

# РЕТРОСПЕКТИВНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЗ И ОЦЕНКА РОЛИ ОТДЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ В ОБЛУЧЕНИИ ЖИТЕЛЕЙ, ЭВАКУИРОВАННЫХ ИЗ ТРИДЦАТИКИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

Профессор В.С.РЕПИН  
Научный Центр Радиационной Медицины АМН Украины

Представлены результаты реконструкции доз облучения жителей, эвакуированных из тридцатикилометровой зоны ЧАЭС. Реконструкция выполнена для основных дозообразующих источников: внешнего гамма-облучения, изотопов йода, доз от ингалированных радионуклидов, доз внешнего бета-облучения. Сравнительная характеристика факторов облучения дана в терминах риска.

## ВВЕДЕНИЕ

Население тридцатикилометровой зоны, первым принявшее на себя удар Чернобыльской аварии, подверглось облучению со стороны многих факторов и источников облучения.

За период от начала аварии до момента эвакуации источники облучения жителей Зоны могут быть квалифицированы как переменные во времени и пространстве смешанные поля гамма- и бета-облучения, формирующиеся в процессе распространения и осаждения радиоактивности в форме полидисперсных аэрозолей моно- и полинуклидного состава.

Каждому источнику, или виду, облучения можно приписать совокупность органов, или тканей, на которые это облучение прежде всего было направлено.

Мишенями облучения были при этом все тело, отдельные органы или даже ограниченный объем ткани. Наиболее облучаемыми органами явились щитовидная железа, легкие, нижний отдел толстого кишечника, открытые участки кожи и хрусталик глаза. Каждый из перечисленных органов испытал двойную лучевую нагрузку: от общего гамма-облучения тела и всех его органов и от специфических видов облучения, избирательно действующих только на данный орган.

Предварительный анализ радиационной ситуации и источников информации о дозах облучения показал, что воссоздание полной картины облучения возможно лишь на основе методов ретроспективной дозиметрии, при

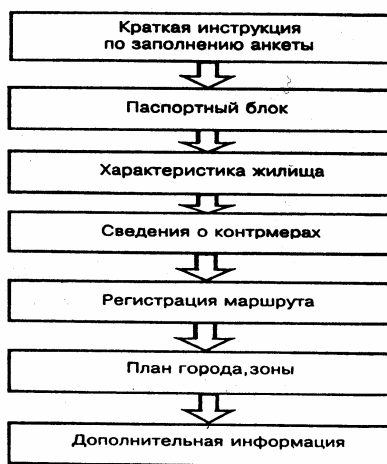


рис. 1. Структура анкеты, заполняемой эвакуантом при реконструкции дозы внешнего гамма-облучения

этом в литературе почти не описаны подходы, разработанные для анализа столь сложных ситуаций.

В процессе разработки методической схемы реконструкции доз показано, что наиболее корректная их оценка системного подхода, базирующегося на определенных принципах, базовой информации и соответствующих методах.

В работе сформулированы и положены в основу реконструкции следующие принципы: разбивка территории на зоны, в пределах которых можно пренебречь фактором неравномерности; выделение однородных по облучению групп населения; обобщение информации в виде закономерностей; перенос закономерностей с малых

выборки на большие; взаимообусловленность параметров радиационной обстановки; использование альтернативных подходов к реконструкции доз; гарантия достоверности. Информационную основу реконструкции составили базовые и вспомогательные источники информации. К числу базовых отнесены данные о динамике мощности экспозиционной дозы (МЭД) в населенных пунктах тридцатикилометровой зоны, результаты прямых измерений щитовидной железы и массового анкетного опроса жителей о маршрутах перемещения и режимах поведения, а также отдельных выборочных исследований.

## РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ДОЗ ВНЕШНЕГО ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ

Принципиальное решение, принятое относительно метода реконструкции индивидуальных доз, состояло в том, что территория отдельного населенного пункта Зоны, кроме г. Припять, считалась территорией с равномерным загрязнением. Отсюда следует, что при оценке доз облучения жителей тридцатикилометровой зоны необходимо было учитывать суммарное время, проведенное на улице или в доме и перемещения из одного населенного пункта в другой, тогда как для жителей Припяти необходимо было также учитывать и перемещения в пределах города.

В основу метода реконструкции были положены опросные листы, структурная схема которых приведена на рис. 1.

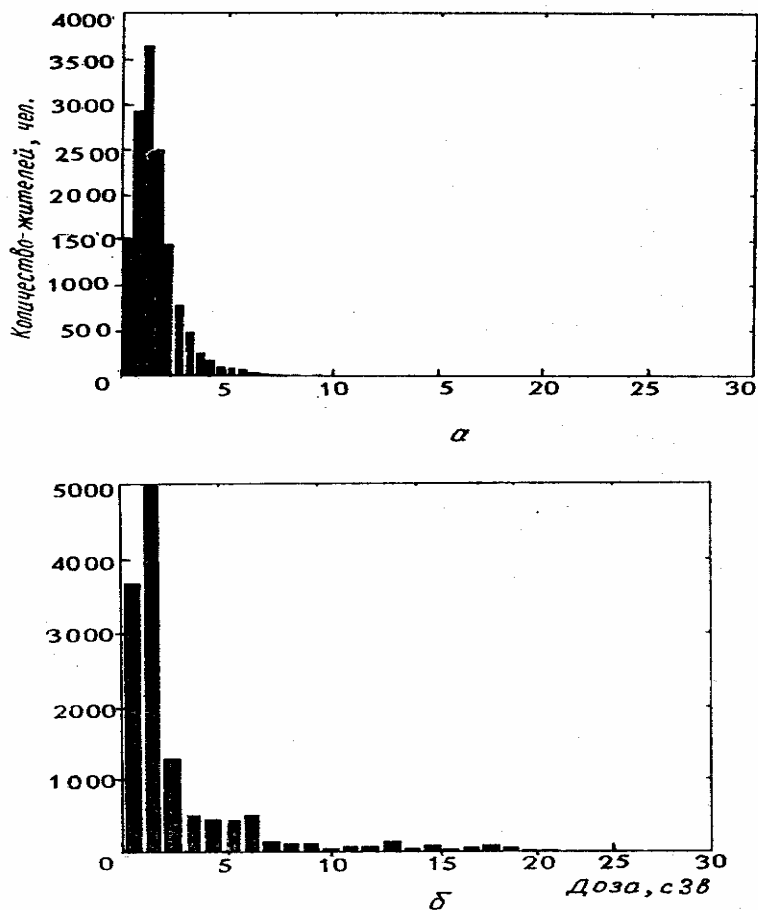


Рис. 2. Частотные распределения индивидуальных доз для жителей Припяти (а) и остальных населенных пунктов зоны (б)

Для установления индивидуальной дозы облучения, полученной жителем Зоны в период от начала аварии до момента эвакуации, необходимо иметь такие сведения: местонахождение и тип дома проживания или пребывания; динамика гамма-фона в населенном пункте проживания или в отдельных точках г. Припять; фиксированные

моменты пребывания на открытом воздухе; маршрут перемещения и его особенности; перечень предпринятых контрмер; момент, характер и место эвакуации.

Кроме того, метод предусматривал идентификацию личности эвакуанта в пределах его паспортной части и профессии, что позволило в последующем установить закономерности поведения и формирования роз облучения в зависимости от пола, возраста и рода занятий.

**Расчет индивидуальной дозы внешнего облучения.** В основу расчета положена динамика радиационной обстановки в населенных пунктах Зоны и в г. Припять.

Расчет индивидуальных доз внешнего облучения осуществлялся по формулам (1) и (2):

$$D_{\gamma} = \sum_m P_i(t_n) \Delta t_n + K_3 \cdot \sum_m P_i(t_m) \Delta t_m = D_{io} + K_3 D_{i3} \quad (1)$$

где  $t_n$  и  $t_m$  — фиксированные моменты измерения МЭД;  $D_{io}$  и  $D_{i3}$  — значения доз, накопленных на открытой местности в точке  $\gamma$  за промежутки времени пребывания соответственно вне зданий и внутри;  $K_3$  — коэффициент защиты зданий, частично равный отношению значений МЭД внутри и вне зданий.

При перемещении объекта облучения в различные точки пространства расчет накопленной дозы облучения можно выполнить по упрощенной схеме посредством суммирования доз в этих точках, однако, часть дозы, которая получена на маршруте перемещения, из расчета исключается:

$$D_{\gamma} = \sum_m D_{io} + K_3 D_{i3} \quad (2)$$

Здесь значения  $D_{io}$  и  $D_{i3}$  являются результатом интегрирования функции МЭД в принципиально различающиеся и взаимно исключающие друг друга промежутки времени, поэтому при существенных перепадах МЭД это обстоятельство необходимо обязательно учитывать.

Коэффициент защиты зданий принимался равным 10 — для высотных домов городского типа и 3 — для домов сельской местности. Последующие исследования коэффициента экранирования зданий показали, что значения этих коэффициентов намного выше [1]. При коррекции доз в будущем необходимо учитывать коэффициент экранирования.

Алгоритм расчета дозы внешнего облучения базировался на информации опросного листа о маршрутах перемещений. Кроме того, формулы расчета включали в себя динамику МЭД для фиксированных точек пространства, каковым являлись либо населенный пункт, либо номер сектора в г. Припять.

Расчет дозы осуществлялся автоматически средствами базы данных, после чего результат заносился в специально выделенное поле.

В итоге реконструкции доз облучения получена база данных, содержащая сведения, необходимые для идентификации и расчета индивидуальных доз для 42473 из 89599 чел., эвакуированных с части тридцатикилометровой зоны, административно относящейся к Украине. Таким образом, в последующем обеспечивалась возможность сортировать массивы данных с целью построения дозовых распределений по выбранным признакам и выявить закономерности формирования доз в выделенных группах.

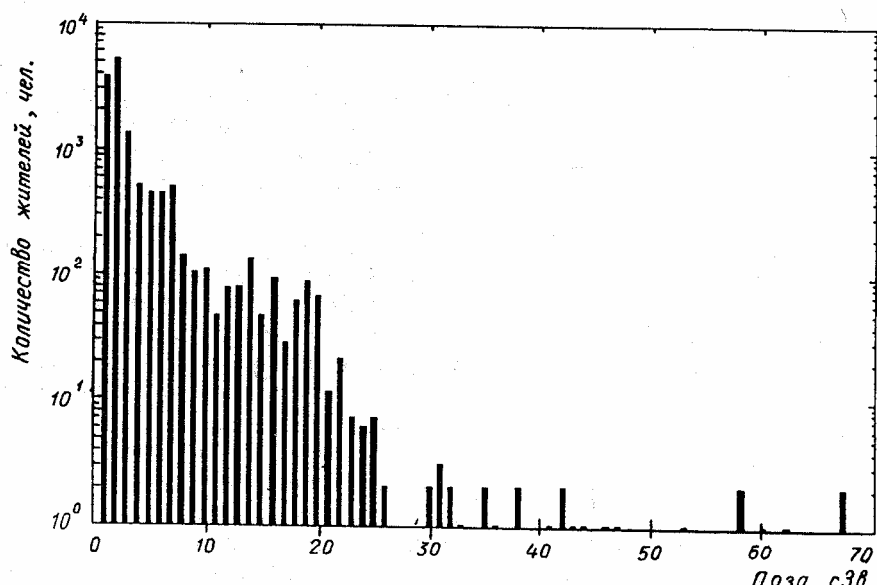


Рис. 3. Частотное распределение индивидуальных доз для жителей сел зоны (логарифмический масштаб)

**Общая характеристика дозовых распределений.** Формирование доз внешнего облучения жителей населенных пунктов тридцатикилометровой зоны происходило в соответствии с радиационной обстановкой и заканчивалось к моменту эвакуации. Часть жителей, покидавших на короткий срок пункт проживания, могла в пункте посещения увеличить или уменьшить суммарную дозу облучения по сравнению с той, которая сформировалась бы в пункте проживания при условии непрерывного нахождения в нем. Поскольку эвакуация жителей Зоны продолжалась две недели, то сопоставлять закономерности формирования доз у жителей населенных пунктов, отселенных в разные сроки, вряд ли имеет смысл. Вместе с тем, дозовые распределения для каждого населенного пункта в отдельности дают достаточно сумбурное представление о картине облучения в целом. Учитывая, что почти половина населения тридцатикилометровой зоны жила в г. Припять, а половина — в остальных пунктах Зоны, рассмотрим частотные распределения накопленных доз у этих двух обширных групп (рис. 2).

