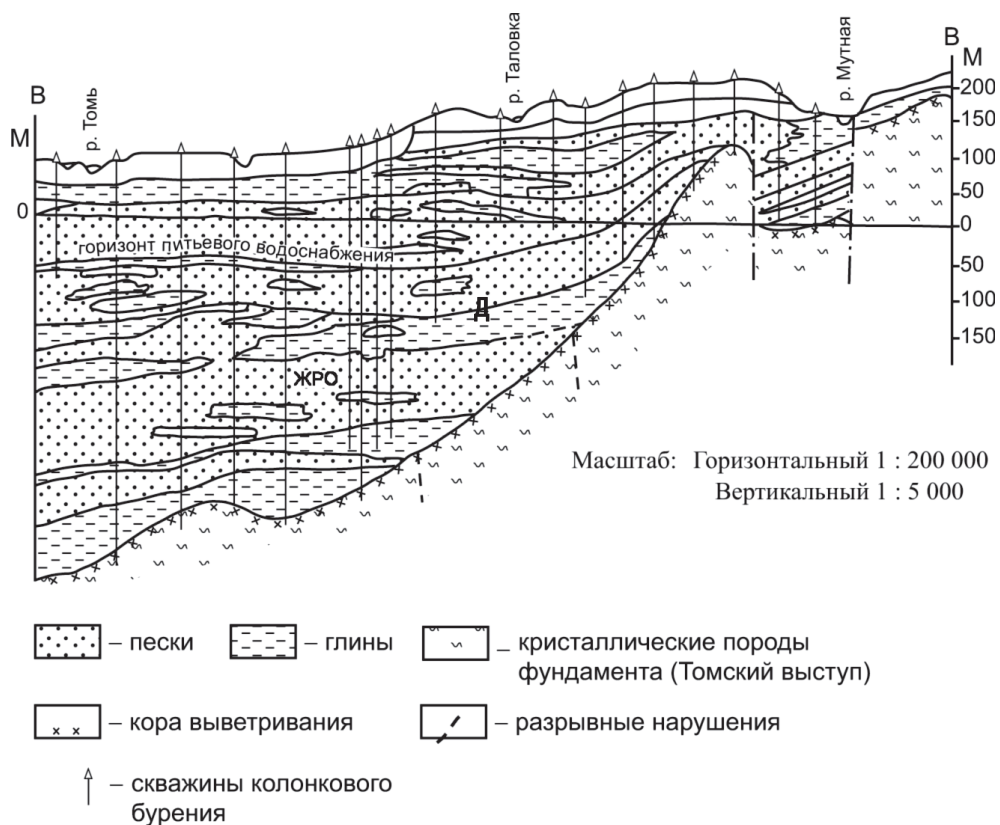


Рис. 7.10. Схематический геологический разрез в районе хранилища ЖРО

Выбор данного способа захоронения проектировщиками (ВНИИПТ) обусловлен:

- 1) асейсмичностью данного региона;
- 2) отсутствием дизъюнктивных тектонических нарушений в породах мезо-кайнозоя;
- 3) наличием непрерывного горизонта глинистых пород (горизонт "Д") морских фракций (люлинворская свита).

Все эти предпосылки, а также моделирование процессов миграции радионуклидов, убеждали людей, принимающих решение о выборе способа и места захоронения ЖРО, что природой созданы максимально благоприятные условия для их закачки (Кедровский, Рыбальченко, Пименов и др., 1991). На момент проектирования хранилища не было известно, что в Обь-Томском междуречьи в непосредственной близости от СХК (15 км) будет развиваться Томский водозабор (см. рис. 7.9).

На сегодняшний день хранилище приняло десятки миллионов м<sup>3</sup> радиоактивных отходов, различных по активности и физико-химическим свойствам. Общая их радиоактивность на данный момент составляет многие сотни миллионов Ки (> 1 млрд Ки, по В.М. Кузнецову, 2003).

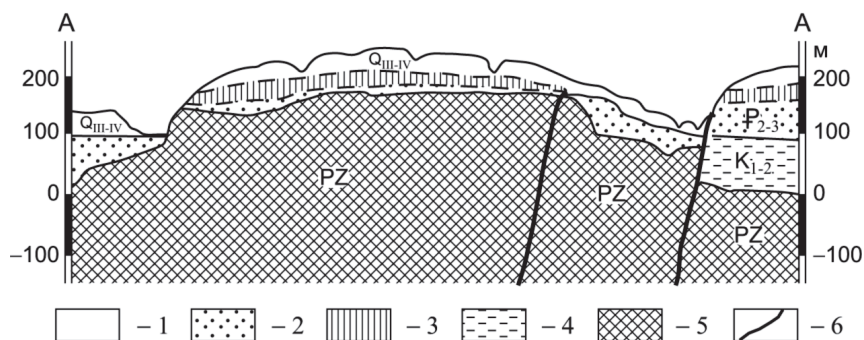
Данный способ захоронения позволил в какой-то мере снять острые экологические проблемы, связанные с хранением ЖРО в открытых прудах-отстойниках, уже занимавших на момент принятия решения о закачке отходов в недра значительные площади и объемы.

По заключению специалистов, ведущих наблюдение за подземными захоронениями ("Решение межведомственного научно-технического семинара" от 27.06.1994 г., Северск), распространение радионуклидов находится в пределах расчетных контуров, локализовано в пределах площадки, и какой-либо гидравлической связи вод горизонтов ЖРО и горизонтов питьевого водоснабжения нет. Реконструкция гидродинамических режимов свидетельствует о благоприятных условиях захоронения. Каких-либо серьезных проблем с его безопасностью не существует, и водозабору г. Томска угрозы в ближайшие 500–1000 лет нет.

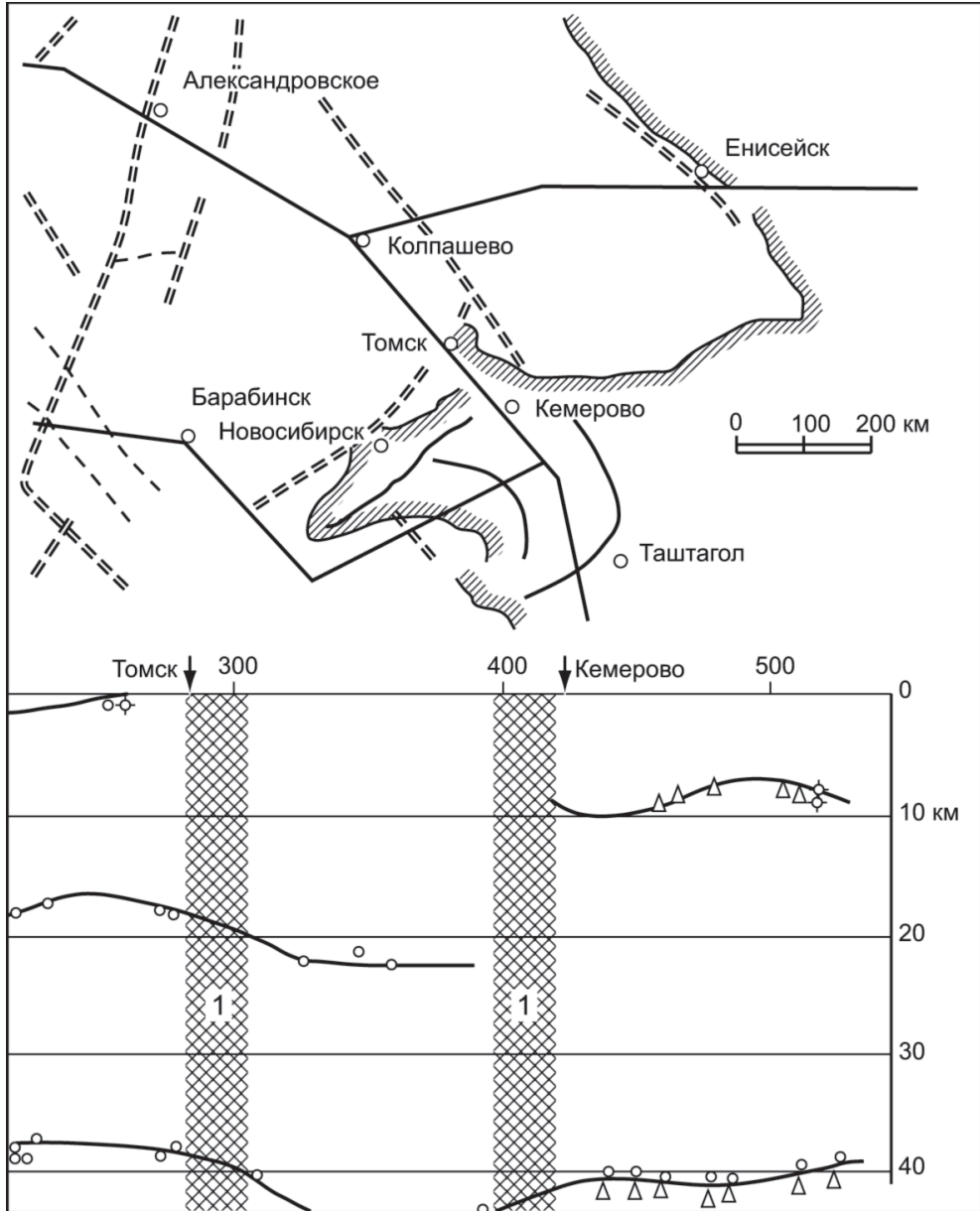
Однако при уточнении особенностей геологического строения района 30-километровой зоны СХК, при получении новой геологической информации и ее обобщении появляется предположение об опасности возможного воздействия подземных закачек ЖРО на Томский водозабор.

Подземное захоронение жидких радиоактивных отходов находится вблизи зоны сочленения Томь-Колыванской складчатой зоны, активно развивающейся в позднем палеозое – раннем мезозое, и Западно-Сибирской плиты, формирование которой происходило в мезо-кайнозойское время.

Сочленение имеет ступенчатый характер и представлено серией разрывных нарушений в палеозойском фундаменте плиты (рис. 7.11). Разноориентирован-



**Рис. 7.11.** Схематический геологический разрез Томь-Яйского водораздела (на широте г. Томска): **1** – четвертичные отложения; **2** – отложения неогенового возраста; **3** – отложения палеогенового возраста (новомихайловская и др. свиты); **4** – отложения мелового возраста (сымская, симоновская и кийская свиты); **5** – породы палеозойского фундамента; **6** – разрывные нарушения (по В.А. Врублевскому и др., 1987)



**Рис. 7.12.** Блоковое строение земной коры по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) (по В.С. Суркову и др., 1974):  
1 – глубинные разломы по данным ГСЗ

ные дизъюнктивные нарушения фиксируются как по данным космоаэродешифрирования, так и по результатам бурения и геофизических исследований, в том числе и глубинного сейсмического зондирования (рис. 7.12). Долины больших и малых рек в большинстве случаев их унаследуют. Возраст разрывных структур установлен как мезо-кайнозойский.

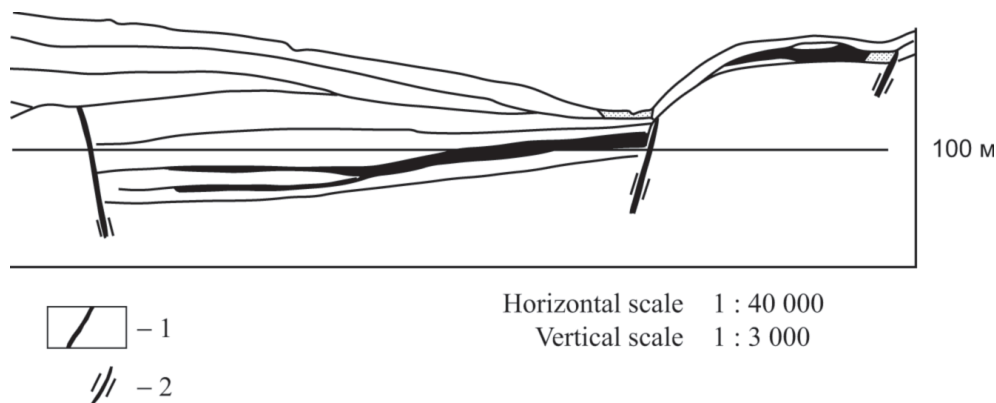
Наличие постмеловых, постпалеогеновых и даже постнеогеновых тектонических разрывов с перемещением пластов горных пород устанавливается по результатам бурения на Туганском *циркон-ильменитовом* месторождении, рудные пласты которого имеют смещение в 30–40 м относительно друг друга (рис. 7.13), а также геологических границ разновозрастных геологических пластов (рис. 7.14). Многометровые смещения угольных пластов установлены при разведке Таловского бурогоугольного месторождения.

Таким образом, схема разрывных нарушений в данном блоке земной коры носит характер сравнительно густой сетки разноориентированных дизъюнктивов, имеющих, преимущественно, северо-восточную, субширотную и, реже, северо-западную (по долине р. Тоть) ориентировки с узлом пересечения в районе промышленной площадки (рис. 7.15, 7.16).

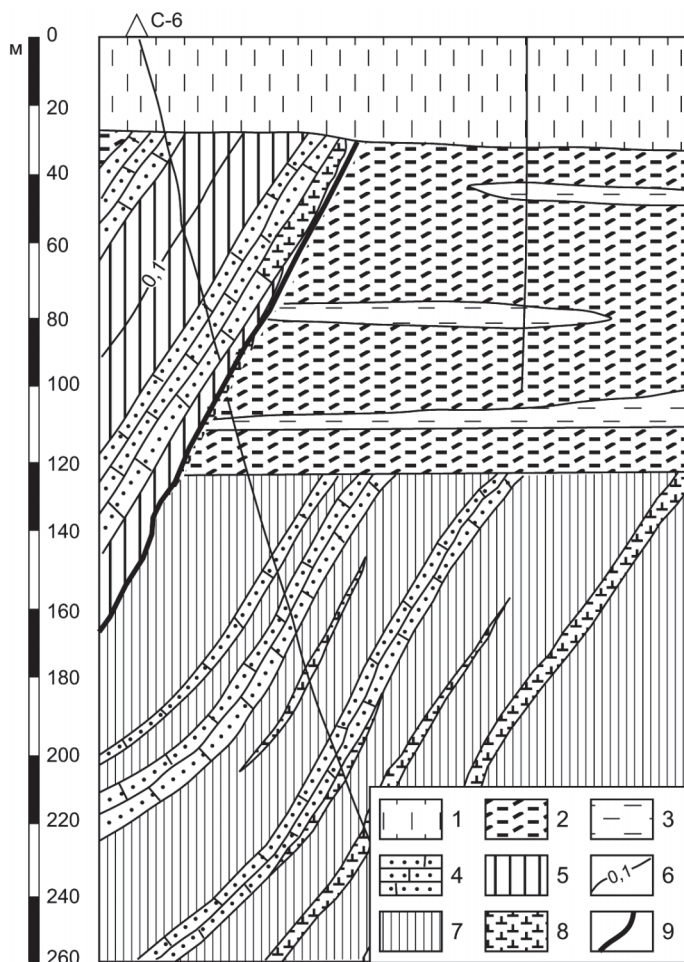
Следует отметить, что уже при выборе площадки для организации хранилища была установлена флексурная зона, прослеживаемая во всех геологических образованиях от палеозоя до четвертичных отложений.

Флексурная зона отчетливо совпадает с зоной, выделяемой по данным аэрогеофизики (рис. 7.15). Тем не менее, этому факту не придали никакого значения, и захоронение организовали практически в зоне ее проявления.

Эти данные опровергают один из основных доводов проектировщиков – отсутствие послемезозойской разрывной тектоники. Она существует, более того, А.Ф. Рубцов отмечает высокую водопроницаемость структур субширотной ори-



**Рис. 7.13.** Геологический разрез Туганского месторождения (в интерпретации д-ра Флетчера, США, 1993): **1** – рудные тела; **2** – разрывные нарушения



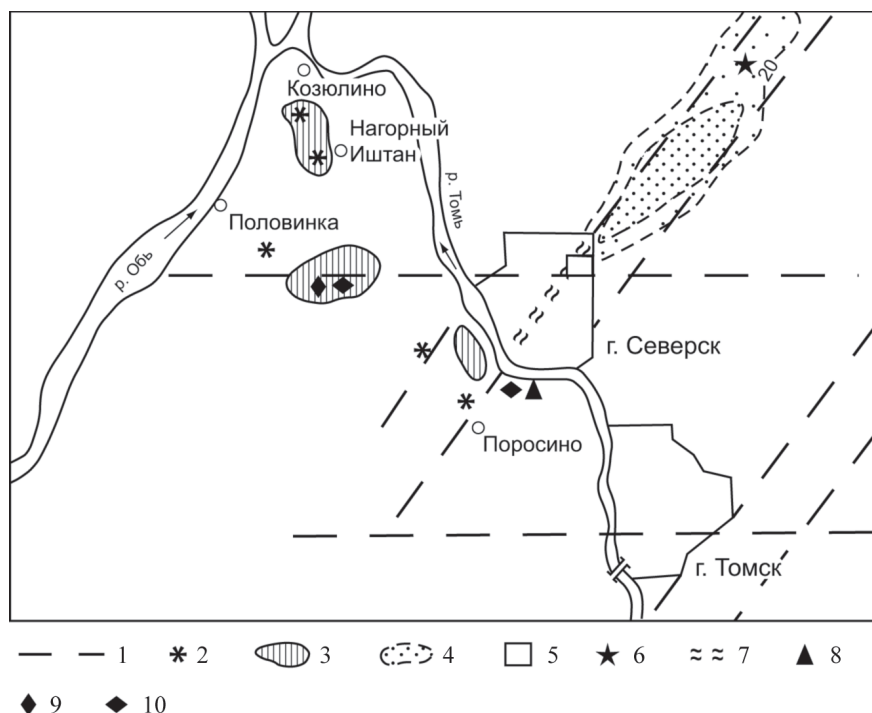
**Рис. 7.14.** Геологический разрез по скважине 6 (Врублевский и др., 1987):  
 1 – четвертичные отложения (Q), глины, суглинки; 2, 3 – симоновская свита ( $K_{25m}$ ):  
 2 – пески, 3 – глины; 4–8 – подломская свита ( $C_{1-2pl}$ ): 4 – песчаники, 5 – аргиллиты  
 углистые, 6 – каменный уголь (цифрой показана мощность пласта), 7 – алевролиты,  
 8 – конгломераты; 9 – взброс

ентировки. По дизъюнктивам наблюдается смещение пластов относительно друг друга с разрывом сплошности.

Не соответствует действительности и тезис о существовании сплошных горизонтов глинистых пород, являющихся водоупорами.

Во-первых, район захоронения находится в зоне смены морских фаций осадочных отложений прибрежно-морскими и континентальными. По разрезам отчетливо можно наблюдать частую смену глинистых пород песчанистыми, наличие





**Рис. 7.15.** Схематическая карта геолого-тектонической и геохимической обстановки в районе г. Томска: **1** – крупные тектонические нарушения, предполагаемые по аэромагнитным данным (съёмка и интерпретация ПГО "Березовгеология", Лященко. и др., 1991); **2** – скважины Томского водозабора с высокими концентрациями хлора (по данным "Восток-бурвода", "Томскнефтьгазгеология", Института ПЖХК); **3** – гидрогеохимические аномалии (по данным Института ПЖХК); **4** – след от выброса 06.04.1993 г. по состоянию на октябрь 1993 г.; **5** – зона захоронения жидких РАО; **6** – скважина ГП "Березовгеология" с признаками цезия-137 и стронция-90 в подземных водах (причина не установлена); **7** – флексурная зона, проявленная в осадочном чехле и фундаменте (по А.А. Лукину); **8** – скважины с концентрацией урана в воде  $n \cdot 10^{-6}$  г/л; **9** – скважина со следами  $^{60}\text{Co}$  в воде; **10** – скважина со следами  $^{137}\text{Cs}$  в воде

окон опесчанивания, резкое уменьшение мощностей глинистых пород и т.д., т.е. геологический разрез оказался весьма гетерогенным (рис. 7.10). Наличие окон опесчанивания фиксируется и методами геофизики (рис. 7.16).

Таким образом, говорить о существовании сплошных горизонтов водоупоров нет достаточных оснований, тем более, что максимальная фациальная изменчивость осадочных пород приходится на район флексурной зоны.

