

УДК 576.799.4

© 2001

**ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ г. ОЗЕРСКА,
СЛОЖИВШИЕСЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ
ЙОДА-131. ОПЫТ РЕТРОСПЕКТИВНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ**

*В.В. Хохряков, Е.Г. Дрожко
Россия, г. Озерск, ПО «Маяк»*

Приведено описание методики расчета эквивалентных доз облучения щитовидной железы для представителей населения г. Озерска, создаваемых в результате выбросов в атмосферу йода-131. Описаны исходные данные, необходимые для проведения ретроспективного восстановления указанных доз, включая параметры источников выбросов йода-131 в атмосферу, метеорологические данные, поставки цельномолочных продуктов в г. Озерск. Критической группой населения являются дети горожан, содержавших крупный рогатый скот. Максимальную эквивалентную дозу накопили представители возрастной группы 1951 г. рождения. Указанная доза составила 4 Зв.

Деятельность ПО «Маяк», пуск которого осуществлялся в условиях жесткого лимита времени, обусловленного гонкой ядерных вооружений, породила целый комплекс проблем в области радиозоологии и охраны здоровья человека. По предварительным оценкам у жителей г. Озерска основной вклад в накопленную дозу был обусловлен выбросами йода-131, поступавшими в атмосферу в первые годы работы предприятия [1, 2].

В настоящее время важной дозиметрической проблемой является реконструкция доз облучения, обусловленных деятельностью предприятий ядерного топливного цикла. Об этом свидетельствуют как отечественные работы, так и многочисленные работы, проводимые в США [3, 4]. Реконструкция доз облучения имеет большое научное значение, так как дает уникальную возможность оценить параметры моделей риска возникновения онкогенных эффектов у человека при хроническом облучении в малых дозах. До

сих пор эти оценки, признанные мировым сообществом ученых, основаны на результатах эпидемиологических исследований, проведенных среди населения двух японских городов, подвергшихся разовому гамма-нейтронному облучению при атомной бомбардировке [5], и они нуждаются в проверке применительно к случаю пролонгированного суммарного внутреннего и внешнего облучения. В этом аспекте особый интерес представляет анализ уровней облучения населения г. Озерска как ближайшего к ПО «Маяк» крупного населенного пункта.

Методология реконструкции доз облучения населения, сложившегося в результате выбросов йода-131 в атмосферу

Выбор методики реконструкции доз облучения населения, обусловленных выбросами в атмосферу йода-131, должен определяться закономерностями миграции радио-

активного вещества в окружающей среде, путями поступления его в организм человека, а также наличием и качеством информации, характеризующей присутствие данного нуклида на каждом из этапов его миграции. Учитывая общие закономерности миграции радиоактивных нуклидов в окружающей среде, начиная от источника выброса и кончая содержанием нуклида в критическом органе представителя исследуемой популяции, можно выделить группы данных (уровни информации), на основании которых можно провести реконструкцию доз облучения населения.

Следуя указанному подходу, были выделены следующие три уровня информации (названия условны).

1. Информация, относящаяся к источнику выбросов и условиям распространения радиоактивных веществ в окружающей среде, включая характеристику источника выброса йода-131, условия распространения примеси в атмосфере, расположение населенных пунктов, и сельскохозяйственных угодий, характер жизнедеятельности и питания населения.
2. Результаты радиационного мониторинга, в том числе концентрации радиойода в приземном слое воздуха района проживания и сельскохозяйственных угодий, удельное содержание рассматриваемого нуклида в основных с радиологической точки зрения продуктах питания.
3. Информация, относящаяся к прямым измерениям доз внешнего и внутреннего облучения щитовидной железы.

Анализ имеющейся на ПО «Маяк» информации показал, что среди возможных методических подходов к реконструкции в настоящее время наиболее приемлемым является метод, основанный на моделях миграции йода-131 в окружающей среде и использующий в качестве исходных данных мощности выбросов нуклида в атмосферу, метеорологические условия, а также условия и характер питания населения.