Для более наглядного представления о диапазоне доз облучения жителей Зоны это распределение дано на рис. 3 в логарифмическом масштабе.

Сравнивая эти распределения между собой, можно отметить следующие характерные особенности. Распределение для жителей г. Припять более гладкое. Оба распределения по форме напоминают логарифмически нормальные, однако, распределение доз у жителей населенных пунктов Зоны более растянуто в сторону больших доз.

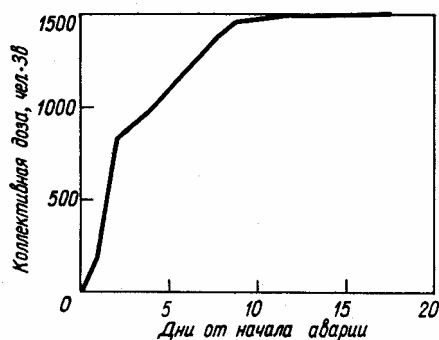


Рис. 4. Динамика изменения коллективной дозы внешнего облучения у жителей тридцатикилометровой зоны в период до эвакуации

Таким образом, получены два типа фактических распределений доз: для одномоментной эвакуации вскоре после начала аварии (г. Припять); для растянутой во

времени эвакуации (населенные пункты зоны). Оба распределения позволяют обоснованно заключить, что относительно доз внешнего облучения эвакуация населения проведена без превышения существовавших на тот период критериев.

Формирование коллективной дозы. Для построения динамики накопления коллективной дозы у жителей тридцатикилометровой зоны производилось суммирование коллективных доз в населенных пунктах до момента их эвакуации (рис. 4). После эвакуации населенного пункта его коллективная доза оставалась неизменной и дальнейшее повышение этой дозы могло происходить только за счет не эвакуированных населенных пунктов.

На кривой зависимости (см. рис. 4) можно выделить два характерных участка. Первый из них заканчивается ко вторым суткам, т.е. к моменту эвакуации г. Припять. Коллективная доза достигает при этом 800 чел. ·Зв. Дальнейший рост коллективной дозы в период со 2-го по 10-й день связан с постепенной эвакуацией населенных пунктов Зоны. Доза к десятым суткам возросла до 1500 чел. ·Зв, и основная масса населения в этот период была эвакуирована. Дальнейший рост коллективной дозы был несущественным. Таким образом, последствия Чернобыльской аварии для жителей, эвакуированных из тридцатикилометровой зоны, по компоненте внешнего облучения могут быть выражены величиной коллективной дозы, равной 1500 чел. ·Зв.

Таблица 1. Характеристика дозовых подгрупп в процентах к численности населения г. Припять и других населенных пунктов тридцатикилометровой зоны (внешнее облучение)

Дозовая подгруппа, сГр	г. Припять	Населенные пункты тридцатикилометровой зоны
0-5	98,58	86,17
>5	1,28	10,50
>10	0,14	3,20
>25	—	0,10
>50	—	0,03

Таблица 2. Характеристики некоторых параметров дозовых распределений для жителей г. Припять и тридцатикилометровой зоны

Территория	Доза, сГр		Отношение максимальной дозы к средней
	средняя	максимальная	
Припять	1,34	20,2	15,0
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	2,40	66,0	27,5

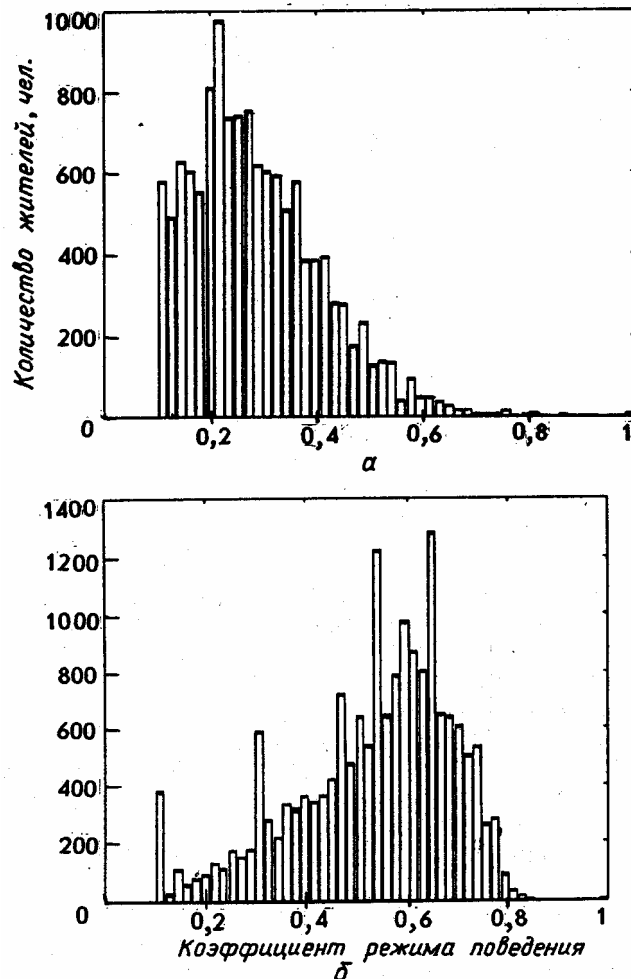


Рис. 5. Частотные распределения коэффициентов режима поведения жителей Припяти (а) и сел тридцатикилометровой зоны (б)

**Характеристика дозовых подгрупп.** Из частотных распределений, представленных на рис. 2 и 3, видно, что диапазон доз облучения населения г. Припять и тридцатикилометровой зоны достаточно широкий. Интересно выяснить, в каких дозовых подгруппах находится та или иная часть эвакуантов. Деление на подгруппы выполнено условно, если учесть оценку эпидемиологических или радиобиологических последствий облучения. Однако основной является, по-видимому, доза 0,5 Гр — порог нестохастических эффектов [2, 3]. Процентные соотношения численности эвакуантов по дозовым подгруппам отдельно для г. Припять (49360 чел.) и тридцатикилометровой зоны (40239 чел.) приведены в табл. 1.

Отсюда видно, что дозы более 50 сГр, в соответствии с представленными частотными распределениями, получили лишь сотые доли процента жителей Зоны.

**Оценка вероятности непланируемого облучения.** Высокая степень неравномерности радиоактивного загрязнения территории тридцатикилометровой зоны и практически не ограничиваемый режим перемещений повышали вероятность переоблучения жителей. В связи с этим в практическом и теоретическом плане правомочным является вопрос о том, какова была вероятность получить дозы на уровне острой лучевой болезни (ОЛБ). Представленные ранее распределения доз на первый взгляд исключают такую возможность как для г. Припять, так и других населенных пунктов Зоны. Однако следует учесть, что эти распределения построены для цензурированных выборок. Так, на основании результатов анкетирования было установлено, что около 15% жителей г. Припять перемещались за пределы городской черты

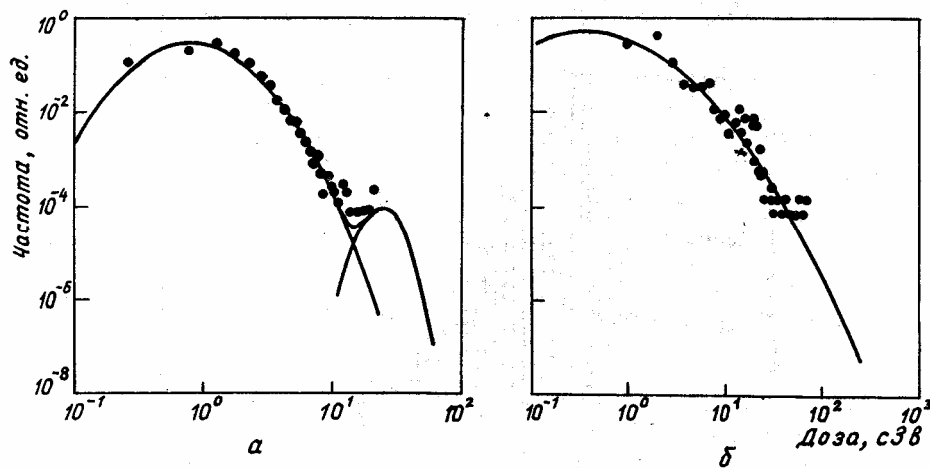


Рис. 6. Дифференциальные распределения доз внешнего облучения жителей Припяти (а) и тридцатикилометровой зоны (б)

Данные об этих жителях не вошли в представленное дозовое распределение из-за отсутствия данных о радиационной обстановке на территориях, прилегающих к г. Припять, в частности в "рыжем лесу". Аналогичная ситуация возникла и относительно жителей Зоны, полный маршрут которых включал в себя точки пребывания с неизвестными параметрами радиационной обстановки, но с чрезвычайно высокой степенью загрязнения.

Таким образом, население Зоны условно можно разделить на две подгруппы: с ординарным и неординарным режимами перемещений, причем вторая подгруппа в дозовом распределении не представлена из-за отсутствия данных.

Рассмотрим детальнее, какие факторы могли влиять на дисперсию распределения, и что способствовало формированию более высоких значений доз. При равномерном загрязнении территории более высокие значения доз наблюдаются у лиц, эвакуированных в более поздние сроки и с более длительным временем пребывания на улице. Для г. Припять эвакуация прошла практически одномоментно и, следовательно, при ее равномерном загрязнении крайние значения доз должны были бы различаться максимум в восемь раз, а среднее и максимальное значения доз — приблизительно в три раза (рис. 5).

Аналогичные соотношения доз можно было бы наблюдать и для жителей тридцатикилометровой зоны при ее равномерном загрязнении. Причем максимальные и средние значения дозы различались бы даже меньше чем в три раза. Это следует из особенностей распределения коэффициентов режима поведения жителей тридцатикилометровой зоны и г. Припять, представленных на рис. 5, диапазон колебаний которых 0,1-0,8 как для г. Припять, так и для жителей населенных пунктов Зоны. Однако распределение этих коэффициентов для жителей населенных пунктов Зоны (рис. 5, б) смещено вправо, при этом средняя величина коэффициента примерно в два раза больше, чем для жителей г.- Припять. Сроки эвакуации, растянувшиеся для сел тридцатикилометровой зоны с 6-го по 18-й день должны были бы дополнительно втрое увеличить дозу. В итоге, при равномерном загрязнении территории максимальная и средняя величины доз должны были бы различаться в три раза для г. Припять и в шестьдесят раз для жителей тридцатикилометровой зоны. Фактические значения средней и максимальной доз приведены в табл. 2, где видны очень большие различия рассматриваемых величин, обусловленные фактором неравномерности.

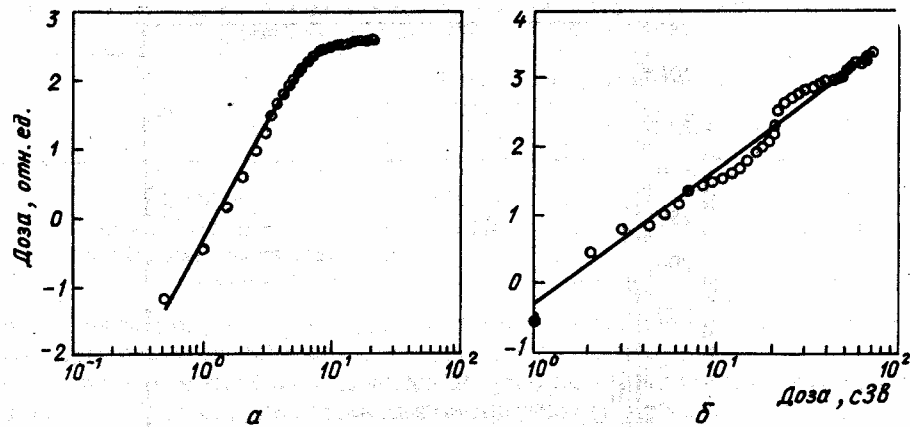


Рис. 7. Инверсия функций накопленных частот для кумулятивных распределений доз жителей Припяти (а) и населенных пунктов зоны (б)

Такое упрощенное описание, не претендующее на детальный анализ отдельных фрагментов фактического распределения, предполагает, что фактор неравномерности вносит в фактическое распределение более весомый, или по крайней мере сопоставимый вклад, чем режим поведения или срок эвакуации.