Даже если допустить, что зона закачки ЖРО отделена от горизонта питьевого водоснабжения водоупором достаточной мощности, выдержанным по площади, все равно существует реальная возможность перетока зараженных меловых вод





в палеогеновые отложения. Дело в том, что район закачки ЖРО и водозабора находится в непосредственной близости от Томского выступа, где верхнемеловые и палеоген-неогеновые осадочные породы перекрывают коры выветривания мезозойского возраста.

По мнению д-ра геол.-мин. н. И.В. Гончарова, кора выветривания имеет региональное распространение по всей Западной Сибири и хорошо исследована геологами-нефтяниками, поскольку по причине своей высокой проницаемости является хорошим коллектором нефти и газа. Именно с ней связаны все известные месторождения палеозойской нефти в Томской области.

Из рисунков 7.10 и 7.16 видно, что гидродинамическая связь между двумя горизонтами может осуществляться, минуя глинистый экран через проницаемые палеозойские породы коры выветривания.

Гидрогеохимические показатели подземных вод (минерализация, высокие вариации содержания кислорода и других водорастворимых газов, окислительный характер вод и т.д.) свидетельствуют о том, что район закачки ЖРО представляет собой зону активного водообмена (область питания).

Эти данные свидетельствуют о том, что в районе действия СХК возможно загрязнение палеогеновых вод – источника водоснабжения г. Томска – радионуклидами как с поверхности из прудов-отстойников и аэрозольных выпадений на данной площадке, так и из подземных захоронений ЖРАО.

Потенциальная опасность последних особенно усиливается при неправильных режимах эксплуатации Томского водозабора. Формирующаяся воронка депрессии уже достигла правого берега Томи, тем более, что она усиливается деятельностью двух водозаборов на правой стороне Томи, осуществляющих водоснабжение г. Северска (рис. 7.17).

Интенсивные режимы эксплуатации на водозаборе в междуречье создают условия перетоков воды из отложений мелового возраста (уровень закачки ЖРО) в палеогеновые (уровень питьевого водоснабжения). Об этом уже свидетельствуют гидрогеохимические показатели, установленные Институтом ПЖКХ (г. Томск, В.К. Попов, 1997). Наблюдается отчетливое возрастание в палеогеновых отложениях концентраций ионов хлора и ряда других компонентов, являющихся характерными для вод меловых отложений. Данные гидрогеохимические аномалии пространственно тяготеют к зонам тектонических нарушений, выделяемых по данным аэрогеофизики (рис. 7.15), которые, по результатам бурения, находят отражение в геологических разрезах в виде древних ложбин стока.

В ряде скважин водозабора зафиксированы содержания урана на уровне  $10^{-6}$  г/л при его фоновом содержании  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  г/л. Требуют тщательной перепроверки признаки присутствия (на уровне чувствительности применяемых методов) некоторых техногенных радионуклидов ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ), химических элементов (Ве и др.), для чего необходим комплекс высокоточной аппаратуры, позволяющей исключить случайные ошибки (а таковые, к сожалению, присутствуют), с одновременным анализом в разных лабораториях.

Особое беспокойство вызывают данные по наличию  $^{137}\text{Cs}$  (до  $7,87 \cdot 10^{-10}$  Ки/л) и  $^{90}\text{Sr}$  (до  $1,17 \cdot 10^{-12}$  Ки/л) в подземных водах участка Кантесский, находящегося



Рис. 7.17. Схематическая карта геолого-тектонической и гидрогеохимической обстановки в районе Томского водозабора (Попов и др., 1997)

в 12 км к северо-востоку от площадки захоронения (рис. 7.15) (данные ГПП "Березовгеология". Измерения выполнены в Западно-Сибирском гидрометцентре и отражены в отчете ИПГ (1992) и ежегоднике Гидрометслужбы России в 1993 г.). У нас не вызывает сомнения качество отбора и анализа проб воды. Необходимо комиссионно, с привлечением независимых исследователей подтвердить наличие в водах цезия и стронция, разобраться с природой их появления, а не отмечать факт как недостоверный, что сделала Комиссия Миннауки РФ, оценивая воздействие СХК на окружающую среду в 1993 г. (доклад специальной Комиссии... от 30.12.1993). Возможно, это будет обусловлено поверхностным загрязнением, а не закачками ЖРО. Но это должно быть доказано комиссионно.

Признаки поверхностного загрязнения подземных вод радионуклидами к востоку, северо-востоку от СХК фиксируются и по результатам работ 1993 г., выполненных гидрогеологами Томска (В.А. Зуев и др.), а также по результатам гаммакаротажа скважин, пробуренных и исследованных ГПП "Березовгеология" (М.И. Баженов и др.).

При этом следует отметить, что загрязнение гидросферы до глубины 100–140 м происходит не только радионуклидами (уран, цезий-137, тритий), но и сопутствующими данному производству компонентами (фтор, йод, нитраты и нитриты, фосфаты, в том числе трибутилфосфат, гелий, литий и др.), которые образуют ореалы, пространственно хорошо совпадающие с главенствующей розой ветров, или непосредственно оконтуривают территорию СХК (Шварцев, Зуев, 1994).

С этими данными следует внимательно разобраться и оценить реальную ситуацию, так как в любом случае создается угроза существованию источников питьевого водоснабжения полумиллионного города.

Несмотря на то, что район захоронения относится к асейсмичной области, следует иметь в виду, что землетрясения силой 3–4 балла в г. Томске фиксировались. Так, землетрясение силой 3,5 балла с эпицентром в 180 км на восток от Томска зафиксировано в 1979 г. В 1984 г. ощущался толчок силой 3–4 балла после взрыва ядерного устройства в скважине в Чебулинском районе Кемеровской области, в июне 1990 г. ощущались толчки после землетрясения в районе оз. Зайсан (Казахстан). Ощущались в г. Томске и толчки от Алтайского землетрясения в 2003 г.

Сейсмические подвижки интенсивностью 6–7 баллов фиксировались в районе г. Новокузнецка в начале XX века. А если еще к этому прибавить, что проявлению землетрясений способствует добыча полезных ископаемых из недр (уголь, нефть, вода), а также строительство водохранилищ, то вряд ли можно с достаточной уверенностью считать данный район сейсмически безопасным. Тем более, что в слабо литифицированных породах мезо-кайнозоя даже при слабых толчках могут возникать резонансные процессы, усиливающие подвижки и нарушение сплошности пород.

Об интенсивном проявлении неотектоники свидетельствуют и многочисленные террасы р. Томи, а график неотектонических движений свидетельствует, что район г. Томска поднимается на 0,3–0,4 м за 1000 лет (рис. 7.18).

Сегодня можно констатировать, что в столь напряженном по экологической

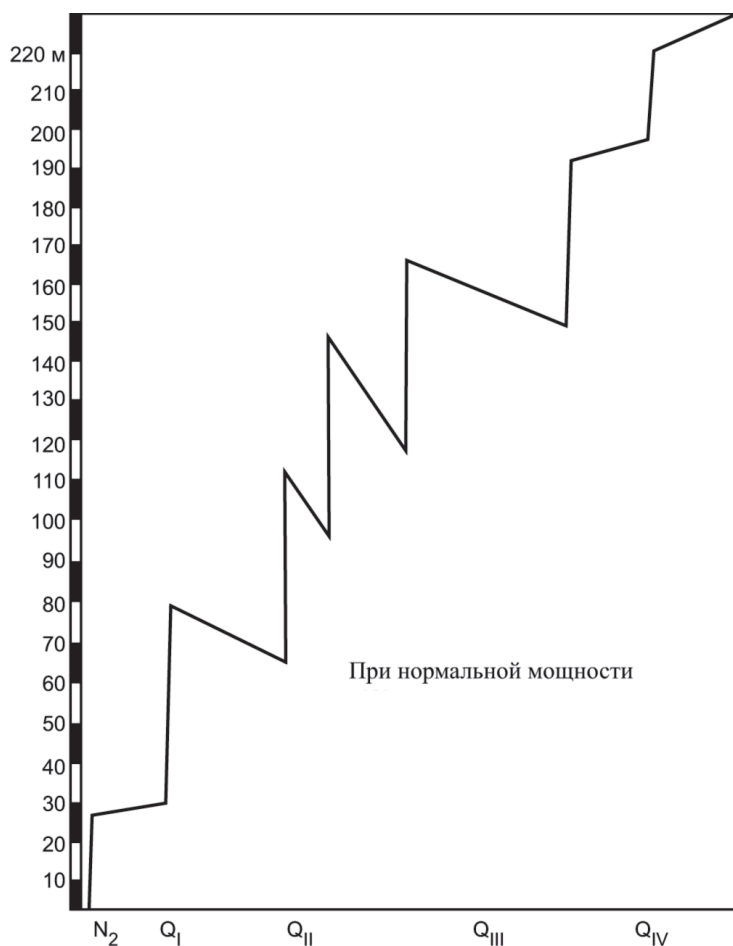


Рис. 7.18. График неотектонических движений в районе г. Томска (по Б.В. Плотникову)

нагрузке районе, где функционируют потенциально высокоопасные производства с захоронением радиоактивных отходов как на поверхности, так и в недрах, где планируется строительство склада для хранения ядерных боеголовок, снимаемых с боевого дежурства, АЭС, заводы по производству МОХ-топлива – отсутствует целостная картина инженерно-гидрогеологических и геологических особенностей строения района в масштабах 1:50 000 и крупнее.

Это не позволяет делать однозначный вывод о пригодности условий района для безопасного захоронения жидких радиоактивных отходов как на поверхности, так и в недрах, тем более о строительстве склада для хранения делящихся компонентов ядерных боеголовок, завода МОХ-топлива, АСТ, АЭС и других потенциально опасных ядерных объектов.

Возможность реализации метода закачки ЖРО в геологические формации должна быть подвергнута самой глубокой и тщательной экспертизе, основанной на принципиально новых геологических данных, так как эта проблема затрагивает интересы всего общества, а не только жителей Томского района.

Автору хорошо известны многочисленные данные по моделированию процессов миграции ЖРО на полигоне СХК по различным сценариям развития событий, и, несмотря на полученные оптимистические выводы по безопасному прогнозу распространения радиоактивных отходов, сохраняются сомнения в том, что полученные расчеты адекватно, как утверждают разработчики моделей, отражают геолого-гидрологические условия территории.

На взгляд автора, в этих моделях не учтены многочисленные нюансы, которые могут сильно изменить существующую и смоделированную картину в зоне закачки ЖРО.

Во-первых, нельзя исключать из внимания влияние действующего Томского водозабора, в котором формируется воронка депрессии при наличии купола репрессии под давлением в зоне закачки ЖРО; во-вторых, отсутствует реальная объективная картина особенностей внутреннего геологического строения территории расположения полигона.

В печати активно обсуждаются и другие альтернативные способы хранения и удаления радиоактивных отходов. К таковым относятся:

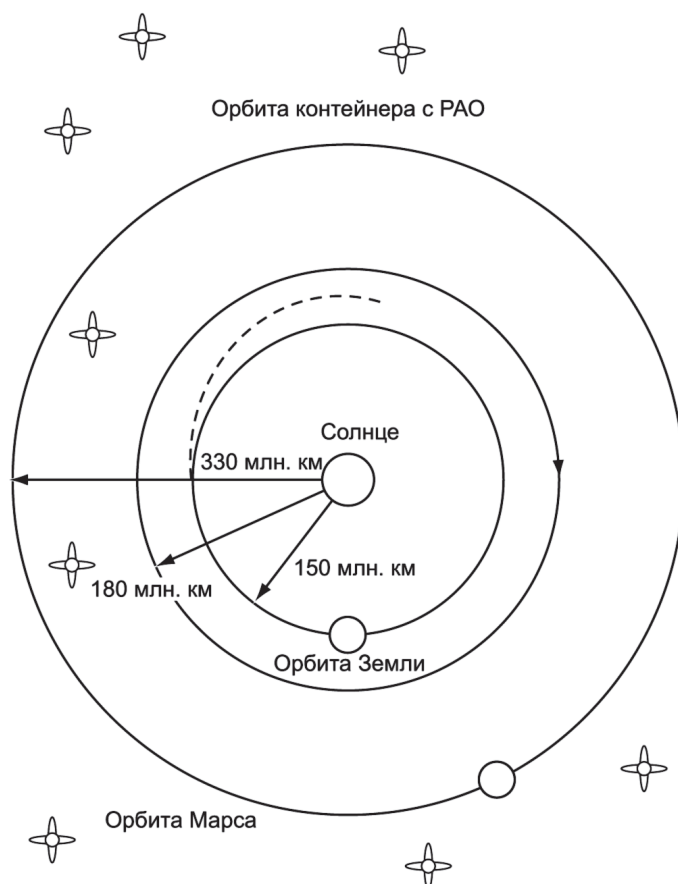
- 1) захоронение ядерных отходов в центре планеты;
- 2) удаление радиоактивных отходов в космическое пространство;
- 3) трансмутация радиоактивных элементов;
- 4) сжигание радиоактивных элементов (урана-238, урана-235, плутония) в котлах внутреннего сгорания с замкнутым топливно-энергетическим циклом;
- 5) захоронение ядерных отходов в глубоководных илах дна Мирового Океана.

При применении способа удаления РАО в центр планеты (проект Института теоретической физики и Института физики Земли) предполагается использовать тепловыделение капсул-контейнеров для расплавления наполнителя (сера, стекло и др.) сверхглубокой скважины и их самоопускание в глубину со скоростью 2–3 м в сутки. Расплавленная масса будет остывать, отгораживая РАО от внешнего мира все более толстым слоем.

Удаление РАО в космос предполагает вывод контейнеров с отходами на орбиту между Землей и Марсом (рис. 7.19). Эта идея была высказана академиком П.Л. Капицей еще в 1958 г. Она обсуждалась на Международной конференции в 1993 г.

Однако до сих пор не решен вопрос о безопасности такого проекта и его экономической рентабельности. По словам Ю. Мосжорина, вице-президента Академии космонавтики и научного руководителя сегодняшнего проекта, теперь эту проблему удалось решить. Даже в случае взрыва космического корабля-носителя радиоактивные отходы не попадут в биосферу Земли. Для захоронения изотопы превращены в окислы и вплавлены в стеклянные пеналы массой 3 кг, которые вставляются для транспортировки в графитовые ячейки.

Проект захоронения увеличивает стоимость электроэнергии лишь на 8%, но



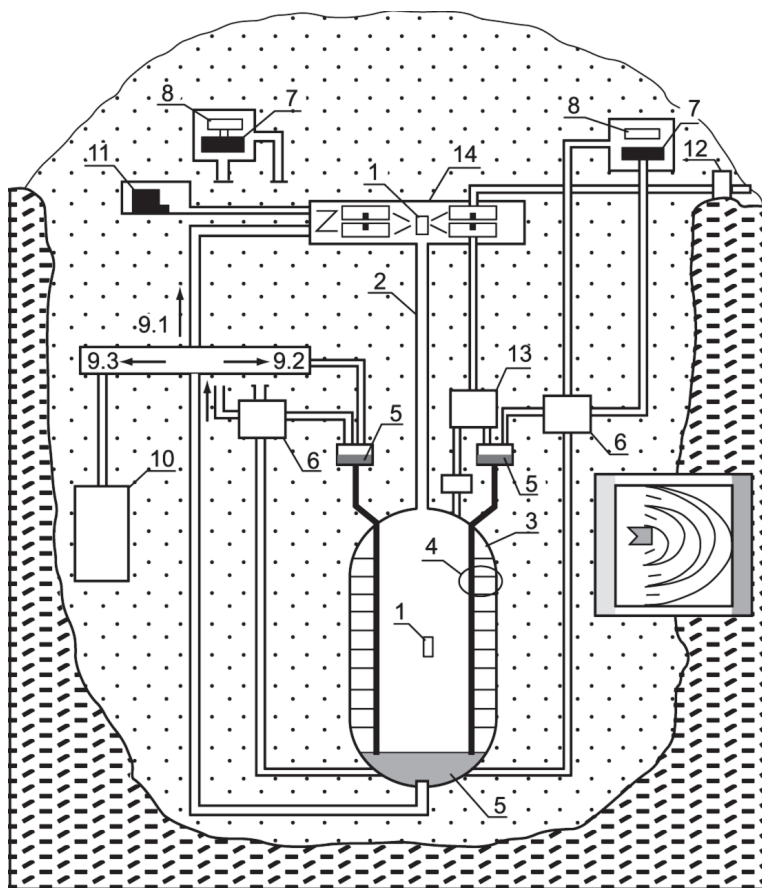
**Рис. 7.19.** Предполагаемое положение орбиты с контейнером РАО в космосе (по Г. Зайченко, 1993)

зато дает коммерческим структурам прибыль в 3,5–5,5 млрд долларов ежегодно за счет конверсии военных космических разработок. Теперь, после теоретических исследований, ученые предлагают провести испытательные полеты, чтобы на практике убедить мировую общественность в безопасности проекта. Для реализации этого метода необходимо решить ряд правовых вопросов.

Трансмутация радионуклидов заключается в их переводе через серию ядерных реакций в нерадиоактивные, стабильные нуклиды. По мнению А.С. Герасимова и др. (1992), трансмутации в первую очередь подлежат долго- и особо долгоживущие радионуклиды:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Te}$ ,  $^{107}\text{Rd}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ .

Для трансмутации радионуклидов необходимо подвергнуть элементы облучению потоком нейтронов. Для их получения необходимы специальные трансмутационные ядерные реакторы.

Утилизация радиоактивных элементов (урана, тория, плутония и др.) способом сжигания была предложена еще в 1950-е гг. Технология сводится к простому решению (Иванов и др., 1994): создать камеру достаточной площади, частично заполнить ее теплоносителем, периодически взрывать в ней дейтериевые энергозаряды, а выделившуюся энергию через теплообменники преобразовывать в электричество и тепло, как в обычных АЭС. Такой котел внутреннего сгорания (КВС) может работать в замкнутом энергетическом цикле (рис. 7.20).



**Рис. 7.20.** Схема котла внутреннего сгорания с замкнутым топливно-энергетическим циклом: 1 – энергозаряд; 2 – канал доставки энергозаряда; 3 – основная стенка камеры; 4 – демпфер; 5 – теплоноситель; 6 – теплообменник; 7 – турбина; 8 – генератор; 9 – разделение делящихся материалов и осколков: 9.1 – уран, плутоний, 9.2 – теплоноситель, 9.3 – осколки деления; 10 – хранилище отходов; 11 – склад урана; 12 – производство дейтерия; 13 – сбор трития и гелия-3; 14 – компоненты энергозаряда (по Г.А. Иванову и др., 1994)

При этом может быть утилизирован и уран-238 (отвальный продукт, скопившийся на заводах, в том числе и на СХК).

Более подробно вероятные подходы к захоронению РАО рассмотрены в работах Г.И. Россмана и др. (2004), В.И. Белоусова и др. (2003), Л.С. Евтерева и др. (1996) и др.



## Глава 8

---

# ВОЗДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОТУ И ЧЕЛОВЕКА

---

С момента открытия радиоактивности исследователи, занимающиеся изучением этого явления, отмечали его специфическое воздействие на природные материалы и биологические ткани. Необходимо помнить, что и открыто явление было благодаря фотографическому воздействию излучения.

В 1899 г. П. и М. Кюри обнаружили способность излучения солей радия преобразовывать кислород в озон, вызывать потемнение и появление мелких трещин в стекле, изменять цвет кристаллов платиносинеродистого и хлористого бария.

В одной из первых переводных работ, посвященных радиоактивности (Г. Хевеши, Ф. Панет. "Радиоактивность", 1925), уже дается обстоятельный анализ воздействия радиоактивного излучения на вещество. При этом отмечаются следующие эффекты:

- ионизация воздуха;
- возбуждение люминесценции;
- образование тепла;
- химическое действие: в твердых телах, в жидкостях (радиолиз), в газах;
- коллоидно-химическое воздействие;
- физическое воздействие.

Многие явления, обнаруженные при взаимодействии излучения с веществом, легли в основу дозиметрии ионизирующего излучения (ионизационные камеры, сцинтилляция, потемнение стекол, интенсивность термолюминесценции и т.д.) либо использованы для решения тех или иных технологических проблем (окрашивание материалов, образование новых высокомолекулярных соединений в органическом синтезе и т.д.). Этим вопросам посвящено большое количество публикаций, есть отдельные направления в науке (радиационное материаловедение, радиационная химия и т.д.).

Но камнем преткновения, своеобразным оселком, на котором проявляется отношение человека к радиации, стала проблема взаимодействия ионизирующего излучения с биологической тканью, а также проблема оценки риска при воздействии радиации на живой организм и, в первую очередь, на человека.