Методика расчета эквивалентных доз облучения щитовидной железы у населения, обусловленных выбросами в атмосферу йода-131

Дозы облучения населения, проживающего на территориях, подвергающихся радиационному воздействию в результате атмосферных выбросов радиоактивных веществ, формируются благодаря действию следующих факторов:

- внешнее облучение, обусловленное погружением в облако радиоактивного вещества и создаваемое осевшими на поверхность почвы радиоактивными нуклидами;
- внутреннее облучение, связанное с ингаляционным и пероральным поступлением радионуклидов в организм человека.

В настоящей методике принята схема миграции йода-131 в объектах окружающей среды, приведенная на рис. 1. В методике рассматривается пероральное поступление йода-131 при потреблении в пищу цельномолочной продукции и свежей листовой зелени, как основных с радиологической точки зрения пищевых продуктов. При оценке доз облучения щитовидной железы от инкорпорированного йода-131 учет иных пищевых продуктов не приводит к значимому уточнению дозы. Методика учитывает то, что рассматриваемые продукты питания производятся в различных хозяйствах, расположенных на различном удалении от источника выброса и в различных направлениях от него.

Методика учитывает возрастные изменения следующих факторов, влияющих на формирование дозы:

- метаболизм йода в организме человека;
- рацион питания;
- объем дыхания.

Годовая эквивалентная доза облучения щитовидной железы (H_i) индивида в возрасте i лет рассчитывалась по формуле:

$$H_i = H^{(out)} + H_i^{(inc)},$$

где $H^{(out)}$ — годовая эквивалентная доза внешнего облучения щитовидной железы, обусловленная выбросами йода-131 в атмосферу, Зв/год;



Рис.1. Схема путей миграции йода-131, использованная при расчете эквивалентных доз облучения щитовидной железы

$H_i^{(inc)}$ — годовая эквивалентная доза облучения щитовидной железы индивида в возрасте i лет, обусловленная инкорпорированным йодом-131, Зв/год.

Расчет дозы внешнего облучения проводился по формуле:

$$H^{(out)} = C \cdot K_3 \cdot (КДП^{(c)} + КДП^{(s)}),$$

где C — среднегодовая приземная концентрация йода-131 в районе проживания населения, Бк/м³;

K_3 — коэффициент, учитывающий защитные свойства зданий и время пребывания на открытой местности;

$КДП^{(c)}$ — коэффициент, равный отношению годовой эквивалентной дозы облучения щитовидной железы к среднегодовой приземной концентрации йод-131, создающей эту дозу, (Зв·м³)/(Бк·год);

$КДП^{(s)}$ — коэффициент, равный отношению годовой эквивалентной дозы облучения щитовидной железы к среднегодовой при-

земной концентрации йод-131, которая создает поверхностное загрязнение, обуславливающей эту дозу, (Зв·м³)/(Бк·год);

Расчет дозы внутреннего облучения, обусловленного пероральным поступлением йода-131, проводился по формуле:

$$H_i^{(inc)} = F_i^{(o)} (P_i^{(m)} + P_i^{(v)}) + V_i^{(inh)} C F_i^{(inh)},$$

где $F_i^{(o)}$ — коэффициент, равный годовой эквивалентной дозе облучения щитовидной железы, обусловленной пероральным поступлением 1 Бк йода-131 в организм человека в течение i -го года жизни, Зв/Бк;

$P_i^{(m)}$ — пероральное годовое поступление йода-131 при потреблении в пищу молока индивидом в возрасте i лет, Бк/год;

$P_i^{(v)}$ — пероральное годовое поступление йода-131 при потреблении в пищу свежей листовой зелени индивидом в возрасте i лет, Бк/год;

$V_i^{(inh)}$ — объем вдыхаемого в течение года воздуха, характерный для человека в возрасте i лет, м³/год;

$F_i^{(inh)}$ — коэффициент, равный годовой эквивалентной дозе облучения щитовидной железы, обусловленной ингаляционным поступлением в организм человека 1 Бк йода-131 в течение i -го года жизни, Зв/Бк.

