

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ И ЭКОЛОГИИ

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

Учебно-методическое пособие

Издание третье



Минск 2007

УДК 616-073.75 (075.8)

ББК 53.6 я 73

Р 15

Утверждено Научно-методическим советом университета
в качестве учебно-методического пособия 31.01.2007 г., протокол № 5

А в т о р ы : А. Н. Стожаров, Л. А. Квиткевич, А. Р. Аветисов, О. К. Сиякова, О. М. Жерко,
С. И. Сычик

Рецензенты: ректор Гомельского государственного медицинского института, д-р
мед. наук, проф. С. В. Жаворонок; зав. каф. патологической физиологии Белорусского
государственного медицинского университета, д-р мед. наук, проф. Ф. И. Висмонт

Радиационная медицина : учеб-метод. пособие / А. Н. Стожаров [и др.]. – 3-е изд. –
Р 15 Минск: БГМУ, 2007. – 144 с.

ISBN 978-985-462-667-3.

Включены основные программные теоретические разделы радиационной медицины, необходимые для понимания процессов формирования лучевого повреждения и, соответственно, для проведения профилактических мероприятий, снижающих негативные последствия воздействия ионизирующих излучений. Первое издание вышло в 2000 году.

Предназначено для студентов всех факультетов, изучающих радиационную медицину, а также для аспирантов и научных сотрудников соответствующего профиля.

УДК 616-073.75 (075.8)

ББК 53.6 я 73

ISBN 978-985-462-667-3

©Оформление. Белорусский государственный
медицинский университет, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный этап развития общества, строительство предприятий ядерного топливного цикла, применение новых технологий (в том числе и в медицине) связаны с возрастающими масштабами применения источников ионизирующего излучения. Эта тенденция увеличивает риск облучения в тех или иных масштабах персонала и населения.

Чернобыльская катастрофа по размерам и последствиям загрязнения окружающей среды — крупнейшая в истории ядерной энергетики. Во внешнюю среду поступило радиоактивных веществ общей активностью около 10 ЭБк. Наибольшее их количество (около 70 %) выпало на территорию Беларуси. Ущерб, причиненный Республике Беларусь чернобыльской катастрофой, относит территорию республики к зоне экологического бедствия. Значительная коллективная доза, сформированная на жителей Беларуси за счет облучения различными радионуклидами, обуславливает во многом медицинские последствия катастрофы, связанные с ростом заболеваемости и, в частности, с онкологической патологией щитовидной железы у детей и взрослых, увеличением общесоматической заболеваемости и др.

Следовательно, совершенно неотъемлемая часть процесса подготовки врачей — подробное рассмотрение механизмов действия ионизирующего излучения на организм человека, а также последствий такого воздействия.

Радиационная медицина находится в тесной связи с биохимией, молекулярной биологией, патофизиологией, клиническими дисциплинами, радиационной гигиеной и другими дисциплинами. Одна из главных целей радиационной медицины — стремление побудить студентов к пониманию взаимосвязи между первичными повреждающими механизмами действия ионизирующей радиации и формированием эффектов в виде ближайших и отдаленных последствий, к пониманию способов предупреждения и нивелирования таких эффектов. Врач должен понимать основные принципы приемлемого риска при действии такого мощного физического фактора, каким является ионизирующее излучение.

Настоящее издание отражает основной программный материал по радиационной медицине. В его основу положен лекционный курс, читаемый авторами на всех факультетах Белорусского государственного медицинского университета в течение двенадцати лет существования кафедры. Особенность изложения материала — его структурирование и более тесная интеграция с другими медико-биологическими дисциплинами.

Авторы хотели бы выразить искреннюю признательность руководству ЗАО «Медфарминвест» (Л. В. Мартиросовой, С. С. Кузавко и В. Л. Ржевскому) за информационную поддержку и предоставление постоянного доступа в Интернет.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

| | |
|---------------------|---|
| АЭС | — атомная электростанция |
| Бк, Вq | — беккерель (единица радиоактивности) |
| Бэр, rem | — единица эквивалентной или эффективной дозы |
| ВОЗ | — Всемирная организация здравоохранения |
| ВПР | — врожденный порок развития |
| Гр, Gy | — грей (единица поглощенной дозы) |
| D | — поглощенная доза |
| ДНК | — дезоксирибонуклеиновая кислота |
| ДУ | — допустимый уровень |
| Е | — эффективная доза |
| ЕВРАТОМ | — Европейское агентство по атомной энергии |
| ЕРФ | — естественный радиационный фон |
| Н | — эквивалентная доза |
| Зв, Sv | — зиверт (единица эквивалентной или эффективной дозы) |
| IQ | — интеллектуальный показатель (intelligence quotient) |
| ИИ | — ионизирующее излучение |
| КК | — коэффициент качества |
| Ки, Ci | — кюри |
| КЭ | — кислородный эффект |
| кэВ/мкм | — килоэлектрон-вольт на микрометр пробега |
| ЛПЭ | — линейная передача энергии |
| МЗ | — Министерство здравоохранения |
| МАГАТЭ (IAEA) | — Международное агентство по атомной энергии |
| МэВ | — мегаэлектрон-вольт |
| мкм | — микрометр |
| МКРЗ (ICRP) | — Международная комиссия по радиологической защите |
| НКДАР ООН (UNSCEAR) | — Научный комитет по действию атомной радиации |
| НРБ | — нормы радиационной безопасности |
| ОБЭ | — относительная биологическая эффективность |
| ОЛБ | — острая лучевая болезнь |
| ОР | — относительный риск |
| ПД | — предел дозы |
| ПДД | — предельно допустимая доза |
| ПОЛ | — перекисное окисление липидов |
| ПР | — порок развития |

| | |
|-----------|---|
| P,R | — рентген |
| рад, rad | — единица поглощенной дозы |
| РДУ | — республиканские допустимые уровни |
| РК | — радиационный контроль |
| РН | — радионуклиды |
| РТМО | — районное территориальное медицинское объединение |
| РФ | — радиационный фон |
| $T_{1/2}$ | — период полураспада |
| ТАКМ | — трансплантация аллогенного костного мозга |
| T_6 | — время, в течение которого из организма выводится половина введенного вещества |
| ТВЭЛ | — тепловыделяющий элемент |
| ТИРФ | — техногенно измененный радиационный фон |
| ТКЧЭП | — трансплантация клеток человеческой эмбриональной печени |
| $T_{эф.}$ | — эффективный период полувыведения радионуклида из организма |
| УЗИ | — ультразвуковое исследование |
| УЛПА | — участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС |
| УФИ | — ультрафиолетовое излучение |
| ФИРЭ | — Фонд исследования радиационных эффектов |
| Х | — экспозиционная доза |
| ХЛБ | — хроническая лучевая болезнь |
| ЦНС | — центральная нервная система |
| ЩЖ | — щитовидная железа |
| ЯО | — ядерное оружие |
| ЯТЦ | — ядерный топливный цикл |
| ЯФУ | — ядерная физическая установка |
| эВ | — электрон-вольт |
| ЭЭГ | — электроэнцефалограмма |

**Некоторые множители и приставки для образования кратных,
дольных единиц и их наименование**

| Множитель | Приставка | Обозначение |
|------------------|------------------|--------------------|
| 10^{18} | Экса | Э |
| 10^{15} | Пета | П |
| 10^{12} | Тера | Т |
| 10^9 | Гига | Г |
| 10^6 | Мега | М |
| 10^{-9} | Нано | н |
| 10^{-12} | Пико | п |
| 10^{-15} | Фемто | ф |

**Соотношение между единицами СИ и внесистемными единицами
в области ионизирующих излучений**

| Величина, символ | Название и обозначение единицы | | Соотношение единиц |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | Единица СИ | Внесистемная единица | |
| Активность (А) | Беккерель (Бк, Вq) | Кюри (Ки, Ci) | 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк |
| Поглощенная доза (D) | Грей (Гр, Gy) | Рад (рад, rad) | 1 рад = 0,01 Гр |
| Эквивалентная доза (H) | Зиверт (Зв, Sv) | Бэр (бэр, rem) | 1 бэр = 0,01 Зв |
| Эффективная доза (E) | Зиверт (Зв, Sv) | Бэр (бэр, rem) | 1 бэр = 0,01 Зв |

ГЛАВА 1.

Введение в радиационную медицину.

Радиоактивность. Закон радиоактивного распада.

Дозиметрия. Радиационный фон Земли.

Уровни облучения населения от различных источников радиационного фона

Радиационная медицина — наука, изучающая особенности воздействия ионизирующего излучения на организм человека, принципы лечения лучевых повреждений и профилактики возможных последствий облучения населения.

Радиационная медицина изучает широкий круг вопросов и тесно связана с радиобиологией, ядерной физикой и биофизикой, биоорганической и биологической химией, клиническими дисциплинами, эпидемиологией. Большой раздел радиационной медицины — радиационная гигиена, которая выделена как самостоятельная гигиеническая наука.

Термин «ионизирующие излучения» используется для описания переноса через пространство энергии в виде электромагнитных волн либо субатомных частиц. **Ионизирующее излучение** – излучение, которое создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и образует при взаимодействии со средой ионы разных знаков (Закон Республики Беларусь № 122-3 от 05.01.1998 «О радиационной безопасности населения»).

По природе ионизирующие излучения делятся на два основных вида:

- а) корпускулярные, например, альфа, бета;
- б) электромагнитные, например, гамма и рентгеновское.

Основной характеристики (табл. 1-1) ионизирующих излучений являются:

- для корпускулярных излучений — заряд частицы, ее масса, а также энергия;

- для электромагнитных излучений — энергия.

Эти параметры определяют особенности взаимодействия ионизирующих излучений с веществом и, соответственно, степень и вероятность их повреждающего действия.

Характеристика основных видов излучения:

1) **альфа-частицы** (ядра гелия) имеют заряд +2, массу 4 а.е.м., энергия альфа-частиц при выходе из ядра составляет 3 – 11 МэВ (эВ – электронвольт – внесистемная единица энергии: $1 \text{ эВ} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$); обладают высокой ионизационной способностью; имеют незначительную проникающую способность: в зависимости от энергии альфа-частиц длина их пробега в воздухе может достигать 11 см, а в биологической ткани — десятков микрометров;

2) **бета-частицы** — это электроны и позитроны, имеющие пренебрежимо малую массу и заряд -1 , или $+1$ соответственно; энергия чаще измеряется в кэВ; удельная плотность ионизации, создаваемая бета-частицами, примерно в 1000 раз меньше, чем у альфа-частиц той же энергии; проникающая способность у бета-частиц больше, чем у альфа-частиц: пробег в воздухе составляет метры, в биологической ткани — сантиметры;

3) **нейтроны** имеют массу, равную 1 а.е.м., заряд 0; нейтрон может иметь энергию от 0,025 эВ до 300 МэВ и более. По энергии выделяют медленные и быстрые нейтроны, граница между ними лежит примерно в области 1 МэВ. Энергия нейтрона определяет характер его взаимодействия с веществом;

Бумага Орг. стекло Свинец Бетон



Рис. 1-1. Проникающая способность разных видов ионизирующего излучения

4) **гамма-излучение** образуется при ядерных превращениях и имеет длину волны 10^{-10} – 10^{-14} м; обладает высокой проникающей способностью, длина пробега в воздухе достигает сотен метров;

5) **рентгеновское излучение** имеет длину волны 10^{-9} – 10^{-12} м. Различают характеристическое рентгеновское излучение и тормозное. Характеристическое рентгеновское излучение образуется за счет изменения энергетического состояния электрона при его переходе на энергетически более выгодную орбиталь. Тормозное излучение образуется при столкновении заряженных частиц с частицами вещества, через которое они проходят. Чем меньше длина волны, тем выше энергия излучения и больше его проникающая способность (рис. 1-1).

С понятием «ионизирующие излучения» тесно связано понятие «радиоактивность». Исторически радиоактивность является первым ядерным процессом, обнаруженным человеком (А. Беккерель, 1896 г.). В изучение

данного процесса большой вклад внесли Мария Складовская-Кюри и Пьер Кюри.

Радиоактивность — самопроизвольное превращение ядер одних элементов в другие, при котором ядро переходит в более устойчивое состояние. Процесс сопровождается испусканием ионизирующих излучений (корпускулярных либо электромагнитных).

Таблица 1-1

Характеристика основных видов ионизирующего излучения

| Излучение | Вид излучения | Масса (а.е.м.) | Заряд | Защитные материалы |
|----------------------|------------------------|----------------|----------|--|
| Альфа | Частица | 4 | +2 | Бумага, кожа, одежда |
| Бета | Частица | 1/1836 | -1 +1 | Пластмасса, стекло, легкие металлы. |
| Гамма, рентгеновское | Электромагнитная волна | 0 | 0 | Тяжелые металлы, бетон, грунт. |
| Нейтрон | Частица | 1 | 0 | Для замедления быстрых нейтронов: вода, парафин, бетон, пластмассы; для поглощения тепловых нейтронов: бораль, борная сталь, борный графит, сплав кадмия со свинцом. |

Радиоактивные превращения характеризуются:

1) способом выделения избыточной энергии, которая отдается либо в виде альфа- или бета-частиц определенной энергии, либо электромагнитного излучения;

2) временем протекания радиоактивного распада и вероятностью распада ядра за единицу времени. Радиоактивный распад — явление статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадется данное нестабильное ядро. Для описания статистических закономерностей радиоактивного распада используется естественная статистическая величина, называемая постоянной распада λ , она не зависит от времени. Смысл величины λ состоит в том, что если взять большое число N одинаковых нестабильных ядер, то за единицу времени в среднем будет распадаться λN ядер. Величина λN называется активностью и характеризует излучение препарата в целом, а не отдельного ядра.

За единицы радиоактивности приняты:

а) системная — **Беккерель (Бк, Вq)**. 1 Бк равен активности нуклида в радиоактивном источнике, в котором за время 1 с происходит 1 акт распада (1 Бк = 1 расп/сек). Единица названа в 1975 г. в честь французского ученого А. Беккереля (А. Becquerel, 1852–1908 г.).

б) традиционная (внесистемная) — **Кюри (Ки, Ci)**. Единица названа в честь французских ученых П. Кюри и М. Складовской-Кюри и введена в 1910 г. С 1956 г. означает такое количество радиоактивного вещества, которое распадается с интенсивностью $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в 1 секунду, т. е. $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$, $1 \text{ Бк} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}$.

Уменьшение количества активных ядер с течением времени происходит в соответствии с законом радиоактивного распада, который описывается

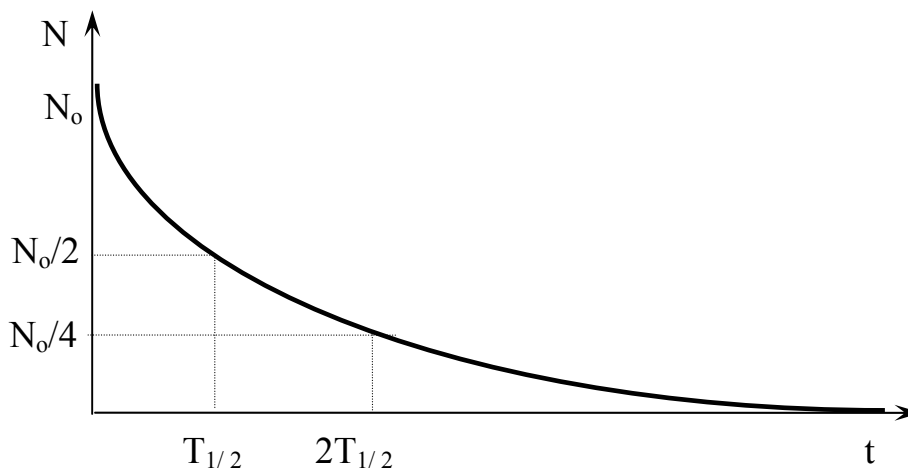


Рис. 1-2. Изменение количества радиоактивных ядер с течением времени

экспоненциальной кривой (рис. 1-2) и формулируется следующим образом: за равные промежутки времени происходит превращение равных долей активных атомов.

Закон радиоактивного распада имеет следующее математическое выражение:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

где N_0 — исходное количество радиоактивных ядер; N_t — количество активных ядер, оставшихся спустя время распада t ; e — основание натуральных логарифмов; λ — постоянная распада, t — время распада.

Постоянная распада λ связана с периодом полураспада ($T_{1/2}$ или T_f). Периодом полураспада называется время, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается вдвое. После математических преобразований формула [1] приобретает следующий вид:

$$N_t = N_0 \cdot e^{\frac{-0.693 \cdot t}{T_f}} \quad [2]$$

Этой формулой пользуются для практических целей, когда дают рекомендации о возможности использования загрязненных радионуклидами территорий, продуктов питания, воды и т. п. Так как через $10 T_{1/2}$ остается практически чистая среда (т. е. остается меньше 0,1 % от исходного количества радионуклида). Например: I-131 имеет период [1]

полураспада, равный 8,05 суток; цельное молоко и листовые овощи местного производства запрещают использовать в течение 2–3 месяцев после выброса радиоактивного йода; у Cs-137 период полураспада равен 30,1 г.; у Sr-90 период полураспада равен 29,12 г.; т. е. земли, загрязненные Cs-137 и Sr-90 можно будет использовать спустя 300 лет после аварии на ЧАЭС.

Прежде чем разбирать типы превращения ядер, необходимо вспомнить, что основной характеристикой атома (рис. 1-3) являются 2 числа: массовое число (A), равное сумме протонов и нейтронов ядра, и атомный номер (Z) в периодической системе элементов Менделеева, равный числу протонов в ядре, т. е. соответствующий заряду ядра. Любая частица, входящая в состав ядра (как протон, так и нейтрон), называется нуклоном. Изотопы — атомы с одним и тем же зарядом ядра, но разным массовым числом, т. е. они отличаются количеством нейтронов в ядре. Радионуклиды — ядра радиоактивных атомов. Различают естественные и искусственные радионуклиды. Радионуклиды, которые образовались и постоянно образуются без участия человека, принято называть естественными радионуклидами. К настоящему времени известно более 900 радиоактивных изотопов, полученных искусственным путем. Особенно много искусственных радионуклидов получают в ядерных реакторах различного назначения, в том числе в реакторах АЭС, где создаются мощные потоки нейтронов. В настоящее время практически не существует таких элементов, у которых не было бы радиоактивного изотопа. По химическим свойствам радиоизотопы не отличаются от стабильных, то есть стабильный и радиоактивный изотопы следуют вместе по всем цепочкам в соответствии с химическими и биологическими законами круговорота в природе.

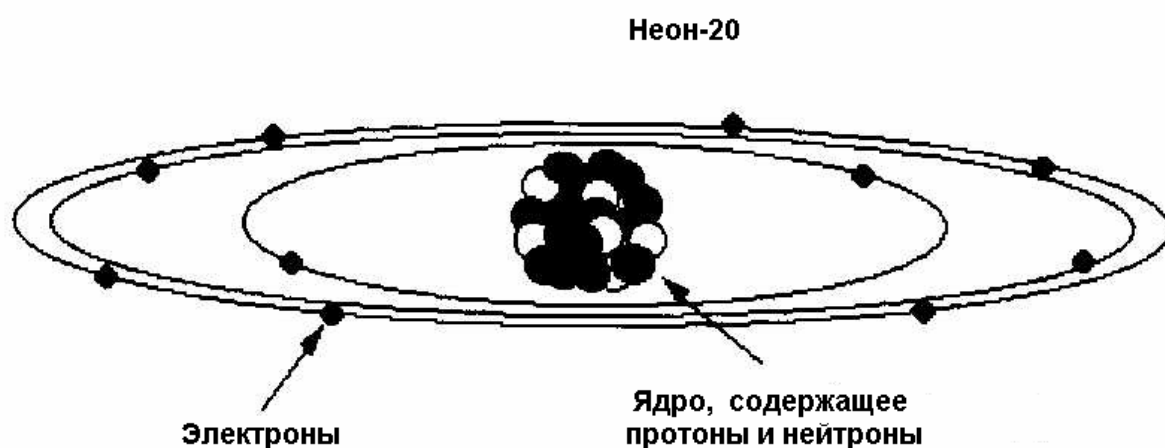
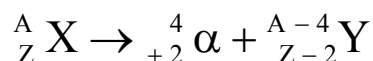


Рис. 1-3. Строение атома неона-20

Нестабильные ядра претерпевают 4 основных типа радиоактивных превращений: альфа-распад, бета-превращение, гамма-превращение и спонтанное деление ядер. Тип радиоактивного превращения определяется видом частиц, испускаемых при распаде. Процесс радиоактивного распада всегда экзотермичен, т. е. идет с выделением энергии. Исходное ядро

называется материнским (в нижеприведенных схемах обозначено символом X), а получающееся после распада ядро — дочерним (в схемах — символ Y).

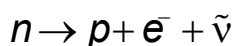
1. Альфа-распад состоит в том, что тяжелое ядро самопроизвольно испускает альфа-частицу, т. е. это чисто ядерное явление.



Известно более 200 альфа-активных ядер, почти все они имеют порядковый номер больше 83. Энергия альфа-частиц тяжелых ядер чаще всего находится в интервале от 4 до 9 МэВ. Например, альфа-излучающими радионуклидами являются Am-241; Ra-226; Rn-222; U-238 и 235; Th-232; Pu-239 и 240:

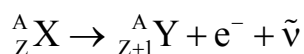


2. Бета-превращение ядер — это внутринуклонный процесс, то есть в ядре распадается одиночный нуклон, происходит внутренняя перестройка ядра, вылетающие из ядра при β -распаде частицы (электрон e^- , позитрон e^+ , нейтрино ν , антинейтрино $\bar{\nu}$) рождаются во время распада. Возможность распада одиночного нуклона хорошо иллюстрирует распад свободного нейтрона с периодом полураспада 11,7 мин.:

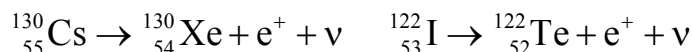
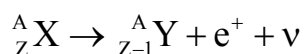


Различают следующие виды бета-превращения ядер:

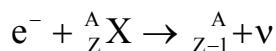
а) электронный распад:



б) позитронный распад:



в) электронный захват (называют К-захватом, т. к. ядро поглощает один из электронов атомной оболочки, обычно из К-оболочки):



Примерами радионуклидов, претерпевающих бета-превращение, являются тритий (H-3), C-14, радионуклиды натрия (Na-22, Na-24), радионуклиды фосфора (P-30, P-32), радионуклиды серы (S-35, S-37), радионуклиды калия (K-40, K-44, K-45), Rb-87, радионуклиды стронция (Sr-89, Sr-90), радионуклиды

йода (I-125, I-129, I-131, I-134), радионуклиды цезия (Cs-134, Cs-137). Энергия бета-частиц варьирует в широком диапазоне: от 0 до E_{\max} (полная энергия, выделяющаяся при распаде) и измеряется в кэВ, МэВ. Для одинаковых ядер

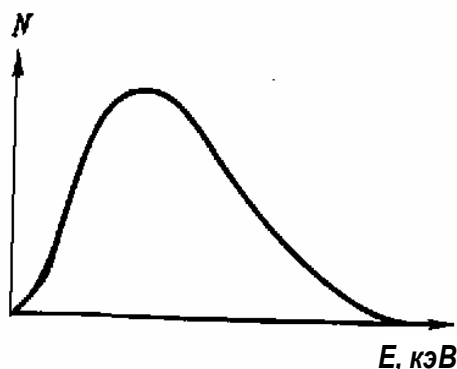


Рис. 1-4. Спектр распределения бета-частиц по их энергиям

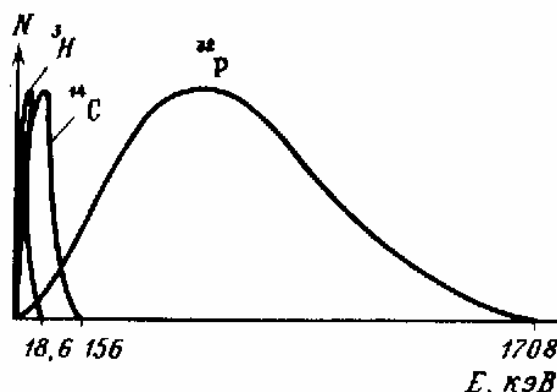
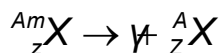


Рис. 1-5. Энергетические спектры бета-частиц для H-3, C-14 и P-32

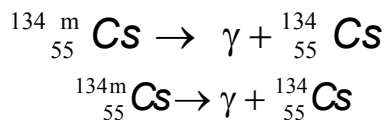
E — энергия частицы; N — число импульсов в минуту

распределение вылетающих электронов по энергиям является закономерным и называется спектром электронов β -распада, или бета-спектром (рис. 1-4). По спектру энергии бета-частиц можно провести идентификацию распадающегося элемента (рис. 1-5).

3. Гамма-распад: за счет энергии возбуждения ядро испускает гамма-квант, переходя в более стабильное состояние. Массовое число и атомный номер при этом не изменяются:



Гамма-излучение — явление внутриядерное, спектр гамма-излучения всегда дискретен. Испускаемые ядрами гамма-кванты обычно имеют энергию от десятков кэВ до нескольких МэВ. Индекс «m» означает метастабильное состояние ядра. Гамма-превращение (или изомерный переход) претерпевают ядра следующих изотопов: Rb-81m; Cs-134m; Cs-135m; In-113m; Y-90m. Например:



4. Спонтанное деление тяжелых ядер возможно у ядер, начиная с массового числа 232. Ядро делится на 2 сравнимых по массам осколка. Именно спонтанное деление ядер ограничивает возможности получения новых трансурановых элементов. В ядерной энергетике используется процесс деления тяжелых ядер при захвате ими нейтронов:



В результате деления образуются осколки с избыточным количеством нейтронов, которые затем претерпевают несколько последовательных превращений (чаще — бета-распад).

ДОЗИМЕТРИЯ — это измерение дозы или ее мощности (т. е. дозы в единицу времени).

В настоящее время различают следующие дозы:

ЭКСПОЗИЦИОННАЯ ДОЗА (X) — количественная характеристика поля источника ионизирующего излучения (гамма или рентгеновского), характеризующая величину ионизации сухого воздуха при атмосферном давлении.

Традиционная (внесистемная) единица экспозиционной дозы — **рентген (Р, R)**. Единица названа в честь немецкого физика В. К. Рентгена (1825–1923 гг.), была введена в 1928 г. 1 рентген равен экспозиционной дозе рентгеновского и гамма-излучения в воздухе, при которой сопряженная корпускулярная эмиссия образует на 0,001293 г воздуха ионы, несущие заряд, равный 1 единице заряда СГС (система единиц измерения, в которой существуют три независимые величины — сантиметр – грамм – секунда) каждого знака (0,001293 г — это масса

1 см³ атмосферного воздуха при температуре 0 °С и давлении 760 мм рт. ст.).

Системная единица — **кулон на килограмм (Кл/кг, C/kg)**. 1 Кл/кг равен экспозиционной дозе фотонного излучения, при которой сумма электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных электронами, освобожденными в облученном воздухе массой 1 кг, при полном использовании ионизирующей способности всех электронов, равна 1 Кл.

Соотношение единиц: $1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ (точно);

$1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ P}$ (приблизительно).

Часто пользуются понятием **мощность экспозиционной дозы** — величиной, выраженной в мР/ч или мкР/ч. Обычные фоновые показатели мощности экспозиционной дозы для Беларуси — до 18–20 мкР/ч.