Эта проблема рассмотрена многоаспектно и многократно. По этой теме имеется большое количество публикаций как у нас в стране, так и за рубежом. Установлено, что уже до 1946 г. в мировой литературе по этому вопросу вышло не менее 2 000 работ (Егоров и др., 1950).

Обстоятельный анализ исследований по оценке воздействия ионизирующей радиации на кроветворные органы, выполненных до начала проведения испытаний ядерного оружия, сделан А.П. Егоровым и В.В. Бочкаревым (1950). Они отмечают, что на первом этапе работ по данному направлению (1896–1911 гг.) были получены следующие результаты:

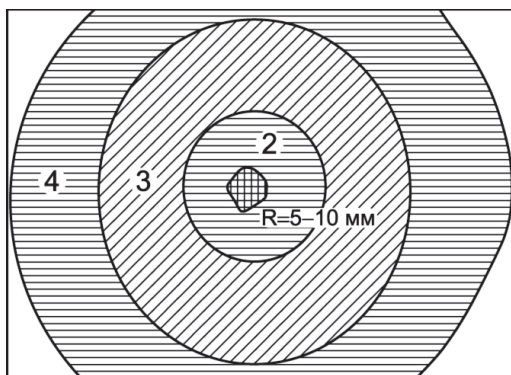
- установлена громадная биологическая активность радиоактивности;
- этот фактор почти немедленно после открытия был применен в терапевтических целях (Россия, США и т.д.), в первую очередь, в отношении болезней крови;
- первые наблюдения установили особенно большую чувствительность кроветворной системы к ионизирующим лучам;
- все наблюдения отмечают угнетение и поражение ионизирующей радиацией клеток и тканей, особенно крови и гонад;
- в этот же период отмечено "вредное" общее действие рентгеновских лучей на персонал, работающий в рентгеновских кабинетах;
- исследования этого первого этапа дали указания на то, что действие нового вида лучистой энергии принципиально отлично от известного и давно действующего на организм комплекса солнечной радиации не только количественно, но и качественно иными биологическими свойствами (Егоров и др., 1950);
- некоторые основные закономерности были установлены уже в первое десятилетие после открытия ионизирующих лучей;
- русская медицина и биология быстро включились в изучение и практическое применение нового фактора.

Итак, уже в начале своего триумфального шествия влияние явления радиоактивности на биологические ткани рассматривалось в двух аспектах: как факторы **негативного** и **позитивного** воздействия на биологические образования.

Так, негативное воздействие от солей радия выражалось в образовании ожогов и язв на коже, кожного рака и т.д.

Эти же результаты использовались и как позитивный фактор воздействия радиоактивного излучения на биологические ткани. Излучение радия стали использовать для лечения кожных заболеваний, рака, как препарат улучшающего и болеутоляющего действия при подагре и ревматизме.

Более того, была сделана попытка лечения лейкопролия, т.к. внутривенное введение радиоактивных растворов приводило к уменьшению количества лейкоцитов.



**Рис. 8.1.** Схема эксперимента А.А. Дробкова: **1** – источник излучения (кристалл соли урана); **2** – зона смерти (зона отсутствия роста); **3** – зона сильно подавленного развития; **4** – зона стимуляции роста культуры

Проводимые в этом направлении исследования чаще всего фиксировали какие-либо негативные изменения и реже – позитивные.

Т.А. Надсон уже в 1920 г. установил, что воздействие излучений радона и радия приводит к структурным изменениям в протопласте дрожжевых, грибковых и растительных клеток. При этом отмечалось, что на высокие дозы облучения от радона прежде всего реагирует вакуоль, в конечном итоге клетка погибает.

Опыты, проведенные в 1930-е гг., показали влияние радиации на интенсивность развития азотобактера и повышение его азотфиксирующей способности.

Воздействие радоновых вод на развитие растений изучал профессор ТГУ В.П. Чехов (1936).

Уже в это время было установлено, что разные виды живых организмов обладают различной чувствительностью к одним и тем же дозовым нагрузкам.

Было отмечено (Дробков, 1957), что различные виды излучения ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) воздействуют на организмы по-разному. Так, например, образование азотсваивающих клубеньков у бобовых отмечалось только тогда, когда присутствовали альфа-излучающие компоненты радиоактивного излучения.

Исследования А.А. Дробкова по развитию клубеньковых бактерий вокруг источника радиоактивного излучения в начале 1940-х гг. убедительно показали, что радиоактивное излучение одновременно может быть смертельно губительным и в то же время стимулирующим их рост. Его влияние определяется дозой нагрузки излучения на бактерии (рис. 8.1).

Масштабы действия ионизирующего излучения на внешнюю среду различны (табл. 8.1) и оцениваются исследователями по-разному. В таблице 8.2 приведена информация по некоторым видам воздействия на человека в областях с высоким уровнем фонового радиоактивного излучения.

Многочисленные исследования биологов, медиков, физиков (Стернгласс, 1982; Штреффер, 1972; Когалл, 1986; Кузин и др., 1981; и др.) дали возможность пред-

Таблица 8.1. Действие ионизирующих излучений на внешнюю среду (по Р.Б. Плэтту, 1968)

Источник	Тип излучений	Продолжительность облучений	Доза внешней среды	Вторичная наведенная активность	Действие огня и взрыва	Общая территория, подверженная воздействию	Прямые эффекты	Включение радиоизотопов в миграцию
Естественная (фоновая) радиация	$\alpha, \beta, \gamma$	Несколько миллиардов лет	0,1–0,5 Р/год	Нет	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Обычно во внешнюю среду излучение не высвобождается								
Медицинское и профессиональное облучение								
Гамма-поля с $^{60}\text{Co}$ (до 4000. кюри)	$\gamma$	Хроническое, несколько лет	До нескольких тысяч Р/год	Нет	Нет	Сотни гектаров	Есть	Нет
Реакторы с защитой	$\gamma, n$	Прерывистое	До величин, равных нескольким фоновым	Незначительная	Нет	Несколько гектаров	Нет	Незначительное
Реакторы без защиты	$\gamma, n$	Прерывистое	До 100 000 Р/ч	Есть	Нет	Сотни гектаров	Есть	То же
Выбросы реакторов	$\alpha, \beta, \gamma$	Непрерывное	Выше фоновой	Нет	Нет	Сотни км <sup>2</sup>	Нет	Есть
Сброс отходов	$\alpha, \beta, \gamma$	Непрерывное	Незначительно выше фоновой	Нет	Нет	Сотни гектаров	Нет	Возможно

Продолжение таблицы 8.1

Аварии	$\alpha, \beta, \gamma$	Острое	До нескольких тысяч Р/ч	Нет	Есть	Несколько гектаров	Есть	Нет
Ядерные испытания	$\alpha, \beta, \gamma$	Острое	До нескольких миллионов Р/ч	Есть	Есть	Сотни км <sup>2</sup>	Есть	Нет
Радиоактивные осадки после аварий и ядерных испытаний	$\alpha, \beta, \gamma$	Хроническое, тысячи лет	До величин, равных нескольким новым фоном	Нет	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Ядерная война	$\alpha, \beta, \gamma$	Острое	До сотен миллионов Р/ч	Есть	Есть	Тысячи км <sup>2</sup>	Есть	Нет
Радиоактивные осадки в ядерной войне	$\alpha, \beta, \gamma$	Хроническое, тысячи лет	До нескольких Р/ч	Нет	Нет	Вся Земля	Есть	Есть

**Таблица 8.2.** Изменения проявления раковых и других болезней в областях высокого естественного фонового излучения (по ECRR, 2003)

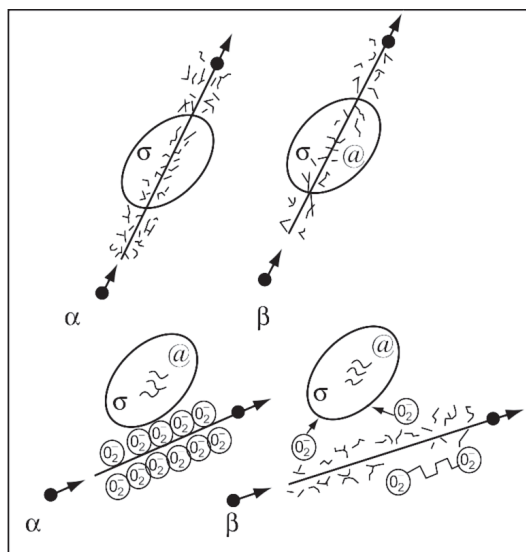
Страна	Число исследованных	Доза	Увеличение раковых клеток	Изменение хромосом
Австрия	122	1–4 мГр $\alpha$ ( $\gamma$ ); 0,1–16 мГр $\alpha$ ( $\alpha$ )	спрогнозировано	да
Финляндия	27	радон в воде	не исследовано	да
Айова	111 городов	$^{226}\text{Ra}$ 4pCi/l; контроль	24%, рак кости	да
Бразилия	12 000	Monazite; 6,4 мЗв в год	нет	да
Керала, Индия	70 000	4 мГр $\alpha$	спорно	да
Яджиянг, Китай	70 000	3–4 мЗв в год	малозначительно	да
Британия	1 600	$\gamma$ -фон	43% (132% – рак желудка)	не исследовано
Айова	28 городов	$^{226}\text{Ra}$	68% и более, рак легких	да
Япония	вся местность	$\gamma$ -фон + 0,15 мГр	рак желудка и печени	не исследовано
Шотландия	вся местность		60% и выше, лейкемия	–

ставить механизмы воздействия ионизирующего излучения (рис. 8.2). При этом однозначно просматривалось различие воздействия разных типов ионизирующих частиц на биологические объекты (рис. 8.3).

При этом повреждения могут происходить на разных уровнях биологической организации (табл. 8.3).

При прямом действии молекулярные связи разрушаются непосредственно в структуре, которая служит мишенью для выбитых электронов. Прямое воздействие происходит очень быстро и является главной причиной повреждения ДНК в ядрах клетки (разрыв связей двойной спирали молекулы ДНК и т.д.).

При косвенном действии вред биологическому объекту, служащему мишенью, наносят радиационно-способные химические группы, которые диффундируют от места образования к мишени (Стернгласс, 1982). При этом возникает весьма токсичный ион  $\text{O}_2^-$  или радикал перекиси, который способен инициировать химические реакции, приводящие к окислению фосфолипидной мембраны клетки и возникновению клеточных мембранных эффектов, хорошо исследованных и описан-

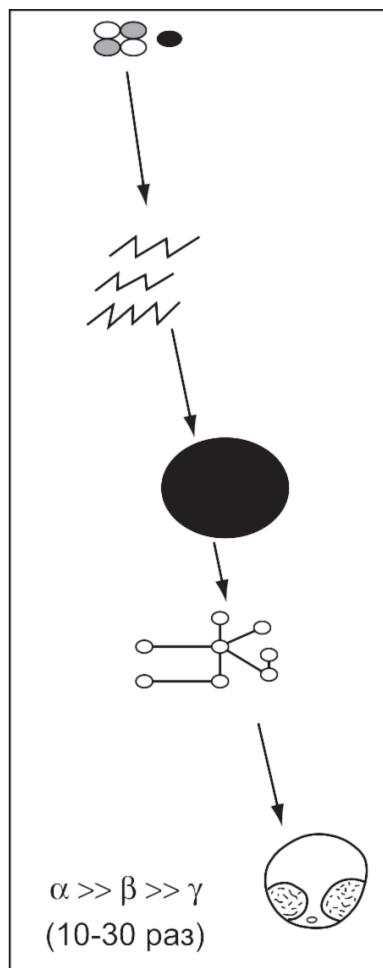


**Рис. 8.2.** Основные виды биологического действия ионизирующих частиц (по Э. Стерн-гласу, 1982). Прямое физическое (пулеобразное) действие на живые клетки. Косвенное действие (химическое) на живые клетки через образование свободных радикалов  $O_2$

**Таблица 8.3.** Некоторые виды радиобиологических повреждений у млекопитающих (по Дж. Когаллу, 1986)

Уровень биологической организации	Важнейшие радиационные эффекты
Молекулярный	Повреждение макромолекул – ферментов, РНК, ДНК и воздействие на обменные процессы
Субклеточный	Повреждение клеточных мембран, ядер, хромосом, митохондрий и лизосом
Клеточный	Подавление деления клеток, гибель клеток, злокачественная трансформация
Ткани, органы	Нарушения таких систем, как центральная нервная система, костный мозг, кишечный тракт могут привести к гибели животных, возникновению злокачественных опухолей
Целое животное	Смерть, радиационное сокращение жизни
Популяции животных	Изменение генетических характеристик вследствие генных и хромосомных мутаций у индивидуумов





**Рис. 8.3.** Воздействие ионизирующего излучения на ткани организма (по "Радиация. Дозы...", 1988):

**Заряженные частицы.** Проникающие в ткани организма альфа- и бета-частицы теряют энергию вследствие электрических взаимодействий с электронами тех атомов, близ которых они проходят. (Гамма-излучение и рентгеновские лучи передают свою энергию веществу несколькими способами, которые, в конечном счете, также приводят к электрическим взаимодействиям).

**Электрические взаимодействия.** За время порядка десяти триллионных секунды после того, как проникающее излучение достигнет соответствующего атома в ткани организма, от этого атома отрывается электрон. Последний заряжен отрицательно, поэтому оставшая часть исходно нейтрального атома становится положительно заряженной. Это процесс называется ионизацией. Оторвавшийся электрон может далее ионизировать другие атомы.

**Физико-химические изменения.** Свободный электрон и ионизированный атом обычно не могут долго пребывать в таком состоянии и в течение следующих десяти миллиардных долей секунды участвуют в сложной цепи реакций, в результате которых образуются новые молекулы, включая и такие чрезвычайно реакционноспособные как "свободные радикалы".

**Химические изменения.** В течение следующих миллионных долей секунды образовавшиеся свободные радикалы реагируют как друг с другом, так и с другими молекулами и через цепочку реакций, еще не изученных до конца, могут вызывать химическую модификацию важных в биологическом отношении молекул, необходимых для нормального функционирования клетки.  $O_2^-$  – радикал-перекись, токсичный ион.

**Биологические эффекты.** Биохимические изменения могут произойти как через несколько секунд, так и через десятилетия после облучения и явиться причиной медленной гибели клеток или таких изменений в них, которые могут привести к раку.

ных в литературе А. Петко (в других транскрипциях – Петкау (Petkau)), Т. Стокке (Т. Stokk), Э. Стернглассом (1982), Е.Б. Бурлаковой и др. (1957, 1959; и др.).

Возникающие при ионизирующем излучении кислородные эффекты весьма подробно рассмотрены в литературе (Эйдус и др., 1984; и др.).

Следует отметить, что токсичные кислородные радикалы могут дезактивироваться при столкновении с другими возбужденными молекулами и нейтрализоваться в присутствии молекул-примесей.

Этим объясняется сложность оценки воздействия того или иного вида излучения на биологические системы, т.к. на биологическое действие дозы ионизирующей радиации может значительно влиять концентрация так называемых "радио-защитных" молекул или радиопротекторов (Стернгласс, 1982, со ссылкой на D. Lea, 1962; Тимофеев-Ресовский и др., 1981).

Кроме того, А.М. Кузин и др. (1981) выделяют опосредованное действие излучения, при котором вред биологическому объекту оказывается через действие активированных (за счет прямого и косвенного воздействия ионизирующего излучения) органических молекул и их радикалов.

При действии ионизирующего излучения на ДНК в ее молекуле возникают (Кузин и др., 1981; Коглл, 1986; и др.):

- одиночные разрывы;
- двойные разрывы;
- частичная денатурация в результате распада n-водородных мостиков;
- радиационное изменение оснований;
- отщепление оснований;
- образование сшивок;
- распад дезоксирибозы.

При облучении белков происходит разрыв водородных связей, сульфгидрильных мостиков и т.д. При этом происходит повышение чувствительности к температуре, рН, действию ионов. Меняются их растворимость, оптические свойства и т.д. Изменяются биологические свойства белков, такие как антигенная иммунологическая специфичность, каталитическая активность и т.д.

При облучении ферментов происходит их инактивация с потерей своих функций.

Действие ионизирующего излучения на хромосомы (молекула ДНК + белки) приводит к многообразным нарушениям (хромосомным абберациям) их структуры. Основными из них являются (Когалл, 1982):

- межхромосомные обмены, когда взаимодействующие повреждения возникают в разных хромосомах;
- внутрехромосомные обмены, когда повреждения находятся в одной хромосоме, в том числе межплечевые и внутривплечевые обмены;
- нарушение непрерывности ("разрыв") хромосом;
- утрата (деление) участков хромосом.

Радиационные поражения на молекулярном и субклеточном уровнях зависят от мощности дозы и величины ЛПЭ (качество ионизирующего излучения).

Воздействие ионизирующего излучения на биоту и на человека может носить *соматический* и *генетический* характер.

*Соматическое* воздействие выражается в осложнении на субклеточном, кле-

точном и тканевом уровне, но не передается по наследству, то есть радиационное воздействие не затрагивает генетический код и половые хромосомы.

Оно выражается в нарушении роста и развития организма, его преждевременном старении, ослаблении иммунной системы и, как следствие, развитии различных иммунозависящих заболеваний, бесплодия и т.д.

*Генетическое* воздействие приводит к изменению наследственного материала и при радиационном воздействии на половые хромосомы или зародышевые клетки проявляется прежде всего на молекулярном и геномном либо на субклеточном уровне.

В результате этого могут происходить генетические мутации. Их индикаторами при радиационном воздействии могут быть: изменение соотношения полов при рождении; частота появления врожденных пороков развития; смертность новорожденных; количество новорожденных; вес при рождении и в 9 месяцев (Вредное действие..., 1959).

Они обуславливают возникновение генетических заболеваний (гипотония, припадки, умственная отсталость, пороки сердца, почек и т.д.).

Детальное рассмотрение последствий радиационного воздействия на молекулярном и субклеточном уровнях с появлением хромосомных aberrаций, микрорповреждений, точечных мутаций проведено в работах Дж. Гофмана (1994) и др.

Многочисленными исследованиями радиобиологов показано, что ионизирующее излучение вызывает не только ранние (острые) повреждения (ожоги, выпадение волос, кровотечения, помутнение хрусталика глаза и т.д.), но и является причиной отдаленных (поздних) эффектов.

К отдаленным эффектам воздействия радиации относят, по мнению Дж. Когалла (1982), следующие эффекты:

- генетические;
- тератогенные;
- канцерогенные.

Отдаленные последствия могут быть весьма многообразны и имеют свои специфические особенности. Так, Дж. Когалл (1982) описывает специфические отдаленные последствия воздействия на глаза, кожу, соединительную ткань, легкие и т.д. Для каждого типа тканей и органа существуют свои пороговые дозы, при которых радиационный эффект может иметь отдаленные последствия, которые зависят от величины ЛПЭ.

Из вышеизложенного краткого рассмотрения воздействия ионизирующего излучения на биологические объекты следует, что любой вид ионизирующего излучения ( $\gamma$ -кванты,  $\alpha$ - или  $\beta$ -частицы, нейтроны и т.д.) оказывает то или иное воздействие на живое вещество и представляет определенную опасность.

На этом основана так называемая *беспороговая гипотеза* эффекта воздействия ионизирующего излучения на организмы.

Согласно этой международно признанной гипотезе, любой, сколь угодно малый, уровень облучения обуславливает определенный риск возникновения отдаленных стохастических медицинских последствий (канцерогенное, тератогенное,

генетическое и т.д.), то есть радиация по своей природе вредна для жизни. И с этим, с физической точки зрения, нельзя не согласиться.

Однако нужно учитывать, что живая клетка возникла и развивалась в условиях радиационного поля. При этом считается, что мощность дозовых нагрузок на живой организм была весьма велика на первых этапах развития жизни на протяжении многих сотен миллионов лет (рис. 8.4). По этому вопросу в мире имеется большое количество научной литературы (Неручев, 1982; Кузин, 1991; и др.).