Пероральное годовое поступление йода-131 при потреблении в пищу молока индивидом в возрасте i лет рассчитывалось по формуле:

$$P_i^{(m)} = v_g \cdot M_i^{(m)} \cdot V_m \cdot \Delta_m \cdot M_c \cdot K_{fm} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k=K} d_{mk} C_k^{(m)} \right),$$

где v_g — скорость осаждения йода-131 на подстилающую поверхность, м/с;

$M_i^{(m)}$ — годовой объем потребления цельномолочной продукции индивидом в возрасте i лет, кг/год;

B_m — коэффициент, учитывающий сезонное осреднение концентрации йода-131 в потребляемом в течение года молоке;

Δ_m — доля содержания йода-131 в молоке после переработки и кулинарной подготовки;

M_c — суточное потребление кормов сельскохозяйственными животными, кг/сут;

K_{fm} — коэффициент пропорциональности, равный отношению результирующей концентрации йода-131 в траве естественных пастбищных угодий в момент стравливания скотом к интенсивности выпадений этого радионуклида, $m^2 \cdot c / кг$.

d_{mk} — доля k -го хозяйства производителя молока в суммарной реализации молочной продукции в населенном пункте;

$C_k^{(m)}$ — концентрация йода-131 в приземном слое воздуха k -го хозяйства производителя молока, усредненная за вегетационный сезон, который для естественных трав, произрастающих на Урале, принят равным 150 сут, начиная с 15 апреля, $Bк/м^3$. Расчет перорального поступления йода-131 при потреблении в пищу свежей листовой зелени индивидом в возрасте i лет проводился по формуле:

$$P_i^{(v)} = v_g \cdot M_i^{(v)} \cdot B_v \cdot \Delta_v \cdot M_c \cdot K_{fv} \cdot \left(\sum_{k=1}^{k=K} d_{vk} C_k^{(v)} \right)$$

где $M_i^{(v)}$ — годовой объем потребления овощной продукции человеком в возрасте i лет, кг/год;

B_v — коэффициент, учитывающий сезонное осреднение концентрации радионуклида в потребляемом в течение года продукте питания (свежей зелени);

Δ_v — доля содержания радионуклида в овощном продукте после переработки и кулинарной подготовки;

K_{fv} — коэффициент пропорциональности, равный отношению результирующей концентрации радионуклида в растительной продукции (лиственные овощи и зеленные) в момент производства к интенсивности

выпадений этого радионуклида, $m^2 \cdot c / кг$;
 d_{fv} — доля свежей листовой зелени, поставляемая в город из k -го хозяйства;

$C_k^{(v)}$ — доля свежей листовой зелени, поставляемая в город из k -го хозяйства.

Расчет значений концентраций йода-131 в приземном слое воздуха проводился в соответствии с Гауссовой моделью струи. Расчет значений вертикальной и горизонтальной дисперсии примеси в струе проводился по формуле Смита-Хоскера. Классификация категорий устойчивости атмосферы проводился по схеме Пасквилла-Гиффорда.

Исходные данные, необходимые для расчетов доз

Расчет доз облучения щитовидной железы, обусловленных выбросами в атмосферу, проводился на основе следующей информации:

- характеристика источника выбросов йода-131 в атмосферу;
- метеорологические условия рассеяния примеси в атмосфере района расположения ПО «Маяк»;
- характеристика объема и структуры питания жителей г. Озерска.

Под характеристикой источника выбросов йода-131 подразумеваются данные, описывающие условия выхода выбрасываемой смеси из источника в атмосферу (высота и диаметр устья трубы, расход выбрасываемого воздуха и его температура), а также мощность выброса радиойода в атмосферу.

Регулярный контроль выбросов йода-131 в атмосферу на ПО «Маяк» начал осуществляться с августа 1957 г. В связи с этим для расчетов доз облучения, формировавшихся в период с 1949 г. по август 1957 г., использовали значения мощности выбросов, реконструированные на основе технологических характеристик завода по переработке облученного топлива. Расчет доз облучения, за период после августа 1957 г. проводился на основе результатов контроля выбросов рассматриваемого нуклида в атмосферу. Динамика мощ-