Полученные частотные распределения описаны логарифмически-нормальным распределением функции плотности вероятности или суммой двух распределений с учетом двух групп населения — с ординарным и неординарным режимами перемещений. Фактические и теоретические распределения доз облучения приведены на рис. 6. Параметры теоретических распределений даны в табл. 3.

Таблица 3. Параметры теоретических распределений плотности вероятности доз для жителей г. Припять и тридцатикилометровой зоны

Территория	Параметр					
	$p1$	$m1$	$s1$	$p2$	$m2$	$s2$
г. Припять	0,997	1,23	0,66	0,003	25,20	0,86
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	1,0	1,40	1,15	—	—	—

Параметры подбирались по двум критериям: наименьшее отклонение от фактического частотного распределения доз и наименьшее отклонение от кривой кумулятивного накопления частот.

Инверсное представление функций накопленных частот для г. Припять и населенных пунктов Зоны приведено на рис. 7.

Из сопоставления распределений на рис. 6 и 7 видно, что правые части теоретических распределений для г. Припяти обозначены некоторым ростом вероятности облучения в диапазоне повышенных значений доз, и тем самым оправдывают существование второго распределения с параметрами, данными в табл. 3. Кривые, описывающие аналогичным образом распределения доз для жителей населенных пунктов Зоны, позволяют убедиться в том, что обычное логнормальное распределение позволяет отразить лишь наиболее общую тенденцию.



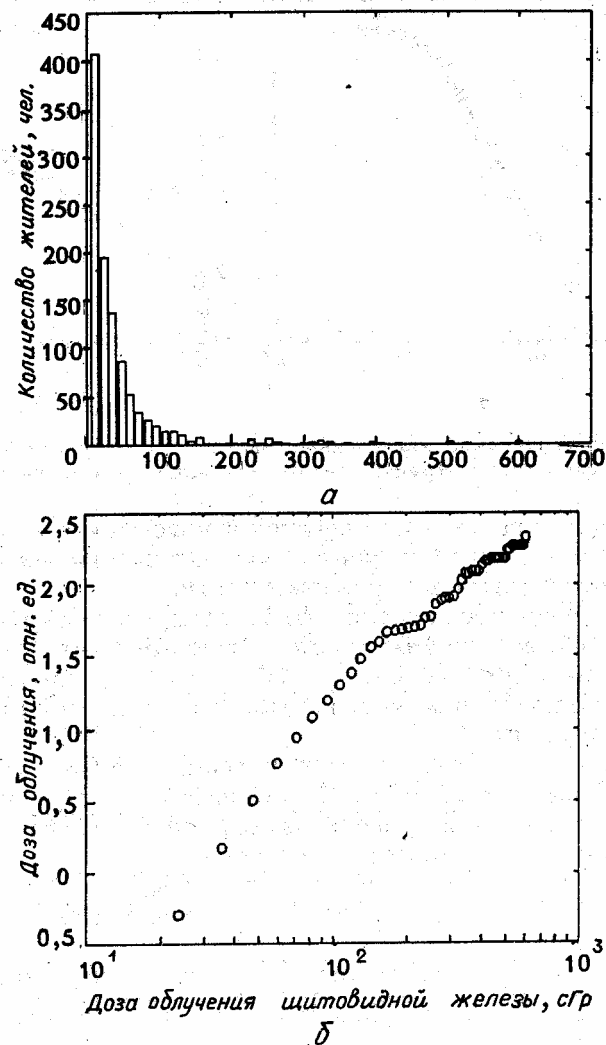


Рис. 8. Частотное распределение доз облучения щитовидной железы взрослых (а) и их инверсия для функции накопленных частот (б)

Сравнивая кривые на рис. 6 и 7, можно убедиться, что разложение фактического распределения для Зоны на сумму нескольких распределений намного сложнее, чем для г. Припять. Это и послужило аргументацией в пользу использования только одного распределения.

Таким образом, с одной стороны, мы имеем цензурированные выборки фактических данных, а с другой — теоретические распределения, не подтверждаемые прямыми данными в диапазоне высоких значений доз.

Тем не менее общие тенденции дают нам некоторое право распространить теоретические значения плотности вероятности в область доз, где фактические данные отсутствуют.

Проинтегрировав теоретические функции плотности вероятности в диапазоне 25 — 50, 50 — 100 и более 100 сГр, получим интересные для нас значения вероятности непланируемого облучения жителей в диапазонах высоких значений доз. Результаты расчета представлены в табл. 4, из которой видно, что вероятность получения жителями г. Припяти (в пределах городской черты) доз на уровне острой лучевой болезни очень мала, но при этом могла быть реальностью для нескольких приблизительно ив 50 тыс. чел. жителей сел Зоны.

Таблица 4. Оценка вероятности получения дозы в диапазонах до 100 и свыше 100 сГр

Территория	Вероятность реализации доз в диапазонах		
	25-50 сГр	50-100 сГр	> 100 сГр
г. Припять	0,015	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-10}$
Населенные пункты тридцатикилометровой зоны	0,045	$6,4 \cdot 10^{-54}$	$6,6 \cdot 10^{-5}$

Сложнее оценить вероятность получения высоких значений доз ЩЖ жителей г. Припять, выезжавших за пределы городской черты. Для этого использовали информацию о соотношении локальной и фактической дозы у лиц, мигрирующих за пределы населенного пункта. Из анализа распределения отношений локальных и фактических доз оказалось что величина фактической дозы может с вероятностью до 1 % превышать локальную дозу в 100 раз. В 10 % случаев фактические дозы могли превышать локальные в 10-50 раз. Это значит, что из 7500 жителей г. Припять, составивших 15 % населения, выезжавшего за пределы города, около 75 чел. могли получить дозы более 100 сГр, а 750 чел. — от 10 до 50 сГр.

Представленные расчеты и оценки имеют очень приближенный характер и их следует воспринимать лишь как сигнал к тому, что проблема переоблучения могла затронуть определенную часть населения.

### ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

Дозы облучения щитовидной железы формировались за счет ингаляционного поступления — в период распространения облака и за счет поступления с продуктами питания (главным образом, с молоком и зеленью).

Таблица 5. Характеристика изотопов йода в реакторе на момент аварии

Радионуклид	Период полураспада	Активность, Бк/т	$A_i / A_{131}$
$^{134}\text{I}$	52,6 мин	$3,58 \cdot 10^{16}$	2,14
$^{133}\text{I}$	20,8 ч	$3,29 \cdot 10^{16}$	1,97
$^{135}\text{I}$	6,61 ч	$3,07 \cdot 10^{16}$	1,84
$^{132}\text{I}$	2,28 ч	$2,37 \cdot 10^{16}$	1,42
$^{131}\text{I}$	8,04 сут	$1,67 \cdot 10^{16}$	1,0
$^{137}\text{I}$	24,7с	$1,41 \cdot 10^{18}$	0,84
$^{136}\text{I}$	44,8с	$1,22 \cdot 10^{16}$	0,73
$^{136m}\text{I}$	85,1с	$1,03 \cdot 10^{16}$	0,62
$^{138}\text{I}$	6,40с	$7,08 \cdot 10^{15}$	0,42
$^{134m}\text{I}$	3,56 мин	$4,15 \cdot 10^{15}$	0,25
$^{139}\text{I}$	2,47с	$2,73 \cdot 10^{15}$	0,16
$^{133}\text{I}$	9,0с	$1,36 \cdot 10^{15}$	0,08
$^{140}\text{I}$	0,86с	$6,26 \cdot 10^{14}$	0,04
$^{130}\text{I}$	12,36 ч	$5,58 \cdot 10^{14}$	0,03
$^{130m}\text{I}$	9,2 мин	$2,98 \cdot 10^{14}$	0,02
$^{132m}\text{I}$	83,6 мин	$2,09 \cdot 10^{14}$	0,01
$^{128}\text{I}$	24,99 мин	$1,17 \cdot 10^{14}$	0,01
$^{141}\text{I}$	0,42 с	$6,87 \cdot 10^{13}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$
$^{129}\text{I}$	$1,57 \cdot 10^7$ лет	$9,18 \cdot 10^8$	$5,5 \cdot 10^8$
$^{126}\text{I}$	13,02 сут	$6,39 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^{10}$
$^{132}\text{Te}$	78ч	$2,33 \cdot 10^{16}$	1,40

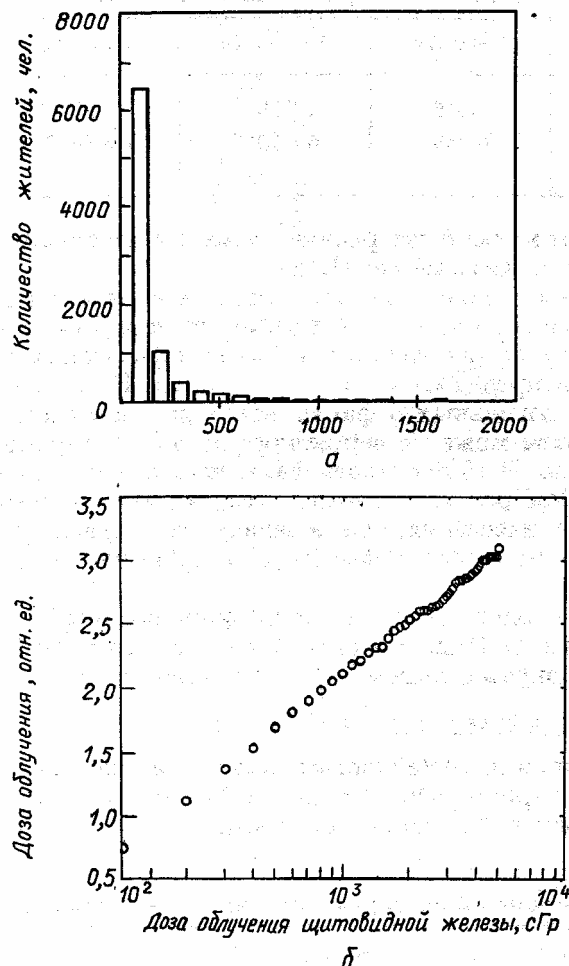


Рис. 9. Частотное распределение доз облучения щитовидной железы детей (а) и их инверсия для функции накопленных частот (б)

Второй путь поступления радиойода в организм имеет наибольшее значение для жителей, отселенных из Зоны в более поздние сроки, или для оказавшихся отселенными в Зону радиоактивного загрязнения за пределами тридцатикилометровой зоны.

Изотопы йода по территории Зоны распространялись в тех же направлениях, что и другие радионуклиды. Однако наблюдалась существенная температурная сепарация изотопов йода, благодаря которой происходило обогащение или обеднение осколочной смеси радиойодом по направлениям выброса.

Метеообстановка в этот период определила и главные направления йодной атаки: северо-западное, северное и северо-восточное.

Характеристика изотопов йода в выбросе. Перечень для 21 изотопа йода, образовавшегося в реакторе, представлен в табл. 5.

Большинство приведенных радионуклидов не представляет опасности. Можно исключить из расчета ДОЗЫ облучения, радионуклиды, период полураспада которых составляет секунды и минуты или те из них, удельная активность которых на 1 т топлива на один или несколько порядков ниже, чем активность радионуклидов верхней части таблицы. Наибольшее значение при облучении щитовидной железы имеют следующие изотопы:  $^{131}\text{I}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$  и  $^{132}\text{Te}$ .