Радиационный фактор, в силу особенности химического состава планеты, все-

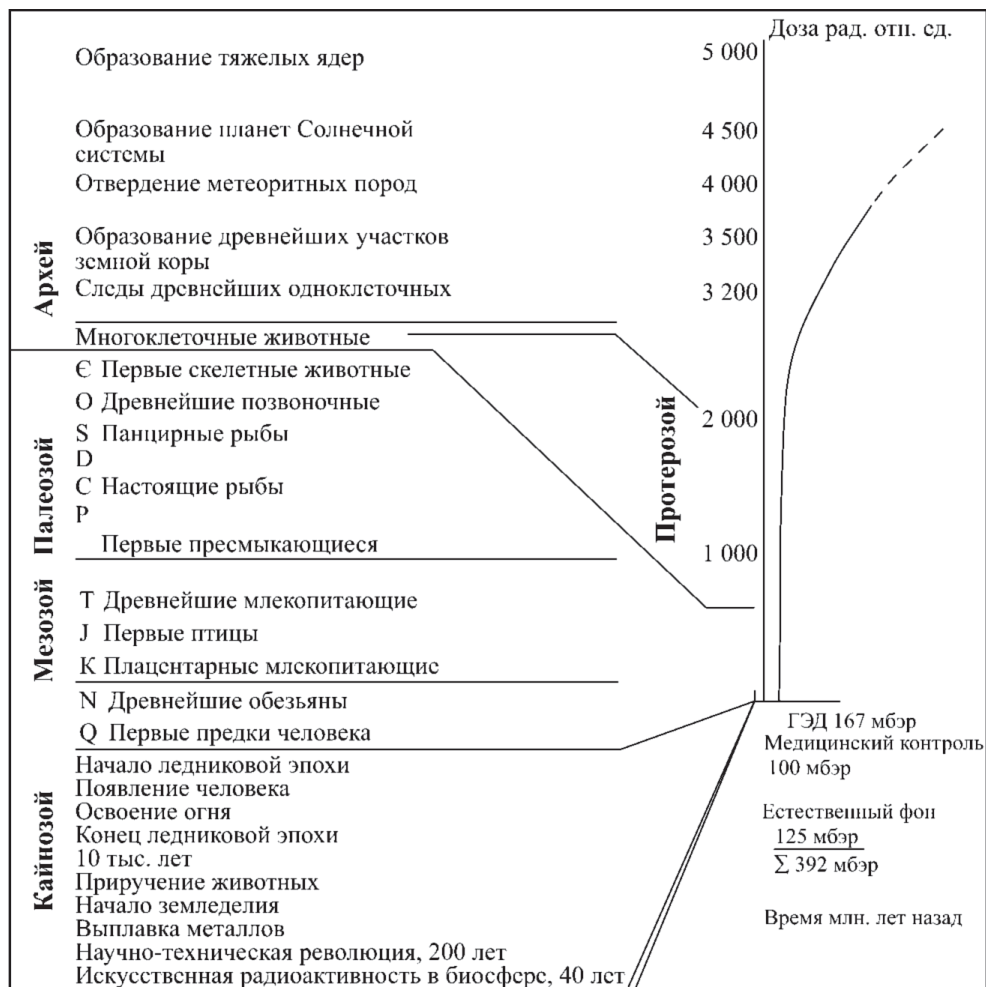
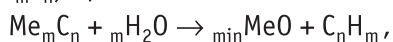


Рис. 8.4. Сопоставление геохронологического хода естественного фона радиации на поверхности Земли с основными этапами биологической эволюции (по А.М. Степанову, 1988)

гда присутствовал, и ионизирующее излучение с общей радиацией от Солнца было одним из энергетических источников для синтеза углеводородов на этапе абиотического развития планеты. Ионизирующая радиация, обладая мощным энергетическим запасом, воздействуя на молекулы первичных абиогенных углеводородов ( $\text{CH}_4$  – метан;  $\text{C}_2\text{H}_8$  и т.д.), образующихся при разложении карбидов металлов ( $\text{Me}_m\text{C}_n$ ) при взаимодействии с водой по схеме (Д.И. Менделеев, А.И. Опарин)



способна разбить их на фрагменты с образованием свободных радикалов. Последние могли вступать во взаимодействие, образуя усложненные цепи углеводородов (разветвленные, циклические и т.д.), которые могли взаимодействовать с азотом, фосфором, серой и т.д., образуя основу для последующих синтезов аминокислот, полипептидов, порфиринов, липидов и т.д.

Эксперименты по действию  $\beta$ -частиц на  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{Fe}^{+2}$ , проведенные на циклотроне в Беркли (Samgon, 1951), показали, что при этом происходит образование формальдегида, муравьиной и янтарной кислот.

Позднее, в результате воздействия ионизирующего излучения на газовые смеси простейших углеводородов (метан, этан и т.д.),  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  были получены аминокислоты.

В 1967 г. при облучении смеси метана,  $\text{H}_2\text{O}$  и аммиака был получен аденин – важный компонент нуклеиновых кислот. При дальнейшем облучении образующегося формальдегида получают сахара, среди которых установлены рибоза, дезоксирибоза и другие сложные углеродосодержащие вещества, многие из которых уже поглощали ультрафиолетовое излучение Солнца.

По-видимому, следует согласиться, что ионизирующее излучение было важным фактором при переходе от абиотической стадии развития к биотической (Кузин, 1991). Наиболее основательными исследованиями по биологическому воздействию природной радиации являются работы Л.А. Перцева (1973), А.М. Кузина и др. (1981), С.Г. Неручева (1982), А.М. Кузина (1991), Р.А. Алексахина (1992) и др.

Современный человек постоянно находится в полях радиационного излучения разного происхождения. В среднем дозовая нагрузка от радиоактивных ионизирующих лучей на земном шаре составляет около 350 мБэр/год (табл. 8.4), в том числе, например, в Англии от естественных источников излучения ежегодные дозовые нагрузки составляют 2352 мЗв. Эти данные отличаются от приведенных в таблице 8.5, так как использована модель расчета МКРП. Колебания эквивалентных эффективных доз зависят, как видно из таблицы, от многих причин (от территории, на которой человек проживает, до того как много он летает на самолете, смотрит телевизор, и т.д.). Так, в естественных условиях, без учета медицинских и других искусственных факторов, такие колебания могут составлять от 100 до 1500 мБэр/год (штат Керал, Индия).

А.М. Кузин (1991) считает, что повышенный радиационный фон оказывает благоприятное воздействие на биоту. Так, он и другие исследователи показывают, что радиоактивное излучение является мощным стимулятором роста растений и ряда других биологических процессов. Например, масса растений в при-

**Таблица 8.4.** Основные источники облучения населения и обусловленные ими эффективные эквивалентные дозы, мБэр/год (по П.В. Рамзаеву, 1992)

Источники излучения		Бывший СССР	Среднемировые данные	Великобритания
Природные. Космические лучи				
на поверхности Земли		32	36	30
при полетах на самолетах		–	0,05	0,6
Гамма-излучение				
фоновое		30	41	40
дополнительное (стройматериалы)		11	–	–
Внутреннее облучение	β-излучатели	20	20	20
	α-излучатели	16	15,5	17
Дополнительное	от удобрений	0,03	–	–
	от сжигания угля	0,2	–	0,4
Радон-222, радон-220				
фоновое		28	–	–
Дополнительное	от почвы	109	–	–
	от стройматериалов	48	126	80
<b>Итого</b>		<b>294</b>	<b>240</b>	<b>188</b>
Медицинские				
рентгенодиагностика		120	100	23,3
радионуклидная диагностика		3	5	1,7
<b>Итого</b>		<b>123</b>	<b>105</b>	<b>25</b>
Остальные искусственные источники				
испытания ядерного оружия		2	1,5	1,05
ядерная энергетика		0,01	0,01	0,2
Профессиональное облучение				
контролируемое		0,3	0,4	0,34
неконтролируемое (неурановые шахты, экипажи самолетов)		–	–	0,56
Последствия аварии на Чернобыльской АЭС		3	–	–
<b>Итого</b>		<b>5,3</b>	<b>1,9</b>	<b>2,1</b>
<b>Всего (округленно)</b>		<b>420</b>	<b>350</b>	<b>215</b>

**Таблица 8.5.** Годовые дозы, получаемые населением Британии от естественных источников, согласно Британского НСРБ. Эти значения можно использовать для оценки уровней облучения европейского населения

Источник	Среднее значение (мЗв)	Диапазон (мЗв)
Вторичные космические лучи	280	200–300
Нейтроны космических лучей	100	50–150
Внешнее наземное	480	100–1000
Внутреннее ( $^{14}\text{C}$ )	12	Нет
Внутреннее ( $^{40}\text{K}$ )	165	Нет
Внутреннее (уран и торий)	120*	Изменяется
Радон и его дочерние продукты распада	1105*	300–100 000*
Торон и его дочерние продукты распада	90*	50–500*
Общее количество	2352*	1000–100 000*

Примечание: \* – значения включают альфа-распад.



**Рис. 8.5.** Схема практического использования ионизирующего излучения в зависимости от дозы (по А.М. Кузину и др., 1981)



**Таблица 8.6.** Смертность населения США от всех видов опухолей в районах с различным радиационным фоном (по А.М. Кузину, 1991, со ссылкой на Frigerio et al., 1976)

Количество штатов	Средняя годовая мощность дозы, мбэр	Смертность на 100 тыс. человек
7	210	126,3
14	170	132,2
14	118	146,8

сутствии радиоактивных излучений увеличивается в 2–3 раза. На основании этого предлагается практическое использование ионизирующего излучения (рис. 8.5).

Исследователями, придерживающимися этой точки зрения, приводятся примеры по увеличению продолжительности жизни животных и человека, а иногда и снижения смертности населения от злокачественных опухолей в районах с повышенным природным радиационным фоном (табл. 8.6).

Перечень этих примеров можно было бы долго продолжать, достаточно вспомнить благотворное воздействие радоновых ванн курорта Белокуриха (Алтай) и т.д.

Существует иной подход к оценке степени опасности радиации, не отрицающий признания факта биологического воздействия ионизирующего излучения на организм, но утверждающий, что вероятность появления соматических и генетических заболеваний от воздействия радиации имеет "пороговый" характер. Риск получить заболевание от радиации зависит от дозы, он очень мал при небольших дозах и возрастает по мере увеличения дозовой нагрузки. Этот принцип "**доза – эффект – риск**" получил весьма широкое признание у специалистов, и его сегодня придерживаются при нормировании дозовых нагрузок.

Существующие подходы к оценке влияния доз радиации на живые организмы показаны на рисунке 8.6.

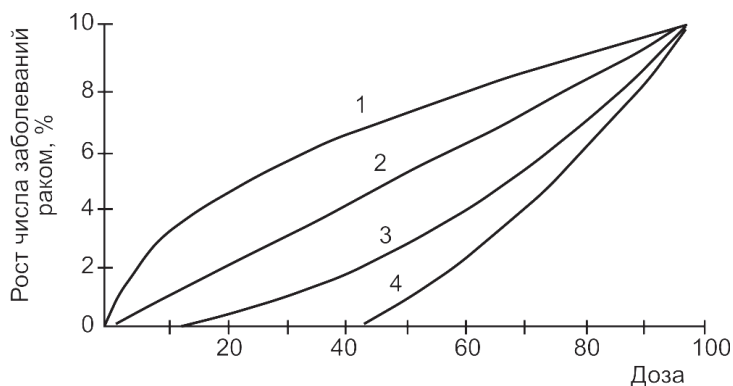
Теоретически, например, считается, что увеличение риска смерти от онкологического заболевания на 0,5% возможно у лиц, получивших эффективную дозу 10 мЗв (1 сантиЗв), что ориентировочно соответствует мощности экспозиционной дозы гамма-излучения 110 мкР/ч в течение года.

Тем не менее, такой подход к нормированию дозовых нагрузок вызывает возражение у многих специалистов, особенно биологов и медиков, не занимающихся специальными вопросами воздействия излучения на биоту и не соизмеряющих такие понятия, как доза, эффект и риск.

Возникает вопрос, что же понимать под высокими, средними и малыми дозами радиации?

Так, А.А. Дробков (1957) предложил следующую их градацию:

- 1) малая или безвредная доза – доза, которая находится в пределах естественного радиационного фона;



**Рис. 8.6.** Влияние дозы радиации на различные организмы (теоретически возможные варианты): 1 — слабая дробно-степенная зависимость  $I = d^{0,5}$  для косвенного химического механизма; 2 — прямая или линейная зависимость чувствительности от дозы  $I = d^{1,0}$  (при постоянном уровне радиации и не слишком больших полных дозах); 3 — квадратичная зависимость  $I = d^{2,0}$  (при раковых заболеваниях в случае поглощения больших доз); 4 — зависимость "порогового" типа (медленная смерть при высоком облучении всего тела) (по Э.Дж. Стернглассу, 1982)

- 2) повышенная доза — доза, превышающая естественную радиоактивность, но не вызывающая лучевых поражений. Это соответствует активности нуклида примерно  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  Ки на 100 г веса ткани;
- 3) высокие и вредные дозы — дозовая нагрузка, которая образуется от вещества активностью около  $10^{-6}$  Ки на 100 г биологической ткани.

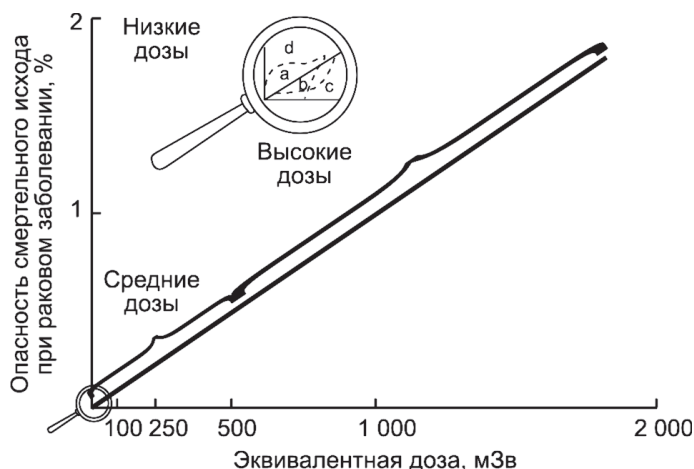
При этом отмечалось, что использование высокой радиоактивности будет характеризовать не физиологические, а патологические процессы, происходящие внутри организма.

Шведские ученые С. Кулландер и Б. Ларсен (1991) свое представление об этих понятиях выразили в виде графика (рис. 8.7, кривые под "увеличительным стеклом" соответствуют кривым 1, 2, 3 на рис. 8.6).

Из анализа этого графика следует, что к высоким дозам относятся дозы более 500 мЗв (более 50 Р). Малые дозы в понимании этих исследователей находятся на уровне 10 мЗв (1 Р).

А.М. Кузин (1987) считает, что за малую дозу можно принять дозу, на порядок меньшую дозы, вызывающей гибель 50% облученной популяции за 30 дней (для человека — 2,5 Зв), т.е. 0,25 Зв (25 Р). По его представлениям, дозы в 1–3 Зв (100–300 Р) укорачивают среднюю продолжительность жизни, а при дозах меньше 1 Зв (100 Р) достоверного снижения продолжительности жизни у исследованных им животных нет. Более того, при дозах 0,26–0,06 Зв (26–6 Р) происходило увеличение средней продолжительности жизни животных на 5–7% (Кузин, 1987).

Таким образом, можно считать, что малая доза по А.М. Кузину соответствует значению 25 Р (~ 23 Бэр) и эта доза стимулирует биологическое развитие.



**Рис. 8.7.** Оценка опасности радиационного облучения в зависимости от эквивалентной дозы

Э. Дж. Стернгласс (1982), исходя из анализа особенностей воздействия радиации на мембраны в клетках, считает, что доза с превышением естественного фона (350 мБэр) всего на 100–200 мБэр приводит к удвоению неблагоприятных биологических эффектов. И, по-видимому, за малую дозу следует принять дозу, на 35–60% превышающую дозу от естественного радиационного фона. Иначе говоря, в его понимании, малая доза меньше 0,01 Зв (1 Р), что близко к оценке С. Кулландера и др. (1991).

Таким образом, в настоящее время существует определенная двойственность в оценке влияния ионизирующего излучения на человека.

Эффект действия высоких доз ионизирующего излучения (сотни Р) на биологические объекты подтвержден многочисленными исследованиями.

Об этом свидетельствуют результаты исследований японских (Мацуда и др., 1959; и др.), английских (Вредное действие..., 1959; Хэмфри и др., 1959; и др.), американских (Действие атомной бомбы в Японии, 1960; и др.) ученых, полученные при обследовании жителей Хиросимы и Нагасаки, населения Маршалловых островов в Тихом океане, военнослужащих и 23 японских рыбаков, попавших под воздействие испытания водородной бомбы в 1954 г., а также результаты многочисленных экспериментов над биологическими объектами, в том числе тех, что публикуются в журналах "Радиобиология", "Радиация и Риск" и др.

У животных и человека установлены различные синдромы радиационного поражения: церебральный, желудочно-кишечный, костно-мозговой (табл. 8.7).

Такие дозовые нагрузки возникают только вблизи эпицентров ядерных взрывов, в ядерных реакторах от направленных нейтронных пучков, и, соответственно, человек может оказаться в таких условиях только в случае катастрофы или крупной аварии.

**Таблица 8.7.** Основные формы проявления острого радиационного синдрома у человека (по Дж. Когаллу, 1986)

Время после облучения	Церебральная и сердечно-сосудистая форма (200 Гр)	Желудочно-кишечная форма (20 Гр)	Гомеопатическая форма (4 Гр)
Первый день	Тошнота, рвота, диарея, головная боль, эритема, дезориентация, возбуждение, атаксия, слабость, сонливость, кома, конвульсии, шок, гибель	Тошнота, рвота, диарея	Тошнота, рвота, диарея
Вторая неделя		Тошнота, рвота, диарея, лихорадка, истощение, прострация, гибель	
Третья и четвертая недели			Слабость, утомляемость, потеря аппетита, тошнота, рвота, лихорадка, кровотечение, эпиляция, выздоровление (?)



**Рис. 8.8.** Летальные дозы ионизирующего излучения

В результате многочисленных исследований были оценочно определены летальные дозы ионизирующего, главным образом, бета-, гамма- и нейтронного излучений (рис. 8.8).

Указанные дозы весьма велики. В природных условиях, даже при пребывании в горной выработке среди богатых (контрастных) урановых или ториевых руд ( $U_3O_8$  или  $ThO_2 > 20\%$ ), дозы достигнут сотых-десятых долей от указанных.

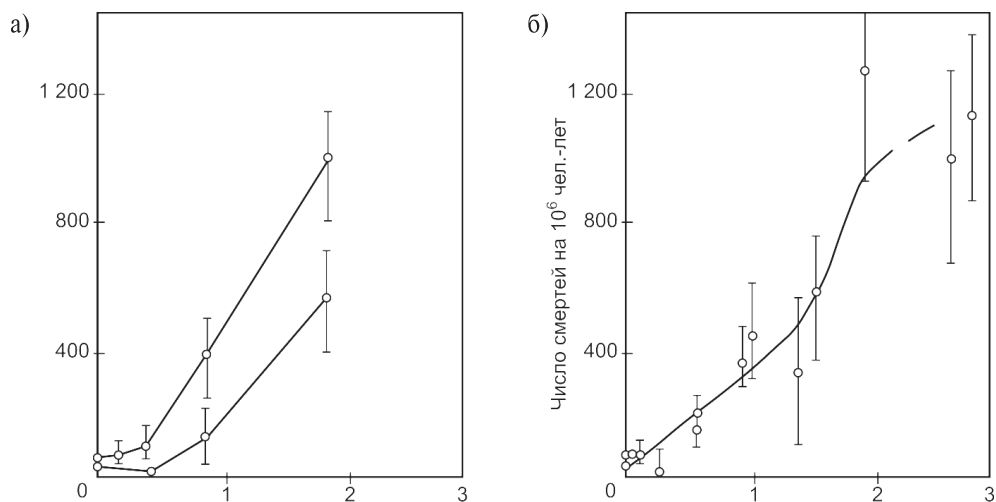
Работы по созданию ядерного оружия и его первые испытания показали губительность мощных доз радиоактивного излучения при прямом воздействии на человека.

Однозначно установлена взаимосвязь дозы облучения костного мозга с общей смертностью населения (рис. 8.9).