По традиции экспозиционную дозу использовали в рентгенодиагностике благодаря тому, что ионизирующая способность рентгеновского излучения для воздуха и биологической ткани приблизительно одинакова. Однако при переходе к высокоэнергетическим типам излучения выяснилась ограниченность использования этой характеристики при оценке поглощенной дозы, особенно в живых организмах. В связи с этим экспозиционная доза, как и прежде, применяется для оценки поля источника излучения, а для определения взаимодействия ионизирующих излучений со средой используется другое понятие — **Поглощенная доза (D)**, представляющая количество энергии, поглощаемое единицей массы облучаемого вещества.

Единицей СИ поглощенной дозы является джоуль на килограмм (Дж/кг) со специальным наименованием **грей (Гр, Gy)**. 1 Гр = 1 Дж/кг. Единица названа в 1975 г. в честь английского физика Л. Грея (1905–1965 гг.). В качестве внесистемной (традиционной) единицы используется **рад (rad, rd)**, равный 0,01 Гр (табл. 1-4). Наименование «rad» образовано от начальных букв выражения radiation absorbed dose — поглощенная доза излучения. Для мягких тканей человека в поле рентгеновского или γ -излучения поглощенная доза в 1 рад примерно соответствует экспозиционной в 1 Р (точнее 1 Р = 0,93 рад).

Поглощенная доза не зависит от вида и энергии ионизирующего излучения и определяет степень радиационного воздействия, т. е. является мерой ожидаемых последствий облучения. Учитывая существенные различия в механизме взаимодействия разных типов излучения с веществом, ионизирующей способности и т. д., следует ожидать, что одна и та же поглощенная доза может дать разный биологический эффект. Для количественной оценки такого различия вводятся понятия: *«взвешивающие коэффициенты для различных видов излучения (W_R)»* и *«эквивалентная доза»*. В радиационной защите при расчете эквивалентной дозы используют взвешивающие коэффициенты как множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ДОЗА (H) есть мера выраженности эффекта облучения. Эквивалентная доза H_{TR} в органе или ткани T, созданная излучением R, определяется соотношением:

$$H_{TR} = W_R \cdot D_{TR}$$

где D_{TR} — средняя поглощенная доза от излучения R в ткани или органе T; W_R — взвешивающий коэффициент для излучения R.

Так как W_R — безразмерный множитель, единица СИ для эквивалентной дозы та же, что и для поглощенной дозы — Дж/кг, со специальным названием **зиверт (Зв, Sv)**, введена в 1979 г.; до этого использовали внесистемную единицу — **бэр (rem)**, равную 0,01 Зв (табл. 1-4).

В настоящее время, в соответствии с публикациями МКРЗ, в Нормах радиационной безопасности (НРБ-2000) рекомендуются перечисленные далее взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения (табл. 1-2). МКРЗ рекомендует использовать W_R вместо ранее применявшегося коэффициента качества (КК, k).

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения

| Вид излучения и диапазон энергии | Взвешивающий коэффициент W_R |
|--|--------------------------------|
| Фотоны любых энергий | 1 |
| Электроны и мюоны любых энергий | 1 |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | 20 |
| Нейтроны с энергией: | |
| менее 10 кэВ | 5 |
| от 10 кэВ до 100 кэВ | 10 |
| от 100 кэВ до 2 МэВ | 20 |
| от 2 МэВ до 20 МэВ | 10 |
| более 20 МэВ | 5 |

Риск развития стохастических последствий облучения организма человека зависит не только от эквивалентной дозы, но и от радиочувствительности тканей или органов, подвергшихся облучению. Величина воздействия ионизирующего излучения, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности, называется **ЭФФЕКТИВНАЯ ДОЗА (E)**. E представляет собой сумму произведений эквивалентных доз в тканях и органах тела на соответствующие взвешивающие коэффициенты и выражается соотношением:

$$E = \sum_T W_T H_T,$$

где H_T — эквивалентная доза в ткани или органе T; W_T — взвешивающий коэффициент для органа или ткани T.

Взвешивающий коэффициент W_T характеризует относительный вклад данного органа или ткани в суммарный ущерб здоровью из-за развития стохастических эффектов. Сумма W_T равна 1. Рекомендуемые МКРЗ (публикация 60) и НРБ-2000 значения взвешивающих коэффициентов W_T приведены в таблице 1-3.

Системная единица эффективной дозы — **зиверт (Зв, Sv)**; внесистемная единица — **бэр**. Один Зв равен 100 бэр (табл. 1-4).

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (W_T)

| Ткань или орган | W_T | Ткань или орган | W_T |
|----------------------|-------|-----------------------------|-------|
| Гонады | 0.20 | Печень | 0.05 |
| Красный костный мозг | 0.12 | Пищевод | 0.05 |
| Толстый кишечник | 0.12 | Щитовидная железа | 0.05 |
| Легкие | 0.12 | Кожа | 0.01 |
| Желудок | 0.12 | Клетки костных поверхностей | 0,01 |
| Мочевой пузырь | 0.05 | | |
| Молочные железы | 0.05 | Остальное | 0.05* |

* «Остальное» включает надпочечники, головной мозг, экстраоракальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку.

Таблица 1-4

Соотношение между системными и внесистемными единицами доз

| Величина и ее символ | Единица СИ | Внесистемная единица | Соотношение между единицами |
|------------------------|------------|----------------------|---|
| Экспозиционная доза, X | Кл/кг | Р | $1 \text{ Кл/кг} = 3.88 \cdot 10^3 \text{ Р}$ $1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ |
| Поглощенная доза, D | Гр (Дж/кг) | рад | $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ $1 \text{ рад} = 0.01 \text{ Гр}$ |
| Эквивалентная доза, H | Зв | бэр | $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ $1 \text{ бэр} = 0.01 \text{ Зв}$ |
| Эффективная доза, E | Зв | Бэр | $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ $1 \text{ бэр} = 0.01 \text{ Зв}$ |

Для оценки эффектов облучения группы людей используют коллективные дозы:

а) **коллективная эквивалентная доза (S_T)** в ткани T применяется для выражения общего облучения конкретной ткани или органа у группы лиц; она равна произведению числа облученных лиц на среднюю эквивалентную дозу в органе или ткани;

б) **коллективная эффективная доза (S)** относится к облученной популяции в целом; она равна произведению средней эффективной дозы на число лиц в облученной группе.

В определении коллективной эквивалентной и коллективной эффективной доз не указано время, за которое получена доза. Поэтому при расчете коллективных доз всегда должно быть четкое указание на период времени и группу лиц, по которым проводился данный расчет.

Коллективные дозы используют для оценки лучевой нагрузки на популяцию и риска развития стохастических последствий действия ионизирующих излучений. Единицы коллективных доз — **человеко-зиверт и человеко-бэр**.

Значение коллективной дозы, разделенное на число членов облученной группы называется «**подушная доза**» (per caput dose, Зв).

РАДИАЦИОННЫЙ ФОН ЗЕМЛИ. УРОВНИ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИАЦИОННОГО ФОНА

Ионизирующие излучения от природных источников, а также от радионуклидов, рассеянных в биосфере в результате деятельности человека, создают радиационный фон (РФ). РФ воздействует на все население земного

шара, в настоящее время имеет относительно постоянный уровень. В прошлом он неоднократно претерпевал резкие изменения.

РФ имеет 2 составляющих:

- 1) естественный РФ;
- 2) техногенно измененный РФ.

Оба компонента РФ участвуют в формировании эффективных доз облучения человека как за счет внешнего, так и за счет внутреннего облучения.

ЕСТЕСТВЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН (ЕРФ) — совокупность ионизирующих излучений от естественных источников внеземного и земного происхождения. Все живые организмы постоянно подвергаются воздействию ионизирующего излучения, которое всегда существовало в природе. Подушная эффективная доза за год во всем мире, создаваемая естественными источниками излучения, составляет 2,4 мЗв (табл. 1-5). Однако индивидуальные дозы распределены в широком диапазоне: в любой большой популяции около 65 % людей будет иметь годовые эффективные дозы 1–3 мЗв, около 25 % — меньше 1 мЗв и 10 % — больше 3 мЗв.

Источником ионизирующих излучений внеземного происхождения является первичное космическое излучение, которое в окрестности Земли состоит из галактического космического излучения (генерированного в еще точно не известных, но удаленных от Земли объектах) и солнечных космических лучей. Средняя энергия космических частиц около 10^8 – 10^9 эВ. Первичное космическое излучение состоит в основном из протонов (90 %) и альфа-частиц; встречаются ядра лития, бериллия, бора и другие. Поток электронов составляет около 1,5 % потока всех космических частиц; позитронов в 5 раз меньше; в небольшом количестве обнаружены также гамма-кванты.

Таблица 1-5

Средняя доза облучения от естественных источников

| Источник | Глобальная средняя годовая эффективная доза, мЗв | Типичный диапазон, мЗв |
|---------------------------------------|--|------------------------|
| Внешнее облучение: | | |
| космическое облучение | 0,4 | 0,3–1,0 |
| гамма-излучение земного происхождения | 0,5 | 0,3–0,6 |
| Внутреннее облучение: | | |
| вдыхание (главным образом радона) | 1,2 | 0,2–10 |
| поступление с пищей | 0,3 | 0,3–0,8 |
| Всего | 2,4 | 1–10 |

Магнитное поле Земли заметно влияет на первичное излучение, препятствуя вхождению в атмосферу низкоэнергетических частиц. В магнитном поле Земли существуют «ловушки», являющиеся естественным

резервуаром для накопления заряженных частиц (в основном протонов и электронов). Такие зоны называют радиационными поясами Земли.

Первичное космическое излучение взаимодействует (а, точнее, поглощается) с атмосферой, в результате чего формируются вторичное космическое излучение (которое состоит из ионов, протонов, нейтронов, мюонов, электронов и фотонов) и космогенные радионуклиды, воздействующие на человека.

Интенсивность вторичного космического излучения зависит от толщины атмосферы: космическое излучение на уровне моря примерно в 100 раз менее интенсивно, чем на границе атмосферы и состоит в основном из мюонов; Северный и Южный полюса получают больше ионизирующих излучений, чем экваториальные области (за счет магнитного поля Земли).

При воздействии космических лучей на атмосферу, в ее верхних слоях происходят различные ядерные реакции, в результате чего образуются космогенные радионуклиды. Основное значение из них имеют: тритий (H-3), C-14, P-32, S-35, Be-7, Na-22 и Na-24.

Естественные источники ионизирующего излучения земного происхождения представлены радионуклидами 2-х групп:

А. Радионуклиды, входящие в радиоактивные ряды.

Б. Радионуклиды, не входящие в радиоактивные ряды.

А. РАДИОНУКЛИДЫ РАДИОАКТИВНЫХ РЯДОВ

Радиоактивный ряд — это последовательность радионуклидов, образующихся в результате альфа- или бета-распада предыдущего элемента. Наиболее долгоживущие изотопы называются начальными для каждого из радиоактивных рядов.

Существует 4 радиоактивных ряда и, соответственно, 4 их родоначальника:

- *ториевый ряд*: наиболее долгоживущий изотоп – торий-232 (Th-232), период полураспада — $1.4 \cdot 10^{10}$ лет;

- *2 урановых ряда*:

- а) наиболее долгоживущий изотоп – уран-238 (U-238), период полураспада — $4.5 \cdot 10^9$ лет (рис.1-7);

- б) наиболее долгоживущий изотоп – уран-235 (U-235), период полураспада — $7 \cdot 10^8$ лет;

- *нептуниевый ряд*: наиболее долгоживущий изотоп – нептуний-237 (Np-237), период полураспада — $2.2 \cdot 10^6$ лет.

Из сравнения периодов полураспада родоначальников радиоактивных рядов со временем существования Земли видно, что в настоящий момент Th-232 почти весь сохранился, U-238 распался лишь частично, а U-235 распался большей частью (т. е., в настоящий момент в земной коре U-238 больше, чем U-235 в 140 раз), изотоп Np-237 распался практически весь. В процессе превращения этих элементов в качестве промежуточных продуктов распада

образуются радиоактивные изотопы радия, радона, полония, висмута, свинца, которые формируют значительную дозу облучения человека. Уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. Повышенным содержанием радионуклидов характеризуются породы вулканического происхождения — гранит, базальт; гораздо меньше радиоактивных элементов в осадочных породах — известняк, песчаник (табл. 1-6).

Таблица 1-6

Содержание урана, тория и радия в породах и почвах

| Тип породы, почвы | Активность U-238, Бк/кг | Активность Th-232, Бк/кг | Активность Ra-226, Бк/кг |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Вулканические: | | | |
| Гранит | 59 | 81,4 | 96–114 |
| Базальт | 11 | 11,1 | 18,5–40,7 |
| Осадочные: | | | |
| Сланцы | 44 | 44,4 | 14,8 |
| Песчаники | 18 | 11,1 | 11,1–25,9 |
| Почвы: | | | |
| Черноземы | 21 | 35,8 | |
| Дерново-подзолистые | 15 | 22,2 | |
| Торфяные | 6 | 6,3 | |

Наиболее высокие уровни земной радиации наблюдаются в Бразилии (на пляжах морского курорта Гуарапари — до 175 мЗв/год), на юго-западе Индии. На их территории есть богатые торием пески (монацитовые пески). Известны и другие места с высоким уровнем радиации, например: во Франции, в Нигерии, на Мадагаскаре. Повышенным содержанием радионуклидов уранового ряда отличается территория Скандинавских стран и Англии.

По подсчетам НКДАР ООН глобальная средняя эффективная доза внешнего облучения, которую человек получает за год за счет гамма-излучения земного происхождения, составляет 0,5 мЗв. Продукты распада урана и тория по пищевым цепочкам, а также с воздухом и водой поступают в организм человека, обуславливая внутреннее облучение (табл. 1-5). При пероральном поступлении радиоактивных элементов важно учитывать их растворимость и, соответственно, коэффициент всасывания.

Наибольшее значение в формировании дозы внутреннего облучения имеют радий-226; радон-220; полоний-210; свинец-210.

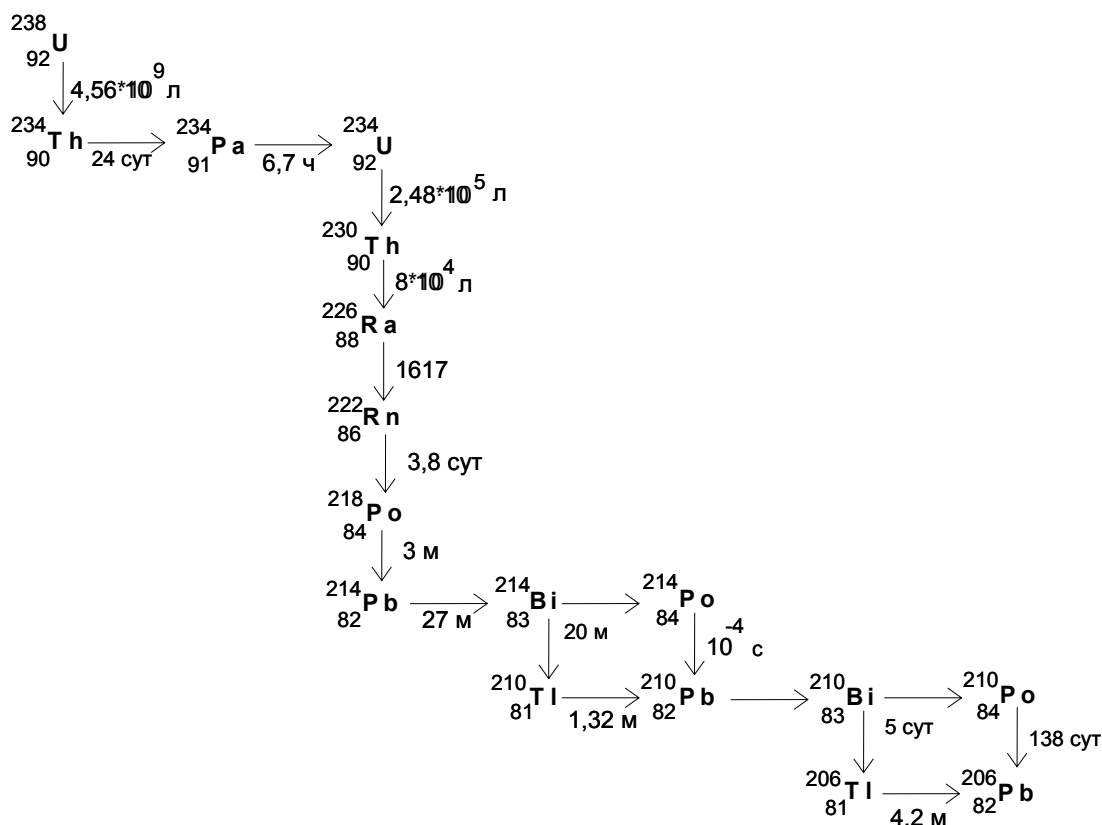


Рис. 1-7. Последовательность радиоактивных превращений в ряду U-238 — Pb-206. Указаны типы превращений (альфа-превращения обозначены вертикальной стрелкой, бета-превращения обозначены горизонтальной стрелкой) и периоды полураспада элементов (л, г — годы, сут — сутки, ч — часы, м — минуты, с — секунды)

Радий-226 (Ra-226 претерпевает альфа-распад с образованием Rn-222 , $T_{1/2}$ — 1620 лет) широко распространен в природе, может поступать в организм через желудочно-кишечный тракт (коэффициент всасывания в желудочно-кишечном тракте — 0,2), органы дыхания и неповрежденную кожу. Его источником для человека в основном служат зерновые культуры и хлеб, куриные яйца; среднее поступление с жидкостями и пищей — $2,3 \cdot 10^{-12}$ г/сут; радий, независимо от химической формы соединения при поступлении, депонируется в костной ткани, из которой выводится с T_6 , равным 17,13 лет (T_6 — время, в течение которого из организма выводится половина введенного вещества).

Радон (Rn-222 претерпевает альфа-распад с образованием Po-218 , период полураспада Rn-222 — 3,8 суток) вносит основной вклад в естественную радиоактивность атмосферного воздуха и уровни облучения человека за счет естественных источников радиации. В организм радон и короткоживущие продукты его распада поступают в основном через органы дыхания, но могут поступать через желудочно-кишечный тракт (например, при питье радоновой

воды) и через кожу (например, при приеме радоновых ванн). Выведение радона из организма, независимо от способа его поступления, осуществляется главным образом через легкие. Более подробную информацию о радоне можно получить в приложении 1.

Полоний-210 (Po-210) подвергается альфа-распаду с образованием стабильного Pb-206, $T_{1/2}$ — 138,38 сут; коэффициент всасывания из желудочно-кишечного тракта — 0,2. В среднем за сутки в организм человека с пищей поступает 0,037–0,37 Бк Po-210 (т. н. нормальное поступление). В регионах, где человек потребляет пищу морского происхождения, а также питается мясом северных оленей, наблюдается повышенное поступление Po-210 в организм — 2,2–11,1 Бк/сут; например: в диете японцев содержание Po-210 в 11–18 раз превышает среднестатистические цифры. Курение увеличивает поступление Po-210 в организм человека: в легких курильщика, выкуривающего 10–60 сигарет в сутки, создаются концентрации Po-210 1,66 мБк/г, что в 2–3 (вплоть до 7–9) раза выше, чем у некурящих, и соответствует дозам 0,027–0,04 мГр/год. Из организма человека Po-210 выводится с T_6 , равным приблизительно 80 сут.

Свинец-210 [ядро Pb-210 подвергается бета-превращению (электронный распад) с образованием Bi-210] распадается с $T_{1/2}$ — 22,3 года; коэффициент всасывания в желудочно-кишечном тракте — 0,2 (для всех соединений); элемент остеотропен, его обмен связан с обменом кальция и фосфора; из организма (в том числе и из костной ткани) выводится с T_6 , равным 12–10000 сут. Pb-210 — один из источников появления в организме Po-210.

Б. РАДИОНУКЛИДЫ, НЕ ВХОДЯЩИЕ В РАДИОАКТИВНЫЕ РЯДЫ

Эта группа в основном состоит из 11 долгоживущих радионуклидов (период полураспада от 10^7 до 10^{15} лет). Из них наибольший вклад в формирование эффективной дозы вносят K-40 и Rb-87.

Калий-40 (ядро K-40 претерпевает бета-распад, период полураспада $1,32 \cdot 10^9$ лет, K-40 является бета- и гамма-источником облучения биоты) занимает 2 место как источник излучений, обуславливающих природный радиоактивный фон. В природе K-40 всегда сопутствует стабильному K-39 (доля K-40 — около 0,01 %), формируя годовую эффективную дозу за счет внешнего облучения 0,12 мЗв и 0,18 мЗв за счет внутреннего облучения.

Калий-40 часто обуславливает активность поверхностного слоя почвы, равную 1–2 Ки/км². Активность растительного покрова Земли по K-40 равна $(0,5-1) \cdot 10^{-8}$ Ки/кг сырого веса. Активность пищевых продуктов по K-40 составляет 10^{-9} Ки/кг сырых продуктов. Наибольшая активность K-40 регистрируется в клюкве, орехах, фасоли, картофеле (табл. 1-7).

Содержание К-40 в окружающей среде

| Источник калия-40 | Активность К-40, Бк/кг |
|------------------------------------|------------------------|
| Известняк | 30–40 |
| Гранит | 925–1200 |
| Песчаники | 300–400 |
| Фосфатно-калийные удобрения | 5900 |
| Азотно-фосфорно-калийные удобрения | 1200–5900 |
| Почва | 37–1100 |
| Зерновые | 18,5–159 |
| Фасоль | 229 |
| Овощи свежие | 40–174 |
| Картофель | 174 |
| Орехи | 210 |
| Клюква | 355 |
| Грибы | 277 |

Таблица 1-8

Средняя удельная активность К-40 и Rb-87 в органах и тканях взрослого мужчины и создаваемые годовые эквивалентные дозы

| Орган или ткань | К-40 | | Rb-87 | |
|----------------------|-----------------|----------|-----------------|----------|
| | Сред. УА, Бк/кг | ГЭД, мЗв | Сред. УА, Бк/кг | ГЭД, мЗв |
| Организм в целом | 60 | 0,183 | 8,5 | 0,0063 |
| Гонады | 64 | 0,18 | 18 | 0,01 |
| Легкие | 64 | 0,18 | 8,1 | 0,0045 |
| Красный костный мозг | 130 | 0,27 | 7,0 | 0,007 |
| Щитовидная железа | 33 | 0,1 | 5,3 | 0,003 |

Примечание: 1) УА — удельная активность; 2) ГЭД — годовая эквивалентная доза; 3) годовая эффективная доза.

Из почвы К-40 поступает в растения, а затем, с пищей — в организм животных и человека. Радиоактивные изотопы калия поступают в организм, главным образом, с пищей и водой. Калий практически полностью всасывается из желудочно-кишечного тракта и равномерно распределяется в органах и тканях. T_6 калия составляет 58 суток.

Суточная потребность человека в калии составляет около 3 г, т. е. в организм может поступать и значительное количество К-40 (табл. 1-7). Например, средняя активность К-40 в красном костном мозге человека оценивается в 121 Бк/кг (содержание калия в красном костном мозге — 4 г/кг), в скелетных мышцах — 90 Бк/кг (содержание калия — 3 г/кг).

Рубидий-87 ($Rb-87$, $T_{1/2}$ — $4,8 \cdot 10^{10}$ г, ядро претерпевает β -превращение) входит в состав продуктов деления урана (до 6 %). При пероральном поступлении практически полностью всасывается из желудочно-кишечного

тракта и равномерно распределяется в органах и тканях (табл. 1-8). T_6 из мягких тканей человека составляет 44 (от 32 до 57) суток.

ТЕХНОГЕННО ИЗМЕНЕННЫЙ РАДИАЦИОННЫЙ ФОН

Формируется в результате деятельности человека, в основном, за счет источников ионизирующих излучений, используемых в медицине; глобальных выпадений радионуклидов; стройматериалов; телевидения; авиации.

Источники ионизирующего излучения, используемые в медицине, являются основной составляющей искусственного облучения и широко распространены во всем мире. Диагностическое облучение характеризуется довольно низкими дозами, получаемыми каждым из пациентов (типичные эффективные дозы находятся в диапазоне 1–10 мЗв), что достаточно для получения требуемой клинической информации. Итоговые значения подушной дозы в различных популяциях приведены в таблице 1–9.

Таблица 1-9

Радиационные нагрузки при медико-диагностических рентгеновских обследованиях

| Уровень медицинского обслуживания | Число жителей на одного врача | Число обследований в год на 100 человек населения | Средняя годовая эффективная доза на население, мЗв |
|-----------------------------------|-------------------------------|---|--|
| 1 | < 1000 | 920 | 1,2 |
| 2 | 1000–3000 | 150 | 0,14 |
| 3 | 3000–10000 | 20 | 0,02 |
| 4 | > 10000 | < 20 | < 0,02 |
| В среднем во всем мире | | 330 | 0,4 |

Терапевтическое облучение сопряжено с гораздо большими дозами, точно подводимыми к объему опухоли (типичные назначаемые дозы находятся в диапазоне 20–60 Гр). По оценке НКДАР ООН ожидается дальнейшее увеличение использования излучения в медицинских целях и соответствующих доз: увеличится использование рентгеновского излучения за счет возрастания значения компьютерной томографии и интервенционных процедур; возрастет использование радиофармпрепаратов для диагностики и терапии (применение новых и более избирательных средств); возрастет потребность в лучевой терапии вследствие старения населения.

Среднемировое значение индивидуальной дозы облучения всего тела вследствие медицинских процедур (главный вклад дает диагностика) составляет 0,4–1,0 мЗв/год; а в некоторых странах — от 50 до 100 % ЕРФ. В 1996 году облучение населения Беларуси за счет медицинских источников оценивалось в 2,0–2,5 мЗв/год. (Для сравнения: по данным индивидуального

дозиметрического контроля в этом же году индивидуальные дозы работников рентгенкабинетов и радиоизотопных лабораторий составляли 2,5–6,3 мЗв/год). Для жителей Беларуси важно снижать дозовые нагрузки за счет медицинских источников.

Стройматериалы формируют эффективную дозу, равную 0,1 мЗв/год. Если человек находится в помещении, доза внешнего облучения изменяется под влиянием двух противоположно действующих факторов:

- а) экранирование внешнего излучения зданием;
- б) излучение естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которых построено здание.

В зависимости от концентрации К-40, Ra-226, U-238 и Th-232 в различных стройматериалах мощность дозы в домах меняется от $4 \cdot 10^{-8}$ до $12 \cdot 10^{-8}$ Гр/ч (0,04–0,12 мкГр/ч). В среднем, в кирпичных, бетонных зданиях мощность дозы в 2–3 раза больше, чем в деревянных домах и в домах из синтетических материалов, где она обычно составляет 0,04–0,05 мкГр/ч (табл. 1-10). Необходимо отметить, что, чем больше отходов производства пошло на изготовление стройматериала, тем выше может быть его удельная активность.

Таблица 1-10

Удельная активность Ra-226 и Th-232 в различных стройматериалах (Бк/кг)

| Стройматериал | Ra-226 | Th-232 |
|---|----------|---------|
| Дерево | 0,3–0,5 | 0,2–1,2 |
| Кирпич | 33–152 | 21–178 |
| Бетон | 11–80 | 9–105 |
| Штукатурка из природного гипса | 1–13 | 1–12 |
| Фософгипс | 24–255 | 3–22 |
| Газобетон на основе квасцовых глинистых сланцев | 320–2620 | 24–115 |

Снижение облучения населения достигается регламентацией эффективной удельной активности ($A_{эфф}$) природных радионуклидов в строительных материалах. Например: в соответствии с НРБ-2000 для материалов, используемых в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях $A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3 A_{Th} + 0,09 A_K \leq 370$ Бк/кг, где A_{Ra} и A_{Th} — удельные активности ^{226}Ra и ^{232}Th , находящихся в равновесии с остальными членами уранового и ториевого рядов, A_K — удельная активность ^{40}K , (Бк/кг).