**Информационная основа для анализа и оценки доз облучения щитовидной железы.** Массовые измерения содержания радиойода в щитовидной железе у эвакуированных жителей составили основу анализа закономерностей формирования доз у жителей Зоны отчуждения. Было выполнено 10 690 измерений, из которых 9625 — у детей и 1065 — у взрослых.

Важный момент при анализе дозовых распределений — выбор возрастных подгрупп. Современные дозиметрические модели имеют шесть градаций возраста: 3 мес, 1; 5; 10; 15

и старше 20 лет. В настоящей работе, для увеличения статистики в пределах младших возрастных групп, целесообразно выделить следующие возрастные диапазоны: менее 1 года, 1-3; 4-7; 8-11; 12-15; 16-18 и более 18 лет.

Таблица 6. Параметры частотных распределений доз облучения щитовидной железы у обследованных жителей тридцатикилометровой зоны в различных возрастных подгруппах

Возрастная группа, лет	Медиана распределения, сГр	Дисперсия	Максимальная доза, сГр	Число намерений	Процент лиц с дозой облучения более 2 Гр
Менее 1	247,70	690,70	4472	100	57,0
1-3	167,60	536,90	4997	1228	42,6
4-7	79,80	307,30	4978	1785	19,9
8-11	26,12	110,20	1661	2679	5,41
12-15	17,22	72,70	1241	3107	2,37
16-18	14,80	55,20	570	726	2,07
Более 18	24,66	67,70	800	1065	3,62
Всего измерений 10 676					

**Общая характеристика дозовых распределений.** Наиболее общее представление о дозах облучения щитовидной железы дают частотные распределения доз и соответствующие им пробит-графики.

Распределение доз у детей (рис. 8) подчиняется логарифмически-нормальному закону, а у взрослых (рис. 9) диапазон высоких значений доз обозначается изломом пробит-графика, что свидетельствует о дополнительной составляющей распределения. Диапазон доз облучения детей существенно шире, чем взрослых, и количество детей, получивших дозы облучения щитовидной железы более 2 Гр (порога возможного развития острого тиреоидита) намного больше.

Параметры представленных на рис. 8 и 9 дозовых распределений приведены в табл. 6, из которой следует, что с увеличением возраста медиана распределения постепенно смещается влево и снижается процент лиц, облученных дозами более 2 Гр. Некоторое исключение составляет лишь группа взрослого населения, у которых медиана распределения почти вдвое превышает медиану старшей возрастной группы детей от 16 до 18 лет.

#### Закономерности формирования доз облучения щитовидной железы

Из предварительного анализа дозовых распределений трудно сказать насколько именно эти распределения адекватны для всего населения Зоны. Дело в том, что количество измерений щитовидной железы у взрослых жителей не превышало 2% общей численности взрослого населения, а сравнительно большое количество измерений у детей проведено в основном в Припяти и Чернобыле.

Очевидно, что закономерности формирования доз облучения способствовали бы выделению дозовых подгрупп, внутри которых присвоение доз происходило бы с наибольшей степенью достоверности.

Поиск закономерностей проводился в следующих направлениях: исследование пространственных закономерностей формирования доз; исследование влияния фактора времени; исследование роли защитных мероприятий. За основу сравнительного анализа доз облучения будем брать населенный пункт, полагая, что в пределах его условия формирования доз внутри отдельных возрастных групп идентичны.

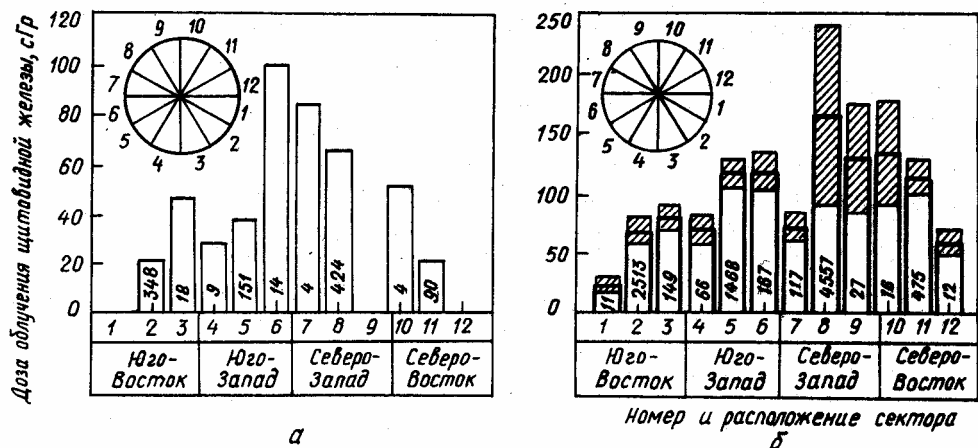


Рис. 10. Распределение средних доз облучения щитовидной железы взрослых (а) и средних стандартизованных доз детей (б) по секторам зоны. Заштрихованная область на рисунке (б) показывает диапазон стандартных ошибок

**Понятие стандартизованной дозы облучения щитовидной железы.** Если учитывать, что разброс доз облучения между возрастными группами достаточно велик, то поиск закономерностей в отдельных возрастных группах при множестве факторов, влияющих на дозы облучения, затруднителен. Необходимо найти такую однородную возрастную группу, численность которой была бы достаточна для статистического обобщения. К сожалению, такую группу найти невозможно, поскольку группы одного возраста разбиваются, еще по принципу момента эвакуации из тридцатикилометровой зоны.

Для повышения статистической мощности обобщения предлагается ввести понятие стандартизованной дозы облучения щитовидной железы, т.е. дозы, приведенной к одному возрасту. В данной работе стандартизованные дозы облучения детей приводятся к дозам облучения взрослых путем деления на коэффициент, равный отношению дозовых коэффициентов в соответствующей детской группе к дозовому коэффициенту взрослых.

**Пространственное распределение доз облучения щитовидной железы.** Темп выброса изотопов йода из реактора и перемена направлений и скорости ветра привели к тому, что различные секторы Зоны подверглись йодной атаке в различной степени. Рассмотрим, как средние значения доз облучения щитовидной железы детей и взрослых распределены по секторам. Каждый сектор представляет собой часть Зоны, ограниченную радиусами, расходящимися под углом 30 градусов. Начало отсчета секторов ведется с юго-восточного направления. Информация о средних дозах облучения приведена на рис. 10, из которого видно, что дозы облучения щитовидной железы жителей северной части Зоны выше доз облучения, чем южной, что согласуется с основными направлениями йодной атаки. Однако размеры выборок по секторам резко различаются. В некоторых секторах средние значения доз представлены единичными измерениями, а для взрослых, проживавших в 1, 9 и 11 секторах Зоны, информация вообще отсутствует. Соотношение численности возрастных групп по секторам также не одинаково, что затрудняет возможность сравнения доз облучения у детей в различных секторах.

Использование стандартизованных доз позволяет устранить отмеченные недостатки. Распределение средних стандартизованных доз по секторам показано на рис. 11. Следует отметить, что характер распределения доз в целом сохранился. Кроме того, абсолютные значения стандартизованных доз согласуются со средними дозами для взрослых, представленных на рис. 10.

Для наиболее пострадавшей северной части Зоны прямых измерения недостаточно, о чем свидетельствуют большие значения стандартных ошибок (заштрихованные области на рис. 10 и 11).

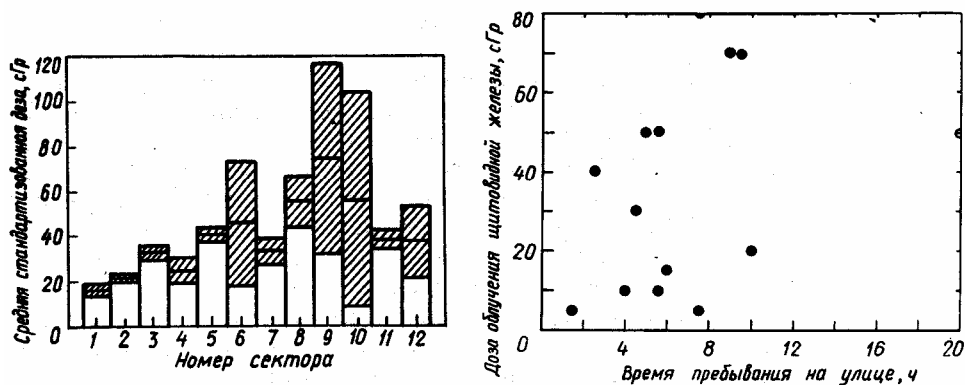


Рис. 11. Распределение средних стандартизованных доз облучения щитовидной железы жителей зоны по секторам. Номера секторов соответствуют рис. 10.

Рис. 12. Связь дозы облучения щитовидной железы жителей Припяти с временем пребывания на улице

**Влияние на дозы фактора времени.** Среди факторов, оказывающих влияние на дозу облучения щитовидной железы, фактор времени должен иметь важное значение. В частности, более длительное время пребывания на улице или более поздние сроки эвакуации должны приводить к возрастанию дозы. Однако проверка этого предположения наталкивается на ряд трудностей, связанных с выбором однородной группы, т. е. группы лиц примерно одного возраста, не принимавших препараты йода, проживающих в одном населенном пункте и имеющих сведения о режиме поведения. Для оценки связи дозы с временем пребывания на улице была отобрана группа взрослых лиц, эвакуированных из Припяти в Ленинград и обследованных в Военно-медицинской академии. Установлено, что 14 чел. из 64 эвакуированных не принимали препараты йода, поэтому после измерения активности  $^{131}\text{I}$  в щитовидной железе и для расчета дозы был проведен подробный опрос режима поведения обследуемых в период от начала аварии до момента эвакуации. С увеличением времени пребывания на улице доза облучения повышается (рис. 12).

Для оценки связи дозы облучения щитовидной железы с моментом эвакуации из тридцатикилометровой зоны отобраны населенные пункты, относящиеся к различным секторам Зоны, из которых были эвакуированы жители в различные сроки.

Таблица 7. Средние дозы облучения щитовидной железы по населенным пунктам и секторам Зоны

Дата эвакуации	Населенный пункт (сектор)	Дети		Взрослые	
		Доза, Гр	> 2 Гр, %	Доза, Гр	> 2 Гр, %
27.04.86	Припять (8)	1,3	15,1	0,8	6,6
03.05.86	(1,2,3)	1,1	11,2	0,5	—
03.05.86	(6,7,8)	1,2	12,1	0,6	3,8
05.05.86	Чернобыль (2)	0,8	5,6	0,5	—
07.05.86	(1,2)	1,9	27,7	0,8	8,3

Средние дозы облучения для населенных пунктов и секторов приведены в табл. 7, из которой следует, что дата эвакуации практически не влияет на дозы облучения. Так, Припять, эвакуированная 27 апреля и относящаяся к сектору 8 Зоны, имеет даже несколько большую среднюю дозу по сравнению со средней дозой населенных пунктов, расположенных в секторах 6, 7 и 8 и эвакуированных 3 мая 1986 г. Только для населенных пунктов секторов 1 и 2, эвакуированных 7 мая, наблюдаются несколько большие значения доз у взрослых и почти вдвое большие — у детей.

**Влияние на дозы облучения щитовидной железы защитных мероприятий.** К числу защитных могут быть отнесены: блокада щитовидной железы стабильным йодом; герметизация помещений; ограничение времени пребывания на улице. Последнее мероприятие слабо влияет на величину дозы облучения. Не исключено, что это связано с открытием окон в домах и квартирах, поскольку в тот период стояла достаточно жаркая погода.

Рассмотрим влияние на дозы облучения йодной профилактики. Для этого использованы результаты анкетного опроса 854 жителей, эвакуированных из Припяти.

Анкеты содержали вопрос о приеме препаратов йода, а также в какие дни и сколько раз эти препараты принимались.