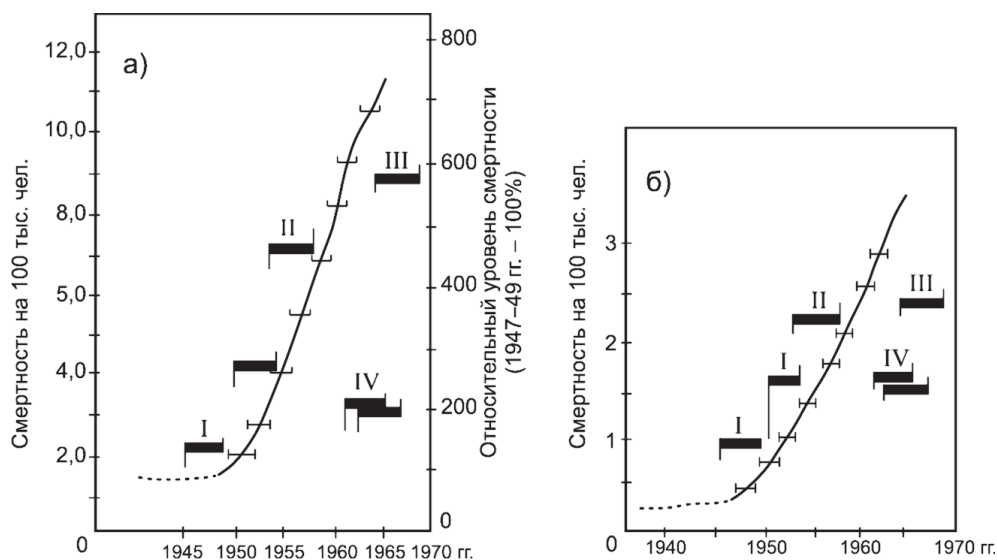
На сегодняшний день в Японии устанавливается зависимость смертности населения от рака легких и рака поджелудочной железы от времени и частоты испытаний ядерного оружия в мире (рис. 8.10).

Авария на Чернобыльской АЭС дала много практического материала по оценке воздействия малых доз радиации в понимании А.М. Кузина ( $< 25$  Бэр).

Эти данные наиболее обстоятельно излагаются в бюллетене "Радиация и Риск",



**Рис. 8.9.** Кривые соотношения "доза—эффект" для смертности от лейкемии в Хиросиме и Нагасаки: **а)** — использовались старые дозовые оценки эксперимента 1965 г. Окриджской национальной лаборатории; **б)** — использовались новые дозиметрические методы, разработанные Национальной лабораторией Лоуренса в Ливерморе. Большое различие данных по городам было отнесено за счет более высокого нейтронного излучения в Хиросиме и, соответственно, очень большой относительной эффективности биологического воздействия нейтронов (**а**). При более низкой оценке дозы за счет нейтронного излучения различия в уровне смертности между городами исчезают (**б**). Оба набора хорошо аппроксимируются линейно-квадратической функцией вплоть до дозы 2 Гр



**Рис. 8.10.** Уровень смертности мужчин в Японии от рака легкого (а) и поджелудочной железы (б): I – первые испытания атомной бомбы США и СССР; II – первые испытания водородной бомбы; III – первое испытание атомной бомбы Китаси; IV – вторая серия испытаний водородных бомб (по Э. Стернглассу, 1982)

выпускаемом Национальным радиационно-эпидемиологическим регистром России (г. Обнинск), а также в публикациях ученых Белоруссии и Украины, например, в книге "Чернобыльская катастрофа" (Киев, 1995) и др.

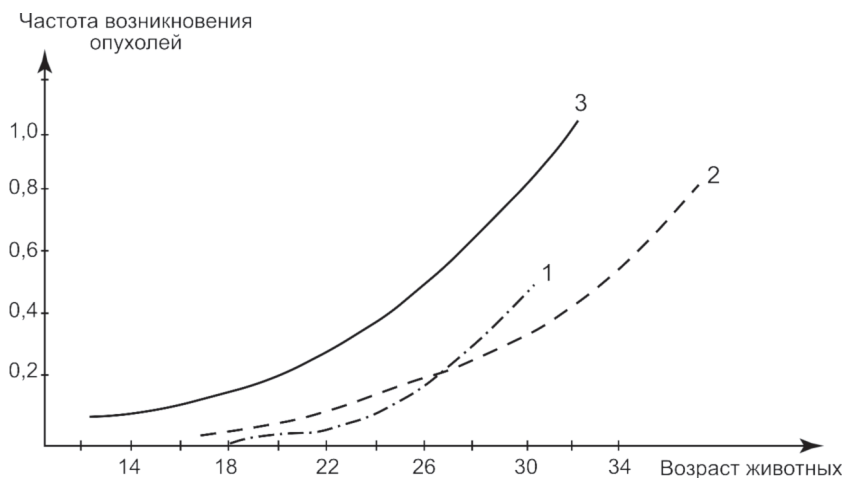
Так, в результате многолетних исследований украинских специалистов по изучению крыс установлены морфологические и ультраструктурные изменения в организме, нарушение окислительного метаболизма, иммунных реакций, увеличение заболеваемости, повышение частоты возникновения опухолей, изменения в периферической крови и т.д. (Серкиз и др., 1991).

Работы, проводимые радиобиологами в зоне Чернобыльской АЭС, показывают, что частота возникновения злокачественных опухолей у крыс достоверно выше (рис. 8.11).

Фактический материал по участникам ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС, хранящийся в Российском государственном медико-дозиметрическом регистре (РГМДР), пока не дает возможности для установления однозначной зависимости смертности от полученной дозовой нагрузки.

Тем не менее, как это видно из рисунка 8.12, заимствованного из справки Медицинского радиологического центра РАМН (Цыб А.Ф. и др., 1994), отмечается непрерывный рост некоторых основных классов болезней и общей заболеваемости среди "ликвидаторов" за 1989–1992 гг.

Прежде всего это касается показателей заболеваемости по злокачественным



**Рис. 8.11.** Динамика кумулятивной частоты возникновения злокачественных опухолей у крыс, постоянно находившихся в условиях Киева (2), Чернобыля (3); доаварийные данные (1) (по Я.И. Серкизу и др., 1991)

новообразованиям, болезням крови и кроветворных органов, эндокринной системы, а также психических расстройств.

Показатели заболеваемости по болезням органов кровообращения и болезням органов пищеварения также превышают контрольные показатели и стабилизировались на высокой отметке в последние два года (1991–1992 гг.).

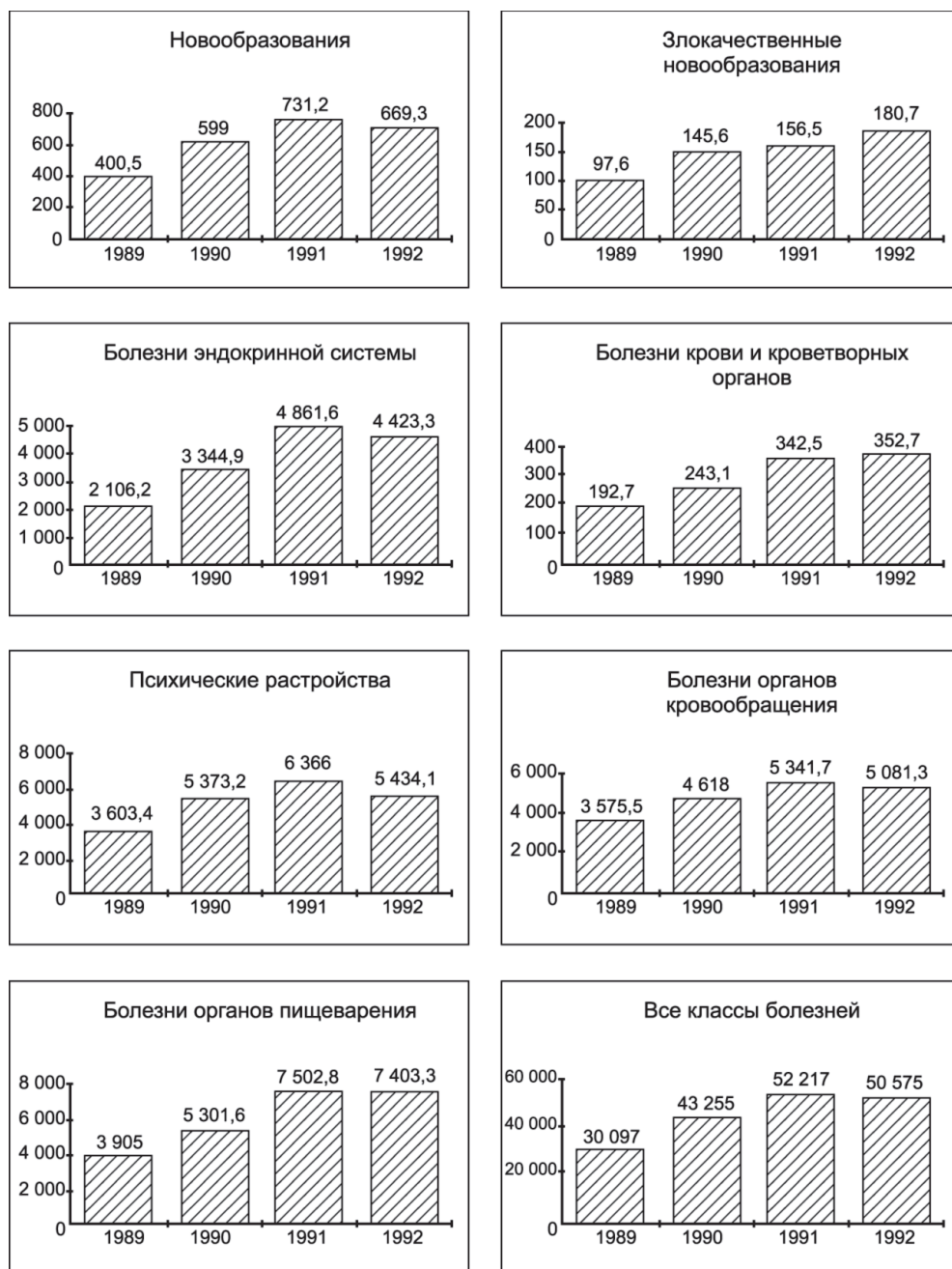
При этом, как установлено А.Ф. Цыбом и его сотрудниками, для злокачественных новообразований, болезней крови и кроветворных органов, болезней эндокринной системы, психических расстройств, болезней нервной системы и органов чувств, болезней системы кровообращения наблюдается статистически значимое ( $P < 0,01$ ) линейное увеличение значений относительного риска в зависимости от дозы.

Близкая к этому картина по структуре заболеваемости и динамике роста отмечается у ликвидаторов аварии на ЧАЭС, по данным Всеармейского медицинского регистра и многочисленным публикациям в материалах, посвященных десятилетию со дня Чернобыльской катастрофы.

Развитие патологии при воздействии на организм доз радиации, полученных "ликвидаторами", по мнению В.Н. Сиваченко и др. (1996), имеет фазный характер: первичная реакция, скрытый подход, компенсированная патология и срыв (поломки адаптивных механизмов).

Первичная реакция у них проявлялась в виде вегетососудистых дистоний дыхательных путей (вследствие воздействия радионуклидов) и некоторых астеновегетативных признаков. Также отмечалось обострение хронических заболеваний органов дыхания и сердечно-сосудистой системы в результате перенапряжения защитно-приспособительных механизмов.





**Рис. 8.12.** Динамика изменений показателей заболеваемости на 100 тыс. человек среди "ликвидаторов" по различным классам заболеваний с 1989 по 1992 гг.

Скрытый период характеризовался состоянием между нормой и патологией. Гематологические исследования не выявляли значительных изменений морфологического состава периферической крови на фоне снижения количества больших гранулодержающих лимфоцитов и повышения мембранной проницаемости эритроцитов. Вместе с тем наблюдалась неадекватная реакция организма на воздействие факторов внешней среды, что проявлялось увеличением частоты простудных заболеваний и увеличением числа симптомов астено-вегетативного синдрома.

Период компенсированной патологии у "ликвидаторов" характеризовался истощением функционального резерва и нарастанием явлений астенизации. Наряду с ростом признаков патологии снижалась социальная активность и формировались синдромы поражений органов и систем. В этот период на первое место в структуре патологии выходили болезни нервной системы (40%) в форме вегетососудистых дистоний (80%) и дисциркуляторных энцефалопатий (20%). Органическая патология центральной нервной системы в этот период не регистрировалась. Обращало на себя внимание изменение психологических тестов "самооценки функционального состояния". На втором месте были нейро-циркуляторные дистонии по смешанному типу (30%) с характерной клинической симптоматикой. Третье место занимали обострения хронических заболеваний, ранее имевшихся в анамнезе (Сиваченко и др., 1996).

Стадия поломки характеризовалась срывом механизмов адаптации, резким снижением социальной активности "ликвидаторов" и ростом органической патологии с проявлением единичных случаев онкологических заболеваний.

По материалам анализа состояния здоровья 306 участников ликвидации аварии на ЧАЭС из г. Томска и области, в этой стадии в структуре патологии на первое место выходила патология органов пищеварения – 28,93%. На втором месте оказывались болезни нервной системы – 20,07%. Третье место занимали болезни органов системы кровообращения – 19,35%. Четвертое место – болезни эндокринной системы – 68 случаев. Пятое место приходилось на патологию костно-мышечной системы и соединительной ткани – 7,59%. Патология мочеполовых органов, органов дыхания, психологические расстройства составляли, соответственно, 6,6, 3,44 и 1,63% (Сиваченко и др., 1996).

Ю. Шевченко (1996), анализируя клинические аспекты последствий аварии на Чернобыльской АЭС, отмечал, что характер развивающейся патологии у "ликвидаторов" связан с *внутренним* радиоактивным заражением изотопами йода, стронция, цезия, плутония, бета-поражением верхних дыхательных путей. К этим патологическим изменениям относятся заболевания щитовидной железы, сердечно-сосудистой системы, костно-суставного аппарата, бронхолегочной системы, рецидивирующий характер умеренных гематологических сдвигов, развитие вторичного иммунодефицитного состояния и т.д.

У них фиксируются повышенная частота структурных изменений хромосом и мутационные изменения на уровне стволовых и коммитированных клеток. Установлено нарушение мембранного потенциала и электропроводности тканей, изменяющих функции щелевых каналов.

Этот перечень патологических изменений у лиц, получивших, по данным физической дозиметрии, дозовые нагрузки, *не превышающие 50 Бэр* (а у подавляющего большинства исследованных она составила *до 25 Бэр*) (Диагностика и медицинская реабилитация ликвидаторов..., 1995), можно существенно дополнить данными Всероссийского центра экологической медицины, результатами наблюдений над чернобыльцами, выполненными в регионах.

Так, на прошедшей в г. Томске в 1996 г. конференции с той или иной степенью достоверности был подтвержден вывод Государственного медико-дозиметрического регистра о том, что по большинству классов заболеваемости отмечается *статистический достоверный рост заболеваемости*, в том числе по злокачественным новообразованиям.

Таким образом, анализ оценки влияния на организм человека дозовых нагрузок, относящихся к разряду малых доз по А.М. Кузину, в связи с аварией на ЧАЭС не свидетельствует об их безвредности, а тем более об их стимулирующем влиянии.

Приведенные выше медико-биологические данные по влиянию радиации на состояние здоровья "ликвидаторов" и населения в зоне ЧАЭС находятся в противоречии с выводами Международного консультативного комитета, осуществлявшего Международный Чернобыльский проект (Экспертиза радиологических последствий..., М., 1991), об отсутствии такого рода воздействия, т.е. подтверждающими точку зрения А.М. Кузина о том, что данный уровень ионизирующего излучения ниже уровня приемлемого риска.

Сложившаяся ситуация весьма подробно разбирается американским ученым Дж. Гофманом в книге "Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящего и будущего" (Минск: Высшая школа, 1994). Вывод, который делает весьма компетентный и независимый ученый по данному обзору прост: "*...не представляет никакой ценности*" (Дж. Гофман, 1994, с. 33). По его мнению, с помощью этого проекта пытаются доказать, что медленно накапливаемые дозы облучения (до 10 бэр) не имеют достоверно доказанных отрицательных последствий, и что такого рода катастрофы не несут особой опасности (Дж. Гофман, 1994).

На сегодняшний день накоплено весьма большое количество данных по влиянию аварии на ЧАЭС. Европейский комитет по радиационным рискам (ECRR) приводит обширный перечень документов, рассмотренных при анализе медико-биологических показателей в зоне влияния ЧАЭС (табл. 8.8).

На затронутой аварией территории первоначально отрицалось развитие рака щитовидной железы (Экспертиза радиологических последствий..., 1991), но дальнейшее развитие событий показало его резкое увеличение (рис. 8.13).

Эти данные показали, что при расчетах рисков принятые Международной комиссией модели риска (JCRP) были ошибочными. Ошибки в модели составляли от 580 до 1240% (табл. 8.9).

Как отмечает ECRR (2003), аналогичная ситуация просматривается и при анализе заболеваемости лейкемией (табл. 8.10).

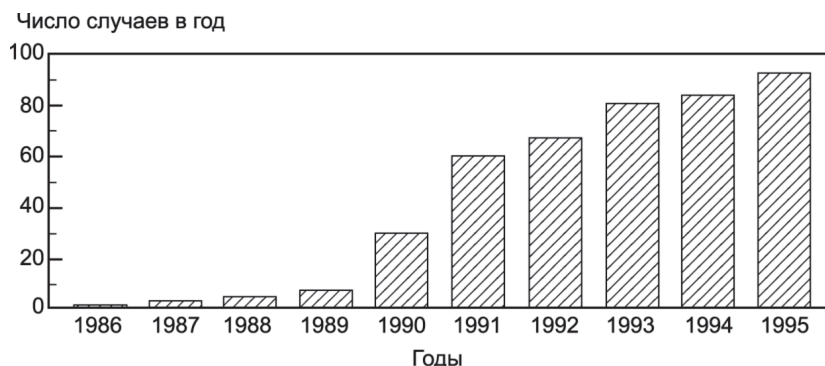
На так называемых "малых дозах" в районе аварии ЧАЭС достаточно наглядно видна проблема оценки влияния ионизирующего излучения на человека. Наряду

**Таблица 8.8.** Исследования и обзоры аварии на ЧАЭС, используемые Европейским комитетом по радиационным рискам в качестве основания для экспертизы последствий аварии

Доклады / вычисления	Примечание
МАГАТЭ, 1994 г.	Конференция Официального Агенства по атомной энергетике в Вене, на которой представлены доклады об ухудшении здоровья либо небольшого увеличения случаев заболевания раком щитовидной железы. Слушания все еще издаются
IPPNW, 1994 г.	Независимая конференция в Вене во время конференции МАГАТЭ – Международного агенства по атомной энергии, где ученые сообщили о существенном неблагоприятном воздействии на здоровье
Савченко, 1995 г.	Выпуск ЮНЕСКО, выпущенный белорусским академиком Савченко, который сообщает о крупных опухолях, раке щитовидной железы, лейкемии и увеличении врожденных болезней
Бурлакова, 1996 г.	Под редакцией российского академика Бурлаковой, которая сообщает о различных разновидностях рака, лейкемии и ухудшении здоровья в области биохимии и изменений в иммунной системе организма, а также нестандартный отклик дозы на радиацию
Нестеренко, 1998 г.	Книга, изданная организацией BELRAD в Минске, сообщает о росте рака щитовидной железы, лейкемии и твердых опухолей у детей в Белоруссии
UNSCEAR, 2000 г.	Обобщает изданные исследования с комментарием к ним и сообщает о том, что единственное существенное ухудшение здоровья в результате облучения происходит из-за рака щитовидной железы. Несуразная попытка анализа результатов прогноза моделей ICRP даже для рака щитовидной железы
WHO, 2001 г.	Конференция в Киеве, на которой говорится о массовом ухудшении здоровья либо небольшом существенном воздействии, помимо рака щитовидной железы. Решение конференции – пересмотр оценки моделей риска
Киото, 1998 г.	Международная совместная работа, включающая разногласия между "официальными сообщениями о воздействия радиации" и реальными результатами на затронутых территориях
Бандашевский, 2000 г.	Книга, в которой сообщается об увеличении сердечных паталогий, связанных с внутренним воздействием радиации, у детей в Белоруссии
Польша, Болгария и др.	Различные сообщения из Польши и Болгарии об остром увеличении рака и ухудшении здоровья младенцев и аномальных результатах рождения сразу после катастрофы в Чернобыле

Окончание таблицы 8.8

Busby, 2001 г.	Доклад Белорусскому Посольству с обзором данных и прогнозом новой модели риска рака в Белоруссии
Младенческая лейкемия	Младенческая лейкемия, о которой сообщают в шести странах, замеченная еще в утробе, что определяет ошибку в факторе риска модели ICRP в 100 раз и более
Миниспутниковые мутации	Различные газеты сообщают об увеличении миниспутниковой нормы мутации у детей в области высокой радиации и у потомства "ликвидаторов": подразумеваемая ошибка до 2000 раз в модели ICRP
IARC	"Официальная" экспертиза роста случаев лейкемии в Европе, с использованием объединенной базы данных, без отношения к Чернобылю: некорректный подход
Белоруссия, доклады Украины на русском	Множество докладов из Белоруссии, Украины и Российской Федерации, содержащих сведения об увеличении лейкемии, твердых опухолей, раковых образований щитовидной железы, врожденных уродств и общего массового ухудшения здоровья от радиации. Доклады не переведены или не включены в официальные обзоры



**Рис. 8.13.** Число случаев рака щитовидной железы среди детей в Белоруссии (на основе трудов Международной конференции МАГАТЭ/ВОЗ/ЕК, Вена, апрель 1996 г.)