Глобальные выпадения радионуклидов делят на 2 группы:

А. Глобальные выпадения радионуклидов за счет испытаний ядерного оружия.

Б. Глобальные выпадения радионуклидов за счет деятельности предприятий ядерно-топливного цикла.

Глобальными называют выпадения радионуклидов, обнаруживаемые вдали от места выброса, т. е. практически в любой точке Земного шара. Это происходит, когда радионуклиды попадают в верхние слои тропосферы (они могут находиться там до 30 суток) и стратосферу (в стратосфере они задерживаются долго — до нескольких месяцев или лет). Эти радионуклиды долгое время выпадают в различном количестве на различные участки поверхности всего Земного шара.

А. Глобальные выпадения радионуклидов за счет испытаний ядерного оружия

Начиная с 1945 г. каждый из нас подвергался облучению за счет радиоактивных осадков, связанных с испытанием ядерного оружия (ЯО) в атмосфере. Максимум этих испытаний приходится на 2 периода:

- 1) 1954–1958 гг., когда взрывы проводили США, СССР и Великобритания;
- 2) 1961–1962 гг., когда взрывы проводили в основном США и СССР.

Каждое испытание ядерного оружия в атмосфере приводило к неконтролируемому выбросу в окружающую среду значительных количеств радиоактивных материалов, которые расплылись на широких пространствах в атмосфере и осаждались повсюду на земную поверхность. Рассчитано, что глобальная средняя годовая эффективная доза достигла пикового значения 150 мкЗв в 1963 г. и с тех пор уменьшилась, примерно, до 5 мкЗв в 2000 г. за счет оставшихся в окружающей среде радионуклидов, главным образом C-14, Cs-137, Sr-90. Средние годовые дозы на 10 % выше в северном полушарии, где большей частью проводили испытания, и ниже в южном.

Дозы облучения при испытаниях ЯО в разные периоды после взрыва формируются за счет разных радионуклидов:

а) максимальное значение в ближайшее время после взрыва имеют радионуклиды с $T_{1/2}$ от нескольких суток до 2 месяцев, такие как I-131, Ba-140, Sr-89, т. е. они имеют максимальное значение в ближайшее время после взрыва; сюда примыкает Zr-95 ($T_{1/2} = 64$ дня);

б) Cs-137 и Sr-90 ($T_{1/2}$ примерно 30 лет) будут давать вклад в облучение приблизительно до конца века, они представляют наибольшую потенциальную опасность;

в) C-14 ($T_{1/2} = 5730$ лет) будет оставаться источником радиоактивных излучений (хотя и с низкой мощностью дозы) даже в отдаленном будущем, так как к 2000 году он потерял лишь 7 % своей активности.

Б. Глобальные выпадения радионуклидов за счет деятельности предприятий ядерно-топливного цикла

Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) включает следующие стадии: добыча урановой руды; переработка ее в обогащенное U-235 ядерное топливо;

производство тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые состоят из урана в металлической, карбидной или оксидной форме, заключенного в оболочку из циркония, магниевое сплава или нержавеющей стали; использование ТВЭЛов на АЭС (нормальная эксплуатация АЭС); переработка отработанного ядерного топлива (для последующего использования извлеченного делящегося материала, извлекают в основном уран и плутоний), переработка и захоронение образующихся радиоактивных отходов. Обязательно надо помнить о транспортировке радиоактивных материалов для обеспечения всех этих стадий. Загрязнение окружающей среды радионуклидами происходит на всех стадиях ЯТЦ, но наибольший вклад вносят:

а) переработка отработанного ядерного топлива на радиохимических заводах; основное значение имеют радионуклиды С-14, Кг-95, Н-3, I-129;

б) нормальная эксплуатация АЭС; при нормальной работе реактора в окружающую среду удаляются (после прохождения системы очистки) газообразные (частично аэрозольные) и жидкие отходы. Основное значение имеют радионуклиды I-131, Cs-137 и 134, Sr-90, а также радиоактивные инертные газы.

В настоящее время рассчитанное значение максимальной подушной дозы за счет использования ядерной энергетики составляет менее 0,2мкЗв в год.

Таблица 1-11

Сравнительная оценка общего ущерба здоровью от ядерного и угольного топливного циклов (ЯТЦ и УТЦ), отнесенная к выработке 1 ГВт*год

| Вид ущерба* | ЯТЦ | УТЦ |
|--|-----|---|
| Число случаев преждевременной смерти | 1 | 300 (20–600) |
| Общее сокращение продолжительности жизни, чел./год | 20 | $1 \cdot 10^4$ $/ (0,06-1,8) \cdot 10^4 /$ |
| Общие потери трудоспособности, чел./год | 10 | $7 \cdot 10^3$ $/ (0,4-12) \cdot 10^3 /$ |

* без учета возможного ущерба здоровью от нераковых заболеваний, вызываемых неканцерогенными компонентами выбросов ТЭС (SO₂, NO, Hg, Pb, Cd и др.)

Оценивая опасность нормальной работы АЭС для человека, необходимо отметить, что проживание вблизи угольной ТЭС мощностью 1000 МВт, с учетом выбросов природных радионуклидов (К-40, U-238, Th-232, Pb-210, Po-210) и химических канцерогенов (бенз[а]пирены), в сотни раз более опасно, чем проживание вблизи АЭС аналогичной мощности (табл. 1-11). Ситуация может существенно измениться в результате крупных аварий.

Телевидение — источник мягкого рентгеновского излучения. Мощность эффективной дозы облучения всего тела от цветного телевизора на расстоянии 250 см от экрана равна $2,5 \cdot 10^{-3}$ мкЗв/ч. Ежедневный в течение года трехчасовой

просмотр цветных телепрограмм формирует дозу 5–7 мкЗв. За счет телевидения формируется средняя взвешенная годовая эффективная доза, равная 0,01 мЗв.

Использование *авиации* увеличивает облучение человека за счет радиационного фона, создаваемого космическими лучами, что ведет к формированию годовой эффективной дозы, равной 0,05 мЗв. Во время полета на самолете мощность дозы облучения всего тела составляет 1,35 мкЗв/ч на высоте 8 км; 5 мкЗв/ч — на высоте 12 км, 13 мкЗв/ч — на высоте 20 км. За 7 ч 25 мин трансатлантического перелета Нью-Йорк — Париж на турбореактивном самолете пассажир получает около 50 мкЗв, а пассажир сверхзвукового самолета (время полета — 2 ч 35 мин) около 40 мкЗв, хотя подвергается более интенсивному облучению.

Таблица 1-12

Лучевая нагрузка при профессиональном облучении

| Источник/Вид деятельности | Число работников под наблюдением, тыс. | Средняя годовая эффективная доза, мЗв |
|---|--|---------------------------------------|
| Антропогенные источники: | | |
| ядерный топливный цикл | 800 | 1,8 |
| промышленное использование излучения | 700 | 0,5 |
| оборонная деятельность | 420 | 0,2 |
| медицинское использование излучения | 2320 | 0,3 |
| образование/ ветеринария | 360 | 0,1 |
| Всего за счет антропогенных источников | 4600 | 0,6 |
| Увеличение воздействия естественных источников: | | |
| воздушные полеты (экипаж) | 250 | 3,0 |
| добыча полезных ископаемых (кроме угля) | 760 | 2,7 |
| добыча угля | 3910 | 0,7 |
| переработка минералов | 300 | 1,0 |
| наземные рабочие места (радон) | 1250 | 4,8 |
| Всего за счет естественных источников | 6500 | 1,8 |

Существует ряд профессий, работники которых подвергаются воздействию источников излучения, например: работа на ядерных установках или в радиологической клинике, работа в условиях повышенных уровней естественного облучения. Для обозначения облучения на работе, которое напрямую обусловлено этой работой, используют термин *профессиональное облучение*. Средние годовые дозы для различных профессий приведены в таблице 1-12.

Вклад различных источников радиационного фона в формирование годовой подушной эффективной дозы в 2000 г. иллюстрирует таблица 1-13.

**Годовая подушная эффективная доза в 2000 году от естественных
и антропогенных источников**

| Источник | Глобальная годовая подушная эффективная доза, мЗв | Диапазон или тенденция лучевых нагрузок |
|-------------------------------------|--|--|
| Естественный фон | 2,4 | Типичные диапазоны в пределах 1–10 мЗв в зависимости от условий местности при существенном числе жителей, приходящихся также на диапазон 10–20 мЗв |
| Медико-диагностические обследования | 0,4 | Границы от 0,04 до 1,0 мЗв при самом низком и самом высоком уровнях медицинского обслуживания |
| Ядерные испытания в атмосфере | 0,005 | Нагрузка уменьшилась с максимального значения 0,15 мЗв в 1963 г, она больше в северном и меньше в южном полушарии |
| Чернобыльская авария | 0,002 | Нагрузка уменьшилась с максимального значения 0,04 мЗв в 1986г (среднее в северном полушарии), она больше в местностях, близких к месту аварии |
| Производство атомной энергии | 0,0002 | Нагрузка увеличилась из-за расширения программы, но уменьшилась благодаря совершенствованию работы |

ГЛАВА 2. Физические и биологические основы действия ионизирующих излучений

Принципиальная особенность действия ионизирующих излучений, в отличие от большинства других повреждающих факторов внешней среды — дистанционность воздействия источника на организм, т. е. способность проникать в биологические ткани, клетки, субклеточные структуры и повреждать их, вызывая одномоментную ионизацию атомов и молекул за счет физических взаимодействий и радиационно-химических реакций. Под воздействием ионизирующего излучения изменяется электронная оболочка атомов. Вследствие этого меняются их химические свойства и возникают химические реакции, приводящие в некоторых случаях к тяжелым повреждениям органов и тканей. Причем биологическое действие ионизирующих излучений нельзя рассматривать как элементарный акт. В его формировании выделяют несколько следующих друг за другом стадий:

1. Физическая стадия. Длительность стадии составляет примерно $1 \cdot 10^{-16}$ с, в течение которых происходит поглощение энергии излучения

облучаемой средой с возбуждением и ионизацией ее молекул. Этот процесс практически не зависит от условий окружающей среды.

2. **Физико-химическая стадия.** Продолжительность $1 \cdot 10^{-7}$ с. Заключается в возникновении активных в химическом отношении свободных радикалов, которые взаимодействуют между собой и с органическими молекулами клетки. Этот процесс слабо зависит от условий окружающей среды.

3. **Химическая стадия.** Длится, как правило, несколько секунд. На этой стадии появляются биохимические повреждения биологически важных макромолекул (белков, нуклеиновых кислот, липидов, углеводов). Этот процесс существенно зависит от условий окружающей среды: температуры, фазового состояния и т. д. Например, свободные радикалы, образующиеся в зубной эмали под действием ионизирующего излучения на физико-химической стадии, практически не видоизменяются со временем на химической стадии, что позволяет использовать данный факт в биологической дозиметрии.

4. **Биологическая стадия.** Заключается в формировании повреждений на клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях, формировании отдаленных последствий облучения. Длительность этой стадии может сильно варьировать (часы, недели, годы), что связано с особенностями протекания патофизиологических процессов в различных органах и тканях. Например, для развития опухоли или лучевой катаракты требуется значительно больше времени, чем для развития острой лучевой болезни.

Основная часть энергии заряженных частиц и гамма-квантов, взаимодействующих с веществом, идет на его ионизацию и возбуждение. Под **ионизацией** понимают отрыв электрона от атома или молекулы, в результате чего они преобразуются в положительно заряженные ионы. Если энергии излучения недостаточно для полного отрыва электрона, то происходит **возбуждение**, т. е. переход электрона на удаленную от ядра орбиталь. Заряженные частицы (альфа- и бета-частицы) производят ионизацию непосредственно и относятся к так **называемым прямо ионизирующим излучениям**. Механизм потери энергии этих частиц в поглотителе в основном обусловлен кулоновским взаимодействием с орбитальными электронами атомов вещества. Электрически нейтральные излучения (гамма, рентгеновское, нейтронное) ионизируют атомы среды в результате вторичных процессов. По этой причине они носят название **косвенно ионизирующих излучений**. Степень ионизации зависит как от свойств самого излучения (энергия, заряд частиц), так и от структуры облучаемого объекта. Основными свойствами излучений являются линейная плотность ионизации и линейная передача энергии.

Линейная плотность ионизации (удельная ионизация) — это число пар ионов, образованных заряженной частицей на микрометр пробега в веществе.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) — средняя энергия, теряемая заряженной частицей на единице длины ее пробега в веществе. За единицу измерения принимают килоэлектрон-вольт на микрометр пути (кэВ/мкм). Для электрически нейтральных видов излучения ЛПЭ не применяется, но используется значение ЛПЭ вторичных заряженных частиц, образующихся в веществе. В зависимости от ЛПЭ все излучения делятся на **редкоионизирующие** (ЛПЭ < 10 кэВ/мкм) и **плотноионизирующие** (ЛПЭ > 10 кэВ/мкм) (пограничная величина 10 кэВ/мкм). К редкоионизирующим излучениям относят бета-, гамма- и рентгеновское излучения, к плотноионизирующим относят альфа- и нейтронное излучения. ЛПЭ заряженных частиц возрастает по мере снижения их скорости, поэтому в конце пробега отдача энергии заряженной частицей максимальна.

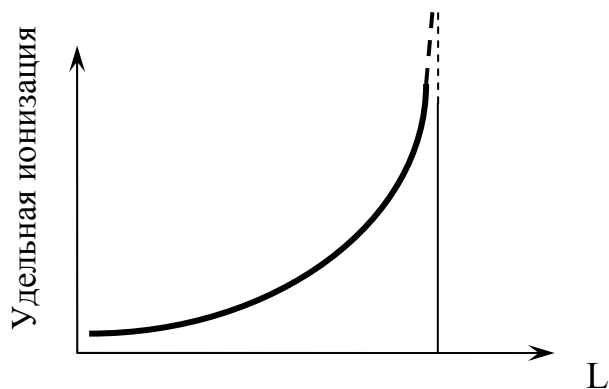


Рис. 2-1. Зависимость удельной ионизации от пробега (L) альфа-частицы в веществе

Таким образом, физические механизмы, при посредстве которых частицы вызывают ионизацию атомов, различны и зависят от вида частиц и их энергии.

Рассмотрим особенности взаимодействия с веществом различных видов излучений.

Альфа-излучение представляет собой поток альфа-частиц и обладает высокой ионизирующей способностью, образуя несколько десятков тысяч пар ионов на микрометр пробега в веществе. По мере продвижения альфа-частицы в веществе плотность ионизации возрастает в несколько раз (с 20 000 до 80 000 пар ионов на 1 мкм пути) и затем, практически при завершении пробега, резко падает (рис. 2-1).

График, отражающий зависимость ЛПЭ альфа-излучения от пройденного в веществе пути, носит название кривой Брегга.

Эту особенность взаимодействия используют при лечении опухолей, т. к. она позволяет сосредоточить значительную энергию на глубине пораженной ткани при минимальном рассеянии в здоровых тканях. Траектории альфа-частиц в веществе прямолинейны, что связано с их большой массой. Пробег в воздухе составляет несколько сантиметров, в жидкостях и биологических тканях — от 10 до 100 мкм. Несмотря на небольшую глубину проникновения альфа-частиц в живую ткань, их разрушительное действие весьма значительно из-за высокой ионизирующей способности. Элементарной защитой от внешнего α -излучения может служить любой плотный материал даже незначительной толщины, например, лист бумаги.

Бета-излучение представляет собой поток β -частиц. Бета-излучение обладает меньшей ионизирующей способностью по сравнению с α -излучением. Бета-частица образует несколько десятков пар ионов на микрометр пробега в веществе. При этом, кроме ионизации за счет торможения электронов в веществе (особенно в веществе, состоящем из атомов с большим порядковым номером), возникает тормозное рентгеновское излучение. Чем выше энергия излучения, тем более жестким будет тормозное излучение. Это свойство потока электронов используется в рентгеновских трубках. Из-за малой массы β -частицы при продвижении в веществе отклоняются на большие углы, поэтому траектория их очень извилиста. Проникающая способность β -частиц в воздухе измеряется метрами, а в биологической ткани составляет несколько сантиметров. Элементарная защита от β -излучателей — тонкий слой легкого металла (алюминиевая фольга).

Гамма-излучение представляет собой поток γ -квантов и является одним из наиболее проникающих. Его проникающая способность зависит как от энергии γ -квантов, так и от свойств вещества. В процессе прохождения через вещество γ -кванты (фотоны) взаимодействуют с электронами атомов, электрическим полем ядра, а также с нейтронами и протонами, входящими в состав ядра. В результате этих взаимодействий происходит ослабление плотности потока излучения благодаря рассеянию γ -квантов и передачи их энергии атомам среды. Гамма-кванты относятся к косвенно ионизирующему излучению. По отношению к фотонному излучению говорить о длине свободного пробега неверно, так как, какой бы толщины ни была среда, данное излучение полностью не поглощается, а лишь ослабляется в любое заданное число раз. Ослабление гамма-излучения в веществе происходит за счет различных эффектов взаимодействия: фотоэффекта, эффекта Комптона, эффекта образования пары «электрон-позитрон».

При **фотоэлектрическом поглощении** (фотоэффекте) фотоны (γ -кванты) полностью передают свою энергию электронам внутренней орбитали атома. При этом фотон поглощается, а его энергия, равная энергии его оболочки (орбитали), расходуется на отрыв электрона и сообщение ему кинетической энергии. В результате электрон вырывается из поля атома и производит в дальнейшем ионизацию вещества (рис. 2-2).

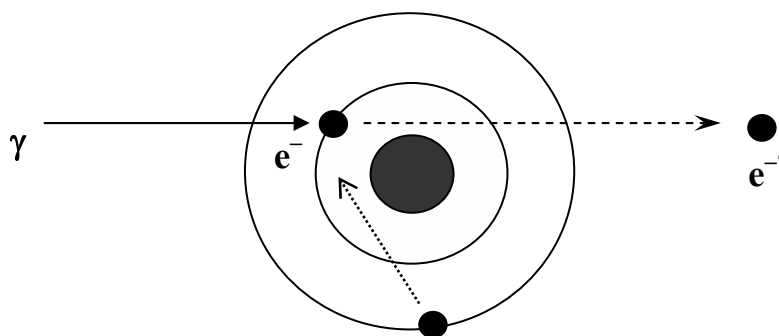


Рис. 2-2. Схема фотоэффекта

Место выбитого фотоэлектрона занимает другой электрон с более высокой орбитали, что сопровождается испусканием низкоэнергетического характеристического рентгеновского излучения или Оже-электронов. Чем больше энергия связи электрона, чем ближе он находится к ядру, тем больше вероятность передачи ему всей энергии γ -кванта. По этой же причине с ростом номера элемента или его заряда вероятность фотоэффекта возрастает. Очевидно в то же время, что с увеличением энергии излучения она быстро падает.

Возникновение фотоэффекта наиболее характерно для мягкого γ -излучения (до 0,5 МэВ). Учитывая тот факт, что для биологических тканей энергия выбивания электрона не превышает 0,5 МэВ, можно говорить о наибольшей вероятности именно этого эффекта при поглощении мягкого γ -излучения.

Суть **комптоновского рассеивания** (Комптон-эффекта) заключается в том, что фотон (γ -квант) передает электрону лишь часть своей энергии, а сам меняет направление своего движения. В отличие от фотоэффекта такое рассеивание

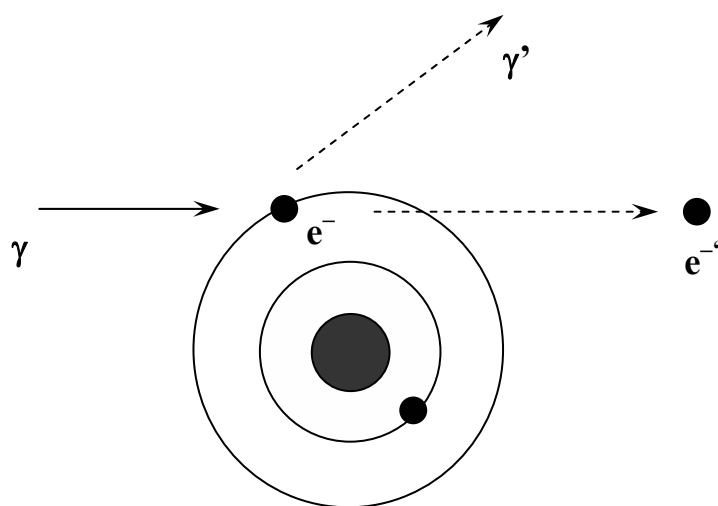


Рис. 2-3. Схема Комптон-эффекта

происходит, в основном, на электронах внешних оболочек атомов с минимальной энергией связи. С ростом энергии излучения вероятность такого взаимодействия снижается, но медленнее, чем при фотоэффекте (рис. 2-3).

Выбитый электрон производит в дальнейшем ионизацию. Затем вторичный фотон может вновь претерпевать эффект Комптона

и т. д. Этот эффект наиболее вероятен при энергии γ -квантов 0,5–1 МэВ.

Образование пары электрон-позитрон возможно только при

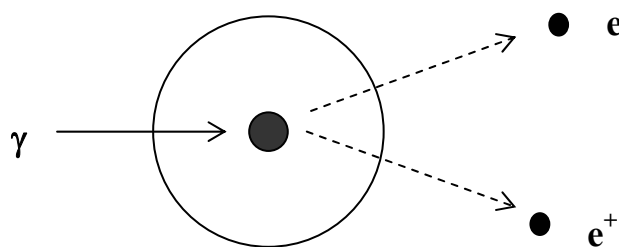


Рис. 2-4. Схема эффекта образования электрон-позитронной пары

значительной энергии γ -кванта (>1 МэВ). Такой квант взаимодействует с атомным ядром и в его поле преобразуется в пару частиц — электрон и позитрон (рис. 2-4).

Эти частицы производят в дальнейшем ионизацию. Позитрон, встречая на своем пути электрон, может соединиться с ним и

превратиться в 2 фотона (эффект аннигиляции). Образующиеся фотоны поглощаются средой в результате эффекта Комптона или фотоэффекта.

Нейтронное излучение представляет собой поток нейтронов. Нейтроны не имеют заряда, поэтому беспрепятственно проникают вглубь атомов, взаимодействуя непосредственно с ядрами. При этом возможны следующие эффекты взаимодействия:

- упругое рассеяние;
- неупругое рассеяние;
- поглощение

(радиационный захват).

При *упругом рассеянии* нейтрон передает ядру часть своей энергии и отклоняется от первоначального направления (рис. 2-5). Ядро, с которым взаимодействует нейтрон (так называемое ядро отдачи), начинает двигаться и ионизировать другие атомы и молекулы.

Такой эффект наиболее характерен для быстрых нейтронов. Самый важный пример упругого рассеяния — рассеяние на ядрах водорода (протонах). При этом нейтрон передает протону более половины своей энергии с образованием протона отдачи. Поэтому для замедления быстрых нейтронов используют вещества, содержащие водород (вода, парафин).

При *неупругом рассеянии* часть кинетической энергии нейтрона тратится на возбуждение ядра отдачи, которое затем переходит в стабильное состояние, излучая гамма-квант (рис. 2-6).

Нейтроны могут поглощаться ядрами (*радиационный захват*). При этом ядро переходит в возбужденное состояние и испускает гамма-квант (рис. 2-7) или частицы (протон, нейтрон, альфа-частицу).

Следовательно, в результате радиационного захвата многие вещества становятся радиоактивными с образованием так называемой «наведенной» активности. Этот эффект наиболее характерен для медленных нейтронов. Лучшими поглотителями медленных нейтронов являются кадмий и бор.

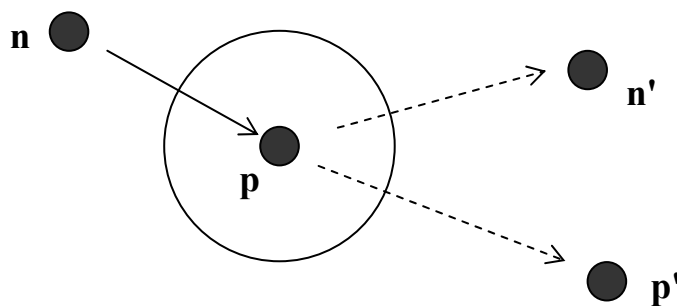


Рис. 2-5. Схема упругого рассеяния нейтрона на ядре атома водорода

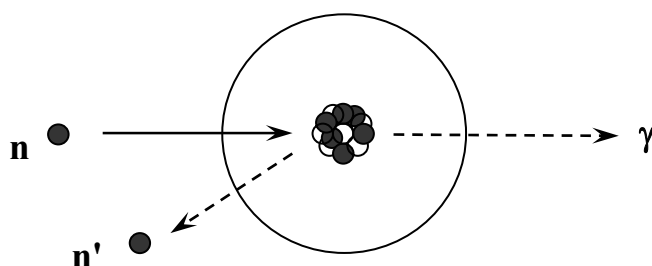


Рис. 2-6. Схема неупругого рассеяния нейтронного излучения

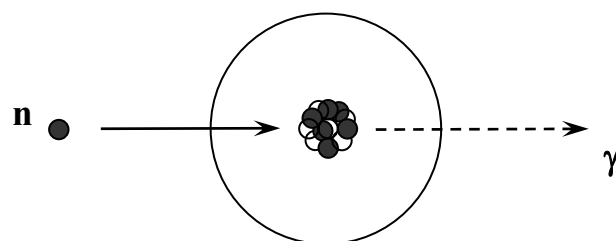


Рис. 2-7. Схема радиационного захвата нейтронного излучения

ПРЯМОЕ И КОСВЕННОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

РАДИОЛИЗ ВОДЫ. КИСЛОРОДНЫЙ ЭФФЕКТ

На этой стадии происходит образование свободных радикалов. Свободные радикалы — это электрически нейтральные атомы или молекулы с неспаренным электроном на внешней орбитали. Они являются весьма реакционноспособными, т. к. имеют тенденцию спаривать этот электрон с аналогичным электроном в другом свободном радикале, либо удалять его из атома путем электронного излучения. Следовательно, свободные радикалы могут быть как окислителями (акцепторами), так и восстановителями (донорами).

В основе первичных радиационно-химических изменений на данной стадии могут лежать 2 механизма действия ионизирующих излучений:

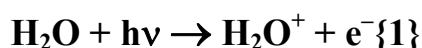
1) прямое действие — когда молекула претерпевает изменения непосредственно при взаимодействии с ионизирующим излучением;

2) косвенное действие — когда молекула непосредственно не поглощает энергию от ионизирующих излучений, а получает ее от других молекул.

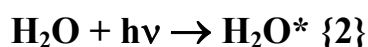
Поскольку живая материя на 70–90 % состоит из воды, то большая часть энергии излучения первично поглощается именно молекулами воды.

Таким образом, в основе косвенного действия ионизирующего излучения лежит воздействие продуктов *радиолиза воды* на биомолекулы. Механизм радиолиза воды заключается в следующем.