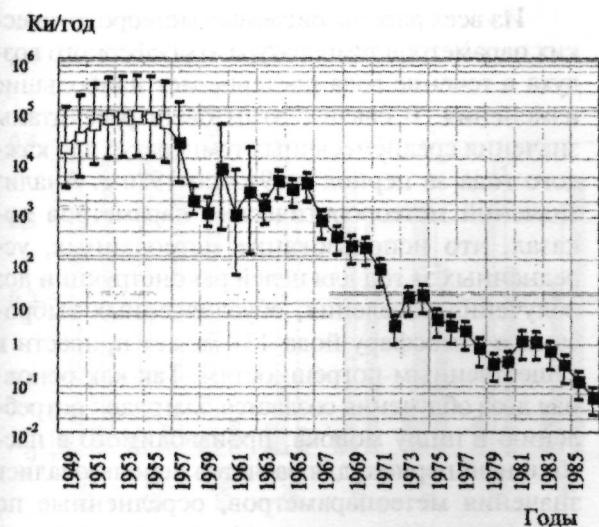


Рис. 2. Выбросы йода-131 в атмосферу за период с 1949 по 1986 гг.:

□ — результат реконструкции;
■ — результат контроля

ности выбросов йода-131 в атмосферу за период с 1949 г. (начало технологических операций, сопровождавшихся выбросами нуклида) до 1986 г. (окончание программы по переработке стандартной продукции) приведена на рис. 2. Подробное описание методики реконструкции мощности выбросов рассматриваемого радионуклида, а также полученных результатов, приведено в работе [6].

Расчет концентраций йода-131 в приземном слое воздуха района проживания населения и расположения сельскохозяйственных угодий проводился с использованием Гауссовой модели рассеяния примеси в атмосфере. Для этих целей применялись следующие метеорологические данные:

- повторяемость ветра;
- скорость ветра;
- повторяемость категорий устойчивости атмосферы;
- температура атмосферного воздуха.

Изучение указанных метеорологических параметров проводилось исходя из требований, предъявляемых методикой расчета доз для следующих периодов осреднения: многолетнее и

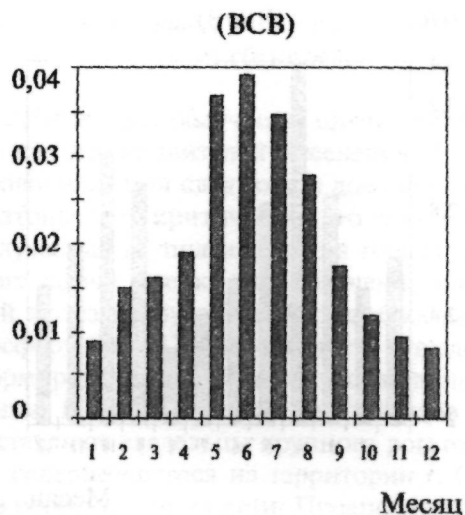


Рис. 3. Сезонные изменения повторяемости ветра

месячное (многолетнее для заданного месяца) [7–9]. В качестве исходных метеоданных использовались результаты наблюдений, проводившихся на метеостанции п. Аргаяш. Анализ результатов изучения метеопараметров показал следующее. Повышенной повторяемостью обладали ветры в секторах от южного до юго-западного направлений, а также от западного до северо-западного направлений. Обработка результатов наблюдений при месячном осреднении выявила наличие значимых сезонных изменений повторяемости ветра (рис. 3).

Анализ результатов обработки многолетних наблюдений скорости ветра показал, что повышенными значениями скорости характеризуются ветры следующих румбов: Ю, ЮЮЗ, З, ЗСЗ. Пониженными значениями скорости обладают ветры румбов В, ВЮВ. Скорость ветра также претерпевает сезонные изменения (рис. 4).

Классификацию устойчивости атмосферы проводили по схеме Пасквилла-Гиффорда. Чаще всего наблюдаются категории устойчивости D, E и F. В сумме на них приходится 83% случаев. Остальные 17% случаев приходятся на долю