с объективными факторами, мешающими выполнить эту оценку (отсутствие достоверно определенных доз, недоучет всех видов излучателей и излучений, недостаточно большая представительность обследованных и контрольных групп, незначительная разница в полученных дозах для данных групп, латентный период развития заболевания, влияние факторов нерадиационной природы и т.д.), существуют и субъективные факторы (секретность, искажение результатов, корректировка баз данных и т.д.).

**Таблица 8.9.** Раковые образования щитовидной железы и риск их возникновения у детей 0–18 лет во время катастрофы в Чернобыле в течение 1991–1995 гг. в трех городах и 2789 поселениях в Белоруссии и Российской Федерации

Основная высчитанная доза (Грей)	Начальная ожидаемая доза <sup>a</sup>	Ожидаемая по модели ICRP <sup>b</sup>	Ожидаемая всего	Реально наблюдаемые случаи	% ошибки в модели ICRP
0,05	0,9	3	3,9	38	1240
0,21	0,7	10	10,7	65	640
0,68	0,2	9	9,2	52	580
1,4	0,08	8	8,08	50	620
3,0	0,03	6	6,03	38	630

Примечание: <sup>a</sup> – основано на факторе риска ICRP 0,0025/1 Зиверт; <sup>b</sup> – основано на данных до 1986 г. 0,08/100 000/год.

**Таблица 8.10.** Трудности интерпретации данных по лейкемии после катастрофы в Чернобыле

1	Советское сокрытие данных в стадии диагноза: лейкемии в медицинских отчетах не числится
2	Советское сокрытие данных в стадии регистрации сообщения для того, чтобы соответствовать средствам управления
3	Последующие исследователи используют базу данных, содержащую неправильные цифры
4	Предположение о линейном отклике означает, что средства управления могут иметь более высокую норму
5	Метод регресса принимает линейный отклик: коэффициенты включают ошибку типа II
6	Маленькие цифры дают результат, критически зависящий от исключения некоторых случаев
7	Объединенные данные искажают результаты вследствие изменения отклика дозы

Всех заинтересовавшихся этими вопросами мы отсылаем к работам Дж. Гофмана (1994, 1995), а сами попытаемся рассмотреть влияние малых доз радиации, отличающихся всего лишь на 1–3 порядка от естественного радиационного фона, на биоту. Таких данных, к сожалению, недостаточно (хотя Р. Грейб (1994), Э.Дж. Стернгласс (1982) приводят много примеров), но тем не менее они существуют, и их следует анализировать.

В работе Дж.М. Гулда и Б.А. Голдмана "Смертельный обман. Большая ложь о



малых дозах" (2002) дается обстоятельный экспертный анализ по влиянию малых доз радиации на здоровье человека, который позволяет предполагать, что ... "смертоносная сущность малоинтенсивного излучения – не "ошибочное впечатление"" (Гулд, Голдман, 2002, с.5).

Прежде всего эти данные касаются лиц, работающих с естественным радиоактивным излучением (горнорабочие урановорудных предприятий, красильщики циферблатов солями радия), а также контингента врачей-радиологов, детей, получивших внутриутробное облучение при рентгенодиагностике матери, а также населения, проживающего в зонах с аномально высоким природным и техногенным радиационным полем и в районах интенсивного выпадения радиоактивных осадков от испытаний ядерного оружия.

Анализ влияния малых доз радиации мы начнем с наблюдений над живыми организмами, проживающими в особых условиях.

Особенно интересными, на наш взгляд, являются исследования В.И. Маслова, И.Н. Верховской, П.П. Вавилова и других на естественных полигонах с разной мощностью экспозиционной дозы гамма-излучения от урана, радия и тория (высокая – 8000 мкР/ч; средняя – 4000 мкР/ч; низкая – 50–100 мкР/ч), что создавало дозы облучения за 6 месяцев от 0,04 до 34,6 Р (Верховская и др., 1965).

Эти исследования показали, что повышение уровня радиации и увеличение концентрации радиоактивных веществ в компонентах среды, с которыми животные имеют тесный контакт, приводит к деструктивным изменениям половых желез, семенников и т.д., что сказывается на сокращении численности популяции вида (Верховская и др., 1965; и др.).

Эксперименты, проведенные П.П. Вавиловым и др. (1963) на этих же полигонах с бобами (*Vicia faba*), сорт "Русские черные", показали, что дозы хронического внешнего ионизирующего излучения в 3,5 Р за весь опыт (0,002 Р/ч) являются причиной заметного угнетения роста этих растений (Вавилов и др., 1963). Это противоречит данным, приводимым А.М. Кузиным, и, по мнению авторов, дает основание для пересмотра существующих пороговых доз для высших растений.

Цитогистологические исследования различных биологических материалов, отобранных с данных полигонов, показали, что хроническое воздействие малых доз радиации на организм не только повторяет общеизвестную картину, наблюдаемую в условиях лабораторного опыта при разовом воздействии высоких доз радиации, но и значительно ее видоизменяет (Маслов, 1972). Отмечается снижение активности ферментов и изменение энергетического обмена у животных.

Д.Дж. Нельсон и Б.Г. Блейлон (1968) исследовали хромосому слюнной железы *Chironomus tentans* Fabr. из р. Клинич вблизи Окриджской национальной лаборатории, куда в 1943 г. были сброшены низкоактивные радиоактивные отходы. Доза облучения на контрольном участке за год составляла 230,4 мРад (0,23 мГр), а на участке исследования колебалась от 4,37 до 230 Рад, т.е. была примерно в 19 000 раз выше фоновой.

Исследования показали относительно высокую частоту хромосомных aberrаций (гетерозиготная инверсия), возможно, это и обусловило, по их мнению, появление у этих видов аномально раздвоенных преданальных жабр.



И.Н. Шевченко и А.И. Даниленко (1989), рассматривая действие малых доз радиации, отмечают работу П.О. Макарова, который показал угнетение проводимости изолированного нерва лягушки при действии  $\gamma$ -излучения от источника с активностью 80–120 мКи. Повторение этих опытов в лаборатории авторов, где воздействовали  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением с активностью в 6 раз меньше, показало, что угнетение проводимости наблюдается и при меньших дозах, при этом исследователи отмечают значительную роль  $\beta$ -излучения (Шевченко и др., 1989).

Анализируя свои и литературные опытные данные по возможному механизму воздействия малых доз радиации, обусловливаемых прежде всего  $\beta$ -излучателями, находящимися в клетках ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{40}\text{K}$ ), И.Н. Шевченко и др. (1989) отмечают, что радионуклиды являются источником энергии, необходимой для белковых взаимодействий. Выход за пределы "норм биологической дозировки" приводит к повышению или снижению образования свободных радикалов, вызывает дефектность ферментных систем и в конечном итоге – функциональную и морфологическую патологию.

Действие малых доз на человека можно оценить по результатам наблюдений над врачами-рентгенологами. В американском медицинском журнале "Journal of American Medical Association" опубликованы материалы о смерти врачей с 1929 по 1948 гг. Их анализ показал, что риск смертности от лейкемии (рак крови) у радиологов примерно в 9 раз выше, чем среди других врачей (Вредное действие..., 1959).

Близкие к этим цифрам данные приводят А.П. Егоров и В.В. Бочкарев (1950). При этом они отмечают, что развитие тяжелых поражений крови у врачей-рентгенологов носит характер внезапности после длительного периода "практического здоровья". При постоянном воздействии малых доз это длится годами. Первыми признаками часто являются недомогание, чувство слабости, утомляемости. Банальные показатели крови при этом часто находятся в норме (Егоров и др., 1950). С момента бурного развития поражения кроветворения в периферической крови обнаруживаются большие изменения. Острый период имеет продолжительность несколько недель.

Э.Дж. Стернгласс (1982), анализируя ситуацию с внутриутробным рентгеновским облучением младенцев, отмечает, что полные дозы, воздействующие на младенцев, сравнимые с дозами от фоновой радиации за 1 год, могут оказывать опасное воздействие на здоровье. В среднем риск заболевания детей раком и лейкемией возрастает до 572 случаев на 1 млн детей.

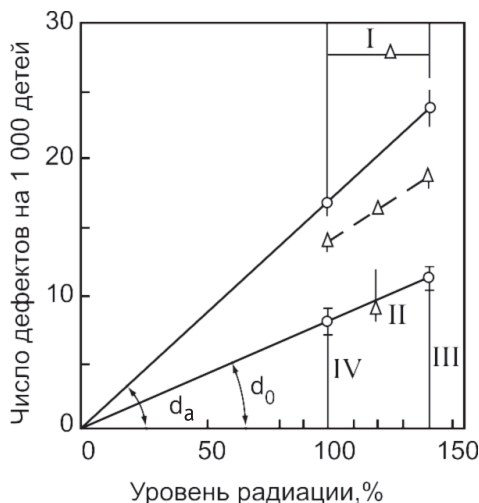
Исследования, проведенные в районах с высокой фоновой радиоактивностью (Бразилия), показали, что у населения и рабочих, занятых добычей и переработкой монацита, отмечаются значительные аномалии хромосом по сравнению с контрольными группами населения (Стернгласс, 1982). Появляются данные и о заметном распространении врожденных пороков развития (ВПР) в районах развития монацитовых песков в Индии.

В мировой литературе есть данные по оценке воздействия малых доз радиации от выпадения радиоактивных осадков, связанных с испытанием ядерного оружия, аварийными выбросами от АЭС и их штатной деятельностью.

Так, Э.Дж. Стернгласс (1982) подробно рассматривает случаи развития врожденных аномалий у детей в провинции Альберта (Канада). Этот показатель возрос с 7,76 на 1000 родившихся в 1959 г. до 13,8 в 1962 г. (рис. 8.14). При этом наблюдалась разница между северными и южными районами провинции (18,6 и 14 случаев на 1000 новорожденных соответственно, при их отношении 1,32), что соответствует количеству осадков в этих районах (448 и 313 мм при отношении 1,42). Анализ всей ситуации с учетом многих факторов позволил автору сделать вывод о том, что это связано с выпадением радиоактивных осадков, а не с приемом лекарств.

Этот же автор отмечает, что радиация низкого уровня, обусловленная выпадением радиоактивных осадков, оказывает и соматические повреждения. Это подтверждается результатами исследования уровня смертности от инфекционных заболеваний.

На рисунке 8.15 представлена смертность детей в США в первый год жизни вследствие заболеваний гриппом и пневмонией, по статистическим данным в период с 1938 по 1974 гг. Из графика видно, что с 1938 по 1946 гг. смертность резко упала, что, по-видимому, связано с улучшением медицинского обслуживания и



**Рис. 8.14.** Зависимость между дозой радиации и числом детей, родившихся с отклонениями от нормы (Канада) в период 1959–1961 гг.:

**I** – разница между уровнями выпадающих осадков; **II** – данные для всей Альберты 1959 г.; **III** – Северный район; **IV** – Южный район;  $d_0 = 0,8 \text{ \%}/\text{мРад}$ ;  $d_a = 1,7 \text{ \%}/\text{мРад}$  (по Э.Дж. Стернглассу, 1958). Нижняя линия относится к женщинам, подвергавшимся действию лекарств в период беременности, верхняя – к детям, родившимся в 1961 г. и подвергавшимся действию не только лекарств, но и радиоактивного излучения; пунктирная линия соответствует данным о совместном подсчете тех, кто подвергался действию лекарств, и тех, кто не подвергался; уровень радиации дан по отношению к естественному фоновому уровню, т.е.  $100\% = 100 \text{ мРад}/\text{год}$

применением антибиотиков. Однако уже в пятидесятых годах, после проведения серии испытаний ядерного оружия уровень смертности стал увеличиваться.

После подписания Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере уровень смертности вновь стал уменьшаться, и в 1974 г. она была одна на тысячу.

Р. Грейб со ссылкой на M. Segy et. al. (1972) приводит график смертности японских детей от рака в возрасте от 5 до 9 лет (рис. 8.16). Из графика видно, что произошло 600-процентное увеличение смертности.

На рост младенческой смертности в районе реактора Шиппингпорт (США) обратил внимание в 1973 г. профессор Э.Дж. Стернгласс. При этом наблюдалась взаимосвязь между мощностью реактора и содержанием  $^{90}\text{Sr}$  в молоке в радиусе 10 миль от реактора, а также снижение смертности от рака по мере удаления от реактора (рис. 8.17).

Физик Дж. Дрейк в 1973 г. опубликовал работу по оценке ущерба для здоровья жителей графства Чарльвуа штата Мичиган, где расположен ядерный реактор

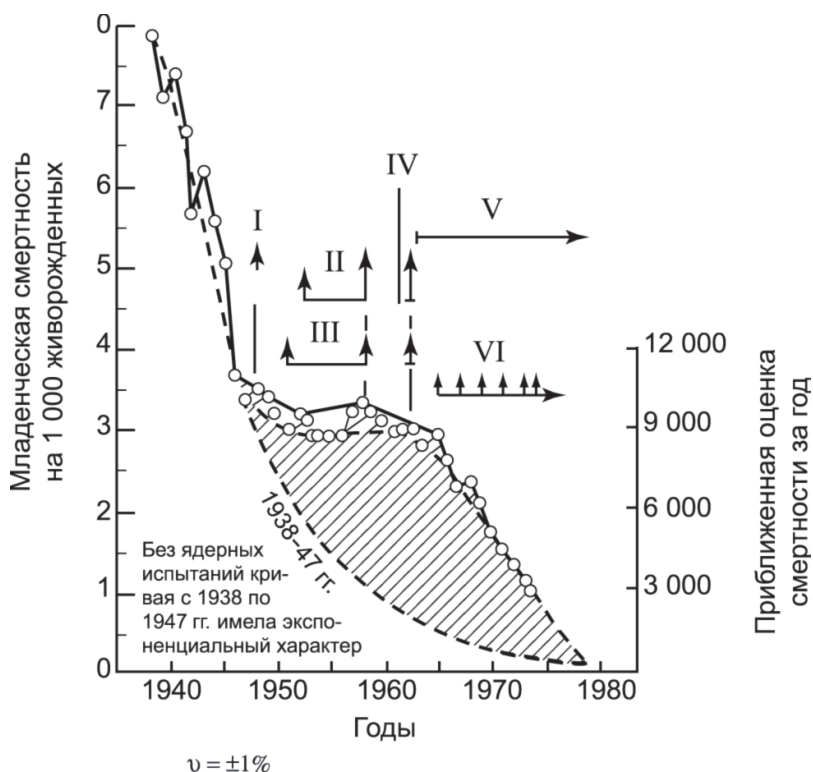


Рис. 8.15. Влияние радиоактивных осадков малого уровня на сопротивляемость новорожденных инфекционным заболеваниям (по Э.Дж. Стернглассу, 1982)

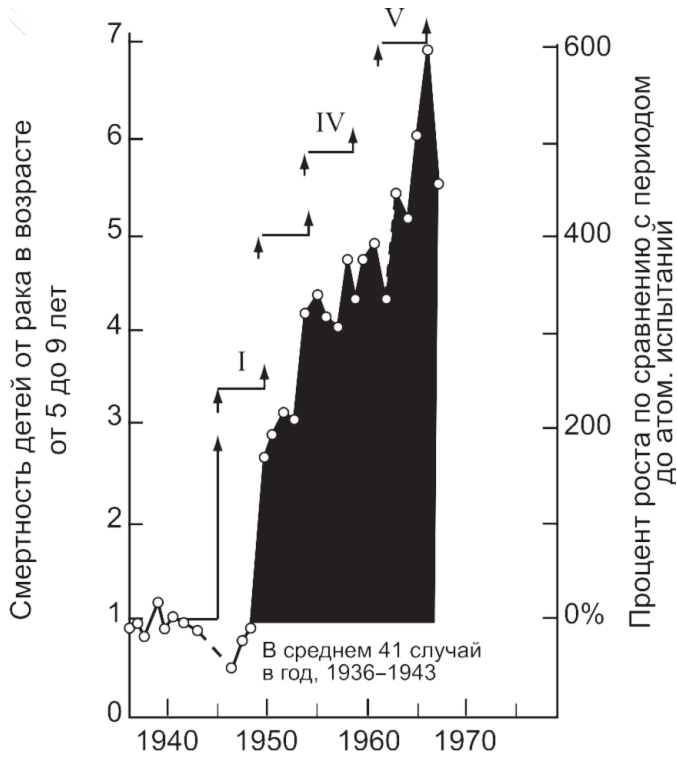


Рис. 8.16. Смертность японских детей от рака в возрасте от 5 до 9 лет

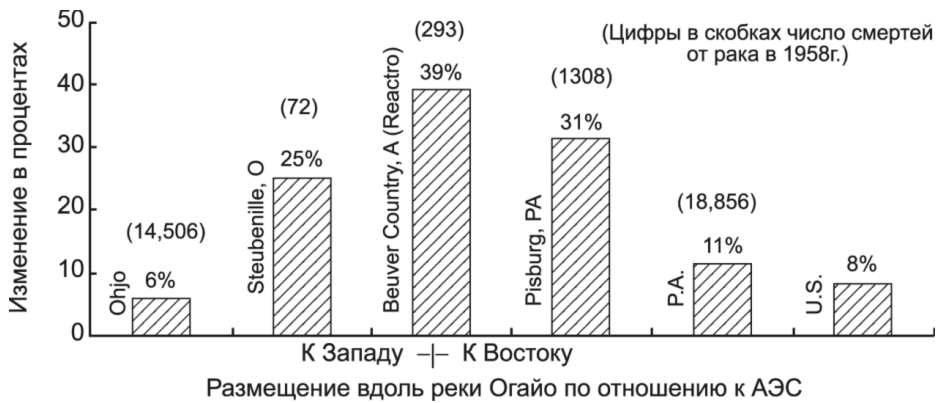


Рис. 8.17. Процентное изменение смертности от рака с 1958 по 1968 гг. в зависимости от расстояния до АЭС Шиппингпорт

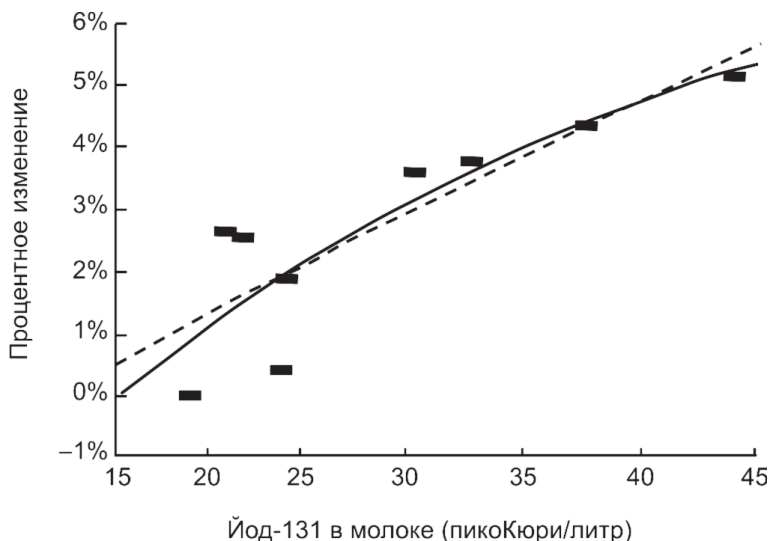
Бит Рок Пойнт. За десятилетний период деятельности станции им отмечено следующее (Грейб, 1994):

- рост младенческой смертности – на 49%;
- рост числа преждевременных родов – на 18%;
- рост смертности от лейкемии – на 400%;
- рост смертности от рака – на 15%;
- рост числа уродств – на 230%.