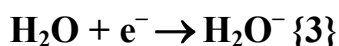
При воздействии ионизирующего излучения в воде идут процессы *ионизации* или *возбуждения*. В результате ионизации из молекулы воды выбивается электрон, и образуется положительно заряженная молекула воды:



Если энергии для ионизации недостаточно, то возможно образование возбужденной молекулы воды:



Освободившийся при ионизации молекулы воды электрон {1} постепенно теряет свою энергию и может быть захвачен другой молекулой воды, которая превращается в отрицательно заряженную молекулу воды:

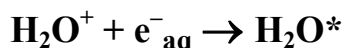


Все перечисленные первичные продукты взаимодействия молекулы воды с излучением (H_2O^+ , H_2O^- , H_2O^*) являются нестабильными и могут распадаться с образованием ионов и свободных радикалов:





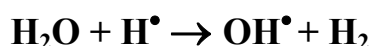
Кроме того, выбитый электрон может окружить себя четырьмя молекулами воды и превратиться в гидратированный электрон e^-_{aq} , а затем может быть захвачен молекулой H_2O^+ с образованием возбужденной молекулы воды:



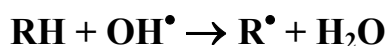
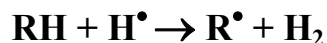
Возбужденная молекула воды распадается на атомарный водород H^\bullet и гидроксильный радикал OH^\bullet {6}. Далее радикалы могут реагировать друг с другом. Это, в первую очередь, касается радикалов H^\bullet и OH^\bullet , образующихся при распаде H_2O^* , после реакции {2}:



Образовавшиеся радикалы могут вступать в реакцию с другими молекулами воды:



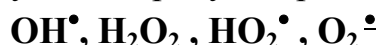
Продукты радиолиза воды способны вырывать атом водорода из органических молекул, превращая их в радикалы:



Продукты радиолиза воды могут также реагировать с молекулами растворенного кислорода, в результате чего образуются перекисные радикалы, обладающие высокой реакционной способностью:



В целом для продуктов радиолиза воды наиболее характерны реакции окисления или восстановления субстрата, образования радиотоксинов. К окислителям относят следующие продукты радиолиза воды:



К восстановителям относят: H^\bullet, e^-_{aq} .

Образование радиотоксинов происходит в результате реакции с хиноном и убихиноном.

Необходимо отметить, что в присутствии кислорода образуются дополнительные реакционноспособные радикалы, которые обладают выраженным поражающим действием. Кроме того, молекула кислорода

обладает электронакцепторными свойствами, активно взаимодействует с образующимися при действии излучения радикалами биологических молекул — как бы фиксирует возникшие в них потенциальные повреждения и делает их труднодоступными для репарации.

Следовательно, в присутствии кислорода отмечается усиление лучевого повреждения по сравнению с анаэробными условиями. Это явление известно в радиобиологии как *кислородный эффект*.

Количественной мерой кислородного эффекта служит коэффициент кислородного усиления. При облучении отдельных клеток он равен 3, т. е. в присутствии кислорода лучевое повреждение усиливается втрое.

Для проявления такого действия кислород должен присутствовать в клетке в момент облучения. Однако в дальнейшем кислород играет положительную роль: он необходим для нормальной работы системы репарации ДНК.

Таким образом, в формировании лучевого повреждения кислород ведет себя двояко: усиливая первичные процессы повреждения в момент воздействия излучения, он одновременно стимулирует процессы внутриклеточного восстановления после облучения.

Кислородный эффект зависит от ЛПЭ: с увеличением ЛПЭ он уменьшается и при действии, например, альфа-излучения исчезает.

На кислородном эффекте основаны методы управления тканевой радиочувствительностью, используемые в лучевой терапии опухолей — оксигенорадиотерапия и гипоксиррадиотерапия.

Оксигенорадиотерапия (оксигенорадиотерапия). Во время сеанса лучевой терапии больной дышит чистым кислородом при нормальном или увеличенном в 2–3 раза атмосферном давлении. Напряжение кислорода в здоровых тканях при этом увеличивается незначительно (есть предел насыщения). В опухоли давление кислорода поднимается до такого же уровня, но, по сравнению с исходным уровнем, его содержание возрастает во много раз, следовательно, повышается и радиочувствительность опухолевой ткани.

Гипоксиррадиотерапия. Во время сеанса лучевой терапии больной дышит гипоксической газовой смесью (содержание кислорода 7–10 % вместо 21 %). Напряжение кислорода в здоровой ткани уменьшается, а в опухоли останется прежним, что позволяет повысить дозу облучения на опухоль.

ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БЕЛКИ

До 20 % поглощенной энергии связано с повреждением белков. Под действием ионизирующего излучения из молекулы белка выбивается электрон. Образуется дефектный участок, лишенный электрона, который мигрирует по полипептидной цепи за счет переброски соседних электронов до тех пор, пока не достигнет участка с повышенными электрон-донорными свойствами. В этом

месте в боковых цепях аминокислот возникают свободные радикалы. Такие события происходят в результате прямого действия ионизирующих излучений. При косвенном действии образование свободных радикалов происходит при взаимодействии белковых молекул с продуктами радиолиза воды. Образование свободных радикалов влечет за собой изменения структуры белка:

- разрыв водородных, гидрофобных, дисульфидных связей;
- модификация аминокислот в цепи;
- образование сшивок и агрегатов;
- нарушение вторичной и третичной структуры белка.

Такие нарушения в структуре белка приводят к нарушению его функций (ферментативной, гормональной, рецепторной и др.).

ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА НУКЛЕИНОВЫЕ КИСЛОТЫ

Около 7 % поглощенной дозы приходится на ядерную ДНК. Механизм повреждения сходен с повреждением белка: выбивание электрона, миграция дефектного участка по полинуклеотидной цепи (несколько сотен азотистых оснований) до участка с повышенными электрон-донорными свойствами. Такое место — чаще всего участок локализации тимина или цитозина, где и образуются свободные радикалы этих оснований. При косвенном действии ионизирующих излучений на нуклеиновые кислоты к образованию свободных радикалов приводит взаимодействие с продуктами радиолиза воды. Образование свободных радикалов приводит к нарушению структуры ДНК, в основе которого лежат следующие механизмы:

- одно- и двунитевые разрывы;
- модификация азотистых оснований;
- образование тиминовых димеров (рис. 2-8);
- сшивки ДНК–ДНК, ДНК-белок.

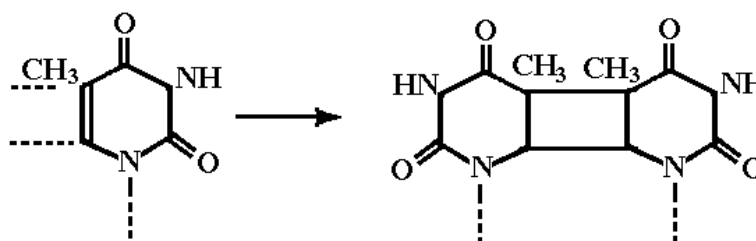


Рис. 2-8. Схема образования тиминового димера

При дозе 1 Гр в каждой клетке человека повреждаются около 5000 азотистых оснований, возникают примерно 1000 одиночных и от 10 до 100 двойных разрывов.

Определенное число одиночных разрывов образуется даже при малых дозах излучения, но они не приводят к поломкам молекулы ДНК, т. к. куски

поврежденной молекулы прочно удерживаются на месте водородными связями с комплементарной нитью ДНК и хорошо поддаются восстановлению.

Репарация повреждений в ДНК является сложным процессом. Все механизмы репарации в клетке многократно продублированы и могут идти разными путями, находящимися под генетическим контролем. Некоторые виды репарации практически безошибочны. К ним относят фотореактивацию и эксцизионную репарацию коротких участков. В отличие от них, так называемая SOS-репарация часто бывает ошибочной, т. к. является попыткой восстановить структуру ДНК любой ценой при серьезных массивных повреждениях.

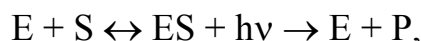
Репарация генетических повреждений обеспечивается десятками ферментов, многие из которых участвуют также в процессах репликации и рекомбинации. Известно 7 основных групп ферментов, участвующих в репарации:

- 1) нуклеозидазы (производят выщепление оснований по N-гликозидной связи с образованием так называемых АП-сайтов — апуриновых или апиримидиновых участков);
- 2) инсертазы (производят встраивание оснований в АП-сайты);
- 3) лиазы (производят расщепление пиримидиновых димеров);
- 4) эндонуклеазы (проводят инцизию — разрез ДНК возле повреждения);
- 5) экзонуклеазы (проводят эксцизию — удаление поврежденного участка);
- 6) ДНК-полимеразы (проводят синтез ДНК по комплементарной матрице);
- 7) ДНК-лигазы (производят сшивку нуклеотидов).

Рассмотрим основные типы репарации ДНК.

1. Прямая репарация. К ней относят несколько видов репарации:

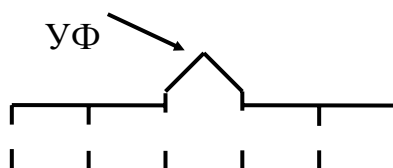
- **Фотореверсия.** Происходит за счет работы фотолиаз, причем начальный этап — образование фермент-субстратного комплекса — может идти и в темноте:

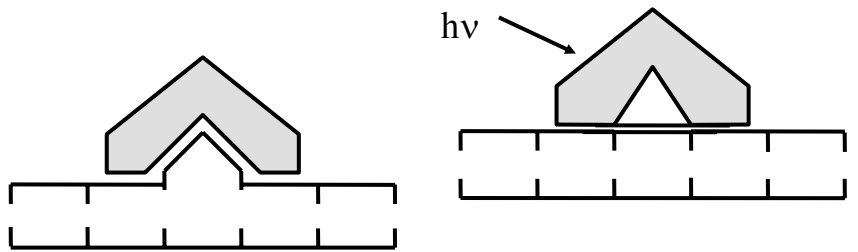


где E — фермент (энзим), S — субстрат, P — продукт реакции.

Для работы фотолиазы требуется свет с длиной волны ≈ 350 нм. Этапы фотореверсии представлены ниже:

А. Повреждение ДНК с образованием димера под действием УФ-излучения:





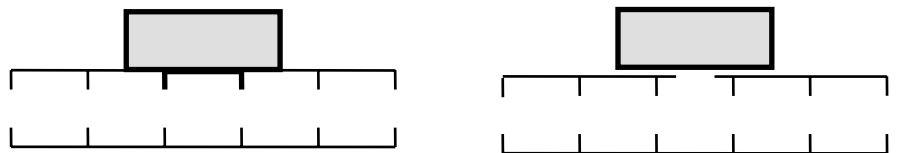
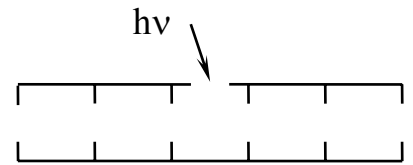
Б. Образование фермент-субстратного комплекса с эндонуклеазой:

В. Восстановление структуры ДНК:

- **Восстановление одиночных разрывов** (с участием ДНК-лигаз).

Данный вид репарации весьма характерен при действии ионизирующих излучений, вызывающих образование большого числа однонитевых разрывов ДНК. Его этапы представлены ниже.

А. Повреждение ДНК с образованием одиночного разрыва:



Б. Образование фермент-субстратного комплекса с ДНК-лигазой:

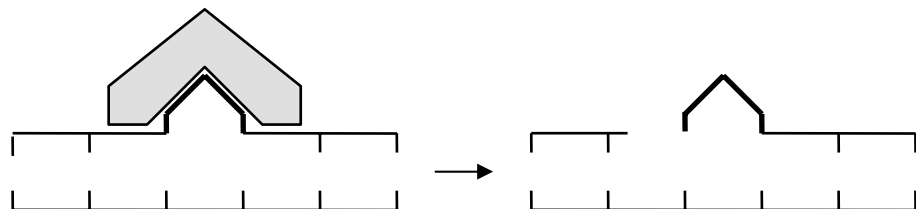
В. Восстановление структуры ДНК:

Другие виды прямой репарации:

- восстановление структуры азотистых оснований (удаление лишних метильных групп, восстановление разрывов циклических структур);
- замена азотистых оснований (с участием ДНК-гликозидаз).

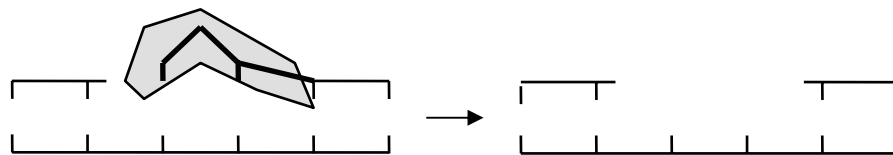
2. Репарация с использованием комплементарной цепи (эксцизионная репарация).

Существует несколько разновидностей эксцизионной репарации,



наиболее изученная из которых — «темновая репарация». Основные этапы этого процесса одинаковы у различных видов организмов:

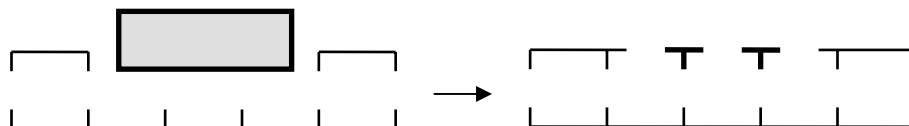
1 этап — incisio



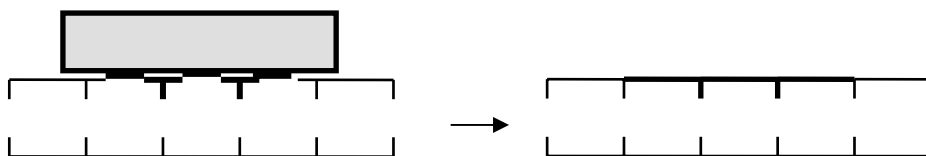
(разрезание) — эндонуклеаза «узнает» поврежденный участок и производит разрез:

2 этап — excisio (вычленение) — экзонуклеаза удаляет поврежденный участок:

3 этап — sintesis — репаративный синтез с помощью ДНК-полимеразы:



4 этап — сшивка восстановленных участков ДНК-лигазой:



3. Репарация с использованием межмолекулярной информации. К этому типу репарации относят восстановление двойных разрывов и репарацию поперечных сшивок.

- Восстановление двойных разрывов возможно только тогда, когда имеется копия генетической информации (например, при диплоидном наборе хромосом). В этом случае основа репарации — достаточно сложный процесс рекомбинации с реципрокным обменом нитей ДНК и последующим восстановлением повреждений. При этом образуются так называемые «структуры Холидея», которые в дальнейшем подвергаются разделению с образованием 2-х нормальных нитей ДНК.

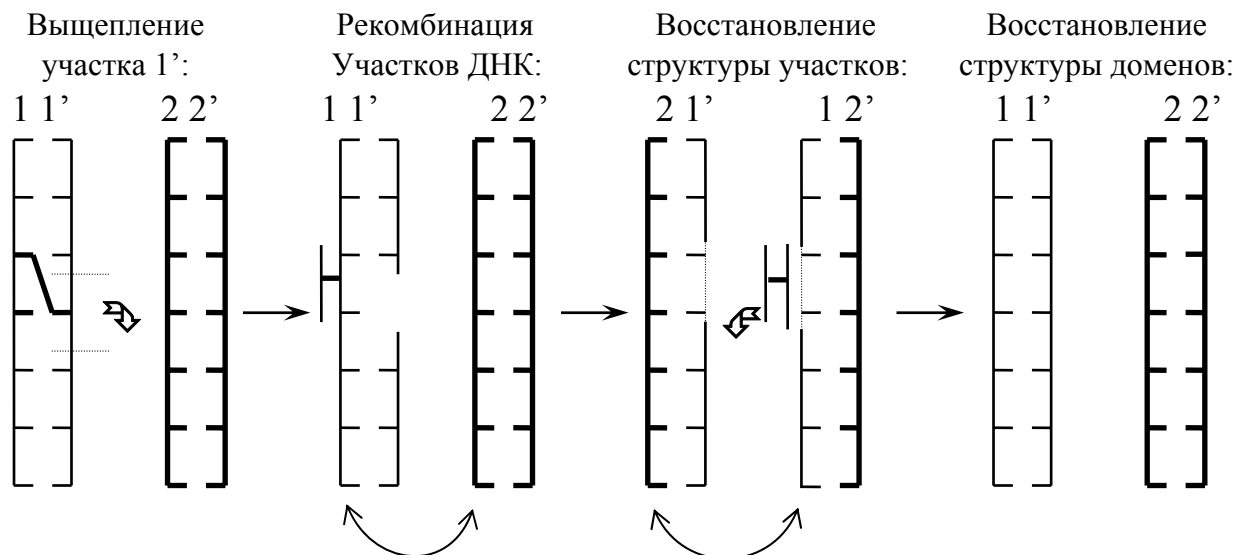
- Репарация поперечных сшивок внутри ДНК происходит по схеме «выщепление–рекомбинация–синтез». Ее этапы представлены ниже:

А.

Б.

В.

Г.



3. Индуцибельная репарация. К этому виду репарации относят SOS-репарацию и постадаптационную репарацию.

- SOS-репарация запускается в клетке при наличии сигнала бедствия — появления свободных фрагментов полинуклеотидной цепи, что указывает на серьезные повреждения ДНК. При этом клетка пытается восстановить структуру ДНК, невзирая на степень ее повреждения. Достигается это, в частности, снижением 3'-5' — корректорской функции ДНК-полимеразы, что помогает быстро, но не всегда безошибочно, восстанавливать структуру.

- Постадаптационная репарация впервые была описана при исследовании культуры лимфоцитов, которые, как известно, обладают повышенной чувствительностью к воздействию ионизирующих излучений. Оказалось, что после предварительного облучения культуры лимфоцитов при суммарной дозе около 30 сГр с низкой интенсивностью в течение 4 часов развивалась повышенная устойчивость к повреждению ДНК, длившаяся около 66 часов (3 клеточных цикла). Механизм этого явления еще до конца не изучен.

Таким образом, механизмы репарации генетических повреждений представляют собой сложную продублированную систему защиты генетической информации клетки и, следовательно, являются основой обеспечения надежности биологических систем. Именно поэтому большинство одиночных разрывов репарируются даже в летально облученных клетках и не являются причиной, определяющей гибель клетки. Однако нерепарированные одиночные разрывы могут в последующем привести к образованию двойных разрывов, плохо поддающихся восстановлению. Двойные разрывы могут возникнуть в результате единичного акта ионизации либо при совпадении одиночных разрывов на комплементарных нитях. Двойные разрывы опасны для клетки, т. к. они не всегда поддаются репарации и служат непосредственной

причиной возникновения хромосомных aberrаций. Основные виды хромосомных aberrаций:

- Фрагментация хромосом.
- Образование хромосомных мостов, дицентриков, кольцевых хромосом (рис. 2-9).



Рис. 2-9. Изменение структуры хромосом под действием ионизирующего излучения. Стрелками показаны хромосомные aberrации

- Появление внутри- и межхромосомных обменов.

Часть aberrаций (например, мосты) механически препятствуют делению клетки. Появление обменов, ацентрических фрагментов приводит к неравномерному разделению хромосом и утрате генетического материала, а это вызывает гибель клеток из-за недостатка метаболитов, синтез которых кодировался утраченной частью ДНК.

ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЛИПИДЫ

Под влиянием облучения происходит образование свободных радикалов ненасыщенных жирных кислот, которые при взаимодействии с кислородом образуют перекисные радикалы, а они, в свою очередь, реагируют с нативными жирными кислотами. Это процесс перекисного окисления липидов.

Так как липиды — основа биомембран, то перекисное окисление повлечет за собой изменение их свойств. А поскольку клетка представляет собой систему взаимосвязанных мембран и многие процессы клеточного метаболизма проходят именно на мембранах, то в клетке нарушаются биохимические процессы. Выражено нарушение энергетического обмена, что связано с повреждением митохондрий.

Нарушение целостности наружной мембраны клетки приводит к сдвигу ионного баланса клетки из-за выравнивания концентраций натрия и калия.

ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА УГЛЕВОДЫ

Углеводы в целом достаточно устойчивы к действию ионизирующего излучения. Так, окислительный распад, укорочение цепи и отщепление альдегидов от простых сахаров наблюдаются при дозах порядка 1000 Гр. Из

продукта распада углеводов — глицеринового альдегида — синтезируется метилглиоксаль — вещество, ингибирующее синтез ДНК и белка и подавляющее деление клеток. Чувствительна к облучению и гиалуроновая кислота, являющаяся составным элементом соединительной ткани. Уже при дозе облучения около 10 Гр наблюдается значительное снижение ее вязкости, а при больших дозах — изменение структуры, связанное с отщеплением гексозамина и гексуроновых кислот.

РЕАКЦИЯ КЛЕТОК НА ОБЛУЧЕНИЕ (биологическая стадия)

Возможны три типа реакции клетки на облучение:

1. Радиационный блок митозов.
2. Митотическая (репродуктивная) гибель клетки.
3. Интерфазная гибель клетки.

Наиболее универсальная реакция клетки на воздействие ионизирующих излучений — временная задержка деления или *радиационный блок митозов*. Длительность его зависит от дозы: на каждый Грей дозы клетка отвечает задержкой митоза в 1 час. Проявляется этот эффект независимо от того, выживет ли клетка в дальнейшем. Причем с увеличением дозы облучения увеличивается не число реагирующих клеток, а именно время задержки деления каждой облученной клетки. Эта реакция имеет огромное приспособительное значение: увеличивается длительность интерфазы, оттягивается вступление клетки в митоз, создаются благоприятные условия для нормальной работы системы репарации ДНК.

При больших дозах, которые необходимы только для развития радиационного блока митозов, развивается *митотическая гибель клетки*. Это *полная потеря клеткой способности к размножению*. Данный тип реакции не относится к клеткам, не делящимся или делящимся редко. В клетке не выражены дегенеративные процессы. Показателем выживаемости клетки является ее способность проходить 5 и более делений.

Варианты митотической гибели:

- 1) клетка гибнет в процессе одного из первых четырех пострadiационных митозов, невзирая на отсутствие видимых изменений;
- 2) облученные клетки после первого пострadiационного митоза формируют так называемые «гигантские» клетки (чаще в результате слияния «дочерних» клеток). Такие клетки способны делиться не более 2–3 раз, после чего погибают.

Основная причина митотической гибели клетки — повреждение хромосомного аппарата клетки, приводящее к дефициту синтеза ДНК.

Интерфазная гибель клетки наступает до вступления клетки в митоз. Для большинства соматических клеток человека она регистрируется после облучения в дозах в десятки и сотни Гр. Лимфоциты (радиочувствительные клетки) гибнут по этому механизму даже при небольших дозах. В клетке наблюдаются различные дегенеративные процессы вплоть до ее лизиса.

Механизм интерфазной гибели следующий. За счет разрывов в молекуле ДНК нарушается структура хроматина. В мембранах идет процесс перекисного окисления липидов. Изменения ДНК-мембранного комплекса вызывают остановку синтеза ДНК. Повреждение мембраны лизосом приводит к выходу из них ферментов — протеаз и ДНК-аз. Эти ферменты разрушают ДНК, что ведет к пикнозу ядра. Повреждение мембран митохондрий ведет к выходу из них кальция, который активирует протеазы. Перечисленные процессы приводят к гибели (аутолизу) клетки.

ГЛАВА 3.

Радиочувствительность.

Радиационное поражение человека

Проблема радиочувствительности занимает центральное место в радиобиологии и радиационной медицине. Познание природы радиочувствительности и механизмов ее регуляции имеет как теоретическое, так и практическое значение, т. к. позволяет разрабатывать методы управления лучевыми реакциями тканей.

Радиочувствительность — это чувствительность биологических объектов к действию ионизирующих излучений. Синонимом данного понятия служит **радиопоражаемость**. Альтернативные понятия — **радиоустойчивость** или **радиорезистентность**.

При сравнении радиочувствительности различных биосистем необходимо использовать адекватные критерии, в качестве которых могут выступать либо непосредственное изменение выживаемости изучаемых объектов в результате облучения в определенных дозах, либо количественные показатели поражения, которые в данном диапазоне доз связаны с выживаемостью. Наиболее часто в качестве меры радиочувствительности используется LD_{50} — доза облучения, вызывающая гибель 50 % облученных организмов за различное время после облучения (в зависимости от вида живых организмов).

Различные виды живых организмов существенно различаются по своей радиочувствительности, о чем можно судить, сравнив величины LD_{50} (табл. 3–1). Степень радиочувствительности существенно варьирует в пределах одного вида (индивидуальная радиочувствительность), в пределах одного организма клетки и ткани также значительно различаются по своей радиочувствительности.

Следовательно, чтобы правильно оценить последствия облучения организма человека, необходимо оценить радиочувствительность на различных уровнях — клеточном, тканевом, органном, организменном.

На **клеточном** уровне радиочувствительность зависит от ряда факторов:

- организация генома (в т.ч. кариопикнотический индекс);
- состояние системы репарации ДНК;
- содержание в клетке антиоксидантов;
- активность ферментов, утилизирующих продукты радиолиты воды (например, каталаза, разрушающая перекись водорода, или супероксиддисмутаза, инактивирующая супероксидный радикал);
- интенсивность окислительно-восстановительных процессов.

Таблица 3-1

Диапазоны радиочувствительности различных организмов

| Разновидность живых организмов | ЛД ₅₀ , Гр |
|--------------------------------|-----------------------|
| Овца | 1,5–2,5 |
| Рыбы | 8,0–20,0 |
| Собака | 2,5–3,0 |
| Змея | 80–200 |
| Насекомые | 10–100 |
| Растения | 10–1500 |
| Птицы | 8–20 |
| Бактерии | 1000–3000 |
| Обезьяна | 2,5–6,0 |
| Человек | 2,5–4,0 |

На **тканевом** уровне выполняется **правило Бергонье-Трибондо**: радиочувствительность ткани прямо пропорциональна пролиферативной активности и обратно пропорциональна степени дифференцировки составляющих ее клеток.

Следовательно, наиболее радиочувствительными в организме будут ткани, имеющие резерв активно размножающихся малодифференцированных клеток, например, кроветворная ткань, гонады, эпителий тонкого кишечника. Наименее радиочувствительными (наиболее радиорезистентными) будут высокоспециализированные мало обновляющиеся ткани, например, мышечная, костная, нервная. Исключением из правила Бергонье-Трибондо являются лимфоциты. Эти высоко специализированные клетки отличаются высокой радиочувствительностью.

На **органном** уровне радиочувствительность зависит не только от радиочувствительности тканей, составляющих данный орган, но и от его

функций. Следует рассмотреть действие излучения на отдельные органы и системы при внешнем облучении.

- **Семенники.** Клетки семенников находятся на разных стадиях развития. Наиболее радиочувствительные клетки — сперматогонии, наиболее радиорезистентные — сперматозоиды. После однократного облучения в дозе 0,15 Гр количество спермы может уменьшиться. После облучения в дозе 3,5–6 Гр наступает постоянная стерильность. При этом не следует смешивать радиационную стерильность с половой потенцией, на которую (как установлено в экспериментах на животных) облучение не оказывает видимого влияния.

- **Яичники.** В яичниках взрослой женщины содержится популяция первичных и вторичных овоцитов, находящихся на разных стадиях развития (их образование заканчивается в ранние сроки после рождения). Эта особенность женских половых клеток определяет их высокую радиочувствительность и неспособность к регенерации. Воздействие однократного облучения в дозе 1–2 Гр на оба яичника вызывает временное бесплодие и прекращение менструаций на 1–3 года. При остром облучении в диапазоне доз 2,5–6 Гр развивается стойкое бесплодие.

- **Желудочно-кишечный тракт.** Наибольшей радиочувствительностью обладает тонкий кишечник. Далее по снижению радиочувствительности следуют полость рта, язык, слюнные железы, пищевод, желудок, прямая и ободочная кишки, поджелудочная железа, печень.