Таблица 8. Результаты опроса 854 жителей Припяти о проведении йодной профилактики

Сведения	Количество чел.	Жители, %
Не принимали препараты йода	231	27
Принимали препараты йода	623	73
Из них:		
Только 26 апреля	387	45,3
Только 27 апреля	121	14,2
26 и 27 апреля	115	13,5

Общая характеристика особенностей йодной профилактики жителей Припяти приведена в табл. 8.

Из табл. 8 видно, что 27,% жителей не принимали препаратов йода в доэвакуационный период. А среди жителей, имевших представление об опасности изотопов йода и узнавших об аварии, основная часть принимала препараты йода только в первый день и только 13,5% жителей принимали препараты их два дня подряд.

Как отразились особенности йодной профилактики или ее отсутствие на дозах облучения, видно из табл. 9. Наибольший защитный эффект достигался при приеме препаратов йода 26 и 27 апреля. Медиана доз облучения уменьшалась при этом в 2,3 раза. Прием препаратов йода только 26 или только 27 апреля давал примерно одинаковый эффект, равный 1,6-1,7.

Таблица 9. Средние значения стандартизованных доз облучения щитовидной железы жителей Припяти в зависимости от отношения к йодной профилактике

Параметр	Средняя стандартизованная доза, сГр			
	Не принимали препараты йода	Принимали препараты йода только 26 апреля	Принимали препараты йода только 27 апреля	Принимали препараты йода 26 и 27 апреля
Среднее арифметическое	60,5	47,4	40,3	31,2
Стандартная ошибка	7,0	6,4	6,3	6,8
Среднее геометрическое	30,8	18,3	19,4	13,1

**Вклад короткоживущих изотопов йода в дозу облучения щитовидной железы.** Значительная часть активности  $^{131}\text{I}$  была выброшена вместе с короткоживущими радионуклидами (см. табл. 5). Однако к моменту измерений содержания радиойода в щитовидной железе короткоживущие изотопы распадались и приборы регистрировали лишь долгоживущий  $^{131}\text{I}$ . Таким образом, возникает вопрос о вкладе в дозу облучения щитовидной железы короткоживущих изотопов йода или их предшественников. Из всего многообразия изотопов, представленных в табл. 5, дополнительную дозу облучения могли дать лишь  $^{132}\text{I}$ ,  $^{133}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ,  $^{132}\text{Te}$ . Последний ( $^{132}\text{Te}$ ) в процессе радиоактивного распада превращался в  $^{132}\text{I}$  и избирательно накапливался в щитовидной железе. Соотношение изотопов йода в выбросе изменялось по мере радиоактивного распада отдельных компонентов смеси, поэтому вклад в дозу облучения мог зависеть от времени, прошедшего от начала аварии до момента поступления в организм и от длительности. Для упрощения расчетов принято, что период облучения населения тридцатикилометровой зоны за счет радиоактивного йода длился от начала аварии до момента эвакуации. В основу расчета дозы облучения от изотопов йода положена экспоненциальная модель поступления, согласующаяся с периодом полураспада соответствующего радионуклида. Дозиметрическая модель  $^{132}\text{Te}$  учитывала накопление дочернего I и его радиоактивный распад во внешней среде и в организме человека. Дозы облучения щитовидной железы от отдельных радионуклидов выражались в относительных единицах к дозе облучения от  $^{131}\text{I}$ , рассчитанной для той же длительности контакта. Результаты расчетов приведены в табл. 10, из которой следует, что наибольший вклад в дозу облучения давали  $^{133}\text{I}$  и  $^{132}\text{Te}$ . С увеличением длительности поступления вклад в дозу короткоживущих изотопов йода уменьшался.

Таблица 10. Относительный вклад отдельных короткоживущих радионуклидов в дозу облучения щитовидной железы от  $^{131}\text{I}$  в зависимости от длительности поступления

Изотоп	Длительность воздействия, ч						
	1	5	10	20	36	96	240
$^{132}\text{I}$	$8,7 \cdot 10^{-3}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$
$^{133}\text{I}$	$3,5 \cdot 10^{-1}$	$3,3 \cdot 10^{-1}$	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	$6,8 \cdot 10^{-2}$
$^{135}\text{I}$	$5,9 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
$^{132}\text{Te}$	$2,4 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$2,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
Сумма	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	$5,8 \cdot 10^{-1}$	$5,2 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$	$2,2 \cdot 10^{-1}$

Например, при длительности поступления изотопов йода 1 ч, вклад в дозу облучения составлял 66 %, а за 10 дней — только 22 %. Результаты расчета, приведенные в табл. 10, позволяют заключить, что жители Припяти и других населенных пунктов, эвакуированные 27 апреля 1986 г., получили дополнительную дозу облучения щитовидной железы за счет короткоживущих изотопов, составляющую 45 % от дозы  $^{131}\text{I}$

## ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ОТ ИНГАЛИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ

Выброс радиоактивности в окружающую среду из разрушенного блока реактора можно представить в виде облака аэрозолей, движущихся на некоторой высоте со скоростью перемещения воздушных масс. Основная часть активности радионуклидов, выпавших на территории Зоны отчуждения, была выброшена из реактора в форме топливных и аэрозольных частиц, геометрические размеры которых и аэродинамические параметры находятся в диапазоне от долей микрона до десятков микрон. В процессе движения облака топливные частицы выпадали на почву, благодаря чему концентрация радионуклидов в воздухе и плотность их выпадений возрастали, формируя локальную радиационную обстановку. Возрастала и мощность экспозиционной дозы, а если в месте



выпадения аэрозолей оказывался человек, то за счет вдыхания радиоактивных частиц формировалась доза внутреннего облучения на фоне внешнего облучения всего тела.

Расчет концентрации аэрозолей в воздухе. Исходной основой расчета дозы облучения за счет ингаляционного поступления радионуклидов является концентрация в воздухе. Предполагалось, что между плотностью выпадений радионуклидов, скоростью их осаждения и концентрацией в воздухе существовала связь с мощностью экспозиционной дозы. Отклонение в соотношениях возникало лишь в случаях сепарации радионуклидов за счет наиболее летучей фракции.

Полидисперсные аэрозоли, даже если они выброшены из реактора одновременно, приземляются на почву с различными скоростями. С увеличением времени от начала аварии наступило истощение крупнодисперсных аэрозолей, если не было их дополнительного притока в окружающую среду. Истощение других, более мелких фракций продолжалось до приземления всей массы аэрозолей.

Концентрация радионуклидов в воздухе определялась аэрозолями различной дисперсности и различным соотношением их размеров в некоторой точке пространства. Кроме того, переменным было и соотношение радионуклидов в зоне приземления аэрозолей, по мере распада короткоживущих радионуклидов. В связи с этим концентрация радионуклидов в воздухе сначала рассчитывалась в единицах массы и связанных с ней геометрических и аэродинамических размеров.

Динамика приземления аэрозолей из облака, находящегося на высотах 100 и 1000 м, показана на рис. 13.

Кривые на рис. 13, а рассчитаны при условии, что скорость приземления определяется только гравитационными и аэродинамическими свойствами аэрозолей и на них не действуют нисходящие и восходящие потоки воздушных масс. Тем не менее для приземления ингалибельной фракции частиц, в диапазоне более 10 мкм, необходимо несколько часов, а для полного приземления — десятки и сотни часов.

Для количественного описания процесса накопления массы аэрозолей заданного диаметра от момента их выброса до момента приземления необходимо учитывать сразу несколько факторов: расстояние от места выброса до точки наблюдения, скорость ветра, высоту выброса, динамику выброса и др. Использование при расчете некоторых приближений позволяет упростить задачу расчета массы аэрозолей.

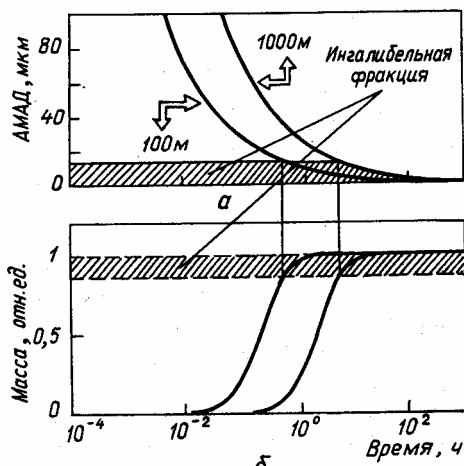


Рис. 13. Время, необходимое для приземления аэрозолей различного размера (а) и накопления массы топлива на поверхности почвы (б)

Во-первых, наибольший интерес представляет не динамика изменения концентрации аэрозолей во времени, а интегральная концентрация за период от начала аварии до момента эвакуации. Это допущение не позволяет в полной мере учитывать пиковые значения концентраций, которые могли возникнуть в период пребывания некоторого субъекта на открытой местности, однако, выпадения ингалибельной фракции

происходили достаточно медленно, чтобы некоторыми особенностями динамики можно было пренебречь.

Во-вторых, если предположить, что радиационная обстановка на момент эвакуации сформировалась благодаря полному спектру размеров аэрозолей, т.е. перенос аэрозолей в пространстве происходил без истощения крупнодисперсной фракции, то плотность выпадений активности или массы топлива можно связать с потоком выпадений и потоком выброса линейной во времени моделью формирования радиационной обстановки.

В соответствии с этой моделью концентрация аэрозолей в воздухе, обусловленная частицами  $i$ -го размера и выраженная в единицах массы, будет

$$C_{mi} = \frac{P_m(d_i)}{t_{эв} V_i} \quad (3)$$

где  $t_{эв}$  — время от начала аварии до момента эвакуации;

$V$  — скорость осаждения аэрозолей  $i$ -й фракции;

$P_m(d_i)$  - относительный парциальный вклад фракции частиц диаметром  $d_i$  в суммарную массу топлива, выпавшего на единичную площадь.

Суммируя (3) по всему диапазону размеров аэрозолей, получаем величину суммарной концентрации аэрозолей в воздухе, выраженную относительных единицах к массе топлива, выпавшего на единичной площади:

$$C_m = \sum C_{mi} \quad (4)$$

Расчет концентрации аэрозолей в единицах массы. Воспользуемся теперь представленными соотношениями для оценки концентрации аэрозолей и параметров некоторых распределений после Чернобыльской аварии. Результаты расчетов концентрации, представленные далее, выполнены из предположения, что выброс и распространение радиоактивности происходили исключительно за счет топливных частиц. Формирование следа, то есть плотности выпадений радионуклидов на почве происходило равномерно за счет всех фракций и в течение всего времени от начала аварии до момента локализации выброса.