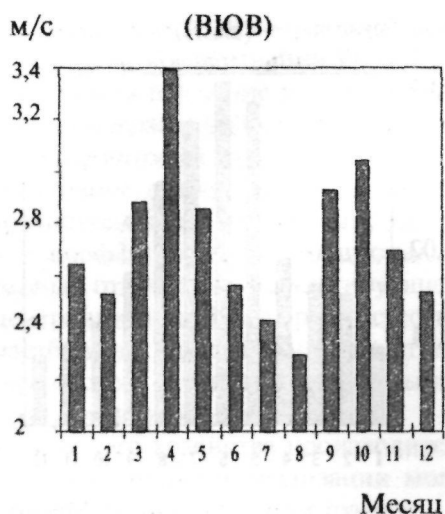


Рис. 4. Сезонные изменения скорости ветра

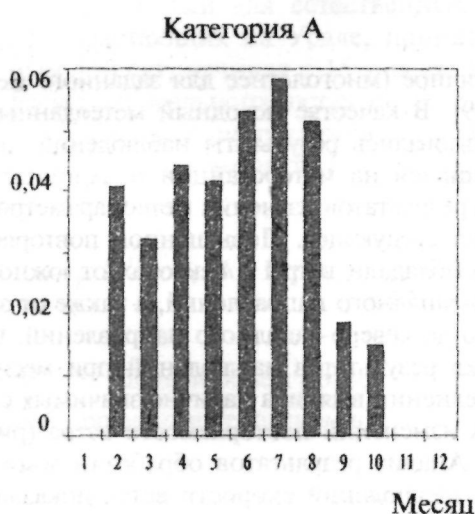


Рис. 5. Сезонные изменения повторяемости категорий устойчивости атмосферы

категорий А, В и С. Следовательно, приземный слой атмосферы района расположения ПО «Маяк» в большинстве случаев характеризуется состоянием от безразличного до устойчивого. Сезонные изменения повторяемости категорий устойчивости также имеют место (рис. 5).

Из всех рассматриваемых метеорологических параметров температура атмосферного воздуха в течение года претерпевает наибольшие изменения. В связи с этим были рассчитаны значения среднемесячных температур для каждого года за период с 1949 по 1986 г. Анализ значений метеорологических параметров показал, что использование метеоданных, усредненных за год для целей реконструкции доз облучения населения, обусловленных выбросами в атмосферу йода-131 может привести к существенным погрешностям. Так как основная доза облучения создается благодаря потреблению в пищу молока, производимого в пастбищный период, для расчетов использовались значения метеопараметров, осредненные по каждому месяцу каждого расчетного года.

Рацион питания является основным источником формирования внутреннего облучения щитовидной железы населения в условиях выбросов в атмосферу йода-131. При расчетах рассматриваемых доз облучения достаточно

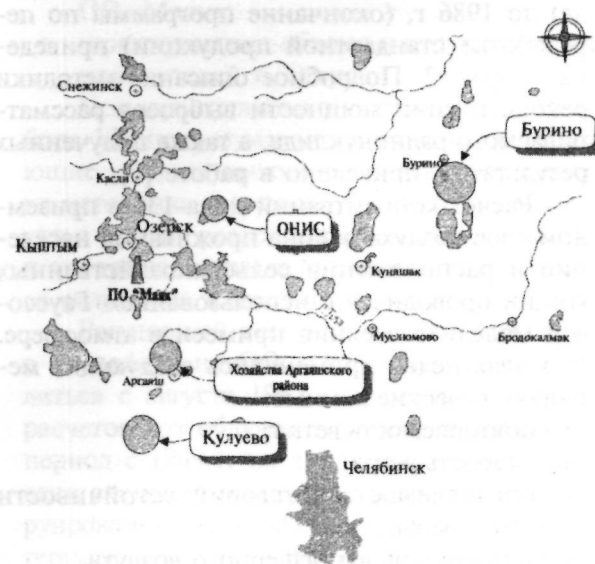


Рис. 6. Схема расположения хозяйств производителей молока относительно источника выбросов йода-131