- **Сердечно-сосудистая система.** В сосудах большей радиочувствительностью обладает наружный слой сосудистой стенки, что объясняется высоким содержанием коллагена. Сердце считается радиорезистентным органом, однако при локальном облучении в дозах 5–10 Гр можно обнаружить изменения миокарда. При дозе 20 Гр отмечается поражение эндокарда.

- **Органы дыхания.** Легкие взрослого человека — стабильный орган с низкой пролиферативной активностью, поэтому последствия облучения легких проявляются не сразу. При локальном облучении может развиваться радиационный пневмонит, сопровождающийся гибелью эпителиальных клеток, воспалением дыхательных путей и легочных альвеол и приводящий к фиброзу, что часто лимитирует проведение лучевой терапии. При однократном воздействии гамма-излучения LD₅₀ для человека составляет 8–10 Гр, а при фракционировании в течение 6–8 недель — 30–30 Гр.

- **Мочевыделительная система.** В обычных условиях почки характеризуются незначительной пролиферацией клеток и, следовательно, достаточно радиорезистентны. Влияние облучения на почки, за исключением

высоких доз, проявляется поздно. Облучение в дозах более 30 Гр за 5 недель может привести к развитию хронического нефрита (это может быть лимитирующим фактором при проведении лучевой терапии опухолей органов брюшной полости).

- **Орган зрения.** Возможны два типа поражений глаз: воспалительные процессы в конъюнктиве и склере (при дозах облучения 3–8 Гр) и катаракта (при дозах облучения 3–10 Гр). Наиболее опасным в плане развития катаракты является нейтронное облучение.

- **Нервная система.** Нервная ткань высоко специализирована и, следовательно, радиорезистентна. Гибель нервных клеток наблюдается при дозах облучения свыше 100 Гр.

- **Эндокринная система.** Эндокринные железы характеризуются низкой скоростью обновления клеток и у взрослых в норме являются относительно радиорезистентными, однако в растущем или пролиферативном состоянии они значительно более радиочувствительны.

- **Костно-мышечная система.** У взрослых костная, хрящевая и мышечная ткани радиорезистентны. Однако в пролиферативном состоянии (в детском возрасте или при заживлении переломов) радиочувствительность этих тканей повышается. Наибольшая радиочувствительность скелетной ткани характерна для эмбрионального периода, так как особенно интенсивная пролиферация остеобластов и хондробластов у человека происходит на 38–85 сутки эмбрионального развития.

На **популяционном** уровне радиочувствительность зависит от следующих факторов:

- особенности генотипа (в человеческой популяции 10–12 % людей отличаются повышенной радиочувствительностью, что связано с наследственно сниженной способностью к ликвидации разрывов ДНК либо со сниженной точностью процесса репарации; повышенная радиочувствительность сопровождает такие наследственные заболевания как атаксия–телеангиэктазия, пигментная ксеродерма);
- физиологическое (например, сон, бодрость, усталость, беременность) или патофизиологическое состояние организма (например, хронические заболевания, ожоги, механические травмы);
- пол (мужчины обладают большей радиочувствительностью);
- возраст (наименее чувствительны люди зрелого возраста).

Следует обратить внимание на особенности радиочувствительности во **внутриутробном периоде развития**. Опасность внутриутробного облучения обусловлена высокой радиочувствительностью малодифференцированных тканей плода, что проявляется врожденными пороками развития, цитогенетическими и сомато–стохастическими эффектами, нарушением физического и умственного развития, снижением адаптационных возможностей организма. Эти эффекты могут выявиться либо сразу после рождения

(неонатальная и постнатальная смерть, пороки развития, нарушение роста), либо в отдаленные сроки после облучения (онкологические заболевания, нарушения гомеостаза, умственная отсталость).

Из наиболее вероятных эффектов внутриутробного облучения следует отметить пренатальную гибель, задержку психического и физического развития, микроцефалию, микроофтальмию, тератогенный и мутагенный эффекты.

Характер развивающихся отдаленных эффектов будет зависеть от физических характеристик ионизирующего излучения (мощность, вид энергии, характер облучения, пролонгированность во времени) и от возраста плода на момент облучения. Особенно важна стадия внутриутробного развития, на которую пришлось облучение, т. к. дифференцировка систем и органов происходит в определенные сроки развития, что и определяет тип повреждения.

При облучении беременных женщин выделяют четыре классических эффекта у потомства:

1. Эмбриональная, неонатальная и постнатальная гибель плода.
2. Врожденные пороки развития.
3. Нарушения роста и физического развития.
4. Нарушение функции центральной нервной системы.

ЭМБРИОНАЛЬНАЯ, НЕОНАТАЛЬНАЯ И ПОСТНАТАЛЬНАЯ ГИБЕЛЬ ПЛОДА

Наиболее высокий риск внутриутробной смерти наблюдается при облучении в преимплантационный период. Полученные на эмбрионах животных данные указывают, что радиационно-индуцированные случаи пренатальной гибели плода наблюдаются в дозах менее 10 рад (0,1 Зв) при облучении до имплантации.

Во избежание пренатального облучения на ранних, нераспознанных стадиях беременности плановые рентгенодиагностические процедуры у женщин детородного возраста рекомендуется проводить только в первые 10 суток после начала менструации («правило 10 дней»).

Врожденные пороки развития (ВПР)

Чаще всего встречаются следующие ВПР:

- нарушение строения головы — черепно-мозговая грыжа, нарушения строения и формы черепа, расщепление верхнего неба и губы, нарушения строения ушной раковины;
- ЦНС — анэнцефалия, микроцефалия, гидроцефалия;
- орган зрения — микроофтальмия, анофтальмия;
- скелет — полидактилия, уменьшение роста плода.

Кроме того, у пренатально облученных животных отмечены ВПР сердца и крупных сосудов, мочевыделительной системы, грудная, паховая и пупочная грыжа.

ВПР наблюдаются в основном при облучении в период основного органогенеза (9–60 день после оплодотворения). В настоящее время считается, что облучение в период основного органогенеза даже при невысоких поглощенных дозах на плод (порядка 10 рад) является фактором риска для развития микроцефалии и других ВПР со стороны ЦНС.

Нарушения роста и физического развития

Наряду со снижением веса и размеров тела обнаружено уменьшение массы внутренних органов (особенно селезенки и головного мозга), уменьшение окружности головы.

Нарушение функции центральной нервной системы

Радиационные эффекты могут возникать при гибели глиальных или нейронных клеток–предшественников во время митоза либо в результате гибели постмитотических, но все еще незрелых нейронов или гибели «клеток–поводырей» — мигрирующих нейронов. Кроме того, при высоких дозах (1,8–5,5 Гр) может наступать поражение красного костного мозга и снижение эритропоэза с уменьшением транспорта кислорода к головному мозгу плода.

Считается, что серьезная задержка умственного развития может быть вызвана внутриутробным облучением на 8–26 неделях развития при дозах свыше 1,5 Гр. Наиболее высокий риск развития умственной отсталости наблюдается у детей, облученных на 8–15 неделях эмбриогенеза (может наблюдаться уже при дозах 0,12–0,23 Гр). Определение интеллектуального показателя IQ (intelligence quotient) у лиц, облученных внутриутробно в указанные сроки в результате атомной бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, показало снижение IQ на 21–29 пунктов на 1 Гр поглощенной дозы излучения. Высокая вероятность нарушения умственного развития отмечена у детей, облученных на 16–24 неделях гестации. Пороговая доза для развития синдрома Дауна среди лиц, облученных *in utero* в результате атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки, была установлена в диапазоне 0,29–0,56 Гр.

Кроме перечисленных выше эффектов, при внутриутробном облучении возможно развитие и другой патологии.

- онкологические заболевания: риск развития рака достоверно увеличивается в группе внутриутробно облученных лиц при дозах облучения на матку матери 0,3 Гр и выше; заболеваемость в этой группе по сравнению с контролем выше в 3,9 раза; относительный риск развития рака на 1 Гр поглощенной дозы составляет 3,77;
- нарушение течения беременности;
- отклонение функции иммунной (нарушения лимфопоэза) и эндокринной систем (снижение йодпоглотительной и гормонсинтезирующей функции щитовидной железы).

РЕАКЦИЯ ОРГАНИЗМА НА ОБЛУЧЕНИЕ. РАДИАЦИОННЫЕ СИНДРОМЫ

Особенности поражения организма в целом определяются двумя факторами:

1) радиочувствительностью тканей, органов и систем, непосредственно подвергающихся облучению;

2) поглощенной дозой излучения и ее распределением во времени.

При облучении страдают все органы и ткани, но ведущим для организма является поражение одного или нескольких критических органов.

Критические органы — это жизненно важные органы и системы, которые повреждаются первыми в данном диапазоне доз, что обуславливает гибель организма в определенные сроки после облучения.

В зависимости от критического органа выделяют 3 основных радиационных синдрома:

1. **Костно-мозговой** — развивается при облучении в диапазоне доз 1–10 Гр, средняя продолжительность жизни — не более 40 суток, на первый план выступают нарушения гемопоэза.

2. **Желудочно-кишечный** — развивается при облучении в диапазоне доз 10–80 Гр, средняя продолжительность жизни около 8 суток, ведущим является поражение тонкого кишечника.

3. **Церебральный** — развивается при облучении в дозах более 80–100 Гр, продолжительность жизни менее 2 суток, развиваются необратимые изменения в ЦНС.

Костно-мозговой синдром

В костном мозге находится два типа клеток: молодые делящиеся клетки и зрелые функциональные клетки периферической крови. В соответствии с правилом Бергонье-Трибондо, первые отличаются высокой радиочувствительностью, а зрелые клетки (за исключением лимфоцитов) будут несомненно более радиорезистентны.

Уменьшение численности клеток костного мозга начинается тотчас после облучения и постепенно достигает минимума. Основная причина катастрофического опустошения костного мозга на самых ранних стадиях облучения состоит в резком торможении клеточного деления при продолжающемся поступлении зрелых элементов на периферию.

Несомненно, изменения в костном мозге коснутся морфологического состава периферической крови (рис. 3-1). На характер изменения морфологического состава крови влияет время жизни зрелых клеток (или скорость их выбывания из кровеносного русла). Наиболее долгоживущими форменными элементами являются эритроциты (среднее время жизни 120 дней). Их численность падает довольно медленно, т. к. даже при полном отсутствии продукции их количество уменьшается со скоростью 1 % в сутки.

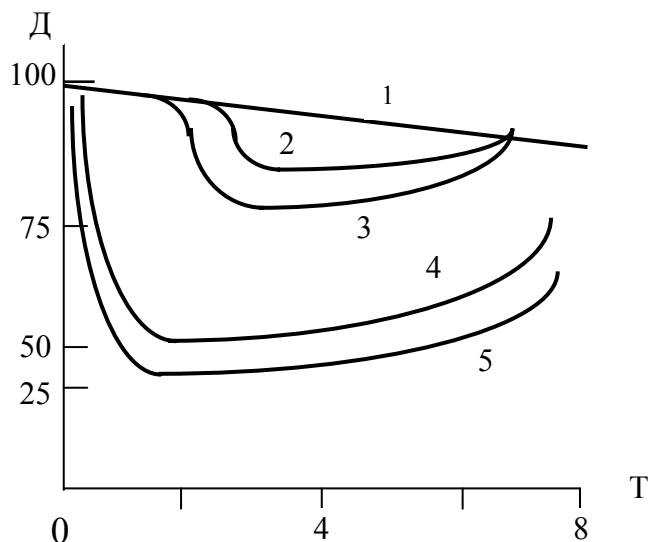


Рис. 3-1. Динамика изменения морфологического состава периферической крови в различные сроки после облучения: Д — доля выживших клеток, в %; Т — время после облучения, сут; 1 — эритроциты; 2 — тромбоциты; 3 — нейтрофилы; 4 — лейкоциты (общее число); 5 —

Число гранулоцитов падает значительно быстрее, т. к. они имеют короткую продолжительность жизни. В динамике их изменения можно выделить несколько фаз:

- фаза дегенерации — характеризуется небольшим порогом и быстрым спадом, в крови обнаруживаются только поврежденные клетки;
- фаза abortивного подъема — обусловлена размножением в костном мозге поврежденных облучением клеток со сниженной пролиферативной способностью; когда эти клетки исчерпают свой пролиферативный потенциал (сами и все их потомки погибнут), число гранулоцитов вновь снизится до минимального (или нулевого) уровня;
- фаза восстановления — обеспечивается небольшим количеством стволовых клеток, сохранившихся в костном мозге и полностью сохранивших пролиферативную способность.

Тромбоциты по своей кинетике занимают промежуточное положение между гранулоцитами и эритроцитами.

Лимфоциты — наиболее радиочувствительные клетки крови — гибнут даже при небольших дозах не только в местах их образования (лимфоузлы, костный мозг), но и в периферической крови.

Желудочно-кишечный синдром

Наиболее важные изменения возникают в тонком кишечнике и заключаются в клеточном опустошении ворсинок и крипт, основную роль в котором играет интерфазная гибель клеток сразу после облучения. Результатом

данного процесса является развитие язвенно-некротической энтеропатии и последующая аутоинтоксикация в результате прорыва «кишечного барьера».

Для летального исхода важны также такие факторы как инфекционные осложнения, поражение кровеносных сосудов, нарушение баланса жидкостей и электролитов.

ЦЕРЕБРАЛЬНЫЙ СИНДРОМ

ЦНС состоит из высокодифференцированных непролиферирующих клеток, отличающихся высокой радиорезистентностью, поэтому при облучении выраженных клеточных потерь не будет. Гибель нервных клеток происходит при огромных дозах порядка сотен Гр. В летальном исходе важную роль играет поражение кровеносных сосудов с быстрым развитием отека мозга.

ОСТРАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ (ОЛБ)

Под лучевой болезнью человека понимают комплекс проявлений поражающего действия ионизирующих излучений на организм. Многообразие проявлений зависит от ряда факторов: вид облучения — местное или общее, внешнее или внутреннее (от инкорпорированных радионуклидов); время облучения — однократное, пролонгированное, хроническое; пространственный фактор — равномерное или неравномерное; объем и локализация облученного участка.

Острая лучевая болезнь при однократном внешнем равномерном облучении — наиболее типичный пример радиационного поражения человека. Пороговая доза для проявления ОЛБ — 1 Гр. При внешнем однократном облучении в дозе 0,25 Гр не отмечаются заметные отклонения в состоянии здоровья облученных. Облучение в дозе от 0,25 до 0,5 Гр может вызывать незначительные временные отклонения в составе периферической крови, от 0,5 до 1 Гр — симптомы вегетативной дисрегуляции и нерезко выраженное снижение количества тромбоцитов и лейкоцитов (А.К. Гуськова и др., 1985).

Выделяют четыре основные клинические формы ОЛБ:

1. Костно-мозговая (доза 1–10 Гр).
2. Кишечная (доза 10–20 Гр).
3. Токсемическая (доза 20–80 Гр).
4. Церебральная (доза более 80 Гр).

Для различных клинических форм характерны определенные ведущие патогенетические механизмы формирования патологического процесса и соответствующие им клинические синдромы.

В зависимости от поглощенной дозы костно-мозговая форма ОЛБ подразделяется по степеням тяжести:

- I (легкая) — 1–2 Гр;*
II (средней тяжести) — 2–4 Гр;

III (тяжелая) — 4–6 Гр;

IV (крайне тяжелая) — 6–10 Гр.

В течении ОЛБ выделяют 3 периода: 1) период формирования; 2) период восстановления; 3) период исходов и последствий.

Период формирования можно четко разделить на 4 фазы:

1 — фаза первичной острой реакции;

2 — фаза мнимого благополучия (латентная);

3 — фаза разгара болезни;

4 — фаза раннего восстановления.

1. Фаза первичной острой реакции. Симптомы первичной реакции могут появиться в первые минуты и часы после облучения и подразделяются на несколько групп:

– диспептические — тошнота, рвота, потеря аппетита, сухость во рту, диарея;

– общеклинические — головная боль, головокружение, слабость, нарушение сознания, изменение двигательной активности, повышение температуры тела;

– местные — изменение кожи и слизистых оболочек в местах наибольшего облучения (преходящая гиперемия).

Проявления первичной реакции имеют существенное значение для оценки степени тяжести ОЛБ и прогнозирования ее течения (табл. 3–2). Наибольшее диагностическое и прогностическое значение среди указанных признаков имеет диспептический синдром, в частности, время появления рвоты после момента облучения и ее кратность.

Таблица 3-2

Показатели степени тяжести ОЛБ в фазе первичной острой реакции

| Показатель | Степень тяжести ОЛБ | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| | I (1–2 Гр) | II(2–4 Гр) | III(4–6 Гр) | IV(6–10 Гр) |
| Рвота | Через 2 ч и более, однократная | Через 1–2 ч, повторная | Через 0,5–1ч, многократная | Через 15–20 мин, неукротимая |
| Диарея | Нет | Нет | Чаще нет | Может быть |
| Головная боль | Кратковременная, умеренная | Умеренная | Выраженная | Сильная, сознание спутанное |
| Температура тела | Норма | Субфебрильная | Субфебрильная | 38–39 °С |
| Состояние кожи | Норма | Слабая преходящая гиперемия | Умеренная Гиперемия | Выраженная гиперемия |
| Продолжительность первичной реакции | Несколько часов | 1 сутки | 2–3 суток | 2–3 суток |

Неблагоприятными признаками, свидетельствующими о высокой степени тяжести облучения (III–IV), являются развитие коллаптоидного состояния с падением артериального давления, кратковременная потеря сознания, субфебрильная температура, раннее появление поноса.

Изменения в периферической крови следующие:

- нейтрофильный лейкоцитоз со сдвигом влево (как следствие перераспределительного сдвига нервно-рефлекторного характера);
- абсолютная и относительная лимфопения.

Изменения в костном мозге наиболее заметны на 2–3 сутки: уменьшение общего числа миелокариоцитов, снижение митотического индекса, исчезновение молодых форм клеток.

Клинические проявления фазы первичной острой реакции связаны не только с гибелью клеток в результате облучения, но и с ранними нарушениями нейрогуморальных механизмов регуляции. Продолжительность фазы — от нескольких часов до 3 суток.

2. Латентная фаза (фаза мнимого благополучия)

Самочувствие пострадавших улучшается, ослабевают симптомы первичной реакции: прекращаются тошнота и рвота, уменьшается гиперемия кожи, нормализуются сон и аппетит. Может сохраняться неспецифическая неврологическая симптоматика, потливость, лабильность пульса и артериального давления. Начинает проявляться такой характерный для ОЛБ процесс, как эпиляция. Пороговая поглощенная доза, вызывающая эпиляцию, близка к 2,5–3 Гр.

В первую очередь выпадают волосы на голове и подбородке.

Поражения кожи вновь проявляются на 8–15 день. На пораженных участках появляется болезненная отечность, развивается интенсивная и стойкая краснота с багрово–синюшным оттенком. При дозах облучения около 6 Гр эти симптомы держатся в течение недели, а затем исчезают, оставляя пигментацию и шелушение. При дозах облучения 8 Гр и более, на пораженных участках кожи появляются пузыри и изъязвления, которые длительно не заживают.

Изменения в периферической крови следующие:

- выраженная лимфопения;
- лейкопения; на 15 день возможен abortивный гранулоцитоз с последующим падением лейкоцитов до минимума;
- тромбоцитопения.

Решающее прогностическое значение имеет уровень лимфоцитов на 3–6-е сутки и лейкоцитов на 8–9-е сутки (табл. 3–3).

Показатели степени тяжести ОЛБ в латентной фазе

| Показатель | Степень тяжести ОЛБ | | | |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|
| | I (1–2 Гр) | II (2–4 Гр) | III (4–6 Гр) | IV (6–10 Гр) |
| Лимфоциты, $\cdot 10^9/\text{л}$ | 1,6–0,6 | 0,5–0,3 | 0,2–0,1 | 0,1 |
| Лейкоциты, $\cdot 10^9/\text{л}$ | 4,0–3,0 | 2,9–2,0 | 1,9–0,5 | 0,5 |
| Эпиляция, время начала | Не выражена | На 12–20 сутки | На 10– 20 сутки | На 7–10 сутки |
| Продолжит. латентной фазы (сут) | 30 | 15–25 | 8–17 | Нет или до 6 суток |

Продолжительность латентной фазы — 14–30 суток. При IV степени тяжести эта фаза может отсутствовать.

3. Фаза разгара болезни

Прогрессирующее угнетение кроветворения в костном мозге и сопутствующая глубокая цитопения составляют основу всех клинических проявлений в данной фазе ОЛБ. О переходе в фазу разгара болезни судят по развитию агранулоцитоза (уменьшение количества лейкоцитов ниже $1 \cdot 10^9/\text{л}$).

Самочувствие больных ухудшается, повышается температура, появляется резкая слабость, головная боль, головокружение, нарушается сон. Возобновляются и усугубляются желудочно-кишечные расстройства: усиливается рвота, извращается или исчезает аппетит, развивается понос со слизистыми или кровянистыми выделениями, что приводит к обезвоживанию и потере массы тела. Ведущими в клинической картине являются 2 синдрома:

1) геморрагический — кровоизлияния в кожу, слизистые оболочки, желудочно-кишечный тракт, мозг, сердце, легкие;

2) инфекционный, вызванный как присоединением экзогенной инфекции, так и активацией собственной микрофлоры. На слизистых оболочках возникают язвенно-некротические образования, которые осложняются воспалительными процессами — язвенным гингивитом, стоматитом, эзофагитом, гастроэнтеритом, некротической ангиной.

Продолжается выпадение волос, начавшееся в латентной фазе.

В фазу разгара в периферической крови происходят следующие изменения (табл. 3-4):

Показатели степени тяжести ОЛБ в фазе разгара болезни

| Показатель | Степени тяжести ОЛБ | | | |
|----------------------------------|---------------------|-------------|--------------|--------------|
| | I (1–2 Гр) | II (2–4 Гр) | III (4–6 Гр) | IV (6–10 Гр) |
| Тромбоциты, * 10 ⁹ /л | 100–60 | 50–30 | 30 | 20 |
| Лейкоциты, *10 ⁹ /л | 3,0–1,5 | 1,5–0,5 | 0,5–0,1 | Ниже 0,5 |
| Начало агранулоцитоза | Нет | 20–30 сут | 8–20 сут | 6–8 сут |
| Начало тромбоцитопении | 25–28 сут | 17–24 сут | 10–16 сут | До 10 сут |
| СОЭ, мм/ч | 10–25 | 25–40 | 40–80 | 60–80 |

- агранулоцитоз (количество лейкоцитов менее $1,0 \cdot 10^9/\text{л}$);
- абсолютная лимфопения;
- относительный лимфоцитоз (морфологический состав крови представлен почти одними лимфоцитами, гранулоциты единичные или отсутствуют);
- тромбоцитопения (менее $40 \cdot 10^9/\text{л}$);
- прогрессирующая анемия.

В костном мозге и лимфоузлах выявляются признаки репаративных процессов, за исключением крайне тяжелых степеней поражения.

Средняя продолжительность фазы — 1,5–2 недели. При крайне тяжелом поражении в конце 2-й недели может наступить летальный исход.

4. Фаза раннего восстановления

Самочувствие улучшается, появляется аппетит, восстанавливается сон. Температура нормализуется. Прекращается кровоточивость, исчезают или ослабевают диспептические явления. Однако отдельные проявления поражения (например, эпилепсия) сохраняются. Как правило, в течение длительного времени наблюдается функциональная лабильность сердечно-сосудистой и нервной систем.

Происходит постепенное восстановление показателей периферической крови: повышается количество лейкоцитов с резким сдвигом лейкоцитарной формулы влево, увеличивается количество тромбоцитов, наблюдается ретикулоцитоз.

Средняя продолжительность фазы раннего восстановления — 2–2,5 мес.

В результате аварии на ЧАЭС возникла своеобразная форма ОЛБ, вызванная сочетанием общего относительно равномерного гамма-облучения

всего тела с бета-облучением обширных участков кожного покрова и частично с ингаляционным поступлением смеси радионуклидов (в основном, радиоактивного йода и цезия). Из персонала ЧАЭС, работавшего на станции в момент аварии, и участников ликвидации ее последствий пострадало 237 человек, при этом диагноз «острая лучевая болезнь» был подтвержден в 134 случаях. Распределение по степеням тяжести было следующим: *I степень* — 41 человек, 1 случай дискутируется, все пострадавшие выжили; *II степень* — 50 человек, 1 погиб; *III степень* — 22 человека, 7 погибло; *IV степень* — 21 человек, 20 погибло. Остальные случаи относятся к неподтвержденным. Всего в острой фазе умерло 28 человек (и еще 2 погибли в момент аварии непосредственно на станции), выжило 209 человек.

У 56 больных отмечались лучевые ожоги за счет бета-излучения, из них 2 человека имели еще и термические ожоги. Радиационные ожоги охватывали у разных больных от 1 до 100 % поверхности тела. Больные, имевшие относительно ранние (с 5–6 сут) ожоги II–III степени, были обречены. При этом вначале развивался лихорадочно-токсемический синдром, затем почечно-печеночная недостаточность и энцефалопатическая кома. При такой клинической картине 26 из 56 больных с лучевыми ожогами погибли.

У 10 больных на 4–8 сутки развился кишечный синдром; все они погибли в первые три недели после облучения. У 7 больных с ОЛБ III–IV степени тяжести развился острый радиационный интерстициальный пневмонит, сочетавшийся с крайне тяжелыми поражениями кожи и кишечника. У 80 больных имел место орофарингеальный синдром в виде острого лучевого мукозита рта и глотки. В 6 случаях летальный исход был связан с необратимой миелодепрессией.

За последующие 10 лет умерло еще 14 человек (9 пациентов с ОЛБ и 5 — с неподтвержденными формами). Среди причин смерти фигурируют: ИБС — 4, энцефалит — 1, гангрена легкого — 1, туберкулез легких — 1, цирроз печени — 1, жировая эмболия — 1, саркома — 1, миелодиспластический синдром — 2, гипоплазия кроветворения — 1, несчастный случай — 1.

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ И ПРИНЦИПЫ ЛЕЧЕНИЯ

В *фазе первичной острой реакции* лечебные мероприятия начинаются с оказания срочной медицинской помощи по жизненным показаниям. Пострадавшие подлежат немедленной эвакуации от источника ионизирующего излучения или из зоны радиоактивного загрязнения. На «чистой» территории проводится частичная санитарная обработка–деактивация в случае загрязнения кожи и видимых слизистых выше допустимого уровня (мытьё с мылом под душем, промывание водой конъюнктивы, полости носа, рта, глотки, смена

одежды). Большое значение в качестве диагностического показателя имеет дозиметрическая информация, которая может быть получена путем индивидуальной или групповой дозиметрии, а также биологической «дозиметрии» (учет клинических симптомов и гематологических показателей).

Экстренная медицинская помощь направлена в первую очередь на профилактику и купирование проявлений первичной реакции, в частности, рвоты. С этой целью применяются такие препараты, как метоклопрамид, диметпрамид, аминазин. Возможно использование комплексного препарата диксафена (включает диметпрамид, кофеин, эфедрин). Препарат вводится внутримышечно, действие проявляется уже через 10–15 мин и сохраняется 4–5 ч. Для профилактики первичной реакции может быть использован комплексный препарат диметкарб (включает противорвотный препарат диметпрамид и психостимулятор сиднокарб), который следует применять за 0,5–1 ч до облучения или непосредственно после воздействия излучения в дозе более 1 Гр. При дозах облучения 4–6 Гр препарат предупреждает развитие тошноты, рвоты, гиподинамии у 40–50 % пораженных.