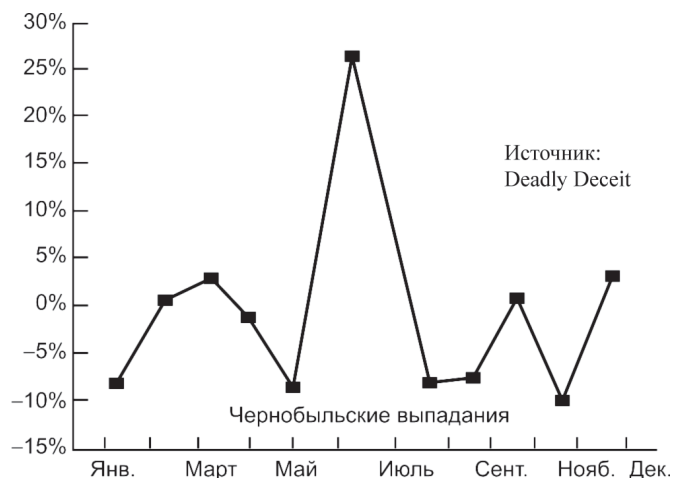
Грейб (1994) приводит ссылки на исследования американских специалистов, отметивших снижение умственных способностей (SAT) по стандартным тестам, проводимым для 18-летних американцев. Особенно наглядно это видно в штатах, подверженных воздействию от испытания ядерного оружия в Неваде (штат Юта). В данном штате концентрация  $^{131}\text{I}$  в молоке в период испытания в течение 1 месяца давала дозу в 14 рад на щитовидную железу (Радиоактивность и пища, 1972).

Неожиданные и весьма тревожные данные по воздействию глобальных выпадений от аварии на Чернобыльской АЭС приводит Р. Грейб (1994) со ссылкой на американских исследователей (Gould, 1987; Gould, Sternglass, 1988; Sternglass, 1987; Gould, Goldman, 1991; Гулд, Голдман, 2002), отмечавших повышение общей и младенческой смертности в США в 1986 г. (рис. 8.18, 8.19).

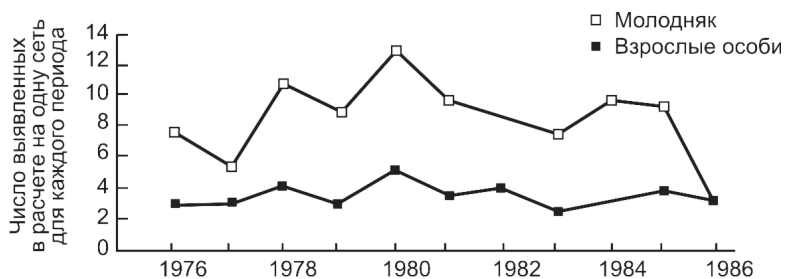
Этот факт, зарегистрированный на человеческой популяции, находит отражение и на популяции птиц. Американский орнитолог Дэвид Де Санти (1988, 1990) отметил в 1986 г. резкое изменение соотношения молодых и старых птиц (рис. 8.20).



**Рис. 8.18.** Процент роста общей смертности для регионов в мае-августе 1986 г. по сравнению с тем же периодом в 1985 г.



**Рис. 8.19.** Помесячная младенческая смертность в южноатлантических штатах США в 1986 г. по сравнению с 1985 г.



**Рис. 8.20.** Количество отловленных птиц по годам за период с 10 мая по 17 августа

Аналогичная картина была отмечена в штатах Калифорния, Вашингтон, Орегон, где 6 мая 1986 г. выпали дожди.

Какова же была реакция официальных органов, занимающихся радиационной защитой, на эти и другие данные? Об этом весьма красноречиво сказано в "Рекомендациях" Европейского комитета по оценке радиационного риска (ECRR), созданного Европарламентом в 1997 г. Проведя свои исследования и проанализировав все имеющиеся данные, ECRR отмечает, что суждения Стернгласса и др. о том, что осадки вызвали увеличения детской смертности, были высмеяны и отвержены. Эта ситуация с опровержением, как полагает ECRR, происходила из-за тайны и контроля, связанного с политикой, относящейся к холодной войне. Это было институционализировано в 1959 г. в соглашении между Всемирной Организацией Здравоохранения (WHO) и Международным агентством по атомной энергии (IAEA-МАГАТЭ). Комитет отмечает, что это соглашение (Res WHA 12-40, 28.05.59)

все еще в силе, и полагает, что точные данные последствий катастрофы в Чернобыле, возможно, были скрыты.

Таким образом, хотя в течение периода испытаний ядерного оружия проводилось огромное число исследований как в области болезней рака, так и в области радиобиологии, имеется лишь небольшое количество сообщений и исследований, которые пролили свет на последствия излучения радиоактивных осадков. Те, которые действительно существуют, представлены в таблице 8.11.

**Таблица 8.11.** Исследования проявлений рака от радиоактивных осадков, рассмотренные ECRR

Исследуемая группа	Дозы облучения	Что обнаружено	Примечание
1. Маршалловы острова	Внешнее: +, внутреннее: 1–10 Грей	Рак щитовидной железы, лейкемия, выкидыш	Только 200 человек
2. США, г. Юта	Внешнее: +, внутреннее: 1 Грей	Рак щитовидной железы, лейкемия	Доза неизвестна
3. США, г. Юта (Mormons)	Внешнее: +, внутреннее: 1 Грей	Лейкемия (4×), рак щитовидной железы (7×), рак груди (1,7×), рак кости (11×)	Доза неизвестна
4. США (V.A. Archer)	Внутреннее: < NBR	Лейкемия, корреляция со стронцием-90	Ошибки, факторы риска ICRP
5. Скандинавия (Darby et al.)	Внутреннее: < NBR	Найдена небольшая корреляция лейкемии у детей	Неубедительный анализ
6. США (Bentham, 1995)	Внутреннее: < NBR	Найдена корреляция с лейкемией у детей	Разногласия с пунктом №5
7. США (RPHP: Gould and Sternglass, 1995)	Внутреннее: < NBR, стронций-90	Различная величина риска рака	Эпидемия рака
8. США NAS	Йод из исследований Невады	Рак щитовидной железы	
9. Великобритания и Уэльс, иссл. болезней рака груди у женщин (Busby, 1995–2000)	Стронций-90, 1 мЗв суммарная доза	Рак груди	Эпидемия рака груди
10. Великобритания и Уэльс (Busby, 1995–2000)	Внутреннее: стронций-90 1 мЗв суммарная доза	Огромная корреляция в периодах исследования	Ошибки



Согласно UNSCEAR, при использовании модели ICRP совокупная внутренняя доза радиации осадков на северном полушарии за период с 1955 по 1965 гг. изменилась приблизительно от 0,5 до 1–3 мЗв в частях Европы, где было большое количество дождей. Возникла тенденция роста доз между 1958 и 1963 гг. из-за увеличения числа испытаний мегатонных бомб. Для внутренних изотопов совокупная тенденция также показала острое увеличение и достигла плато в 1965 г., после чего медленно снизилась (через биологическую потерю и физический распад) примерно до 20% к значениям 1999 г. Внутренняя доза определялась двумя изотопами: цезия-137 с  $T_{1/2} = 30$  лет и стронция-90 с  $T_{1/2} = 28$  лет, хотя в то же время другие, более активные изотопы показали более высокие дозы. Сумма изотопов и доз, рассчитанная на основании ICRP, полученная в итоге в 1993 и 2000 гг. UNSCEAR, и главные компоненты, подверженные облучению, показаны в таблице 8.12.

Европейский комитет по радиационному риску отмечает, что глобальные радиоактивные осадки от испытаний ядерного оружия оказывают существенное воздействие на человеческое здоровье. Это воздействие вызвало резкое увеличение детской смертности и повлияло на заболевания раком, лейкемией и другими болезнями генетического происхождения с задержкой между облучением и клиническим выражением болезни. При рассмотрении этого заключения Комитет был впечатлен нехваткой причин относительно происхождения глобальной эпидемии рака, которая началась в период 1975–1985 гг. В медицинском сообществе рак теперь широко освещен как генетическая болезнь, выраженная на клеточном уровне. И раннее и недавнее исследования поддержали идею, что происхождение болезни – чрезвычайная экологическая предрасположенность к мутагену. Если уровень заболевания раком начал резко увеличиваться в период 1975–1985 гг., и так как исследование показало, что болезнь растягивается на 15–20 лет, ясно, что происхождение эпидемии должно быть связано с поступлением в окружающую среду какого-то вызывающего рак мутагена в период с 1955 по 1965 гг. Идентификация мутагена с ионизацией радиации от осадков ядерного оружия убедительна.

Такого рода исследованиями занимаются только две группы: Проект Радиации и Здравоохранения (RPHP) Gould, Mangano и Sternglass в США и Green Audit group of Busby et al. в Великобритании. Последняя рассматривала сферу действия рака в Англии и Уэльсе, чтобы исследовать изменение среди подобных поселений с суммарной дозой изотопа стронция-90 равной от 0,2 до 1 мЗв. Им удалось показать, что вариации величины излучения радиоактивных осадков высоко коррелированы с более поздней сферой действия рака ( $R = 0,96$ ). Исследо-

**Таблица 8.12.** Расчеты полученной от радиоактивных выбросов средней эффективной дозы (человеко-Зв) для населения Земли (по модели МКРЗ, 1993)

Период	Внешнее	Поглощено	Ингаляция	Всего
1945 – до бесконечности	2 160 000	27 200 000	440 000	29 800 000

вания Green Audit group показали, что это демонстрирует 300-кратную ошибку в модели риска ICRP. Обе группы заняты в исследовании геофизических факторов, которые представляют концентрации изотопов осадков в устьях и речных долинах, где материал становится сконцентрированным. Именно здесь существует дополнительный риск для рака и лейкемии. Исследователи RPHP выявили, что рак молочной железы вызван нахождением стронция-90 в осадках. Сейчас они ведут исследования нормы рака относительно стронция-90 в замерах, которые они сделали на листовых зубах.

В дополнение к увеличениям всех раковых образований периода пиковых выпадений осадков были выявлены некоторые специфические виды раковых образований. Существенные и необъяснимые увеличения произошли в развитии раковых опухолей молочной железы у женщин и мужском раке простаты. Обе болезни вызваны радиацией. Комитет отметил исследования, которые связывают развитие рака молочной железы со стронцием-90 (по Sternglass и др.), и исследования группы людей, умерших от рака молочной железы (по данным Busby et al.), которые представляют веское доказательство о происхождении болезни. Рак простаты также показывает самую высокую сферу действия в Уэльсе примерно до 15 лет после появления осадков. Дополнительный риск заболевания раком простаты у рабочих ядерной промышленности, по исследованиям их на внутренние изменения (Roman и др.), предполагает тысячекратную ошибку в модели риска, используемой ICRP.

В докладе для Организации Объединенных Наций (1993 г.) (табл. 8.12) представлены эффективные дозы, получаемые мировыми поселениями вследствие испытания ядерного оружия. Начиная с этой дозы фатальный фактор риска рака по ICRP составляет 0,05 Зв, из чего вытекает 1,5 млн случаев фатальных раковых образований в мировом населении. Более свежие данные UNSCEAR 2000 г. передают подобные вычисления эффективной дозы от осадков ядерного оружия, но результаты значительно отличаются (значения ниже) от данных исследований 1993 г.

В таблице 8.13 (из UNSCEAR 1993 г.) представлены эффективные дозы для северных умеренных широт (Север, 40–50 градусов) от каждого из главных присутствующих изотопов. Для сравнения в таблице также показаны полные дозы, рассчитанные при использовании предложенной модели ECRR. В расчет включается дополнительный риск от внутренних эмитентов. Использование корректировки ECRR к внутреннему риску при применении отношения внешних к внутренним изотопам (табл. 8.13) увеличило бы фатальное заболевание раком по ICRP до 60 млн человек. Это приблизительно 120 млн случаев с диагнозом рака. Большая часть таких случаев произошла за 50 лет после облучения, и это предсказанное увеличение раковых образований, конечно, очевидно.

В Сибирском регионе весьма интересный анализ по оценке влияния радиоактивных выпадений от испытания ядерного оружия в атмосфере на здоровье населения выполнил В.П. Суслин (1994, 1995). Выделенные 3 группы районов Новосибирской области отличались по уровню плотности радиоактивных выпадений (архивные данные) на почву в 1959–1961 гг. Эпидемиологический анализ заболеваемости показал их достоверное различие (табл. 8.14).

**Таблица 8.13.** Главные изотопы, вносящие свой вклад в облучение человека после выпадения осадков от испытания ядерного оружия, вместе со средними эффективными дозами для населения северных умеренных широт (40–50 градусов) от каждого изотопа, рассчитанными UNSCEAR с использованием моделей ICRP

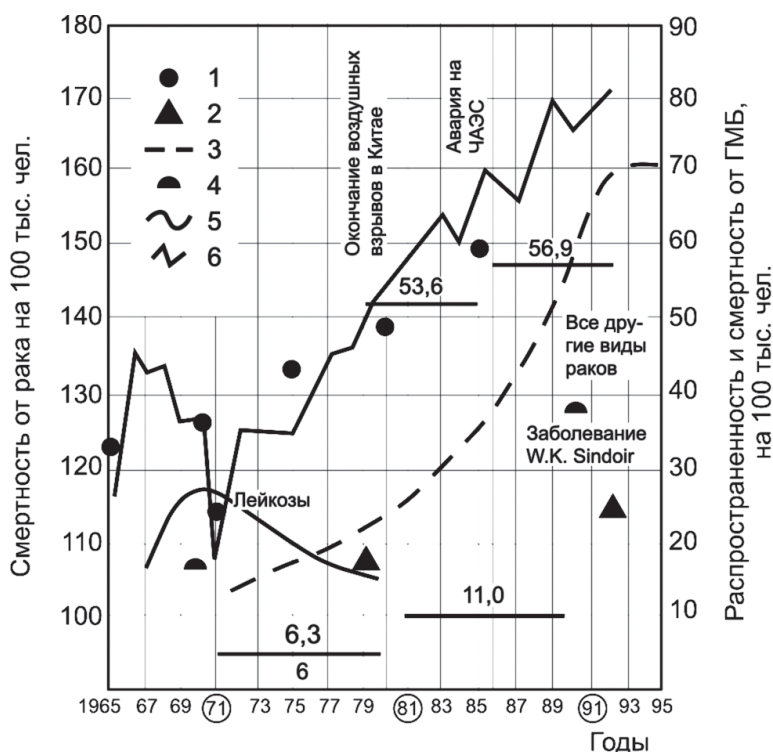
Внешнее облучение	Доза (мЗв)	С пищей	Доза (мЗв)	Через легкие	Доза (мЗв)
Cs-137	510	Cs-137	280	Pu, Am	81 (24 300)
Sb-125	47	C-14	2 600 (26 000)	Sr-90	15 (4 500)
Ru, Rh-106	70	H-3	48 (1 440)	Ru-106	110 (5 500)
Mn-54	93	Sr-90	170 (51 000)	Ce-144	86 (4 300)
Zr, Nb-95	207	I-131	79		
Ru-103	20				
Ba, La-140	25				
Ce-144	23				
Всего по ICRP (МКРЗ)	995		3 177		292
Всего по ECRR	995		78 440		38 600

**Таблица 8.14.** Усредненные показатели заболеваемости и смертности населения Новосибирской области в группах районов с различной плотностью глобальных радиоактивных выпадений

Группа районов и численность населения	Плотность загрязнения Ки/км <sup>2</sup>	Смертность на 1000 человек		Заболеваемость психическими расстройствами на 1000 чел.	Средний % гипотрофии от общего числа детей до 1 года
		Детская, 1965 г.	Общая, 1965–1967 гг.		
I гр. – 1 507 000 чел.	1,1–5,5	25,1	8,2	12,6	1,43
II гр. – 838 000 чел.	0,6–1,1	23,6	7,2	8,9	1,03
III гр. – 151 000 чел.	< 0,6	23,3	6,7	7,0	1,31

На рисунке 8.21 показана смертность населения Новосибирской области от злокачественных новообразований.

Анализ этих данных свидетельствует о том, что кривая смертности населения Новосибирской области, построенная исходя из предположения, что стартовая доза облучения всего тела в 1961 г. была в 2,4 раза выше, имеет сходство с кривой, построенной по модели W. Sinclair (1984), которая предполагает, что лейкозы развиваются после двухлетнего скрытого периода, а все другие опухоли развивались в среднем через 10 лет после облучения (Радиация. Дозы..., 1988). Sinclair обратил внимание на совпадение частоты генетических нарушений у мушки дрозофилы и неходжкинских лимфом у жителей г. Новосибирска с датами ис-



**Рис. 8.21.** Смертность населения Новосибирской области

от злокачественных новообразований в 1965–1993 гг. (по В.П. Суслину, 1994):

1 – смертность в бывшем СССР; 2 – распространенность злокачественных лимфом; 3 – средний показатель распространенности гемобластозов в 1979–1985 гг. (а) и в 1986–1992 гг. (б), смертность от гемобластоза в 1971–1980 гг. (в) и в 1981–1990 гг. (г) (по В.П. Суслину, Л.А. Паначевой и др., 1992, 1994); 4 – смертность от рака легких; 5 – среднестатистическая вероятность развития раковых заболеваний по модели W.K. Sinclair; 6 – смертность населения Новосибирской области от злокачественных заболеваний в 1965–1993 гг.

питания мегатонных ядерных устройств в атмосфере на Синьцзянском полигоне (оз. Лобнор) в Китае (Суслин, 1994).

Проведенный В.П. Суслиным (1994) расчет риска проявления стохастических эффектов облучения от малых доз (табл. 8.15) показывает, что именно они определяют возможный ущерб здоровью населения на территориях, загрязненных радионуклидами от испытания ядерного оружия в атмосфере.

Некоторые данные по влиянию малых доз ионизирующего излучения (в 10–100 раз превышающих дозы от естественного радиационного фона) свидетельствуют об их биологическом воздействии и влиянии на здоровье человека.

Действие малых доз радиации, не представляющей какой-либо опасности с точки зрения пороговых доз и эффектов, может существенно усиливаться под воздействием электрического поля, возникающего при ядерных превращениях (Марков, 1996).

По мнению Э.Я. Бегуна и др. (1996), радиоактивное загрязнение почвы и атмосферы значительно изменяет параметры атмосферного электрического поля (АЭП), искажая при этом естественный электромагнитный фон. Аномалии АЭП, возникающие в зонах радиоактивного загрязнения, могут быть тем дополнительным нерадиационным фактором, который вызывает наблюдаемое несоответствие между заболеваемостью людей и реальной радиоэкологической ситуацией.

Радиоактивное загрязнение окружающей среды и связанные с ним аномалии АЭП будут воздействовать на организм человека одновременно. Даже если биологические эффекты от каждого из этих воздействий будут небольшими (или неощутимыми), то эффекты от их суммарного воздействия могут быть весьма значительными.

Есть основание полагать, что результат комбинированного действия малых доз

**Таблица 8.15.** Риск проявления эффектов на единицу дозы облучения

Стохастические эффекты облучения	Группы районов		
	I (1,1–5,5 Ки/км <sup>2</sup> )	II (0,6–1,1 Ки/км <sup>2</sup> )	III (< 0,6 Ки/км <sup>2</sup> )
Смертельные опухолевые заболевания (5 на 10 000 чел. · бэр)	2487	361	23
Генетические заболевания (1 на 10 000 чел. · бэр)	497	72	5
Все заболевания, взвешенные по утрате времени жизни, число условно смертельно раковых заболеваний (7,3 на 10 000 чел. · бэр)	3631	527	33

*Примечание:* МКРЗ допускает возможность проявления у 1 млн человек, получивших дозу 1 бэр, 600 смертельных и условно смертельных раковых заболеваний и 130 наследственных заболеваний.

радиации и аномальных электрических полей может превосходить сумму эффектов от каждого фактора в отдельности, т.е. может иметь место так называемый "синергизм".

Этими исследователями установлено изменение электромагнитного поля в зоне цезиевого загрязнения в Тульской области, в санитарно-защитной зоне Калининской АЭС.

Они отмечают резкие пространственно-временные колебания напряженности АЭП со сменой знака поля. При этом уровень радиационного фона у поверхности Земли остается стабильным и не превышает 10–15 мкР/ч.

Обнаруженные ими в зоне АЭС аномалии АЭП находятся в области максимальной чувствительности сердечно-сосудистой системы человека к воздействию АЭП. Не исключено также влияние таких аномалий на регуляторные системы организма.