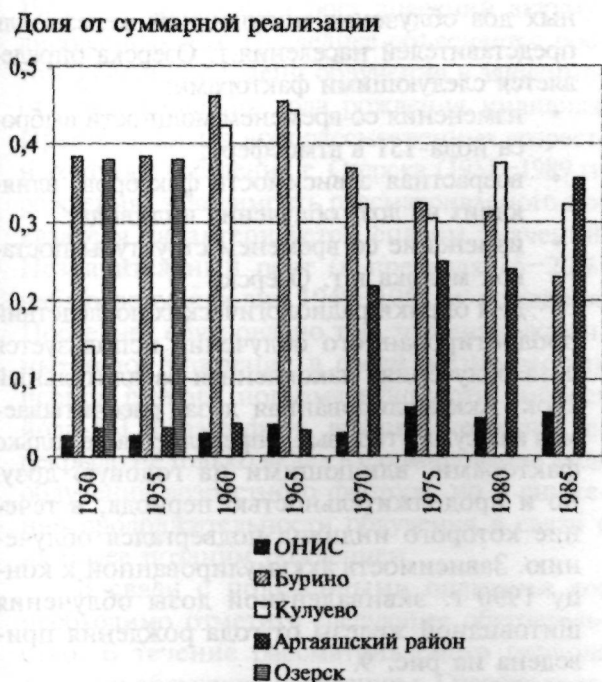


Рис. 7. Динамика реализации молока в г. Озерске

ограничиться учетом потребления в пищу молока и свежей листовой зелени. По данным Управления рабочего снабжения г.Озерска поставки молока в город осуществлялись из четырех хозяйств: ОНИС, Бурино, Кулуево, хозяйства Аргаяшского района. Их угодья расположены в различных направлениях и на различных расстояниях от источника выбросов йода-131 в атмосферу (рис. 6). Значения объемов поставок молока были реконструированы за период с 1949 по 1986 гг. Анализ динамики поставок и реализации цельномолочной продукции в г. Озерске показывает, что с течением времени структура реализовывавшегося в городе молока претерпевала изменения (рис. 7). По имеющейся в органах Госсанэпиднадзора информации [10] в г. Озерске до 1957 г. содержалось принадлежавшее жителям стадо личного крупного рогатого скота. Молоко, производившееся указанными животными, употреблялось в пищу. Данное обстоятельство учитывалось при расчетах доз облучения.

Результаты реконструкции доз и их обсуждение

Расчет доз облучения щитовидной железы для представителей населения г. Озерска проводился при следующих допущениях. Рассматривалась критическая, то есть наиболее облучаемая группа населения города. В условиях задачи оценки доз облучения щитовидной железы, обусловленных выбросами в атмосферу йода-131, критичность определяется формированием молочной части рациона питания. В данном случае критическую группу составляют владельцы крупного рогатого скота, содержащегося на территории г. Озерска и в особенности их дети. Предполагалось, что индивид непрерывно с момента рождения и до 1990 г. проживает на территории г. Озерска. Лица, родившиеся до момента пуска ПО «Маяк» в эксплуатацию, начинают облучаться с 1949 г.

В рамках перечисленных выше допущений были проведены расчеты годовых эквивалентных доз облучения щитовидной железы за период с 1949 по 1986 гг. Проведены оценки эквивалентных доз, накопленных к 1990 г. лиц, родившихся в период с 1927 по 1986 гг.

На рис. 8 приведена зависимость от времени годовых эквивалентных доз облучения щитовидной железы лиц, родившихся в период с 1949 по 1965 гг.

Из рис. 8 следует, что в течение рассматриваемого периода времени значения годовых доз меняются в широком диапазоне. Начальный период (1949–1953 гг.) характеризуется ростом значений доз, что является следствием увеличения выбросов в атмосферу йода-131. С 1953 по 1959 гг. в динамике годовых доз наблюдается снижение значений, превышающее два порядка величины. В период с 1959 по 1966 гг. рассматриваемый показатель меняется сравнительно мало. Начиная с 1967 г., значения годовых доз резко уменьшаются. Из всех рассмотренных возрастных когорт (1949–1986 гг. рождения) максимальную годовую дозу (1,57 Зв) получили лица 1952 г. рождения в 1953 г. Динамика годовых эквивалент-