В данной фазе проводится симптоматическая терапия: в случае возникновения сердечно-сосудистой недостаточности — кордиамин, кофеин-бензоат натрия, при необходимости — мезатон, строфантин или коргликон; купирование психомоторного возбуждения седативными средствами, при явлениях обезвоживания — инфузионная терапия.

Хирургическая коррекция угрожающих состояний проводится в первые 48 часов, остальные хирургические вмешательства — после восстановления гемопоэза.

Дальнейшее лечение ОЛБ должно проводиться в специализированном стационаре.

В *латентной фазе* продолжается симптоматическая терапия, назначаются витамины (А, Е, С, группа В), а также проводится профилактика инфекционных осложнений путем назначения антибактериальных средств.

В *фазе разгара* большое значение для исхода болезни имеет уход за больными, в связи с чем уже с конца латентной фазы больного необходимо поместить в асептические условия: больных помещают в изолированные боксы, снабженные бактерицидными лампами. При входе в палату персонал надевает маски, дополнительные халаты и обувь, хранящуюся у входа в палату на коврик, смоченным 1 % раствором хлорамина. Большое значение придается гигиене кожи и полости рта.

Для борьбы с инфекционными осложнениями назначается антибиотикотерапия. Согласно выводам I (согласительной) конференции по лечению радиационных поражений (Вашингтон, 1989 г.) рекомендуется назначение одновременно внутривенно трех антибиотиков в максимальных дозировках (один из аминогликозидов, один из цефалоспоринов, один из полусинтетических пенициллинов с антисинегнойной активностью). Если нет

эффекта в течение 24–48 часов, то рекомендуется назначить внутривенно антистафилококковый гамма-глобулин. Если лихорадка не купируется в течение недели, дополнительно назначается амфотерицин В. При активации вируса герпеса рекомендуется назначать ацикловир. Параллельно с этим для профилактики развития кандидосепсиса назначают противогрибковые препараты.

Проводится антигеморрагическая терапия: переливание тромбоцитарной массы, системные и местные антигеморрагические средства, витаминотерапия в комплексе с десенсибилизирующими средствами.

Большое значение имеет активная дезинтоксикационная терапия, парентеральное питание, введение растворов белка и сбалансированных аминокислот.

Очень важна заместительная терапия, включающая в себя два направления:

- переливание компонентов крови;
- трансплантация аллогенного костного мозга (ТАКМ) или трансплантация клеток человеческой эмбриональной печени (ТКЧЭП).

Согласно «Протокола для лечения радиационных поражений» (Гаага, 1990 г.) перед инфузией компоненты крови рекомендуется облучать в дозе 15–20 Гр для предотвращения реакции «трансплантат против хозяина». Проведение ТАКМ показано при равномерном облучении в дозе свыше 6 Гр. Костный мозг должен быть подобран по АВО–группе, резус–фактору и типирован по HLA–антигенам. Из трансплантата костного мозга удаляются Т–лимфоциты. Лучшие сроки для проведения ТАКМ — 3–5 сут после облучения, более позднее проведение требует проведения иммуносупрессивной терапии.

В *фазе раннего восстановления* назначаются витамины, стимуляторы миелопоза (китайский лимонник, элеутерококк, левзея, женьшень и др.), препараты, улучшающие клеточный метаболизм (оротат калия, панангин, пантотенат кальция, метилурацил, нуклеинат натрия и др.).

ХРОНИЧЕСКАЯ ЛУЧЕВАЯ БОЛЕЗНЬ (ХЛБ)

Хроническая лучевая болезнь представляет собой клинический синдром, формирующийся медленно, постепенно, при длительном воздействии на организм ионизирующего излучения, разовые и суммарные дозы которого превышают принятые предельно допустимые для профессионального облучения.

Выделяют два варианта ХЛБ:

1) с развернутым клиническим синдромом, возникновение которого обусловлено действием общего облучения;

2) с клиническим синдромом преимущественного поражения отдельных органов и систем от внутреннего или внешнего облучения (местные лучевые поражения).

ХЛБ, обусловленная общим облучением может развиваться:

при равномерном внешнем облучении у лиц, занятых промышленными и медицинскими гамма- и рентгеновскими исследованиями, работающих возле ускорителей, реакторов, на предприятиях ядерного топливного цикла;

при инкорпорации равномерно распределяющихся в организме изотопов (например, тритий, цезий-137, углерод-14).

Данный вариант ХЛБ развивается при достижении определенного уровня доз (суммарная доза 0,7–1 Зв, интенсивность излучения 1–5 мЗв в день). Характеризуется постепенным развитием и длительным волнообразным течением.

Ткани, имеющие большой резерв активно размножающихся малодифференцированных клеток (эпителий кишечника, кроветворная ткань, сперматогенный эпителий), длительно сохраняют возможность морфологического восстановления. В высокоспециализированных системах (нервной, сердечно-сосудистой, эндокринной) процессы клеточного обновления идут слабо, они отвечают на хроническое лучевое воздействие комплексом функциональных сдвигов.

В течение заболевания выделяют следующие периоды: доклинический, формирования, восстановительный, исходный и последствий.

Доклинический период характеризуется нарушением нервной регуляции различных органов и систем, носящим адаптивный характер. Поэтому ранние проявления болезни сводятся к функциональным нарушениям организма, нестойким, обратимым, поддающимся лечению. Сюда относятся нестойкая лейкопения, появление признаков астенизации, вегетативно–сосудистой неустойчивости.

Лица с подобными проявлениями, развившимися в результате контакта с ионизирующими излучениями, не могут быть отнесены к больным ХЛБ, однако они нуждаются в систематическом врачебном наблюдении.

Период формирования связан с возрастанием интенсивности лучевой нагрузки или накоплением определенной суммарной дозы облучения.

В данном периоде, в зависимости от клинического течения, выделяют три степени тяжести ХЛБ. Эти степени тяжести — по существу фазы в развитии единого патологического процесса и при продолжающемся облучении сменяют друг друга.

ХЛБ легкой (I) степени представляет собой период обратимых реакций организма. Клиническая картина заболевания складывается из вегетативно–

сосудистых нарушений, начальных астенических проявлений и умеренных нестойких изменений клеточного состава периферической крови.

Больные жалуются на общую слабость, повышенную утомляемость, снижение работоспособности, головные боли, ухудшение аппетита, бессонницу. Начальные астенические проявления сочетаются с симптомами нарушения гемодинамики (преимущественно в коже, конечностях, головном мозге). Недостаточность церебрального кровообращения проявляется в двух синдромах в зависимости от тонуса сосудов мозга. Для лиц со сниженным тонусом характерны тупые головные боли, возникающие утром и усиливающиеся во второй половине дня. Для лиц с повышенным тонусом сосудов мозга более характерны приступообразные головные боли, чаще связанные с физическими и эмоциональными перегрузками, перепадом температуры и давления.

Отмечается лабильность артериального давления с колебаниями от пониженных до умеренно повышенных цифр.

Со стороны желудочно-кишечного тракта наблюдаются функциональные нарушения: диспептические явления, дискинезии кишечника и желчевыводящих путей, возможны функциональные нарушения секреторной функции желудка.

В периферической крови возможно развитие умеренной лейкопении, реже тромбоцитопении. Число эритроцитов чаще не изменяется. Изменения со стороны крови носят нестойкий характер, с колебаниями показателей до нормальных цифр и нормализацией картины крови после проведенного лечения.

ХЛБ средней (II) степени тяжести характеризуется углублением функциональных нарушений со стороны нервной, сердечно-сосудистой, пищеварительной систем, выраженным и стойким угнетением кроветворения.

Усиливаются головные боли и головокружение. Могут появиться трофические изменения кожи и ее придатков: сухость кожи, выпадение волос, ломкость ногтей.

Наблюдаются более выраженные изменения со стороны сердечно-сосудистой системы. Артериальное давление стойко снижается, преимущественно за счет диастолического, что указывает на падение сосудистого тонуса. Отмечается приглушение тонов и расширение границ сердца.

Со стороны желудочно-кишечного тракта наблюдаются нарастание диспептических явлений, выраженное нарушение ферментативной деятельности желудка, кишечника, поджелудочной железы.

Отмечаются функциональные нарушения со стороны эндокринных органов. Снижение функции коры надпочечников проявляется в стойкой артериальной гипотензии, вялости, адинамии, снижении содержания 17-кетостероидов в моче. Может наблюдаться нарушение овариально-

менструального цикла у женщин. Выраженные и стойкие изменения наблюдаются в системе крови. Число лейкоцитов в периферической крови снижается до $3,0-2,0 \cdot 10^9/\text{л}$ и ниже. Лейкопения носит стойкий характер с абсолютной нейтропенией и лимфопенией. Выражены токсическая зернистость и дегенеративные изменения нейтрофилов. Развивается более или менее выраженная тромбоцитопения. При исследовании пунктата костного мозга обнаруживается гипопластическое его состояние.

ХЛБ тяжелой (III) степени тяжести характеризуется тяжелыми необратимыми изменениями в организме. В относительно радиорезистентных органах (стенка сосудов, мышца сердца, нервная система) развиваются микроструктурные дистрофические изменения. На первый план в картине заболевания выступают тяжелые изменения со стороны нервной системы, геморрагический синдром, глубокое угнетение кроветворения.

Прогрессирует ухудшение общего состояния, отмечается резкая слабость и адинамия. Резко выражены трофические изменения кожи, выпадение волос, ломкость ногтей. Больные жалуются на одышку, сердцебиение, боль в области сердца. Границы сердца расширены, тоны глухие. Артериальное давление стойко понижено.

В желудочно-кишечном тракте развиваются атрофические процессы. Аппетит резко понижен, живот вздут. Печень увеличена, путем функциональных проб выявляется снижение ее функций.

Отмечаются глубокие нарушения в эндокринной системе, главным образом в надпочечниках, щитовидной железе, половых железах.

В периферической крови происходит резкое снижение количества лейкоцитов с абсолютной нейтропенией и лимфопенией, возможен относительный лимфоцитоз при резком падении числа нейтрофилов. Резко снижается количество тромбоцитов. В более поздние сроки развивается анемия. В пунктате костного мозга отмечается резкое обеднение его клеточными элементами, вплоть до картины панмиелофтиза.

Глубокое угнетение кроветворения ведет к резкому ослаблению сопротивляемости организма и развитию инфекционных осложнений.

Тромбоцитопения в сочетании с явлениями патологической проницаемости сосудистой стенки и нарушениями в свертывающей системе крови ведут к развитию геморрагического синдрома.

Восстановительный период начинается по прекращении интенсивного лучевого воздействия или при значительном снижении уровней облучения до предельно допустимых и характеризуется сглаживанием деструктивных и преобладанием репаративных процессов в наиболее радиочувствительных тканях.

В *периоде исходов и последствий* наблюдается сочетание остаточных повреждений и новой, более или менее совершенной функциональной организации, которая носит приспособительный характер.

В качестве отдаленных исходов ХЛБ нужно учитывать возможность развития лейкозов, злокачественных новообразований, гипопластической анемии.

МЕСТНЫЕ ЛУЧЕВЫЕ ПОРАЖЕНИЯ

Данный вариант ХЛБ может развиваться:

- при инкорпорации избирательно распределяющихся в организме радионуклидов;
- при локальном внешнем облучении, которое возможно при ручных манипуляциях с источниками ионизирующих излучений либо как осложнение в процессе лучевого лечения.

Для местных лучевых поражений характерны следующие особенности:

- преимущественно местное повреждающее действие ионизирующих излучений с преобладанием прямых эффектов над общими рефлекторными реакциями;
- наличие длительного скрытого периода, когда постепенное формирование процесса в критическом органе протекает без отчетливых клинических признаков его поражения;
- большая выраженность приспособительных механизмов вследствие преимущественно локального характера лучевого поражения.

Основные патогенетические механизмы и клинику местных лучевых поражений определяет поражение одного или нескольких критических органов. Критический орган — это орган или структура, накапливающие основную часть дозы облучения и за счет этого определяющие исход поражения.

Если местное лучевое поражение развилось при инкорпорации радионуклидов с избирательным типом накопления, то клиническая картина зависит от физико-химических свойств радионуклида, путей попадания в организм, типа распределения в организме, периода полураспада, интенсивности и путей выведения из организма. Радиоактивные вещества могут попасть в организм человека ингаляционным путем, через пищеварительный тракт, поврежденную и неповрежденную кожу, а выделяются из организма с выдыхаемым воздухом, мочой, калом, потом.

Особенность действия радиоактивных веществ, попавших внутрь — то, что облучение критических органов происходит непрерывно в течение определенного промежутка времени, который зависит от эффективного периода выведения изотопа из организма (Тэф). При поступлении изотопов с коротким эффективным периодом выведения основные признаки поражения

критического органа выявляются за небольшой промежуток времени. Для изотопов, длительно находящихся в организме, выявление клинических симптомов возможно в течение большого промежутка времени, а иногда и всей жизни человека.

Примерами радионуклидов с избирательным типом накопления являются стронций-90, радий-226, плутоний-239, полоний-210, уран.

Полоний-210 — альфа-излучатель, $T_{1/2}$ — 138,4 сут, $T_{эф}$ — 37 сут. Независимо от путей поступления быстро всасывается в кровь и концентрируется в органах, богатых макрофагами (преимущественно в лимфоузлах, печени, селезенке, костном мозге). Клиническая картина характеризуется ранним развитием астенизации организма. В начальной стадии наблюдаются явления вегетативной неустойчивости, характерно снижение сосудистого тонуса. Поражаются надпочечники, что проявляется вялостью, адинамией, снижением артериального давления, пониженным содержанием в моче 17-кетостероидов. Поражение органов кроветворения приводит к неустойчивости показателей периферической крови, а в последующем к угнетению белого, а затем красного ростков кроветворения. Отмечается также поражение печени, что сопровождается увеличением ее размеров и отклонением показателей функциональных печеночных проб. Возможны изменения со стороны почек: различной степени выраженности дистрофические изменения в клубочках и канальцах.

Плутоний-239 — альфа-излучатель, $T_{1/2}$ — 24 000 лет, $T_{эф}$ — 200 лет. Накапливается, в основном, в скелете (60 %) и печени (10–20 %). При ингаляционном поступлении некоторое количество плутония (1–10 %) поглощается легочной тканью и легочными лимфоузлами. Характерна постепенно развивающаяся астенизация, угнетение костномозгового кроветворения. При ингаляционном поступлении возможно развитие очагового или диффузного пневмосклероза.

Радий-226 — альфа-излучатель, $T_{1/2}$ — 1602 года, $T_{эф}$ — 44 года. Откадывается, главным образом, в костях, частично в печени, легких, костном мозге. Развивается деструкция костной ткани (радиационный остеит), что приводит к повышенной ломкости костей. В отдаленном периоде возможно развитие остеогенной саркомы. Выражено также воздействие радия на систему кроветворения.

Уран — природный уран состоит из смеси трех изотопов: урана-238 (99,3 %), урана-235 (0,7 %), урана-234 (0,008 %). Уран-238 имеет $T_{1/2}$ — $4.4 \cdot 10^9$ лет, $T_{эф}$ — 6 сут. Действует на организм в большей степени как тяжелый металл и в меньшей степени как радиоактивный элемент (альфа-излучатель). Преимущественно накапливается в костях и почках. Выражены изменения со стороны ЦНС (медленно прогрессирующие симптомы астенизации). Изменения

в периферической крови долгое время не выявляются: лейкопения и тромбоцитопения развиваются лишь через несколько лет. Может быть поражение печени по типу хронического токсического гепатита, который протекает более благоприятно, чем при интоксикации полонием, функции печени нарушены незначительно. Поражение почек более выражено при интоксикации растворимыми соединениями урана и протекает по типу хронической токсической нефропатии. При поступлении растворимых соединений урана также наблюдаются изменения со стороны верхних дыхательных путей (атрофический назофарингит).

Диагноз ХЛБ основывается на тщательном ознакомлении с анамнезом больного, выяснении условий его работы, количественной характеристике радиационного воздействия и всестороннем клиническом и лабораторном обследовании больного.

Принципы лечения

Единственный и необходимый элемент этиотропной терапии при ХЛБ — прекращение облучения или уменьшение лучевой нагрузки для основных критических органов путем применения средств, эффективно ускоряющих выведение изотопов из организма

После постановки диагноза пострадавшему следует рекомендовать прекращение контакта с тем комплексом радиационных и других общих неблагоприятных производственных факторов, которые явились причиной заболевания. Рациональное трудоустройство создает возможность стабилизации процесса и некоторого регресса клинических симптомов. Минимальный срок отстранения от работы с источниками ионизирующих излучений составляет 1 год. В отдельных случаях в восстановительном периоде при наличии признаков отчетливого и стойкого (в течение 1–3 лет) клинического улучшения допустим возврат на прежнее место работы, если дозы облучения будут заведомо ниже принятых предельно допустимых для профессионального облучения.

Лечение больного ХЛБ первой степени тяжести должно состоять, главным образом, из общеукрепляющих мероприятий. Назначается щадящий режим с обязательным пребыванием на воздухе и полноценное высококалорийное питание. Рекомендуются лечебная гимнастика и массаж, физиотерапевтические процедуры. Назначаются общеукрепляющие препараты: витамины, адаптогены. При ХЛБ первой степени часто применение общеукрепляющей терапии оказывается достаточным. Симптоматические средства применяют по показаниям: при функциональных нарушениях со стороны сердечно-сосудистой системы и желудочно-кишечного тракта. Можно рекомендовать санаторно–курортное лечение.

Лечение больного ХЛБ второй степени должно проводиться в стационаре в течение 2–3 месяцев. Назначается щадящий режим, высококалорийное питание. Применяют общеукрепляющее лечение и физиотерапию. Однако при значительных изменениях кроветворения и при более выраженной астении это лечение оказывается недостаточным. Необходимо назначение заместительной терапии в виде переливаний недостающих компонентов крови. Назначение стимуляторов кроветворения противопоказано, т. к. при лучевой болезни к органам кроветворения предъявляются повышенные требования, как в плане их функциональных возможностей, так и физиологической регенерации. Симптоматические средства назначают по показаниям. После проведения стационарного лечения больной должен находиться под систематическим врачебным наблюдением. Общеукрепляющее лечение проводится и в амбулаторных условиях. Можно рекомендовать и санаторно-курортное лечение.

При ХЛБ третьей степени проводят все мероприятия, применяемые при лечении ХЛБ второй степени. Помимо этого, лечение больного ХЛБ третьей степени должно быть направлено на борьбу с инфекционными осложнениями и геморрагическими явлениями. Большое внимание уделяется тщательному уходу за больным, гигиеническому содержанию полости рта и кожи. Назначаются антибиотики широкого спектра действия в больших дозировках. Проводится активная антигеморрагическая терапия. Симптоматические средства применяют по соответствующим показаниям.

При поступлении радиоактивных веществ в организм лечебные мероприятия подразделяют на две группы:

1. Этиотропная терапия средствами, препятствующими отложению изотопа и ускоряющими его выведение.
2. Патогенетическая и симптоматическая терапия, направленная на нормализацию деятельности критических органов и систем.

К первой группе мероприятий относятся:

- процедуры по механическому удалению изотопа;
- промывание желудка и кишечника;
- назначение адсорбентов;
- обильное питье.

Методы изотопного разбавления — ведущие по отношению к таким изотопам как натрий-24, цезий-137, тритий. Количество вводимой в организм жидкости в этих случаях должно быть максимально увеличено одновременно с применением средств, повышающих диурез.

— применение средств, ускоряющих выведение изотопов методом конкурентного замещения или комплексообразования:

- при поступлении в организм радия-226, стронция-89, стронция-90 — внутрь сернокислый барий или адсорбар;
- поступлении плутония-239, америция-241 — внутривенно 5 %-ный раствор пентамина или внутримышечно 5 %-ный раствор унитиола;
- при поступлении полония-210 — внутривенно 5–10 %-ный раствор ЭДТА;
- для замещения радиоактивного йода применяют его стабильный аналог в виде йодной настойки или йодида калия внутрь.

К *мероприятиям второй группы* можно отнести предоставление физиологического покоя критическому органу и создание условий для его оптимального функционирования. Сюда относятся:

- при поражении органов желудочно-кишечного тракта — назначение щадящей диеты;
- при поражении мышц — создание режима дозированной мышечной нагрузки; терапия, направленная на нормализацию регуляторных процессов (витамины, общеукрепляющее лечение).

В связи с тем, что в органах, подвергшихся облучению, развиваются выраженные репаративные процессы, следует избегать назначения стимулирующих средств, т. к. усиливается опасность патологической направленности репаративных процессов.

В остальном выбор основных средств патогенетической и симптоматической терапии соответствует принятому в обычной клинической практике.

ГЛАВА 4.

Радиоэкологическая ситуация в Республике Беларусь после катастрофы на ЧАЭС

Чернобыльская АЭС размещена на Украине, в 12 км от южной границы Республики Беларусь. 26 апреля 1986 г. на 4-м блоке ЧАЭС произошла крупная авария, которая резко изменила радиоэкологическую ситуацию в нашей республике.

По Международной шкале событий на АЭС, предложенной в 1990 году группой экспертов МАГАТЭ и Европейского агентства по атомной энергии, авария на Чернобыльской АЭС относится к 7-му классу и именуется глобальной аварией.

Катастрофа на 4-м блоке ЧАЭС, которая произошла в результате взрыва пара, снесшего крышу здания, разгерметизации активной зоны и возникшего пожара, сопровождалась выбросом в окружающую среду значительного количества радиоактивных веществ (по последним данным, около 10 ЭБк). По некоторым оценкам зарубежных авторов, величина выброса была более высокая. Выброс газо-аэрозольной струи, достигшей 1,5 км, был длительным (10 суток), неравномерным по количеству выбрасываемых радионуклидов, при постоянно меняющихся метеоусловиях (направление ветра, осадки) (табл. 4-1).

Формирование радиоактивного загрязнения РБ началось сразу после взрыва реактора, т. к. радиоактивное облако перемещалось с воздушными потоками в северо-западном и северном направлениях. Около 70 % радиоактивных веществ, выброшенных из разрушенного реактора в атмосферу, в результате сухого и влажного осаждения выпали на территорию Беларуси.

При этом 23 % территории Республики Беларусь (46,5 тыс. км²) с 3221 населенными пунктами, в том числе 27 городов, где проживало 2,2 млн. человек (более 400 000 детей), оказалось загрязненной цезием-137 более 37 кБк/м² (1 Ки/км²). Для сравнения: в Украине зона с уровнем загрязнения более 37 кБк/м² занимает площадь 28,5 тыс. км² (5 %, 1599 населенных пунктов), в России — 35,2 тыс. км² 10,6 %, 1088 населенных пунктов).

Радиоактивное загрязнение распространилось по всем областям республики. Оно имеет неравномерный «пятнистый» характер, что обусловлено динамикой выброса и постоянно меняющимися метеоусловиями.

Максимальные уровни загрязнения были обнаружены в 30-километровой зоне вокруг АЭС:

- по цезию-137 — 18500 кБк/м² (500 Ки/км²);
- стронцию-90 — более 455 кБк/м² (более 12 Ки/км²);
- по плутонию-239,240 — около 150 кБк/м² (около 4 Ки/км²).

**Динамика ежесуточного выброса радиоактивных веществ в атмосферу
из аварийного блока ЧАЭС (без радиоактивных благородных газов)**

| Дата | Время после аварии, сутки | Активность выброса, МКи |
|------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 26. 04. 86 | 0 | 12,0 |
| 27. 04. 86 | 1 | 4,0 |
| 28. 04. 86 | 2 | 3,4 |
| 29. 04. 86 | 3 | 2,6 |
| 30. 04. 86 | 4 | 2,0 |
| 1.0 5.8 6 | 5 | 2,0 |
| 2.0 5.8 6 | 6 | 4,9 |
| 3.0 5.8 6 | 7 | 5,0 |
| 4.0 5.8 6 | 8 | 7,0 |
| 5.0 5.8 6 | 9 | 8,0 |
| 6.0 5.8 6 | 10 | 0,1 |
| 9.0 5.8 6 | 14 | 0,01 |
| 23. 05. 86 | 28 | $28 \cdot 10^{-3}$ |

Однако и за пределами зоны отчуждения выявлены участки с высокими уровнями загрязнения (д. Чудяны Могилевской области — 5402 кБк/м²). Есть случаи, когда в пределах одного населенного пункта существует большое различие уровней загрязнения почвы цезием-137. Например, в д. Веприн Могилевской области в восточной части загрязнения 37 кБк/м² (1 Ки/км²), в западной — 2035 кБк/м² (55 Ки/км²); в д. Колыбань Гомельской области загрязнение почвы от 174 до 2424 кБк/м².

Самыми пострадавшими от Чернобыльской катастрофы областями Беларуси являются: Гомельская, Могилевская и Брестская. В Брестской области значительное радиоактивное загрязнение было установлено в Столинском, Пинском, Лунинецком, Дрогичинском, Березовском и Барановичском районах. В Минской, Гродненской и 4-х населенных пунктах Витебской области содержание цезия-137 в почве превышает 37 кБк/м² (1 Ки/км²). На остальной территории Беларуси уровни загрязнения почвы цезием-137 также выше доаварийных значений и лишь в северо-западных районах Витебской области сопоставимы с глобальными выпадениями.

Загрязнение территории республики стронцием-90 носит более локальный характер. Уровни содержания его в почве выше 5,5 кБк/м² (0,15 Ки/км²) обнаружены на площади 21,1 тыс.км², что составляет 10 % от территории республики. Максимальные уровни стронция-90 обнаружены в пределах 30-километровой зоны ЧАЭС и достигают величины 1800 кБк/м² (около 49 Ки/км²) в Хойникском районе Гомельской области. Наиболее высокое содержание его в почвах дальней зоны обнаружено на расстоянии 250 км от станции в Чериковском районе Могилевской области и составляет 29 кБк/м² (0,78 Ки/км²), а также в северной части Гомельской области в Ветковском районе — 37 кБк/м² (1 Ки/км²).

Загрязнение почвы изотопами плутония-238,-239,-240 более 0,37 кБк/м² (0,01 Ки/км²) охватывает около 4 тыс. км² или почти 2 % площади республики. Эти территории преимущественно находятся в Гомельской области (Брагинский, Наровлянский, Хойникский, Речицкий, Добрушский и Лоевский районы) и Чериковском районе Могилевской области. Так, загрязнение почвы изотопами плутония от 0,37 до 3,7 кБк/м² отмечены в Гомельской области. Содержание в почве плутония, достигающее 3,7 кБк/м², характерно для 30-километровой зоны ЧАЭС. Наиболее высокие уровни наблюдаются в Хойникском районе — более 111 кБк/м² (3 Ки/км²).

Газо-аэрозольное облако имело радионуклидный состав, однозначно характеризующий источник выброса: в него входили изотопы 27 радионуклидов. Радионуклидный состав выпадений, особенно в первые недели после аварии, имеет существенное значение для ретроспективной оценки доз облучения жителей ближайших к станции населенных пунктов, персонала

станции и лиц, принимавших участие в аварийно-восстановительных и дезактивационных работах.

В окружающую среду были выброшены:

- летучие радиоактивные инертные газы;
- сотни осколочных продуктов деления, накопившихся в зоне реактора;
- изотопы наведенной радиоактивности за счет веществ, которые сбрасывали на реактор;
- частички ядерного топлива (табл. 4-2).