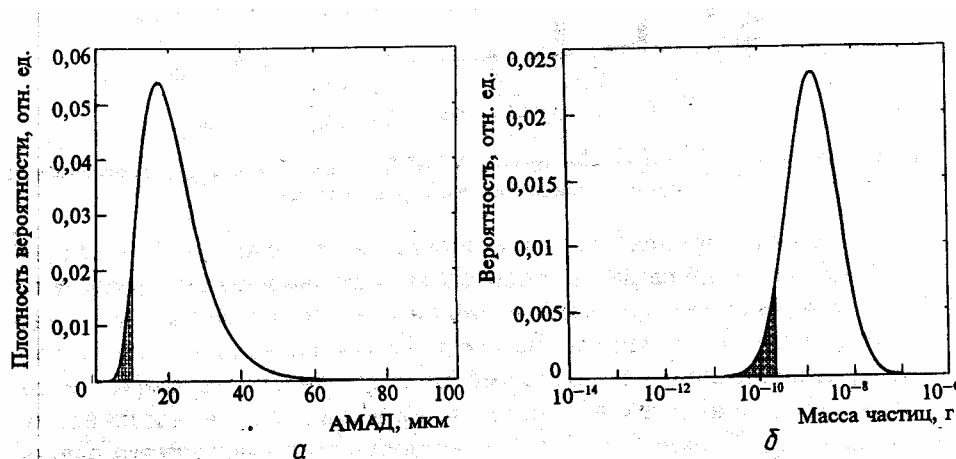
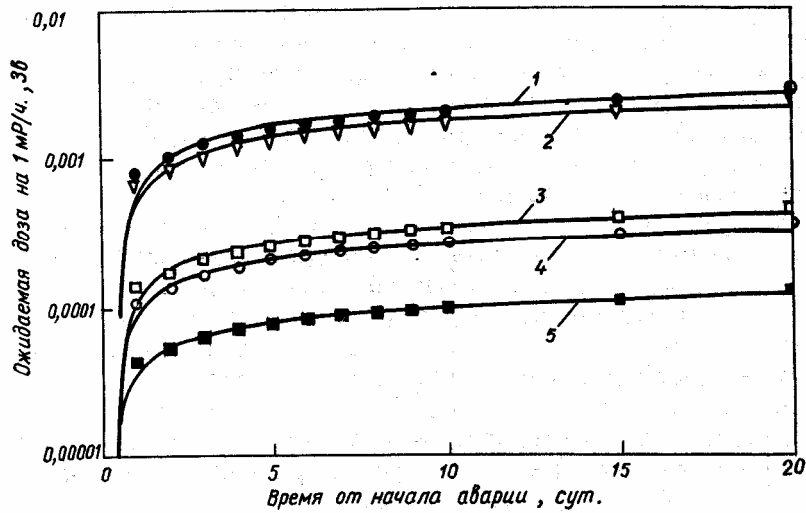


Рис.14. Плотность вероятности распределения аэрозолей выброса по АМАД (а) и дифференциальное распределение аэрозолей по массе (б)



15. Динамика изменения дозового эквивалента МЭД для ингаляционного поступления:

1-суммарная эквивалентная доза на легкие; 2 — эквивалентная доза на легкие от бета-излучателей; 3 — суммарная эффективная доза; 4 — эффективная доза от бета-излучателей; 5 — эквивалентная доза на НТК

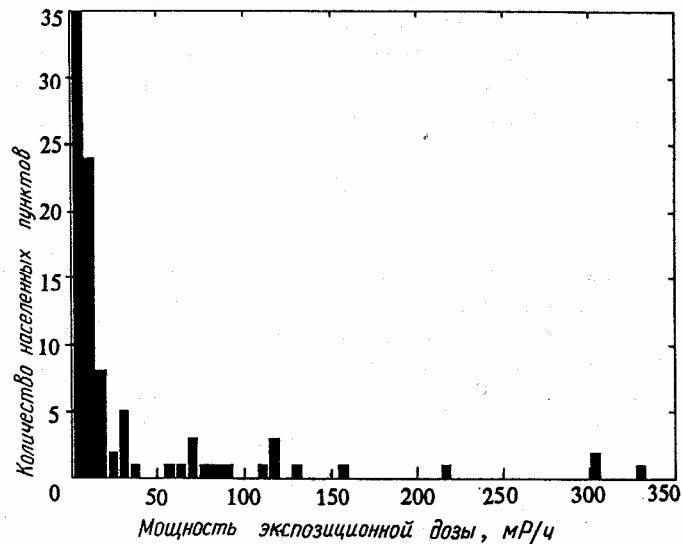


Рис.16. Частотное распределение значений МЭД в день эвакуации в населенных пунктах тридцатикилометровой зоны

Распределение аэрозолей по диаметру подчинялось логарифмически-нормальному закону с АМАД (аэродинамический медианный по активности диаметр) 20 мкм [5] и  $\sigma=0,4$ . Плотность топлива принята равной  $9 \text{ г/см}^3$ , что соответствует плотности отработанного топлива. В модели предполагается, что основная масса выпавшего топлива оседает достаточно быстро, чтобы считать, что в момент эвакуации населения радиационная обстановка сложилась за счет радиоактивности, осевшей на почву, а не за счет аэрозолей, находящихся в воздухе.

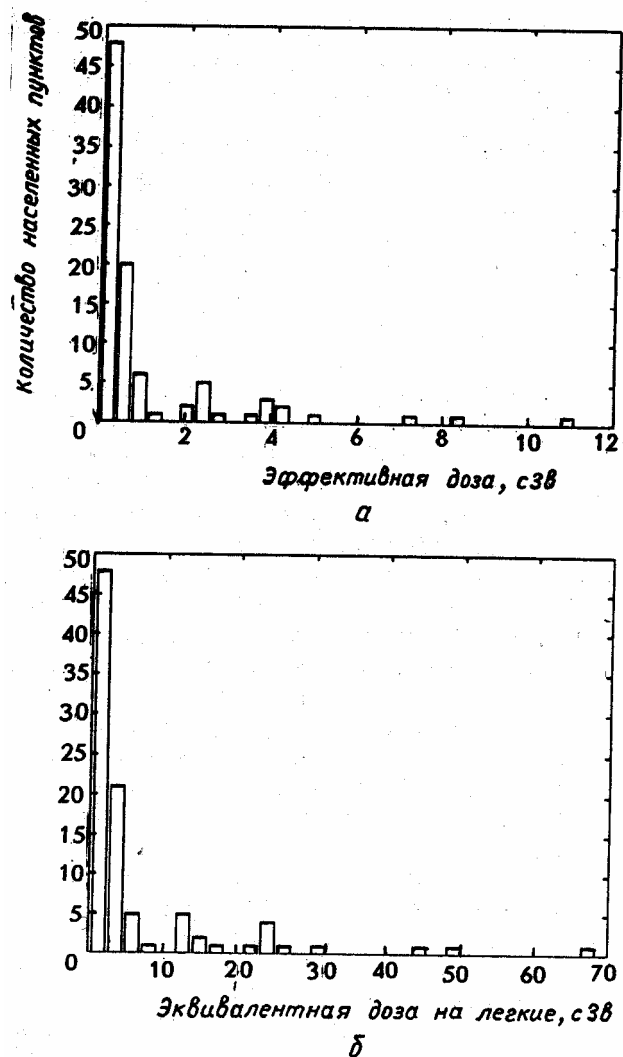


Рис. 17. Распределения максимальных ожидаемых эффективных доз (а) и эквивалентных доз на легкие (б) по населенным пунктам тридцатикилометровой зоны

Последнее допущение позволяет выразить массу выпавшего топлива, с учетом известного распределения плотности вероятности аэрозолей по диаметру и по массе на потоки осаждения топлива по соответствующим фракциям.

Распределения аэрозолей по диаметру и массе, при условии полного приземления всех фракций выброса на почву, показаны на рис. 14.

Для полного приземления аэрозолей всех размеров необходимо несколько суток (рис. 13). Тем не менее принято допущение о том, что в любой рассматриваемый момент эвакуации все фракции аэрозолей, обуславливающие текущую радиационную обстановку, уже выпали на почву. Это предположение позволяет, с одной стороны, значительно упростить расчет, а с другой — исключить недооценку доз за счет наиболее ингалибельной фракции аэрозолей.

Из представленных распределений видно, что ингалибельная фракция аэрозолей (до 10 мкм) [6] составляет лишь достаточно узкую область полного распределения. Из рис. 14, б также видно, что медиана распределения по массе равна  $2,77 \cdot 10^{-9}$  г, а граничная масса ингалибельной фракции составляет  $1,2 \cdot 10^{-9}$  г. Эти величины крайне важны для перехода от массовых единиц к единицам активности.

В соответствии с представленной ранее формулой (3), концентрация аэрозолей, соответствующая некоторой плотности выпадений топлива на почву, зависит от времени формирования следа, т. е. времени, прошедшему от начала аварии до момента эвакуации.

Таким образом, усредненная во времени концентрация аэрозолей в воздухе конкретного населенного пункта, эвакуированного через  $t_{эв}$  суток, будет

$$C_m(t_{эв}) = 1.4 \cdot 10^{-4} \frac{\delta_m}{t_{эв}} \quad (5)$$

где  $\delta_m$  — поверхностная плотность выпадений топлива, сформировавшаяся к моменту эвакуации,  $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}$ ;  $1,4 \cdot 10^{-4}$  - коэффициент связи между полной концентрацией и плотностью выпадений (для ингалябельной фракции величина этого коэффициента равна  $3,2 \cdot 10^{-4} \text{сут}\cdot\text{м}^{-1}$ ).

Оценка доз ингаляционного поступления радионуклидов для произвольного населенного пункта. Поскольку величина мощности дозы является основой для расчета плотности выпадений топлива по массе и концентрации его в воздухе, то нетрудно рассчитать начальные значения этих концентраций для мощности дозы в 1 мР/ч на момент эвакуации, а затем перейти к оценке уровней поступления и доза облучения. Зная "дозовый эквивалент" 1 мР/ч в каждый момент времени от начала аварии, можно легко рассчитать дозы облучения в населенный пунктах с учетом времени их эвакуации. Для этого достаточно умножить этот дозовый эквивалент на МЭД в день эвакуации.

Величину МЭД рассчитывали по справочным коэффициентам, которые связывают мощность экспозиционной дозы с плотностью выпадений отдельного радионуклида [7-10]. Зная активность радионуклида, заключенную в единице массы топлива, нетрудно рассчитать величину МЭД, умножая активность на эти коэффициенты.

Дозовый эквивалент (дозы облучения от ингалированных радионуклидов для МЭД в день эвакуации 1 мР/ч) рассчитан для периода эвакуации 1-20 сут (рис. 15). Полученные кривые хорошо аппроксимируются функциями вида  $y = a \log(bx)$ . Параметры этой функции для эффективных и эквивалентных доз облучения приведены в табл. 11.

Таблица 11. Параметры функций, описывающих значения дозового эквивалента МЭД

Вид дозовой зависимости	Параметр дозовой функции $DE = a \log(bx)$	
	a	b
Суммарная эффективная доза на весь организм	0,000244	2,597
Эффективная доза на организм от бета-излучателей	0,00019	2,757
Суммарная эквивалентная доза на легкие	0,00161	2,107
Эквивалентная доза на легкие от бета-излучателей	0,00137	2,17
Эквивалентная доза на НТК	0,0000648	3,446

Максимальная ожидаемая эффективная доза может быть рассчитана по величине МЭД в день эвакуации следующим образом:

$$H_e = 2,44 \cdot 10^{-4} \text{МЭД}(t_{эв}) \log(2,6 t_{эв}) \quad (6)$$

Таблица 12. Расчет доз облучения жителей Припяти

Радио- нуклид	Период полураспада, ч	Поступление радионуклида в организм за период до эвакуации, Бк	Дозовый коэффициент для перехода к аффектив- ной дозе, Зв/Бк	Эффективная доза, Зв	Эквива- лентная доза облучения на легкие, Зв	Эквива- лентная доза облучения на НТК, Зв
<sup>90</sup> Y	$6,14 \cdot 10^1$	$5,64 \cdot 10^3$	$2,80 \cdot 10^{-9}$	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$5,25 \cdot 10^{-5}$	$7,33 \cdot 10^{-5}$
<sup>90</sup> Sr	$2,50 \cdot 10^5$	$3,45 \cdot 10^3$	$6,00 \cdot 10^{-8}$	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$	$1,79 \cdot 10^{-5}$
<sup>91</sup> Y	$1,40 \cdot 10^3$	$2,55 \cdot 10^4$	$1,40 \cdot 10^{-8}$	$3,58 \cdot 10^{-4}$	$2,53 \cdot 10^{-3}$	$3,58 \cdot 10^{-4}$
<sup>89</sup> Sr	$1,21 \cdot 10^3$	$3,41 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^{-4}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
<sup>95</sup> Zr	$1,54 \cdot 10^3$	$8,52 \cdot 10^4$	$6,30 \cdot 10^{-9}$	$5,37 \cdot 10^{-4}$	$3,41 \cdot 10^{-3}$	$3,58 \cdot 10^{-4}$
<sup>95</sup> Nb	$8,44 \cdot 10^2$	$8,46 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^{-9}$	$1,35 \cdot 10^{-4}$	$7,19 \cdot 10^{-4}$	$1,61 \cdot 10^{-4}$
<sup>99</sup> Mo	$6,55 \cdot 10^1$	$7,14 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^{-9}$	$9,29 \cdot 10^{-5}$	$3,07 \cdot 10^{-4}$	$3,93 \cdot 10^{-4}$
<sup>103</sup> Ru	$9,44 \cdot 10^2$	$4,09 \cdot 10^5$	$2,50 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	$6,55 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-3}$
<sup>106</sup> Ru	$8,84 \cdot 10^3$	$1,66 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-2}$	$1,66 \cdot 10^{-1}$	$6,15 \cdot 10^{-3}$
<sup>110m</sup> Ag	$6,01 \cdot 10^3$	$8,57 \cdot 10^1$	$2,10 \cdot 10^{-8}$	$1,80 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$	—
<sup>131</sup> I	$1,93 \cdot 10^2$	$2,73 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^{-8}$	$3,54 \cdot 10^{-3}$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$6,54 \cdot 10^{-6}$
<sup>132</sup> T	$7,82 \cdot 10^1$	$3,20 \cdot 10^5$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$5,44 \cdot 10^{-4}$	-
<sup>132</sup> I	2,28	$3,79 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^{-10}$	$4,93 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$9,09 \cdot 10^{-7}$
<sup>133</sup> I	$2,08 \cdot 10^1$	$4,83 \cdot 10^5$	$2,30 \cdot 10^{-9}$	$1,11 \cdot 10^{-3}$	—	—
<sup>135</sup> I	6,61	$1,39 \cdot 10^5$	$4,60 \cdot 10^{-10}$	$6,42 \cdot 10^{-5}$	$6,14 \cdot 10^{-5}$	—
<sup>134</sup> Cs	$1,81 \cdot 10^4$	$1,12 \cdot 10^4$	$1,20 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,34 \cdot 10^{-4}$	$1,57 \cdot 10^{-4}$
<sup>136</sup> Cs	$3,12 \cdot 10^2$	$5,59 \cdot 10^3$	$1,90 \cdot 10^{-9}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$1,17 \cdot 10^{-5}$
<sup>137</sup> Cs	$2,64 \cdot 10^5$	$2,28 \cdot 10^4$	$8,50 \cdot 10^{-9}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-4}$	$2,07 \cdot 10^{-4}$
<sup>140</sup> Ba	$3,07 \cdot 10^2$	$8,25 \cdot 10^4$	$1,10 \cdot 10^{-9}$	$9,07 \cdot 10^{-5}$	$2,69 \cdot 10^{-4}$	$3,63 \cdot 10^{-4}$
<sup>140</sup> La	$4,02 \cdot 10^1$	$6,40 \cdot 10^4$	$1,50 \cdot 10^{-9}$	$9,60 \cdot 10^{-5}$	-	$3,52 \cdot 10^{-4}$
<sup>141</sup> Ce	$7,80 \cdot 10^2$	$8,45 \cdot 10^4$	$2,60 \cdot 10^{-9}$	$2,20 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$3,47 \cdot 10^{-4}$
<sup>144</sup> Ce	$6,82 \cdot 10^3$	$6,01 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$6,01 \cdot 10^{-3}$	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$
<sup>144</sup> Pr	$2,88 \cdot 10^{-1}$	$6,95 \cdot 10^2$	$1,20 \cdot 10^{-11}$	$8,34 \cdot 10^{-9}$	$6,53 \cdot 10^{-8}$	—
<sup>239</sup> Np	$5,64 \cdot 10^1$	$6,94 \cdot 10^5$	$7,50 \cdot 10^{-10}$	$5,21 \cdot 10^{-4}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$	$2,01 \cdot 10^{-3}$
Суммарная доза за счет бета-излучателей				$3,75 \cdot 10^{-2}$	$2,35 \cdot 10^{-1}$	$1,44 \cdot 10^{-2}$
<sup>238</sup> Pu	$7,68 \cdot 10^5$	$1,74 \cdot 10^1$	$6,10 \cdot 10^{-5}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$5,58 \cdot 10^{-3}$	$1,03 \cdot 10^{-5}$
<sup>239</sup> Pu	$2,14 \cdot 10^8$	$1,56 \cdot 10^1$	$6,40 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
<sup>240</sup> Pu	$5,73 \cdot 10^7$	$2,23 \cdot 10^1$	$6,40 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$7,12 \cdot 10^{-3}$	—
<sup>241</sup> Pu	$1,33 \cdot 10^5$	$3,06 \cdot 10^3$	$9,30 \cdot 10^{-7}$	$2,85 \cdot 10^{-3}$	$9,81 \cdot 10^{-3}$	$3,37 \cdot 10^{-5}$
<sup>241</sup> Am	$3,80 \cdot 10^6$	$1,62 \cdot 10^1$	$7,00 \cdot 10^{-5}$	$1,14 \cdot 10^{-3}$	—	$3,73 \cdot 10^{-5}$
<sup>242</sup> Cm	$3,91 \cdot 10^3$	$4,67 \cdot 10^2$	$3,50 \cdot 10^{-6}$	$1,63 \cdot 10^{-3}$	$7,01 \cdot 10^{-3}$	—
<sup>244</sup> Cm	$1,57 \cdot 10^5$	$1,80 \cdot 10^0$	$4,00 \cdot 10^{-5}$	$7,21 \cdot 10^{-5}$	—	—
Суммарная доза за счет альфа-излучателей				$9,18 \cdot 10^{-3}$	$3,45 \cdot 10^{-2}$	$9,13 \cdot 10^{-5}$
Суммарная доза за счет всех излучателей				$4,67 \cdot 10^{-2}$	$2,69 \cdot 10^{-1}$	$1,45 \cdot 10^{-2}$

где  $H_e$  — ожидаемая эффективная доза, Зв;

$t_{эв}$  — число дней от начала аварии до момента эвакуации, сут.

Аналогично можно рассчитать и другие дозы облучения, перечисленные в табл. 11.

Рассмотрим радиационную обстановку в тридцатикилометровой зоне на момент эвакуации и оценим дозы от ингалированных радионуклидов для некоторых населенных пунктов.

При выборе дозовых коэффициентов использовались данные работ [11-13], а при отсутствии данных — публикация [14], как наиболее исчерпывающий источник. При расхождении данных учитываем наибольшие значения коэффициентов.

Обобщенная информация о значениях МЭД в населенных пунктах Зоны в день эвакуации приведена на рис. 16, во которого следует, что для основной части населенных пунктов величина МЭД не превышала 100 мР/ч, а максимальные значения мощности дозы в день эвакуации, более 300 мР/ч, наблюдались в г. Припяти и в селах Буряковка и Городчан соответственно на 2, 5 и 9 сут. от начала аварии.

Результаты расчета доз от отдельных радионуклидов и суммарных доз по описанной схеме для жителей Припяти приведены в табл. 12.

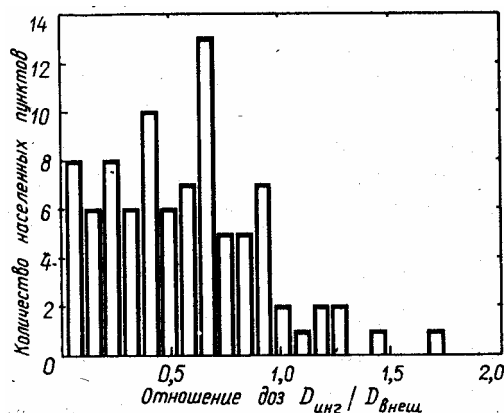


Рис. 18. Распределение отношений доз, сформированных за счет ингаляционного и внешнего облучения по населенным пунктам Зоны

Зная информацию о МЭД в населенных пунктах Зоны в день эвакуации и число дней, прошедших от начала аварии до момента эвакуации, можно оценить максимальные ожидаемые дозы облучения жителей для всех населенных пунктов Зоны. Частотные распределения этих доз представлены на рис. 17, из которого следует, что максимальные значения эффективной дозы облучения за счет ингалированных радионуклидов достигали 12 сЗв, а эквивалентной дозы облучения легких — 70 сЗв. Отсюда следует, что дозы облучения от ингаляционного поступления могли дать существенную добавку к дозам внешнего облучения и дозам облучения щитовидной железы.

Частотное распределение отношений доз от ингаляционного и внешнего облучения по населенным пунктам Зоны показано на рис. 18. Медиана этого распределения равна 0,56, что позволяет отнести ингаляционную компоненту облучения к числу значимых. Вместе с тем фактические средние значения доз облучения от ингалированных радионуклидов могут быть несколько ниже, если учесть, что эти дозы рассчитывали из предположения о том, что половину времени суток жители проводили на улице, а половину — в домах с коэффициентом защиты зданий 0,3, который принят [15] для аэрозолей размером 1 мкм и меньше.

Из представленных результатов следует, что даже при непрерывном пребывании в доме доза облучения будет только в два раза ниже максимальной. Фактические значения коэффициентов защиты зданий от проникновения крупных аэрозолей скорее всего намного меньше. Для жителей тридцатикилометровой зоны они могут быть приняты в 10 раз меньше, о чем свидетельствуют результаты обследования загрязненности жилищ в Припяти и других населенных пунктах Зоны после эвакуации.

### СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСТОЧНИКОВ И ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЖИТЕЛЕЙ ТРИДАТИКИЛОМЕТРОВОЙ ЗОНЫ

Подводя итог выполненного исследования можно свести полученные результаты в единую шкалу доз облучения, представленную на рис. 19.

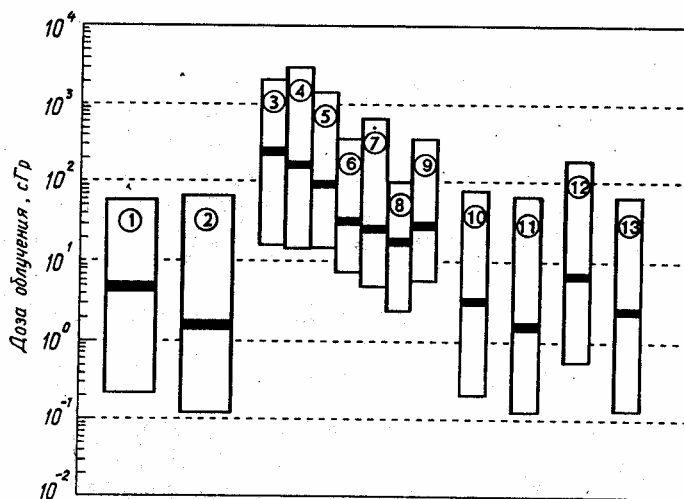


Рис. 19. Обобщенная оценка медиан и диапазонов доз облучения тела и отдельных органов жителей тридцатикилометровой зоны после аварии на ЧАЭС за период до эвакуации:

1 — дозы внешнего гамма-облучения, накопленные в воздухе населенных пунктов до момента эвакуации; 2 — дозы внешнего гамма-облучения жителей населенных пунктов; 3-9 — дозы облучения щитовидной железы за счет  $^{131}\text{I}$ ; 3 — дети 0-1 год; 4 — дети 1-3 года; 5 — дети 4-7 лет; 6 — дети 8-11 лет; 7 — дети 12-15 лет; 8 — дети 16-18 лет; 9 — взрослые; 10 — суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения легких; 11 — суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения нижнего отдела толстого кишечника; 12 — суммарные дозы внешнего гамма- и бета-облучения эпителиальных клеток эпидермиса кожи на высоте 0,5 м от поверхности почвы; 13 — суммарные дозы внешнего гамма- и бета-облучения хрусталика глаза на высоте 1 м

Кроме доз облучения от основных источников их формирования — внешнего гамма-облучения, облучения щитовидной железы и доз, обусловленных ингаляционным поступлением радионуклидов, учтены также дозы облучения за счет других дозообразующих источников: внешнего бета-облучения кожи и хрусталика глаза, а также дозы облучения нижнего отдела толстого кишечника.

Максимальные и минимальные значения доз облучения, выявленные или рассчитанные по каждому виду облучения, обозначены на рис. 19 прямоугольниками, а черной полосой выделены медианы доз облучения.

Сопоставляя между собой различные виды облучения или дозы облучения отдельных органов на фоне общего гамма-облучения тела (обозначенного номером 2), можно выделить, в первую очередь, дозы облучения щитовидной железы (3-9). Следующий наиболее облучаемый орган — кожа (12), затем легкие (10), нижний отдел толстого кишечника (11) и хрусталик глаза (13).