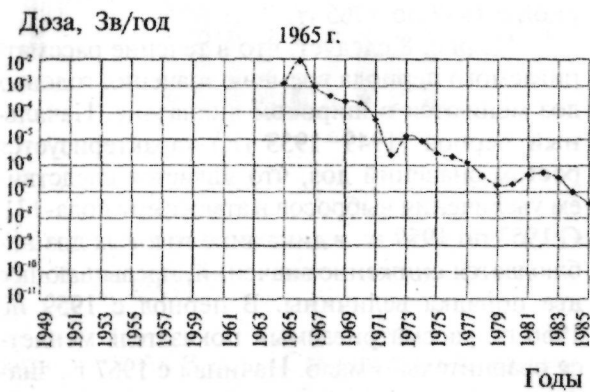
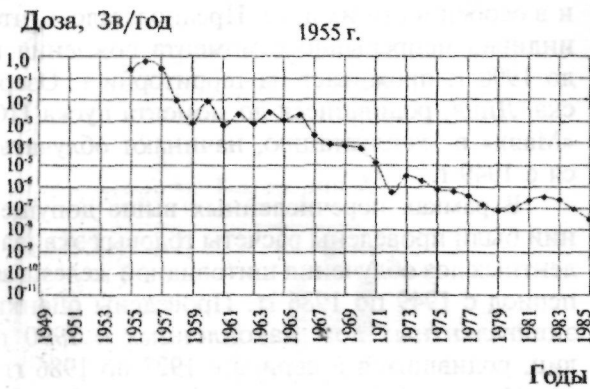
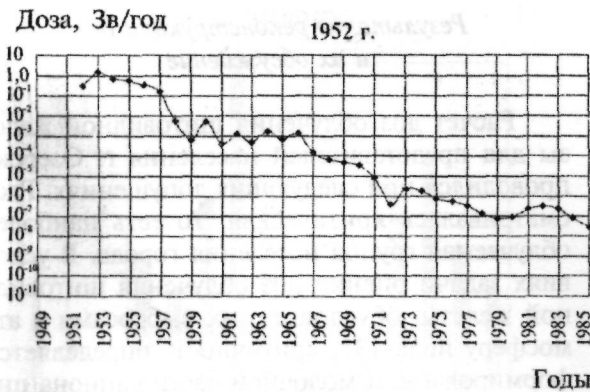


Рис. 8. Динамика годовых доз облучения щитовидной железы

ных доз облучения щитовидной железы для представителей населения г. Озерска определяется следующими факторами:

- изменения со временем мощности выброса йода-131 в атмосферу;
- возрастная зависимость факторов, влияющих на дозу облучения индивида;
- изменение со временем структуры поставок молока в г. Озерск.

Для оценки радиологических последствий пролонгированного облучения используется доза облучения, накопленная за длительный срок. Аккумулированная доза, рассчитываемая как сумма годовых, определяется не только факторами, влияющими на годовую дозу, но и продолжительностью периода, в течение которого индивид подвергался облучению. Зависимость аккумулярованной к концу 1990 г. эквивалентной дозы облучения щитовидной железы от года рождения приведена на рис. 9.

Анализ зависимости аккумулярованной дозы от года рождения показывает следующее. Для лиц, родившихся в период с 1927 по



Рис. 9. Эквивалентные дозы облучения щитовидной железы в зависимости от года рождения

1949 г. наблюдается рост значений аккумулярованных доз. Последнее объясняется ростом значения времени облучения в зависимости от увеличения года рождения индивида. Практически для всех рассмотренных возрастных когорт населения г. Озерска (1951–1989 г. рождения) зависимость рассматриваемого показателя характеризуется спадом значений. Незначительный рост (в пределах 15–20%) наблюдается для лиц 1949–1951 г. рождения. Последнее обусловлено тем, что лица указанных годов рождения в своей жизни застали период резкого подъема мощности выброса йода-131 в атмосферу, влияние которого перекрыло не только вклад в формирование дозы облучения возрастного фактора, но и снижение продолжительности облучения в связи с их более поздним рождением.

В связи с полученными оценками доз необходимо отметить следующее обстоятельство. В течение рассматриваемого периода времени облучение населения г. Озерска складывалось в результате действия множества факторов, среди которых кроме рассмотренных в настоящем сообщении выбросов в атмосферу йода-131 можно указать на внешнее облучение, обусловленное как выбросами в атмосферу инертных радиоактивных газов, так и от загрязнения почвы радиоактивными веществами, внутреннее облучение, связанное с пероральным поступлением радионуклидов с пищевыми продуктами. Использование приведенных в настоящем сообщении значений доз облучения щитовидной железы для оценки показателей риска возникновения стохастических эффектов без учета указанных выше факторов может привести к завышению численных значений получаемых результатов.