Сразу после аварии радиационная обстановка в республике и формирование дозовых нагрузок на население определялись действием короткоживущих радионуклидов: молибдена, технеция, лантана, бария, благородных инертных газов, радиоизотопов йода-131, 132, 133, 134, 135, 123, 125, 126. По расчетным данным, в окружающую среду было выброшено 50–60 % накопившихся в реакторе радиоизотопов йода.

Уровни радиоактивного загрязнения короткоживущими радионуклидами йода во многих регионах республики были настолько велики, что вызванное ими облучение миллионов людей квалифицируется специалистами как период «йодного удара».

В апреле — мае 1986 года наибольшие уровни выпадения йода-131 имели место в ближней (10–30 км) зоне в Брагинском, Хойникском, Наровлянском районах Гомельской области, где его содержание в почвах составило 37000 кБк/м² (1000 Ки/км²) и более, в Чечерском, Кормянском, Буда-Кошелевском, Добрушском районах уровни загрязнения достигали 18500 кБк/м² (500 Ки/км²).

Значительному загрязнению радиоизотопов йода подверглись также юго-западные регионы республики — Ельский, Лельчицкий, Житковичский, Петриковский районы Гомельской области и Пинский, Лунинецкий, Столинский районы Брестской области. Высокие уровни загрязнения имели место и на севере Гомельской и Могилевской областей. В Ветковском районе Гомельской области содержание йода-131 в почве достигало 20000 кБк/м² (более 540 Ки/км²). В Могилевской области наибольшее загрязнение отмечалось в Чериковском и Краснопольском районах — 5550–11100 кБк/м² (150–300 Ки/км²).

**Важнейшие радионуклиды, выброшенные в окружающую среду
в результате катастрофы на ЧАЭС**

| Радионуклид | Процент выброшенной активности на 5.05.1986 г. | Распространилось в окружающую среду Бк*10¹⁶ | Период полураспада |
|--------------------|---|---|---------------------------|
| криптон-85 | 100 | 3,3 | 10,72 часа |
| ксенон-133 | 100 | 170,0 | 5,25 дня |
| йод-131 | 50 | 65,0 | 8,05 дня |
| цезий-134 | 25 | 4,7 | 2,06 года |
| цезий-137 | 30 | 8,7 | 30,0 лет |
| стронций-89 | 10 | 20,0 | 50,5 дня |
| стронций-90 | 10 | 2,0 | 29,12 лет |
| цирконий-95 | 8 | 35,0 | 64,0 дня |
| рутений-103 | 8 | 33,0 | 39,3 дня |
| рутений-106 | 8 | 17,0 | 368,0 дней |
| церий-141 | 6 | 26,5 | 32,5 дня |
| церий-144 | 8 | 25,6 | 284 дня |
| плутоний-238 | 8 | 0,008 | 87,74 года |
| плутоний-239 | 8 | 0,006 | 24390 лет |
| плутоний-240 | 8 | 0,008 | 6537 лет |
| плутоний-241 | 8 | 1,4 | 14,4 года |

Выделяют несколько основных типов воздействия радионуклидов чернобыльской аварии на организм человека:

1. Внешнее гамма-облучение от радиоактивного облака.

Оно было недолгим и продолжалось до формирования радиоактивного следа на местности и объектах окружающей среды. Его вклад в формирование дозы в первый послеаварийный год составил 2,5 %.

2. Ингаляционное поступление радионуклидов в организм человека.

Формирует 4,5 % дозы за счет внутреннего облучения организма. Аэрозольное загрязнение атмосферного воздуха можно разделить на 2 этапа:

а) относительно кратковременный — это момент выброса газо-аэрозольной струи в атмосферный воздух, формирование и перенос радиоактивных облаков до момента их осаждения на поверхность земли, воды, объекты окружающей среды, т. е. ингаляционное поступление радионуклидов из радиоактивного облака;

б) непрерывный — вторичное загрязнение атмосферы за счет ветрового подъема пыли.

Загрязнение приземного слоя атмосферы в результате ветровой эрозии почвы является дополнительным фактором загрязнения территории радионуклидами. Мельчайшие аэрозольные частички переносятся с воздухом на большие расстояния вследствие медленной седиментации. В ряде случаев перенос радиоактивной пыли обуславливал повторное загрязнение дезактивированных территорий. Особую опасность вторичное загрязнение атмосферы радионуклидами за счет ветрового подъема пыли представляет для населения, постоянно проживающего и работающего на загрязненной территории.

3. Внешнее гамма-излучение от осевших на земную поверхность и объекты окружающей среды радионуклидов (осадки также интенсивно вымывают радиоактивные вещества из атмосферы).

Облучение организма от осевших радионуклидов самое длительное и интенсивное. Оно формирует около 50–60 % дозы у населения.

Данный тип воздействия обусловлен, в основном, гамма-излучением цезия-137 и другими гамма-излучающими радионуклидами.

Основными факторами, уменьшающими внешнее гамма-излучение, являются:

- естественный распад радионуклидов;
- миграция радионуклидов вглубь почвы.

В настоящее время доза на организм человека формируется за счет долгоживущих радионуклидов цезия-137 с периодом полураспада 30 лет; стронция-90 — 29,1 лет; трития — 12 лет; углерода-14 — 5730 лет; плутония-239 — более 24000 лет.

Как показывают результаты исследований, проводимых на загрязненных территориях, миграция радионуклидов вглубь почвы незначительна. Основная масса цезия-137 спустя 12 лет после аварии сосредоточена в верхнем 5-сантиметровом почвенном слое. В обедненных гумусом дерново-подзолистых песчаных почвах максимум концентрации радиоцезия находится на глубине 3,5–4,5 см. Наиболее интенсивно вертикальная миграция протекает в торфяниках. Основная часть радиостронция (51–78 %) находится в поверхностных слоях (0–1 см) почвы, причем 2–5 % — растворимых. Ближайший и долгосрочный (50 лет) прогнозы показывают, что самоочищение

почв вследствие вертикальной миграции радионуклидов будет происходить крайне медленно.

Нахождение радионуклидов в корнеобитаемом слое, а также увеличение относительного количества обменного стронция в поверхностных слоях почв будут длительное время обуславливать интенсивную миграцию радионуклидов по пищевым цепочкам.

4. Попадание радионуклидов в организм по пищевым цепочкам. Для нашей республики этот тип воздействия радионуклидов имеет особое значение. Это связано с особенностями почв, преимущественно в Белорусском Полесье.

Среди загрязненных радионуклидами земель Беларуси больше половины составляют почвы легкого гранулометрического состава, характеризующиеся низкой емкостью поглощения, малым содержанием гумуса и вторичных глинистых минералов. В легких почвах республики радионуклиды цезия-137 и стронция-90 аномально подвижны, т. е. они плохо связываются частицами почвы и поэтому коэффициент перехода их в растения высокий. Хорошо фиксирует радионуклиды чернозем, глинистая почва, а в Белорусском Полесье почва песчаная, подзолистая, торфяно-болотная, т. е. легкая.

Указанные особенности Полесского региона имеют принципиальное значение и определяют высокие уровни накопления радионуклидов в местных продуктах питания и высокие дозовые нагрузки на организм проживающего там населения. Наглядным примером является Лельчицкий район Гомельской области, на территории которого встречаются почвы, разные по составу и по плотности загрязнения цезием-137 (табл. 4-3).

Таблица 4-3

Зависимость объемной активности молока от степени поверхностной активности по цезию-137

| Плотность загрязнения территории, Ки/км² | Содержание Cs-137 в молоке, Бк/л |
|--|---|
| 1,9 | 220 |
| 2,1 | 290 |
| 3,0 | 540 |
| 3,8 | 40 |
| 5,0 | 180 |
| 8,8 | 120 |

Такая же картина наблюдается в ряде других районов Гомельской области, в Столинском и Лунинецком районах Брестской области.

Особую опасность представляет попадание радиоактивных веществ внутрь организма человека. Концентрация их в том или ином органе тела человека может во много раз превысить таковую в окружающей среде.

Поведение радионуклидов в организме — пути и способы поступления, распределения по органам и системам (включая избирательное накопление), скорость и пути выведения — обусловлены их химическими свойствами.

Существует три основных пути поступления радиоактивных изотопов в организм:

- 1) *ингаляционный путь* — при вдыхании загрязненного радиоактивными аэрозолями воздуха;
- 2) *алиментарный* — через желудочно-кишечный тракт с водой и пищей;
- 3) *через кожу* — поврежденную и неповрежденную.

При вдыхании воздуха радиоактивные вещества, содержащиеся в нем, задерживаются на всем протяжении дыхательного тракта от преддверия носа до глубоких, альвеолярных отделов легких. При этом между размером частицы и глубиной ее проникновения установлена следующая зависимость: чем меньше диаметр вдыхаемых частиц, тем относительно меньше их задерживается в верхних дыхательных путях, в бронхах и тем больше проникает в альвеолярные отделы легких, где отсутствуют механизмы, способные выводить попавшие частицы в бронхи и трахею (табл. 4-4). Судьба радионуклидов, задержанных в разных отделах дыхательного тракта, неоднозначна. Радиоактивные вещества (растворимые или труднорастворимые), осевшие на слизистой верхних дыхательных путей, трахеи, бронхов быстро с помощью мерцательного эпителия переводятся в глотку и ротовую полость, откуда поступают в желудок. В альвеолярном отделе легких растворимые радионуклиды хорошо и быстро всасываются в кровоток, чему способствует широко развитая сеть капилляров.

Таблица 4-4

Задержка в легких частиц разной дисперсности

| Аэродинамический диаметр, мк | Коэффициент задержки, в % | |
|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | в верхних дыхательных путях | в альвеолярных отделах легких |
| 50 | 100 | 0 |
| 10 | 90 | 0 |
| 5 | 58 | 3 |
| 2 | 22 | 10 |
| 1 | 3 | 12–33 |
| 0,5 | 0 | 15–20 |
| 0,2 | 0 | 18–20 |
| 0,1 | 0 | 20–25 |
| 0,05 | 0 | 35–65 |

Радиоактивные вещества, которые при нормальном pH организма образуют радиоколлоиды или труднорастворимые гидроксиды, ведут себя по-иному. В этом случае радионуклиды фагоцитируются и распределяются

неравномерно в легочной ткани. После проникновения в лимфатические сосуды они поступают в лимфатические узлы легкого, трахеи и средостения. Процесс этот медленный. Еще медленнее происходит поступление радионуклидов в кровеносные сосуды. Однако общая величина труднорастворимых радиоактивных веществ, поступающих в организм через легкие, гораздо выше, чем через кишечник, из-за большой поверхности всасывания легких.

По скорости выведения из легких все радиоактивные элементы разделяются по времени биологического полувыведения (T_0) на три класса: Д (дни), Н (недели), Г (годы). К классу Д относятся растворимые соединения радиоактивных элементов 1 группы, а также соединения элементов 1-го, 2-го и отчасти 3-го периодов Периодической системы Д. И. Менделеева. Наиболее медленно, с периодом полувыведения более 1 года, удаляются из легких соединения меди, серебра, золота, цинка, кадмия, иттрия, актиния, циркония и металлы платиновой группы.

Через желудочно-кишечный тракт в организм поступают хорошо растворимые радионуклиды (водород, щелочные металлы, галогены, благородные газы, все элементы второго периода, кроме берилля). Хуже всасываются щелочноземельные элементы, а также цинк, кадмий и ртуть (табл. 4-5).

Таблица 4-5

Значения коэффициентов всасывания в желудочно-кишечном тракте химических элементов

| Химический элемент | Коэффициент всасывания | Химический элемент | Коэффициент всасывания |
|--------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Водород (H) | 1,0 | Медь (Cu) | 0,5 |
| Калий (K) | 1,0 | Цинк (Zn) | 0,5 |
| Рубидий (Rb) | 1,0 | Стронций (Sr) | 0,3 |
| Цезий (Cs) | 1,0 | Кадмий (Cd) | 0,1 |
| Углерод (C) | 1,0 | Золото (Au) | 0,1 |
| Азот (N) | 1,0 | Ртуть (Hg) | 0,4 |
| Фтор (F) | 1,0 | Свинец (Pb) | 0,2 |
| Хлор (Cl) | 1,0 | Полоний (Po) | 0,1 |
| Бром (Br) | 1,0 | Алюминий (Al) | 0,005 |
| Йод (I) | 1,0 | Цирконий (Zr) | 0,002 |
| Радон (Rn) | 1,0 | Америций (Am) | 0,001 |
| Уран (U) | 0,2 | Плутоний (Pu) | 0,0005 |

Плохорастворимые радионуклиды (коэффициент всасывания менее 0,01) покидают кишечник в течение 1–4 дней, не успевая создать значительные дозы облучения (элементы третьей группы, частично четвертой, пятой, лантаноиды, актиноиды). Эти элементы способны образовывать коллоиды и труднорастворимые гидроксиды, которые препятствуют их всасыванию в желудочно-кишечном тракте. Зато та часть радионуклида, которая попала в организм, по типу коллоидальной адсорбции очень прочно удерживается в тканях. Период биологического полувыведения из организма для таких радионуклидов в большинстве случаев составляет десятки лет.

Проницаемость кожи для радиоактивных веществ зависит от агрегатного состояния радионуклидов, склонности их к гидролизу и комплексообразованию, кислотности раствора, в котором находятся радиоактивные вещества, и состояния кожного барьера. Водорастворимые и жирорастворимые соединения радионуклидов всасываются через кожу быстро, скорость их проникновения сравнима со скоростью всасывания в кишечнике. Наибольшая скорость проникновения — у йода-131. Достаточно активно проникают в кожу изотопы молибдена, трития и элементов I и VI групп. В некоторых случаях через кожу всасывается большее количество радионуклида, чем через кишечник. Это прежде всего относится к элементам III группы Периодической системы элементов. Количество радиоактивных веществ, проникающих через кожу в организм, зависит от длительности ее контакта с радиоактивным веществом и целостности. Следовательно, своевременная дезактивация кожных покровов необходима. Самый простой метод дезактивации — обильная обработка кожных покровов водой и моющими средствами.

Особенность поведения в организме химических элементов — достаточно постоянное и строгое распределение по их системам, органам и тканям. Стабильные и радиоактивные изотопы одних и тех же элементов абсолютно одинаково ведут себя в организме, поэтому накапливаются они в одних и тех же органах и тканях. Различают несколько типов распределения радионуклидов в организме:

- равномерный (Cs-137, C-14, H-3, Ru-106);
- скелетный (Sr-90, Zr-95, Ce-144, Pu-239, Am-241, Ra-226, Pb-210);
- щитовидный (I-131);
- ретикуло-эндотелиальный (Pu-239, Am-241, Zn-65, Fe-55);
- почечный (U-238, Pb-210, Be-7).

В основу распределения положены принципы максимального или преимущественного содержания радионуклида в органе. Так, распределение считается равномерным, если более половины обнаруженного в организме радионуклида распределено равномерно. Данный тип распределения

характерен для химических элементов I группы, II побочной группы, III главной подгруппы Периодической системы Д. И. Менделеева, за исключением серебра, поступающего преимущественно в печень вследствие коллоидообразования в условиях организма. Все элементы II главной подгруппы и III побочной подгруппы — остеотропные радионуклиды. Кроме того, лантаноиды и актиноиды распределяются по ретикулоэндотелиальному типу. Для таких элементов как висмут, уран, кадмий, мышьяк характерен почечный тип распределения.

Описанные типы распределения в организме касаются только той доли радионуклидов, которые поступают в кровь. Совершенно иной тип распределения в организме радионуклидов наблюдается при их ингаляционном поступлении. В этом случае, как правило (особенно в начальной фазе, а для некоторых радиоактивных элементов всегда), содержание и концентрация максимальны в легких.

Радиотоксичность — свойство радиоактивных изотопов вызывать большие или меньшие патологические изменения при попадании их в организм. Радиотоксичность обусловлена рядом факторов: 1) видом радиоактивного превращения; 2) средней энергией одного акта распада; 3) схемой радиоактивного распада; 4) путями поступления радионуклида в организм; 5) типом распределения радионуклида в организме; 6) временем пребывания радионуклида в организме; 7) продолжительностью времени поступления в тело человека.

Время пребывания радионуклида в организме определяется длительностью облучения тканей, в котором локализован изотоп. Это время зависит от периода полураспада изотопа ($T_{1/2}$) и от скорости его выведения из организма, которая характеризуется периодом полувыведения (T_6), т. е. временем в течение которого из организма выводится половина введенного радионуклида.

Эффективный период ($T_{эфф}$) — время, в течение которого активность изотопа в организме уменьшается вдвое. Эффективный период рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{эфф} = \frac{T_{1/2} \cdot T_6}{T_{1/2} + T_6}$$

Из огромного количества выброшенных при аварии на ЧАЭС в окружающую среду радиоактивных веществ выделяют группу основных дозообразующих радионуклидов:

- углерод-14 (C-14);
- цезий-137 (Cs-137);
- тритий (H-3);
- йод-131 (I-131);

- цирконий-95 (Zr-95);
- рутений-106 (Ru-106);
- стронций-90 (Sr-90);
- церий-144 (Ce-144);
- плутоний-239 (Pu-239);
- америций-241 (Am-241);
- «горячие частицы».

УГЛЕРОД-14

По своим физическим свойствам является бета-излучателем. $T_{1/2}$ — 5730 лет. В окружающую среду попадает в результате испытаний ядерного оружия как космогенный радионуклид и с выбросами АЭС. Соединения его растворимы, в организм поступает через желудочно-кишечный тракт в основном по пищевым цепочкам, вклад ингаляционного пути не превышает 1 %. Распределяется в организме равномерно. Период биологического полувыведения из организма составляет около 200 дней. Углерод-14 вызывает трансмутационный эффект: встраиваясь в азотистые основания нуклеиновых кислот, углерод при распаде превращается в стабильный азот-14, что вызывает изменение структуры азотистых оснований, в результате чего меняется смысл генетического кода. Эти изменения не поддаются репарации, и их доля составляет 10 % от всех мутаций. Эффективный период равен 0,53 года.

ЦЕЗИЙ — 137

Принадлежит к бета- и гамма-излучателям. $T_{1/2}$ — 30 лет. Очень летуч, поэтому загрязнил обширные территории в нашей стране и в мире в целом. Соединения его хорошо растворимы. В организм поступает через ЖКТ. Основные загрязненные продукты — молоко, мясо, овощи. По химическим свойствам похож на калий, поэтому может его заменять. Распределяется в организме равномерно. Цезий хорошо сорбируется частицами почвы и удерживается (особенно черноземами), но в песчаных почвах он очень подвижен, т. е. коэффициент перехода его в растения высокий. В водной среде процессы миграции и накопления цезия идут интенсивнее, поэтому в рыбе он накапливается в значительных количествах. Период биологического полувыведения: для взрослых — 100 дней, у детей до 15 лет — 50 дней, до 5 лет — 20 дней. Эффективный период для взрослых — 0,26 года, для детей до 15 лет — 0,13 года, для детей до 5 лет — 0,05 года.

СТРОНЦИЙ — 90

Распадается по типу бета-превращения атомных ядер. $T_{1/2}$ — 29 лет. Конечный продукт распада — радиоактивный иттрий-90, тоже является бета-излучателем, но с коротким периодом полураспада — 64 часа и высокой энергией излучения. Иттрий-90 избирательно накапливается в гонадах, создавая значительную дозу облучения. Стронций-90 менее летуч, загрязнил меньшую территорию. Как и цезий, плохо фиксируется почвами. Имея

хорошую растворимость, стронций легко вымывается из почвы и попадает в водоемы, где активно накапливается гидробионтами.

По химическим свойствам близок к кальцию, поэтому накапливается в зонах роста костей, представляя тем самым опасность для детей. Процент всасывания стронция зависит от ряда факторов:

- возраста (у детей процент всасывания выше);
- физиологического состояния организма (период беременности, лактации);
- приема витамина D (витамин ускоряет всасывание стронция);
- количества поступающего в организм Ca;
- пола (у мужчин всасывание происходит активнее).

Основные продукты, содержащие стронций — цельное молоко, костные бульоны, злаковые, рыба.

У экспериментальных животных стронций-90 вызывает нарушения в процессе развития плода и новорожденного. Из общих аномалий в первые дни постнатального развития отмечается асфиксическое состояние, дистрофия, отеки, патологические изменения в сосудистой системе. Самый частый тип аномалий — подкожная гематома, из локальных аномалий чаще всего встречаются аномалии сердца и кости. Хронические эффективные дозы, не вызывающие значительного сокращения продолжительности жизни, оказывают существенное влияние на состояние функции печени и почек, нейроэндокринную систему, иммунную реактивность, сперматогенез, овогенез. В отдаленные сроки после поражения как при однократном, так и при длительном поступлении радионуклидов развиваются опухоли костей и лейкозы.

При комбинированном действии стронция-90 и йода-131 оказывается влияние на репродуктивную функцию, кроветворную систему, продолжительность жизни. При комбинированном воздействии стронция-90 и плутония-239 у лабораторных животных эффект повреждения не только суммируется, но выявляется раньше, чем при изолированных воздействиях. Отмечается увеличение частоты остеосарком, сокращение латентного периода их развития, повышение частоты лейкозов, более выраженное изменение периферической крови, сокращение продолжительности жизни.

Период биологического полувыведения — около 20 лет.

Эффективный период — 11,8 лет.

Тритий

Мягкий бета-излучатель с $T_{1/2}$ — более 12 лет. Образуется в верхних слоях атмосферы как космогенный радионуклид, а также выделяется при термоядерных реакциях. Соединения трития растворимы. В организм поступает через желудочно-кишечный тракт, частично через легкие. Распределяется в

организме равномерно. Период биологического полувыведения — 10 суток для свободного трития, 450 суток — для связанного. Летом период биологического полувыведения уменьшается из-за усиленного водного обмена. Эффективный период для свободного трития — 0,03 года, для связанного — 1,12 года.

Йод — 131

Относится с бета- и гамма-излучателям с $T_{1/2}$ около 8 дней. В организм попадает всеми известными способами — через желудочно-кишечный тракт, легкие, неповрежденную кожу. Токсичность радионуклида при ингаляционном поступлении примерно в 2 раза выше, что связано с большей площадью контактного β -облучения.

Обладает большой миграционной способностью — легко проникает в овощи, ягоды, молоко, водоросли, рыбу. Накапливается в щитовидной железе. Накопление зависит от возраста и количества стабильного йода. При поступлении меньших количеств йода-131 отмечается нарушение функции щитовидной железы, незначительные изменения в картине крови, некоторых показателей обмена и иммунитета. При дозе несколько грей выявлено повышение функциональной активности щитовидной железы в ближайший период, которое в дальнейшем может сменяться состоянием гипофункции. Функциональные нарушения проявляются не только уменьшением секреции гормонов, но и снижением их биологической активности. Повреждение щитовидной железы связано не только с непосредственным действием радионуклида на тиреоидный эпителий, но и повреждением сосудов и особенно радиоиммунными нарушениями. Опасность облучения щитовидной железы в дозах десятки сантигрей связывают с бластомогенными эффектами. Статистически значимое учащение опухолей железы отмечено при дозе облучения 0,5 Гр.

Биологическое действие йода-125 по сравнению с йодом-131 специфично. Его распад происходит в результате К-захвата, который сопровождается каскадом фотонов характеристического рентгеновского излучения и низкоэнергетических Оже-электронов. Значительная часть этой энергии поглощается коллоидом фолликулов и той частью тиреоидного эпителия, где локализованы синтез и секреция гормонов. Ядра клеток облучаются в меньшей мере. Вследствие этого по показателю функционального состояния железыйод-125 эффективнее йода-131, а по показателю гибели клеток и развитию склеротических процессов — менее эффективен.

Йод-131 в организме беременной женщины легко проходит плацентарный барьер к плоду. С увеличением срока беременности уровни перехода повышаются. В щитовидной железе накапливается до 50–60 % йода, содержащегося в теле плода, таким образом в железе плода формируются дозы, в десятки раз большие, чем в железе беременной женщины.

Основным путем выведения йода из организма являются почки. Йод выводится также с калом, а также с женским молоком в период лактации.

Период биологического полувыведения — 138 суток. Эффективный период — 0,019 года.

Плутоний-239 и америций-241 относятся к группе трансурановых элементов.

ТРАНСУРАНОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ — химические радиоактивные элементы, расположенные в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева после урана-238, то есть с атомным номером (Z) более 92. Получены трансурановые элементы путем бомбардирования тяжелых элементов (урана, тория или протактиния) нейтронами. Известно 14 трансурановых элементов, синтезированных с помощью ядерных реакций. С увеличением Z период полураспада трансурановых элементов резко уменьшается.

ПЛУТОНИЙ — 239

Является смешанным α - и γ -излучателем. $T_{1/2}$ — 24000 лет. Загрязнение биосферы плутонием происходит при:

- аварийных выбросах предприятий, перерабатывающих ядерное горючее;
- при эксплуатации АЭС;
- при испытании ядерного оружия.

Плутоний не имеет стабильных изотопов. Основное количество плутония из чернобыльского выброса седиментировало в 30-километровой зоне и Гомельской области. Наиболее загрязнены Брагинский, Светлогорский и Рогачевский районы.

Соединения плутония плохо растворимы. Поступает в организм, в основном, ингаляционным путем, создавая тем самым значительную нагрузку на легкие за счет альфа-излучения. Тип распределения — скелетный, частично — ретикуло-эндотелиальный (лимфоузлы, печень). У детей первого года жизни всасываемость плутония в 10 раз выше, чем у взрослых.

Отмечена тропность плутония к органическому матриксу кости. С течением времени плутоний перемещается в неорганическую часть кости и «замуровывается». Некоторое количество плутония захватывается макрофагами и переходит в костный мозг. Острое лучевое поражение у лабораторных животных характеризуется резким сокращением продолжительности жизни, падением массы тела, развитием геморрагического синдрома, угнетением костномозгового кроветворения, некробиотическими изменениями внутренних органов. При подостром лучевом поражении характерно сочетание атрофических, дегенеративных и репаративных процессов. Отмечается существенное сокращение продолжительности жизни, изменения со стороны

сосудистой системы, умеренное угнетение костно-мозгового кроветворения, атрофические и дегенеративные изменения внутренних органов. Основной неопухоловой формой отдаленных последствий является развитие пневмосклероза. При этом частота, тяжесть, распространенность процесса возрастают с увеличением поглощенной дозы, а латентный период уменьшается. Опухоли легких развиваются в широком диапазоне доз от 0,04 до 20 Гр. В случае замены в рационе у экспериментальных животных питьевой воды на молоко экскреция с мочой плутония-239 возрастает в 2–10 раз, с калом — в 225 раз. Характер действия молока напоминает действие эффективного комплексообразователя.

Период биологического полувыведения — 197 лет. Эффективный период — 195,4 года.

АМЕРИЦИЙ — 241

Распадается с испусканием высокоэнергетических альфа-частиц. $T_{1/2}$ — 433 года. Стабильные изотопы не известны. Является дочерним продуктом распада плутония-241 ($T_{1/2}$ — 14,4 года), но его соединения более растворимы и более подвижны. Основной путь поступления — ингаляционный. Химические соединения америция быстро перемещаются из легких в кровь с T_6 от нескольких дней до нескольких недель. Затем накапливается в скелетной ткани, частично в печени, почках, селезенке. Период биологического полувыведения — 194 года.

В настоящее время и в ближайшие десятилетия серьезную угрозу для здоровья населения (наряду с цезием-137 и стронцием-90) будет представлять Am-241, накапливающийся в окружающей среде в результате распада Pu-241.