У детей, проживающих вблизи радиоактивных зон, отмечена резко повышенная частота заболеваемости лейкозами, хотя и сами дети, и их родители не получали опасных доз радиации, а также такие явления как раннее старение, ослабление зрения, угнетение реактивности иммунной системы, чрезмерная психологическая возбудимость, изменения в составе крови и др. По мнению исследователей, они могут быть связаны с дополнительным воздействием аномалий АЭП, возникающих в результате радиоактивного загрязнения окружающей среды, которое само по себе не вызывает наблюдаемых эффектов (Бегун и др., 1996).

Действие малых доз радиации может быть также усилено присутствием тех или иных химических элементов и их соединений, синергизмом действия факторов ионизирующей радиации и химического загрязнения.

Продолжающаяся в научной литературе дискуссия о выборе философии радиационной защиты (беспороговая линейная гипотеза; пороговая концепция "доза – эффект – риск"; концепция ALARA) и степени опасности малых доз радиации свидетельствует лишь об одном – *нашем недостаточном уровне знаний о реальном воздействии ионизирующей радиации.*

Современные международные и национальные нормативные документы, в том числе "Основной международный стандарт безопасности" (ОСБ), основаны на пороговой концепции (табл. 8.16).

Исходя из этого и предлагаются дозовые критерии для проведения защитных мероприятий. Как видно из таблицы 8.17, предложенные пороговые дозы и дозовые критерии в реальной жизни могут существовать только на производствах либо при аварийных ситуациях.

И более того, как высказался в печати один из специалистов Института биофизики Минздрава РФ, "такие эффекты, как кратковременное угнетение кроветворения, легкий ожог кожи и временное снижение потенции мужчины не слишком серьезны, поскольку быстро проходят без последствий. Помутнение хрусталика глаза не влияет на остроту зрения" (И.Б. Кеprim-Маркус, 1995).

Трудно сказать, чего в этих словах больше: издевательства, кощунства или чего-то другого, но как не процитировать стихотворные строки из английского медицинского журнала конца 50-х годов (по Хэмфри и др., 1958):

**Таблица 8.16.** Пороговая доза детерминированных эффектов кратковременного облучения, Гр (по И.Б. Кеprim-Маркусу, 1995)

Критический орган, вредный эффект	МКРЗ, № 60, 1990 (рус. 1994)	ОСБ, 1993
Красный костный мозг		
кратковременное угнетение кроветворения	0,5	
острая лучевая болезнь	1	1
Кожа		
легкий ожог		3
облысение	7	
тяжелое повреждение	20	
Хрусталики глаз		
помутнение	0,5	0,5
потеря зрения вследствие катаракты	5	2
Половые железы		
временное снижение потенции мужчины	0,15	0,15
постоянная стерильность мужчины и женщины	2,5–6	2
Щитовидная железа		
поражение функции		5
Легкие		
лучевое воспаление		6
Плод		
умственная отсталость ребенка	0,2 <sup>2)</sup> ; 0,8 <sup>3)</sup>	
уродства у ребенка	0,002 <sup>4)</sup>	

*"Ядерные мудрецы (благослови их Бог!)  
Определили величину радиоактивных осадков до n-го знака,  
Но у моего племянника и племянницы по пять ног,  
И умишко бесконечно малой величины".*

В нормативных документах России существует понятие **допустимой дозы облучения**.

Так, для гамма- и рентгеновского излучения с энергией до 3 МэВ она была принята в 2800 мкР/ч или 25 Бэр/год.

В современной концепции радиационной защиты населения и хозяйственной



**Таблица 8.17.** Дозовые критерии для введения защитных мероприятий, мГр (по И.Б. Кеприм-Маркусу, 1995)

Защитные мероприятия	ОСБ	Примерная МЭД
На ранней фазе		
Временное укрытие	3 за 6 часов	~ (50 000 мкР/час)
Временная эвакуация	10 за 1 сутки	~ (42 000 мкР/час)
Йодная профилактика	50 за 10 суток	~ (20 800 мкР/час)
На поздних фазах		
Контроль продуктов питания	10 в год	~ (114 мкР/час)
Другие простые контрмеры		
Временное переселение	30 в месяц	~ (4 166 мкР/час)
Постоянное переселение	1000 за жизнь	
Предупреждение детерминированных эффектов		
В хрусталиках глаз	100 в год (7 Гр за жизнь)	~ (1 140 мкР/час)
В половых железах	200 в год (14 Гр за жизнь)	
В красном костном мозге	400 в год (28 Гр за жизнь)	

*Примечание:* в скобках указана приблизительная мощность экспозиционной дозы гамма-излучения, измеряемая прибором СРП-68-01, при которой за указанный промежуток времени может быть накоплена данная доза, без учета β- и α-излучающих нуклидов и внутреннего облучения.

деятельности на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению (одобрена РНКРЗ 07.05.1993 г.), детерминированные эффекты (лучевые поражения тканей и функций организма) имеют пороговый характер и могут клинически проявляться при уровнях однократного облучения органов в 0,15 Гр либо хронического многолетнего облучения при мощности дозы более 0,1 Зв/год (100 мЗв/год), или в ранее применяемых единицах измерения – 10 Бэр/год, что на местности будет ориентировочно соответствовать экспозиционной дозе гамма-излучения 1142 мкР/ч. Согласно данной концепции, территория, на которой измеряется годовая эффективная доза от 5 до 50 мЗв (от 55 до 550 мкР/ч в течение года), определяется как зона добровольного отселения.

Если она превышает 50 мЗв (550 мкР/ч по гамма-излучению в течение года), то данная территория является зоной отчуждения, и на такой территории постоянное проживание населения не допускается.

Для сознательного определения линии поведения человека на загрязненной радионуклидами территории необходимо представлять величину возможного ущерба здоровью, связанного с последствием облучения.

Дж. Джованович (1995), например, считает, что такой фактор риска, как радиационное облучение сокращает продолжительность жизни максимум на 600 су-

ток при облучении 50 мЗв за 47 лет, а это соответствует примерно такому фактору человеческой деятельности, как работа в лесной промышленности (сокращение жизни на 537 суток). А если рассматривать естественную радиацию за 75 лет жизни, то сокращение продолжительности жизни будет на 40 суток, примерно как у работающих в обрабатывающей промышленности или в общественной администрации (сокращение продолжительности жизни, соответственно, на 54 и 57 суток).

В этих расчетах принимается показатель, что на 1 Гр (100 Рад) поглощенной дозы сокращение жизни составит 350–500 суток (Джованович, 1995).

Годовой риск при этом будет на уровне риска от загрязнения атмосферы или от выкуривания 200–300 сигарет в год.

Но эти данные не могут служить всеобщим успокоением, т.к. *радиоактивное излучение – серьезный радиационно опасный фактор, который лучше переоценить, чем недооценить*, тем более, что еще недостаточно установлены точные границы положительного и отрицательного действия радиоактивного излучения на биологические объекты.

Следует отметить, что эти расчеты относятся ко всей человеческой популяции, а вот насколько они соответствуют реальному воздействию, каков действительный фактор риска от ионизирующего излучения на конкретной территории?

Как отмечает В.И. Карагодин (1995), говоря о допустимых дозах облучения биоты, имеется в виду функционирование популяций микроорганизмов, растений или животных, а не состояние отдельных индивидов.

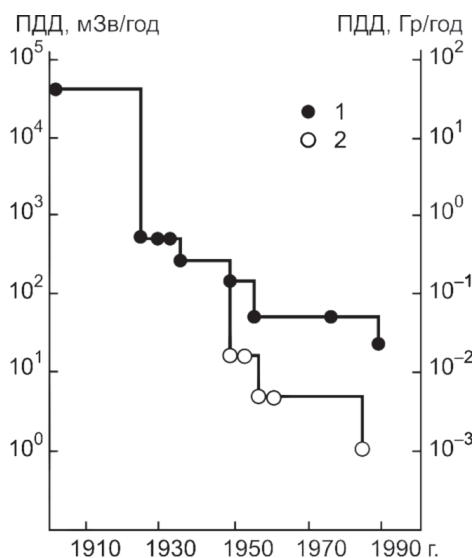
Это обстоятельство, по его мнению, объясняет видимость противоречия между высокой радиочувствительностью икры некоторых рыб и устойчивостью к облучению популяций разных рыб. Могучее "давление жизни" приводит к тому, что биота легко справляется с некоторыми дополнительными нагрузками, в частности, с облучениями, способными вызывать летальные, онкогенные и генетические последствия (Карагодин, 1995).

У человека же основной интерес представляет реакция на облучение не популяций, как в случае с биотой, а отдельных индивидуумов.

И не случайно, что по мере накопления данных по воздействию ионизирующего излучения на человека, допустимая доза облучения человека многократно пересматривалась на протяжении столетней истории явления радиоактивности в сторону ее уменьшения (рис. 8.22).

Некоторые исследователи считают, что критерием безопасной генетически значимой дозы для человека может служить современный уровень естественной радиационной дозы, которая не изменялась на протяжении последних 450 млн лет (рис. 8.4), тогда как критерием опасности следует считать степень превышения этой дозы (Степанов, 1988).

Особую опасность вызывает не внешнее проникающее излучение, хотя при больших дозах и оно вредно, а внутреннее облучение под воздействием высокозаряженных  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, попадающих с воздухом, водой, продуктами питания, и именно этого радиационно опасного фактора и следует опасаться. Его необходимо оценивать в первую очередь.



**Рис. 8.22.** Предельно допустимые дозы облучения для работающего персонала (1) и всего населения (2), принятые в разное время с 1902 по 1985 гг. (Карагодин, 1995, со ссылкой на Gigna, 1993)

К сожалению, чаще всего о радиационной обстановке судят только по экспозиционной дозе гамма-излучения, которая не всегда отражает реальную обстановку на той или иной территории, в т.ч., например, и в зоне воздействия Сибирского химического комбината.

Европейский комитет по радиационной защите (ECRR) в своем официальном докладе, представленном 30.01.2003 г. в Европейский парламент, на наш взгляд, отметил практически все существующие проблемы в оценке радиационно опасных факторов и дозовых нагрузок.

Материалы доклада показывают, что действующие нормы радиационной безопасности (МКРЗ-90, в России – НРБ-99) были разработаны на основе сверхупрошенных взглядов о действии радиации, сформировавшихся еще до открытия роли ДНК и других важных открытий в области влияния радиации на живой организм.

Единицы доз радиации "Грей" и "Зиверт" являются не прямо измеряемыми, а расчетными величинами, основанными на усреднении количества энергии, приходящейся на единицу массы (1 кг). Такой подход не делает различия в действии энергии, согревающей человека у камина, и проглоченного раскаленного угля. Не измеряются, а рассчитываются различия между внутренним и внешним облучением, облучением от разных радионуклидов. Понятие "поглощенной дозы" не достаточно учитывает также влияние "горячих частиц" и других факторов влияния радиации на клеточном и субклеточном уровнях.

Принятая МКРЗ базовая модель расчетов радиационного риска, идущая со времен создания атомной бомбы и ускоренного развития атомной промышленности, основанная на результатах внешнего острого кратковременного облучения высокого уровня в Хиросиме и Нагасаки, существенно занижает уровень опасности антропогенной ионизирующей радиации для всего живого. Так, модель МКРЗ учитывает далеко не все влияние радиации на здоровье, не учитывает спектр эффектов на клеточном, генетическом и молекулярном уровнях, не учитывает также последствия присутствия углерода-14 и трития в биологических тканях, а также опасного специфического влияния некоторых радионуклидов (например, плутония) на структуры ДНК.

Принятая МКРЗ беспороговая линейная гипотеза применима лишь к диапазону доз более 100 мЗв. В результате расчеты по модели ICRP занижают риск развития опасных последствий радиации в диапазоне малых доз в 100–1000 раз. В целом, модель расчетов радиационного риска МКРЗ не может учесть анизотропию в действии облучения и в пространстве, и во времени в отношении биологических структур (из доклада ECRR, 2003).

Новые подходы к определению радиационных рисков, представленные в докладе ECRR, основаны на наблюдениях длительного влияния малых доз (в том числе глобального и регионального загрязнения от "разрешенных" выбросов предприятий атомной индустрии, атомных испытаний, радиационных аварий и катастроф, а также заболеваемости работников атомной индустрии) и на учете спектра данных современной молекулярной, радиационной, популяционной биологии и эпидемиологии. ECRR вводит новые коэффициенты риска – "биофизический" фактор риска, связанный с разными типами облучения, и "биохимический изотопный" фактор риска, а также предлагает учитывать многократно доказанный факт нелинейного беспорогового влияния малых доз хронического облучения и малых мощностей доз радиации.

В докладе ECRR учитывается возникающая под действием радиации геномная нестабильность, а также другие (кроме рака) последствия радиации для здоровья населения (младенческая смертность, выкидыши, ослабление иммунитета, ускоренное старение, увеличение неспецифической заболеваемости и "снижение среднего качества жизни", под которым понимается любая вызванная антропогенной радиацией повышенная заболеваемость и преждевременная смертность).

Если все-таки человек в силу тех или иных обстоятельств попадает на территорию, подвергшуюся радиоактивному загрязнению, то необходимо прежде всего предусматривать элементарные правила личной гигиены, правила обращения с продуктами питания. Так, доктор Гейл (США) для жителей Чернобыльской зоны предлагал следующие меры предосторожности:

*Необходимо:*

- 1) хорошее сбалансированное питание;
- 2) обильное питье, чаще потеть (баня);
- 3) употреблять соки с красительными пигментами (томатный, свекольный, морковный и т.д.);

- 4) отвары крапивы, слабительных трав;
- 5) черноплодная рябина, тертая редька (утром натереть – вечером съесть и наоборот), морковь, хрен, чеснок, грецкие орехи, изюм;
- 6) крупа гречневая, овсяная;
- 7) хлебный квас;
- 8) аскорбиновая кислота с глюкозой, активированный уголь;
- 9) молочные продукты: творог, сливки, сметана, масло;
- 10) мясо: лучше свинина и птица (первый отвар слить, залить водой и варить до готовности).

*Нельзя:*

- 1) кофе;
- 2) холодец, кости, говядину;
- 3) вареные яйца (содержащийся в скорлупе стронций при варке переходит в белок).

Существуют и другие научные и народные методы предосторожности при проживании на таких территориях. Например, рекомендуют красное вино (по 1 столовой ложке 3 раза в день), а также уринотерапию.

К продуктам с антирадиоактивным действием относятся: морковь, капуста, растительное масло, творог, таблетки кальция.

Известны фитотерапевтические противолучевые средства, которые, по оценке В.Г. Пашинского (1989), являются в основном препаратами дополнительной, поддерживающей и симптоматической терапии. К ним следует отнести следующие растения: облепиху, подорожник, ромашку аптечную, женьшень, элеутерококк, золотой корень, заманиху, медуницу лекарственную, одуванчик, шиповник, тысячелистник (Пашинский, 1989; Минаева, 1991).

Дискуссия о приемлемости понятий пороговой и беспороговой доз ионизирующего излучения будет продолжаться, и аргументы в сторону усиления того или иного подхода будут появляться постоянно.

Сейчас здравомыслящие исследователи пришли к понятию **степени приемлемого риска**.

Дело в том, что отношение людей к той или иной опасности определяется степенью их представления о различных факторах риска. Есть опасности, о существовании которых люди часто и не подозревают, хотя они значительно опаснее тех, которые им известны. Мало кто обращает внимание на естественную радиацию, вклад от которой составляет около 80% среднегодовой эквивалентной дозы облучения, на облучение, связанное с наличием радона в закрытых помещениях, или при рентгенологических обследованиях. Населению мало известно о степени воздействия на организм этих факторов. Известно ли, например, что сотни тысяч американцев, проживающих в домах с высокой концентрацией радона, получают за год такую же долю радиационного воздействия, какую получили жители Чернобыля и его окрестностей, когда один из реакторов взорвался и радиоактивный материал был выброшен в атмосферу (Неро, 1988).

С другой стороны, хорошо известные факторы риска, такие как альпинизм, гор-

нолыжный спорт, курение и т.п., мало кого пугают, хотя вероятность преждевременной смерти из-за курения (при выкуривании 20 сигарет в день) более чем в 100 раз превышает вероятность смерти вследствие облучения.

Опасения по поводу радиационной опасности в обществе сосредоточились, главным образом, на атомной энергетике, хотя реальный фактор риска здесь значительно меньше, чем при курении, употреблении спиртных напитков и т.д. (рис. 8.23).

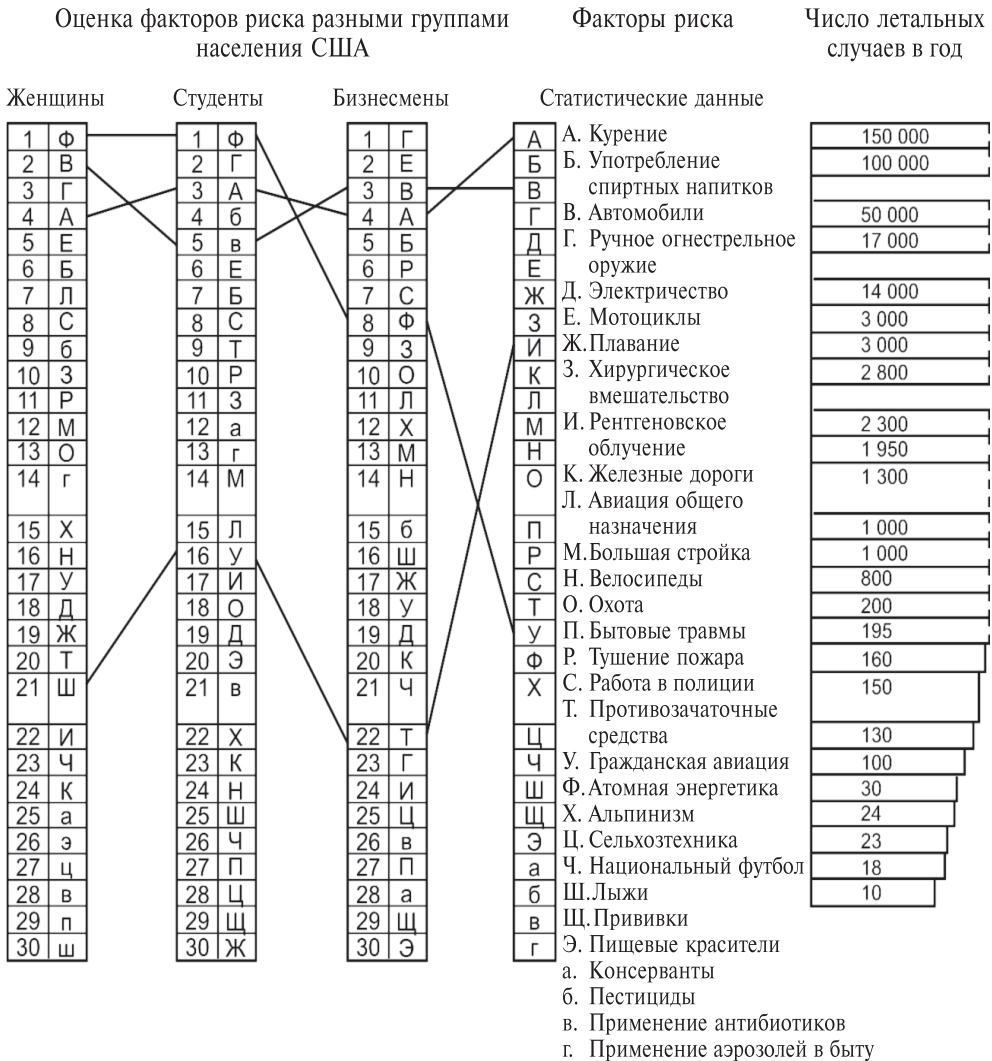


Рис. 8.23. Предполагаемая и реальная опасность радиации (по исследованиям в США)

По образному выражению В.В. Рачинского (1992), "**сознание без знаний слепо**".

Кризис доверия к ядерной энергетике возник по причине излишней засекреченности, голословных и высокомерных заявлений ученых-экспертов и политических деятелей (наиболее яркий пример с аварией на ЧАЭС), которые во многих случаях оказались ложными и лишенными необходимого глубокого комплексного анализа реальной ситуации.

К сожалению, значительная часть специалистов, особенно руководителей, оценивает ситуацию по принципу одного из афоризмов Козьмы Пруtkова: "Этого не может быть, потому что этого не может быть никогда".

Ликвидировать этот кризис тяжело. Для этого необходима только правдивая и объективная информация, на основе которой должна формироваться свобода выбора каждым человеком приемлемой для себя степени риска.