Диапазон суммарных экспозиционных доз, накопленных в населенных пунктах на открытой местности за время до эвакуации, приведен на рис. 19 (номер 1). Эта информация — удобный критерий отсчета, поскольку контроль уровней внешнего облучения является наиболее доступным видом контроля. Весьма интересен факт снижения медианы распределения реальных доз внешнего облучения на фоне размытия этого распределения как в сторону относительно больших, так и меньших значений доз облучения, что связано с особенностями миграции и эвакуации.

Сопоставляя дозы облучения щитовидной железы и дозы внешнего облучения с критериями эвакуации, можно отметить, что значительная часть жителей Зоны имеет дозы облучения щитовидной железы выше критерия эвакуации в 250 сГр.



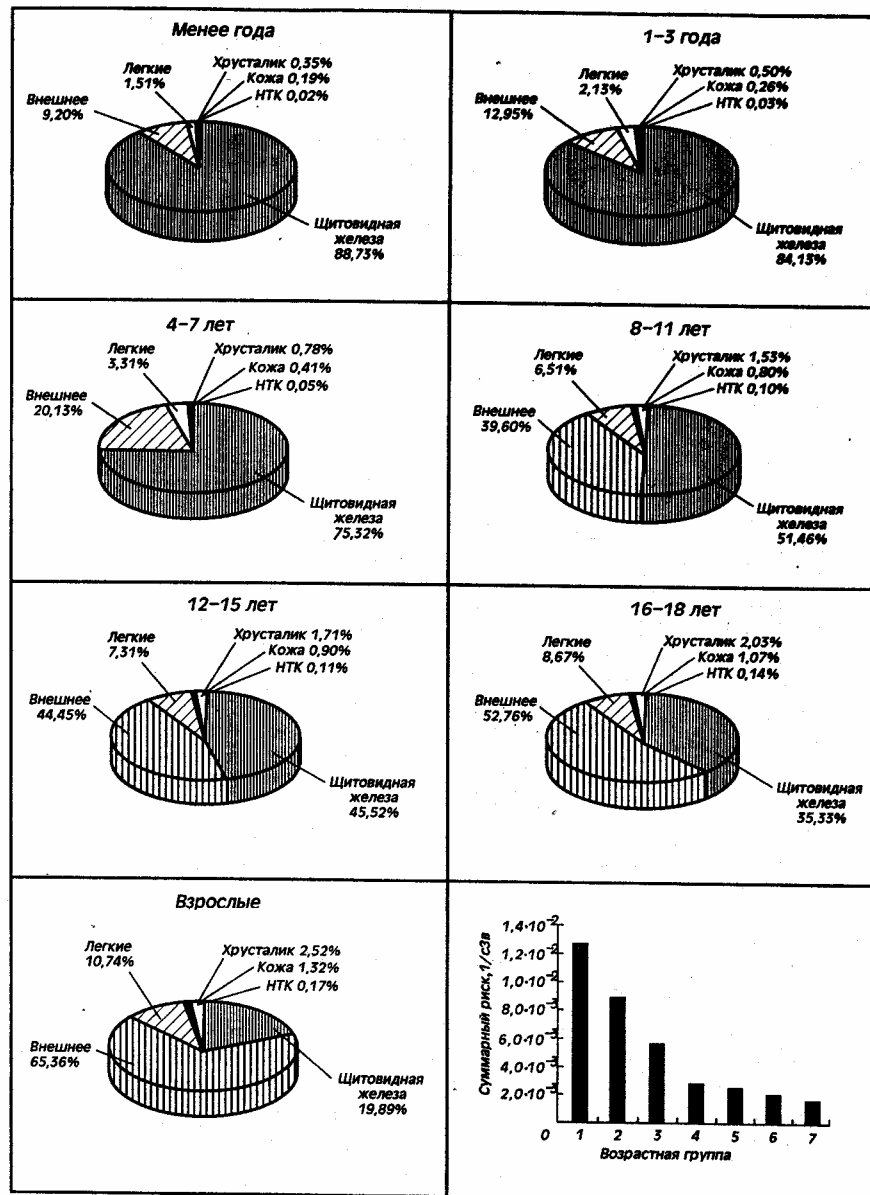


Рис. 20. Распределение суммарного риска по факторам облучения в зависимости от возраста жителей тридцатиклометровой зоны

Несмотря на существенные различия в дозах облучения отдельных органов и тканей, значение разных видов облучения или их уровней может быть определено по более строгим критериям, а именно в единицах риска. Пользуясь весовыми коэффициентами публикации МКРЗ-60, а по щитовидной железе — данным работы [2], можно выразить последствия облучения разных органов и систем в сопоставимых единицах.

Обобщенная информация о возрастном распределении величин суммарного риска (правый нижний рисунок) и структуре суммарного риска, определенного в виде процентного вклада в этот риск различных факторов и источников облучения, приведена на рис. 20. Значения риска определены для медиан доз облучения жителей (зоны). Величина риска включает вероятность возникновения всех форм радиационно-индуцированных раков и наследственных повреждений за период предстоящей жизни или за время нахождения под риском.

Наибольшие значения индивидуального риска были у детей до 7 лет. Начиная с 8 лет значения риска мало отличаются по абсолютной величине, однако, структура, риска связана с возрастом. У детей до 7 лет от 75 до 90 % суммарного риска связано с облучением щитовидной железы и от 9 До 20% — обусловлено внешним облучением (рис. 20). Доля риска от ингаляционного поступления радионуклидов и за счет других

факторов облучения составляет 14%. Роль внешнего облучения в формировании величины индивидуального риска становится доминирующей, начиная с 16 лет. В то же время несколько возрастает и доля риска, связанного с ингаляцией радионуклидов. Относительно облучения кожи, нижнего отдела толстого кишечника и хрусталика глаза, то их значение в формировании величины суммарного риска не превышает 0,6-4%.

Зная медианы доз облучения, значения суммарного риска облучения и численность возрастных групп, можно оценить число радиационно-индуцированных ожидаемых случаев раков и наследственных повреждений (рис. 21). Подходы к оценке риска изложены в работах [16-20]. В данной работе мы воспользовались публикацией [2].

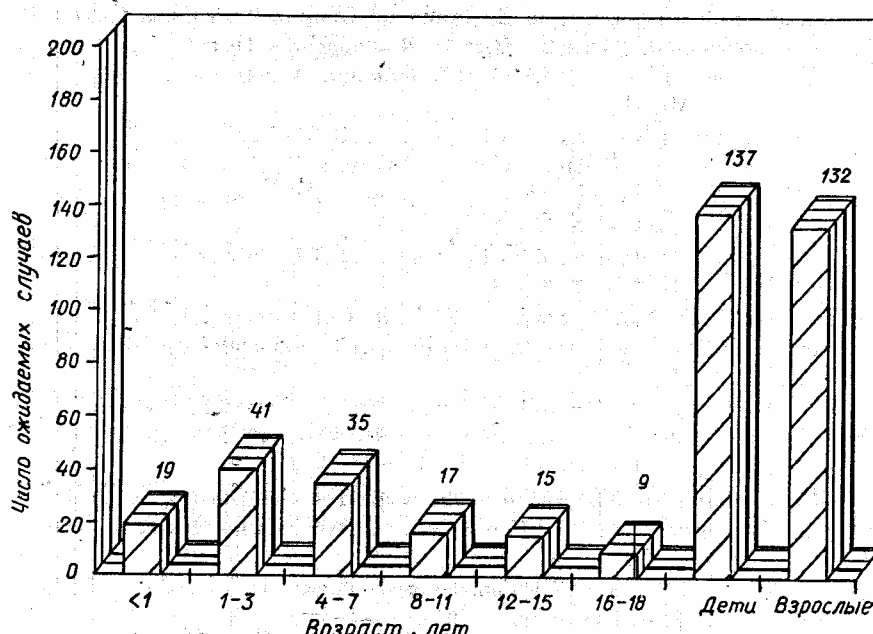


Рис. 21. Расчет числа ожидаемых случаев риска и наследственных повреждений среди жителей тридцатикилометровой зоны

Половина ожидаемых случаев (132) приходится на наиболее многочисленную категорию жителей — взрослых, хотя индивидуальные значения суммарного риска у взрослых меньше.

Распределение числа прогнозируемых случаев среди детей различного возраста характеризуется небольшими различиями. Вместе с тем общее число ожидаемых случаев для всех детей составляет половину общего числа (269) при численности детского населения 25% от общей численности населения Зоны.

1. Jacob P, Meckbach Я. Shielding Factors and External Dose Evaluation // Radiat. Prot. Dosim. — 1987. — 21, N 1-3. — P. 79-85 1
2. ICRP Publication 60. Recommendation of the International Commission on Radiological Protection // Annals of the ICRP. — 1990. — N 21(1). — 201 p. I
3. Радиационная защита / Под ред. А.А.Моисеева, П.В.Рамзаева: Пер. с англ. // Публикация 26 МКРЗ. — М.: Атомиэдат, 1978. — 85 с.
4. ICRP Publication 56. Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. — Oxford: Pergamon Press, 1990. — 122 p.
5. Асмолов В.Г., Боровой А.А., Демин В.Ф. и др. Авария на Чернобыльской АЭС: год спустя // Атом, энергия. — 1988. — 64, вып.1. — С.3-23.
6. Публикация 30. Часть 1. Пределы поступления радионуклидов для работающих с ионизирующим излучением: Пер. с англ. / Под ред. П.В. Рамзаева и А.А.Моисеева. — М.: Энергоиздат, 1982. — 133 с.
7. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 224 с.
8. Organ Doses from Radionuclides on the ground. Part 1. Simple Time Dependences/ P.Jacob, H.Paretzke, H.Rosenbaum, M.Zankl// Health Phys. — 1988. — 54, N 6. — P.617-633.
9. Calculation of Organ Doses from Environmental Gamma Rays Using Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part 1 : Monoenergetic Sources and Natural Radionuclides in the Ground./ K.Saiko, N.Petoussi, M.Zankl et all. // GSE-Bericht 2/90. — Munchen, 1990. — 102 p.
10. Calculation of Organ Doses from Environmental Gamma Rays Using Human Phantoms and Monte Carlo Methods. Part II: Radionuclides Distributed in the Air or Deposited on the Ground / P. Jacob, H. .Rosenbaum, N.Petoussi, M.Zankl. // GSE-Bericht 12/90. — Munchen, 1990. — 76 p.
11. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: ICRP Publication 30. Supplement to pt.1 // Annals of the ICRP — Oxford: Pergamon Press, 1979. — 3, N 1-4.
12. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: ICRP Publication 30. Supplement to pt.2 // Ibid. — 1981. — 5, N 1-6.
13. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers: ICRP Publication 30. Supplement to pt.3 // Ibid. — 1982. — 7, N 1-3.
14. Phipps A.W., Kendall G.M., Stather J.W. et all Committed Equivalent Organ Doses and Committed Effective Doses from Intakes of Radionuclides / NRPB-R245. — Chilton, 1991. — 93 p.
15. Per Hendemann Jenser, Atmospheric Dispersion and Environmental Consequences. Exposure from Radioactive Plume Pathways. Ris Ø-M-2849 (EN),Denmark, November, 1992. — 46 p.
16. Дозовые. зависимости нестохастических эффектов, основные концепции и величины, используемые в МКРЗ / Пер. с англ. // Публикации 41 и 42 МКРЗ. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 88 с.

17. Количественное обоснование единого индекса вреда / Пер. с англ. // Публикация 45 МКРЗ. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 88 с.
18. BEIR III: The Effects on Population of Exposure to low levels of ionizing Radiations /Advisory Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiation. — Washington, D.S.: National Academy Press, 1980. — 524 p.
19. Шевченко В.А., Померанцева М.Д. Генетические последствия действия ионизирующих излучений. — М.: Наука, 1985. — 279 с.
20. BEIR IV: Health Risk of Radon and other Internally Deposited Alpha — Emitters. — Washington: National Academy Press, 1988. — 602 p.