ВЫВОДЫ

На основе реальной метеорологической информации, а также по динамике и структуре рациона питания рассчитаны годовые и накопленные к 1990 г. эквивалентные дозы облучения щитовидной железы жителей города, обусловленные выбросами в атмосферу

йода-131, в зависимости от года рождения и продолжительности проживания на территории населенного пункта.

Критической группой населения являются дети горожан, содержавших крупный рогатый скот.

Из всех рассмотренных возрастных когорт (1949–1986 г. рождения) максимальную годовую дозу (1,57 Зв) получили лица 1952 г. рождения в 1953 г.

Максимальную эквивалентную дозу от выбросов йода-131 накопили представители возрастной группы 1951 г. рождения. Указанная доза составила 4 Зв.

При эпидемиологических исследованиях необходимо учитывать то, что облучение щитовидной железы складывалось не только в результате выбросов в атмосферу йода-131.

ЛИТЕРАТУРА

1. Population Exposure Dose Reconstruction for the Urals Region (M.O. Degteva, V.P. Kozheurov, M.I. Vorobiova, D.S. Burmistrov, V.V. Khokhryakov, K.G. Suslova, L.S. Anspaugh, B.A. Napier, A. Buville) In «Assessing Health and Environmental Risks from Long-Term Radiation Contamination in Chelyabinsk, Russia», Proc from the 1996 AAAS Ann. Meeting Symp., 12 February 1996, Baltimore, Maryland., Ed. by S.L. Kellogg and E.J. Kirk., American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C. 1997.
2. Хохряков В.В., Дрожко Е.Г., Мокров Ю.Г., Стукалов П.М. Ретроспективное восстановление доз облучения населения Южного Урала, сложившегося в результате выбросов в атмосферу йода-131 из источников ПО «Маяк». I международный симп. «Хроническое радиационное воздействие: риск отдаленных эффектов». Тезисы докладов. — Челябинск. — 1995. — 169 с.
3. Work Plan for the Hanford Environmental Dose Reconstruction Project. Prevision 1., Hanford Environmental Dose Reconstruction Project, PNL-6696 HERD Rev.1, December 1989.
4. Chew E.W., Dickson R.L., Otis M.D., Peterson H.K., and Start G.E. Overview of the

Idaho National Engineering Laboratory Historical Dose Evaluation. In «Environmental Health Physics» Proc. of the Twenty-Sixth Midyear Meeting of the Health Physics Society, January 24–28, 1993 Coeu d'Alene, Idaho., Research Enterprises, publishing Segment. — 1993. — P. 193–210.

5. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1988 Report to the General Assembly, with annexes. United Nations, New York. — 1988.

6. Хохряков В.В., Дрожко Е.Г. Выбросы в атмосферу йода-131 из источников ПО «Маяк». Результаты многолетнего мониторинга и опыт ретроспективного восстановления // Вопросы радиационной безопасности. — №1. — 2000. — С. 31–36.

7. Жмуцкая З.А., Постнова Н.В., Хохряков В.В. Комплекс работ по сбору и обработке ретроспективной информации в районе деятельности ПО «Маяк»: Отчет / ЧГМЦ. — Че-

лябинск. — 1996. — С.16.

8. Хохряков В.В., Тепляков И.И. Анализ результатов метеорологических наблюдений на станции Аргаяш за период с 1949 по 1958 гг. (Предварительное сообщение): Отчет / ПО «Маяк». — Озерск. — 1996. — С. 37.

9. Жмуцкая З.А., Постнова Н.В., Хохряков В.В. Комплекс работ по сбору и обработке ретроспективной метеорологической информации в районе деятельности ПО «Маяк». Повторяемость направлений ветра и категорий устойчивости атмосферы в районе расположения метеостанции Аргаяш. Отчет/ ЧГМЦ. — Челябинск. — 1997. — С. 72.

10. Сулова К.Г., Хохряков В.Ф., Дрожко Е.Г., Хохряков В.В., Меньших З.С., Бажин А.Г., Романов С.А., Мокров Ю.Г., Петер И.Г. Эффективная доза облучения населения г. Челябинск-65. / Тез. докл I междунар. симп. «Хроническое радиационное воздействие: риск отдаленных эффектов». — Челябинск. — 1995. — 169 с.