Соединения америция обладают большой растворимостью и, следовательно, большой миграционной способностью. Острое лучевое поражение лабораторных животных характеризуется ранней аплазией костно-мозгового кроветворения, геморрагическим синдромом, некробиотическими изменениями в паренхиматозных органах, резким сокращением продолжительности жизни. Подострое лучевое поражение характеризуется гипоплазией костно-мозгового кроветворения, некротическими и склеротическими изменениями органов депонирования, существенным уменьшением продолжительности жизни. Основной формой неопухоловых отдаленных последствий является развитие пневмосклероза и цирроза печени. Основная опухолевая патология при инкорпорации америция-241 — опухоли легких и остеосаркомы. Частота опухолей легких и скелета, рассчитанная на 1 Гр, увеличивается с уменьшением поглощенной дозы в органе. Эффективный период — 133,97 года.

«ГОРЯЧИЕ» ЧАСТИЦЫ

«Горячие» частицы — это аэрозоль диспергированного ядерного топлива. Они бывают различной величины, активности и радионуклидного состава.

После аварии «горячие» частицы разнеслись атмосферным воздухом на значительные расстояния, но основная масса их сосредоточилась в зоне отчуждения и Гомельской области. Так, в образцах растительности и почвы из Брагина и Хойников, определялось до 1000 «горячих» частиц в 1 кг образца.

В организм частицы попадают прямым аэрозольным путем (первые месяцы после аварии). Доминирующий путь в настоящее время — ингаляционное поступление при вторичном загрязнении воздуха пылью с объектов окружающей среды. Возможен и алиментарный путь поступления.

Основное количество активных частиц (до 70 %) находится в верхнем 1 см слое почвы. Проведенный анализ воздушных фильтров показал, что 10 м³ воздуха в районе Мозыря, Гомеля, Бреста содержат до нескольких сотен активных частиц. Обнаружены они и на планшетах, установленных во многих других населенных пунктах республики.

«Горячие» частицы представляют опасность для всего живого ввиду высокой концентрации в них радионуклидов с разными видами излучений.

Чернобыльская катастрофа оказала воздействие на все сферы жизнедеятельности населения республики. Из сельскохозяйственного оборота выведено более 260 тыс. га самых плодородных пахотных земель; ликвидировано 54 колхоза и совхоза; прекратили хозяйственную деятельность около 300 объектов народнохозяйственного комплекса, свыше 600 школ и детских садов, около 100 больниц, свыше 500 объектов торговли, общественного питания и бытового обслуживания. Резко сократились посевные площади из-за различных уровней загрязнения территории, снизился сбор сельскохозяйственных культур.

Значительно уменьшены размеры пользования лесными ресурсами: более четверти лесного фонда республики загрязнено радионуклидами (а в Гомельской области — 51,6 %, в Могилевской — 36,4 %).

Ущерб, нанесенный республике чернобыльской катастрофой, оценивается в 32 бюджета республики (1985 г.).

В июле 1990 г. Верховный Совет республики объявил Беларусь зоной национального радиационного экологического бедствия. Это означает, что последствия глобальной ядерной аварии, приведшей к неблагоприятным изменениям экологической обстановки и условий обитания человека, создают возможность острых или хронических поражений людей, животных, растений, а также приносят материальный ущерб, превышающий годовой национальный доход республики.

Особенностью формирования доз облучения населения, проживающего на загрязненных территориях, является:

1) пролонгированное внешнее и внутреннее облучение за счет долгоживущих радионуклидов (Cs, Sr, Pu) в дополнение к дозам, сформировавшимся на раннем этапе аварии за счет короткоживущих радионуклидов, особенно радиоизотопов йода;

2) определенная часть населения вынуждена жить на загрязненных радионуклидами территориях, используя в пищу продукты местного производства, которые формируют основную дозовую нагрузку на организм (более 80 %). При этом сельские жители получают гораздо большие дозовые нагрузки, чем городские.

При одинаковом питании с взрослыми дети получают в 3–5 раз большие дозовые нагрузки в силу меньшего веса и более активных обменных процессов в детском организме.

Каждая радиационная авария, ведущая к выходу радиоактивных веществ из реактора, имеет свои особенности по характеру и интенсивности воздействия радиационного фактора на население. Этими особенностями обуславливаются и конкретные защитные мероприятия. Принципы, заложенные в основу проведения всех защитных мероприятий, сводятся к следующему:

1. Следует исключить какую-либо возможность возникновения у населения лучевой болезни.

2. Риск возникновения у человека отдаленных эффектов действия радиации должен быть снижен настолько, насколько это практически достижимо.

Один из первых шагов по ликвидации последствий аварии — действия по установлению загрязнения продуктов питания, питьевой воды, значений мощности экспозиционной дозы в местах проживания и трудовой деятельности населения не только пострадавших районов, но и на территории всей республики. В апреле–мае 1986 года мощности экспозиционных доз в южных районах Беларуси достигали десятков миллирентген в час, то есть превышали в тысячи раз естественный фон Беларуси до аварии (табл. 4-6).

Анализ дозовых нагрузок, проведенный Минздравом, штабом ГО, правительственной комиссией по ликвидации последствий аварии на ЧАЭС, явился основанием для эвакуации части населения из загрязненных радионуклидами территорий.

Таблица 4-6

Значения мощности экспозиционной дозы (мР/ч) в некоторых населенных пунктах непосредственно после катастрофы на ЧАЭС

| Населенный пункт | 27.04.86 г. | июнь 1986 г. |
|-------------------------|--------------------|---------------------|
| Брагин | 48,0 | 0,5 |
| Чечерск | 10,0 | 0,2 |
| Славгород | 2,0 | 0,1 |

С мая 1986 года правительственной комиссией устанавливались Временные нормативы по дозовым нагрузкам для населения (мЗв/год):

| | |
|---------------|--------|
| 1986–1987 гг. | — 100; |
| 1988 год | — 30; |
| 1989–1990 гг. | — 25; |
| 1991 год | — 5; |
| 1993 год | — 3; |
| 1995 год | — 2; |
| 1998 год | — 1. |

При этом предполагалось, что 50 % дозы формирует внешнее облучение, 50 % — внутреннее.

Таблица 4-7

Нормируемые величины содержания цезия-137 в некоторых продуктах питания (Бк/кг) в различные периоды после аварии на ЧАЭС

| Наименование продукта | ВДУ-88 | РКУ-90 | РДУ-92 | РДУ-96 |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Вода питьевая | 18,5 | 18,5 | 18,5 | 18,5 |
| Молоко | 370 | 185 | 111 | 111 |
| Говядина, баранина | 2960 | 592 | 600 | 370 |
| Свинина, птица, рыба, яйца | 1850 | 592 | 600 | 370 |
| Жиры растительные и животные, маргарин | 370 | 185 | 185 | 185 |
| Картофель, корнеплоды | 740 | 592 | 370 | 100 |
| Овощи и бахчевые | 740 | 185 | 185 | 100 |
| Фрукты и садовые ягоды | 740 | 185 | 185 | 100 |
| Хлеб и хлебобродуки | 370 | 370 | 185 | 74 |
| Мука, крупа, сахар | 370 | 370 | 370 | 100 |
| Консервы плодово-ягодные | 740 | 185 | 185 | 74 |
| Дикорастущие ягоды | — | 185 | 185 | 185 |
| Грибы свежие | 1480 | 370 | — | 370 |

| | | | | |
|-------------------------|-------|------|------|------|
| Грибы сухие | 11100 | 3700 | 3700 | 3700 |
| Детское питание | 1850 | 37 | 37 | 37 |
| Прочие продукты питания | — | 592 | 370 | 370 |

Исходя из этих значений с учетом рационов питания Минздравом СССР, а затем Минздравом Беларуси устанавливались временные допустимые уровни (ВДУ-86, ВДУ-88) и республиканские допустимые уровни (РКУ-90, РДУ-92, РДУ-96) содержания радионуклидов в продуктах питания (табл. 4-7).

Правительством республики были разработаны Программы по ликвидации в Беларуси последствий катастрофы на ЧАЭС на 1990–1995 гг., а также на 1996–2000 гг. Основной задачей этих программ является создание безопасных для здоровья человека условий жизнедеятельности в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Верховным Советом республики приняты Законы:

1. «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС» (22.02.1991 г., дополнение от 11.12.1991);
2. «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС» (12.11.1991 г.).

Закон «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС» имеет следующие основные положения:

- 1) устанавливает правовой режим территорий РБ, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС;
- 2) его мероприятия направлены на снижение радиационного воздействия на население и экологические системы;
- 3) предусматривает проведение защитных и природовосстановительных мероприятий;
- 4) предусматривает рациональное использование хозяйственного потенциала этих территорий.

Основными принципами проживания населения на загрязненной радионуклидами территории являются следующие:

1. Любая доза радиации не является безопасной для живого организма, что требует принятия мер по ее снижению.
2. Необходимо учитывать возможность суммации повреждающего действия на организм излучения и действия ксенобиотиков.
3. Индивидуальный подход к условиям проживания в каждом населенном пункте из-за сложившейся различной радиоэкологической обстановки и психо-эмоционального состояния людей.

Согласно данному Закону вся загрязненная радионуклидами территория РБ делится на зоны:

1. **Зона эвакуации** (отчуждения, 30-километровая зона).
2. **Зона первоочередного отселения** — плотность загрязнения радионуклидами цезия-137 более **40 Ки/км²**.
3. **Зона последующего отселения** — с плотностью загрязнения территории **15–40 Ки/км²**.
4. **Зона с правом на отселение** — с поверхностной активностью **5–15 Ки/км²**.
5. **Зона периодического радиационного контроля** — с плотностью загрязнения **1–5 Ки/км²**.

Обозначение зон свидетельствует о том, что первоначальным критерием для отселения людей была плотность загрязнения территории радионуклидами, начиная с активности 15 Ки/км² и выше. Существует определенная корреляция между плотностью загрязнения территории радионуклидами и сформированной дозой на организм человека. Однако вследствие особенностей почв нашей республики не всегда эта закономерность поддерживается. Население отдельных районов Гомельской и Могилевской областей (особенно Белорусское Полесье) получает значительные дозовые нагрузки на организм за счет внутреннего облучения, проживая на территориях, незначительно загрязненных радионуклидами. Поэтому сейчас ведущим критерием для отселения людей являются дополнительные дозовые нагрузки на организм человека, которые формируются сверх доз, зависящих от естественного радиационного фона.

Основным показателем оценки территории, где условия проживания и трудовая деятельность населения не требует каких-либо ограничений, является дополнительная эффективная эквивалентная доза облучения не более **1 мЗв/год** (сверх дозы от естественного фона). Если формируется дополнительная доза облучения от 1 до 5 мЗв/год, необходимо проведение комплекса адекватных защитных мероприятий. При дополнительной дозовой нагрузке 5 мЗв/год и выше необходимо отселение.

Подводя итог всему сказанному, следует отметить, что радиационная обстановка в регионах, пострадавших при аварии на Чернобыльской АЭС, до настоящего времени остается сложной. Неоднозначность радиоэкологической обстановки, сложность социально-психологической ситуации, упущения при реализации защитных мер привели к тому, что спустя столько лет все еще продолжаются работы по ликвидации ее последствий.

ГЛАВА 5

Медико-биологические последствия облучения. Структура заболеваемости и диспансеризация населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях

В конце XIX столетия были открыты явление радиоактивности и рентгеновское излучение. Применение этих открытий в практике, использования ядерной энергии в мирных и военных целях привело к накоплению знаний о медицинских последствиях облучения. Сюда следует включить наблюдения за 90000 пострадавших в результате бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, наблюдения за больными с анкилозирующим спондилитом, прошедшими курс рентгенотерапии (14000 случаев), наблюдение за пациентами, страдающими грибковыми заболеваниями кожи головы, подвергнутыми также рентгенотерапии (27000 пациентов), наблюдения за гинекологическими больными, прошедшими курс радиотерапии (83000 случаев), наблюдение за пострадавшими после Южно-Уральской катастрофы (28000 человек) и др. Ниже описываются данные о последствиях действия ионизирующей радиации на человека.

Как указывалось выше, в развитии радиационных повреждений можно выделить 4 фазы: три короткие, связанные с нарушениями на молекулярном уровне и четвертая — длинная, в течение которой развиваются изменения на уровне клетки, ткани, органа и организма. В свою очередь, сформировавшиеся на 4-й фазе последствия делятся по времени на *ближайшие или ранние* и *отдаленные или поздние*, а по характеру проявления — на **детерминированные (ранее обозначаемые как нестохастические), стохастические и генетические**.

Ближайшие появляются спустя часы, дни или недели после облучения. Отдаленные — спустя годы или даже десятки лет.

Детерминированные (от латинского — *определять*) эффекты возникают в организме вскоре после облучения и, следовательно, являются ближайшими.

Стохастические (от латинского — случайный, вероятностный) эффекты — последствия радиационного воздействия возникают в отдаленные сроки после облучения (отдаленные последствия). Они носят вероятностный характер и могут быть обнаружены при длительном наблюдении больших контингентов (когорт) людей.

Генетические эффекты — последствия, связанные с повреждением половых клеток. Они проявляются в последующих поколениях (отдаленные последствия) и носят также вероятностный характер.

Между перечисленными эффектами имеется несколько различий.

Отличительными особенностями проявления биологических последствий является наличие порога для детерминированных эффектов и его отсутствие для стохастических и генетических. Отсюда следует, что риск возникновения детерминированных эффектов может быть сведен к нулю путем снижения дозы облучения ниже пороговых значений. Риск же возникновения стохастических и генетических эффектов не может быть сведен к нулю, но может быть уменьшен снижением дозы облучения.

Тяжесть проявления детерминированных эффектов зависит от индивидуальной дозы, которая была получена пострадавшим в результате облучения.

Дозовая зависимость для стохастических эффектов проявляется не в изменении тяжести заболевания, а в увеличении частоты той или иной патологии. При этом значение имеет не индивидуальная, а коллективная доза облучения на определенную популяцию или когорту лиц.

К настоящему времени известна вероятность заболевания раком при получении человеком поглощенной дозы в 1 Гр. Известно также, что радиационный риск при полном отсутствии облучения равен нулю. Однако мало что известно о действии промежуточных доз, поэтому следует попытаться экстраполировать известные оценки риска при больших дозах облучения на область **малых доз**.

Малыми дозами для данного вида организмов называют дозы, при которых выявляется обратная реакция объекта по сравнению с реакцией, вызываемой в области поражающего действия этого же вида радиации. Область малых доз лежит, как правило, на 2 порядка ниже LD_{50} для данного объекта. Так как для человека LD_{50} лежит в диапазоне 3–5 Гр (среднее значение 4 Гр), область малых доз будет составлять значения поглощенных доз меньше, чем 0,04 Гр.

На рисунке 5-1 показаны три способа упомянутой экстраполяции. В общем случае все возможные виды зависимостей можно условно отнести к одному из трех типов. Первый тип зависимости (1) графически представляет собой прямую; это означает, что вероятность заболевания увеличивается прямо пропорционально дозе облучения. Второй тип зависимости (2) представлен

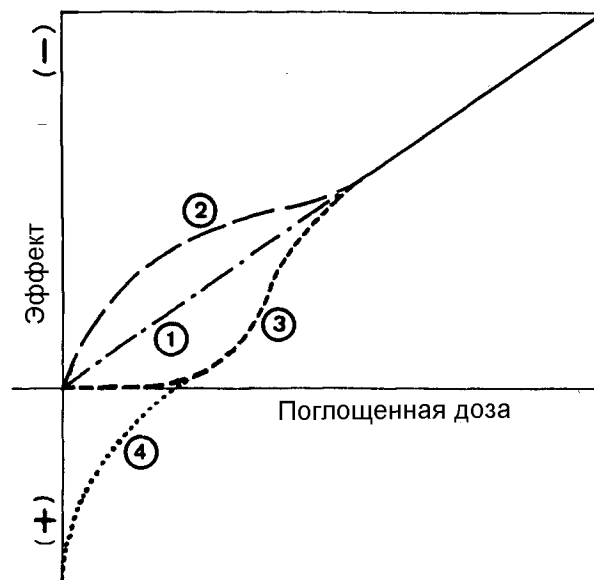


Рис. 5-1. Способы экстраполяции стохастических эффектов в область малых доз

выпуклой кривой и предполагает, что с увеличением дозы вероятность заболевания быстро растет при малых дозах и медленнее при больших. Третий тип зависимости (3) представлен вогнутой кривой и предполагает, что с увеличением дозы вероятность заболевания возрастает медленнее при малых дозах, чем при больших. Кривая (3) может быть продолжена до пересечения с осью ординат в области положительных эффектов (4), что позволяет предполагать возможность предупреждения малыми дозами онкологических заболеваний. Этот эффект получил название *радиационного гормезиса*.

В настоящее время общепринятым является допущение о линейной зависимости вероятности заболевания от дозы, т. е. зависимости типа (1).

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ЭФФЕКТЫ

В основе механизма возникновения детерминированных эффектов после облучения лежит превышение количества погибших клеток над числом вновь образованных. Если ткань жизненно важна и существенно повреждена, то конечным результатом может быть смерть организма. Клинические проявления детерминированных эффектов определяются специфической функцией облученной ткани. Это связано с тем, что наряду с гибелью функциональных клеток органа или ткани, могут быть повреждены сосуды, кровоснабжающие данную ткань, что приведет к вторичному повреждению ткани. Возможно также замещение функциональных клеток фиброзной тканью. Некоторые из детерминированных эффектов могут быть обратимы при условии, что повреждение не слишком тяжелое. Примером таких функциональных эффектов являются:

- уменьшение секреции экзо- и эндокринных желез (например, слюнных);

- неврологические эффекты (например, изменение ЭЭГ);
- сосудистые реакции (например, ранняя эритема или подкожный отек).

К детерминированным эффектам относят:

- Опустошение красного костного мозга, проявление лучевой болезни.

Клинически значимое подавление кроветворения при остром облучении наблюдается при превышении порогового значения поглощенной дозы 0,15 Гр. При протяженном облучении в течение многих лет порог мощности дозы превышает 0,4 Гр/год. При остром равномерном облучении однородной группы людей без высококачественного медицинского обслуживания ЛД₅₀ за 60 суток для развития костно-мозгового синдрома составляет примерно 3–5 Гр.

- Нарушение репродуктивной функции. Порог для временной стерильности мужчины при однократном облучении семенников составляет около 0,15 Гр. В условиях протяженного облучения порог мощности дозы составляет примерно 0,4 Гр/год. Соответствующие значения для постоянной стерильности составляют от 3,5 до 6 Гр и 2 Гр/год. Порог для постоянной стерильности женщины при остром облучении находится в интервале от 2,5 до 6 Гр, причем с возрастом женщины чувствительность увеличивается. При протяженном облучении в течение многих лет пороговая мощность дозы превышает 0,2 Гр/год.

- Лучевая катаракта. Помутнение хрусталика, вызванное облучением, можно отличить от катаракты, вызванной другими причинами, только на ранних стадиях. На поздних стадиях определить причину развития катаракты уже невозможно. Рисунок 5–2 иллюстрирует схему помутнения хрусталика после действия радиации. Поддерживает функцию хрусталика прозрачный слой эпителиальных клеток на внутренней стороне капсулы, который медленно смещается в радиальном направлении к центру за счет деления клеток на периферии (экваторе) хрусталика. Именно эти клетки особенно чувствительны к радиации. По неизвестным еще причинам, поврежденные клетки мигрируют к тылу хрусталика. Они поглощают световые лучи, что приводит к помутнению.



Рис. 5-2. Схема формирования лучевой катаракты

При остром воздействии излучений с малой ЛПЭ порог для помутнения хрусталика, достаточного для ослабления зрения, лежит в диапазоне от 2 до 10 Гр (рис. 5-3). Для излучений с большой ЛПЭ (в частности, нейтронов) порог поглощенной дозы в 2-3 раза ниже. При протяженном многолетнем облучении порог мощности дозы выше 0,15 Гр/год. Первые клинические проявления развиваются спустя 4-13 лет. Длительность латентного периода увеличивается с возрастом облученного.

- Неопухолевые формы поражения кожи:
 - лучевой дерматит;
 - изменения пигментации;
 - уплотнение и атрофия эпидермиса, атрофия или фиброз дермы;

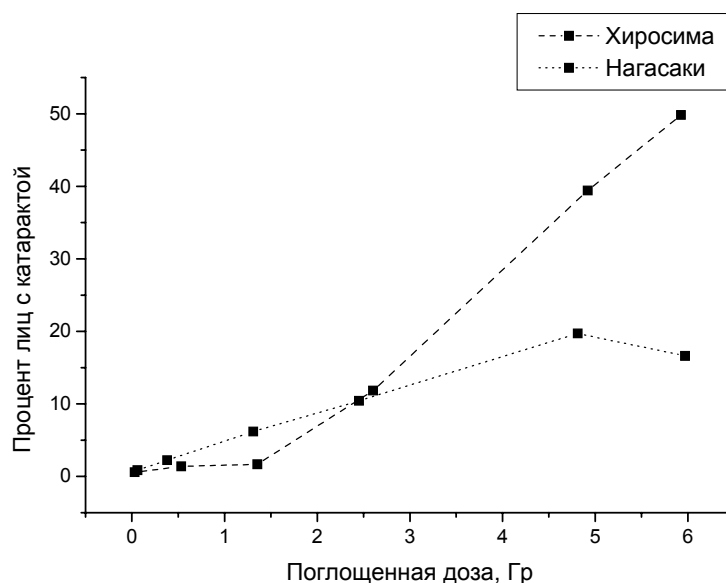


Рис. 5-3. Распространенность катаракты среди облученных лиц в зависимости от полученной дозы

- хроническое изъязвление;
- дисфункция потовых и сальных желез;
- повышенная чувствительность кожи к травме;
- поседение и выпадение волос.

На рисунке 5-4 изображена зависимость между поглощенной дозой и значительной эпиляцией волос (2/3 поверхности головы). Как видно из

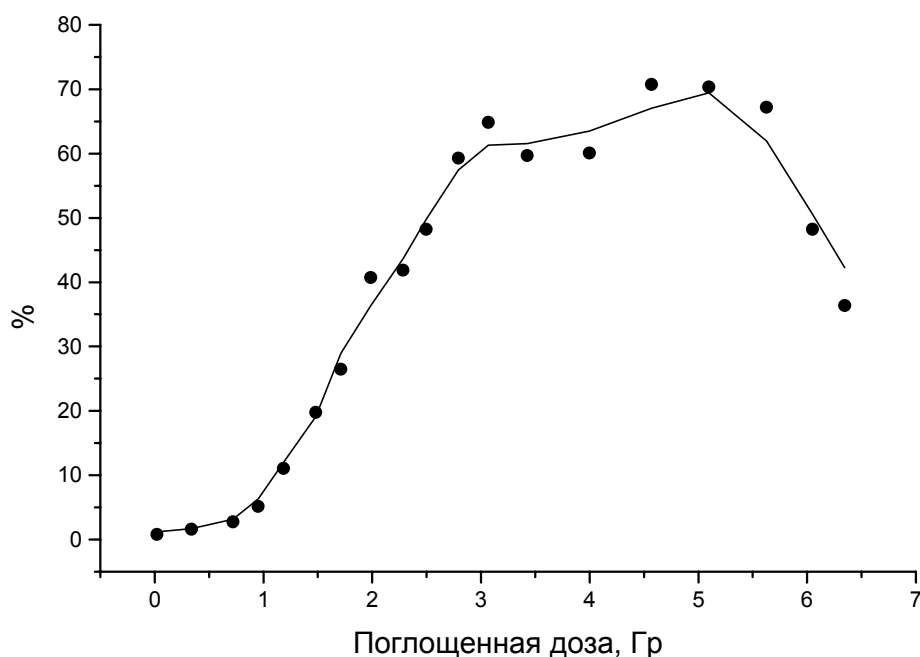


Рис. 5-4. Зависимость между дозой ионизирующего излучения и эпиляцией волос

иллюстрации, при дозе менее 1 Гр потеря волос незначительная. При дозах более 5 Гр эффект не выражен, так как эти дозы являются летальными.

- Сокращение продолжительности жизни. В качестве порога для этого эффекта у млекопитающих называют дозу 0,04 Гр. По расчетам, при облучении человека в больших дозах сокращение продолжительности жизни составит 1–15 сут на каждую 0,01 Гр при однократном облучении. Показано, что сокращение продолжительности жизни у облученных в малых дозах групп людей связано с избыточной смертностью от вызванных облучением опухолей, лейкозов; т. е. это сокращение продолжительности жизни вследствие развития стохастических эффектов. В то же время считают (НКДАР ООН, 1982 г.), что облучение в дозах до 0,01 Гр в неделю не вызывает поддающегося обнаружению неспецифического сокращения продолжительности жизни.

Суммарная зависимость детерминированных эффектов от дозы облучения показана в таблице 5-1.

Дозовая зависимость детерминированных эффектов

| Доза, Гр | Орган, ткань | Эффект |
|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 0, 1 | Плод | Тератогенез |
| 0, 15 | Семенники | Временная стерильность |
| 0, 5 | Костный мозг | Нарушение гематопоеза |
| > 1 | Волосы | Выпадение |
| 0, 5-2, 0 | Хрусталик | Нарушение прозрачности |
| 3 | Кожа | Эритема |
| 2, 5-6, 0 | Яичники | Стерильность |
| 3, 5-6, 0 | Семенники | Постоянная стерильность |
| 5, 0 | Хрусталик | Катаракта |
| 10, 0 | Легкие | Пневмония, смерть |
| 10, 0 | Щитовидная железа | Гипотиреозидизм |

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

В патогенезе стохастических эффектов существенную роль играет принцип вероятностных событий. В их основе лежит появление в организме выжившей, но поврежденной в результате облучения соматической клетки. При этом вероятность событий выражается в том, что у одинаковых индивидуумов с одинаковыми молекулярными повреждениями на уровне ДНК процессы репарации могут, в силу определенных генетических особенностей, протекать с разной интенсивностью. При этом у одного из индивидуумов репарация будет полной и, следовательно, последствия не будут иметь место. У другого репарация пройдет не до конца, что приведет к возможности появления клетки с поврежденным генетическим аппаратом, способным индуцировать болезнь. В свою очередь существует вероятность уничтожения измененной клетки с помощью компонентов иммунной системы, которая будет предотвращать возникновение заболевания. Следовательно, последующие эффекты будут зависеть от множества причин, которые могут происходить или могут не возникнуть. В этом и проявляется принцип неопределенности, т. е. вероятности того или иного события.

В зависимости от вида клеток, в которых происходят наследственные изменения, различают:

- соматические или, правильнее, сомато-стохастические эффекты (их регистрируют у лиц, подвергшихся облучению);

- наследуемые или генетические эффекты (их регистрируют у потомков лиц, подвергшихся облучению).

К сомато-стохастическим последствиям облучения относят злокачественные новообразования, которые могут возникать практически во всех органах. Установлено, что ионизирующая радиация индуцирует:

- лейкозы;
- рак щитовидной железы;
- рак легких, желудка;
- эндокринно-зависимые опухоли — рак молочной железы и яичников.

При местном облучении чаще всего развиваются злокачественные опухоли кожи и костей.

Таблица 5-2

Латентные периоды стохастических эффектов

| Заболевание | Латентный период, годы |
|-----------------------|------------------------|
| Лейкозы (лейкемии) | 5–7 |
| Рак легких | 10–20 |
| Рак щитовидной железы | 15–20 |
| Опухоли костной ткани | 15 |

Латентный период для онкологической патологии представлен в таблице 5-2 и на рисунке 5-5. Следует указать, что медицинские последствия Чернобыльской катастрофы внесли определенные коррективы в значения латентных периодов некоторых видов патологии (см. ниже).

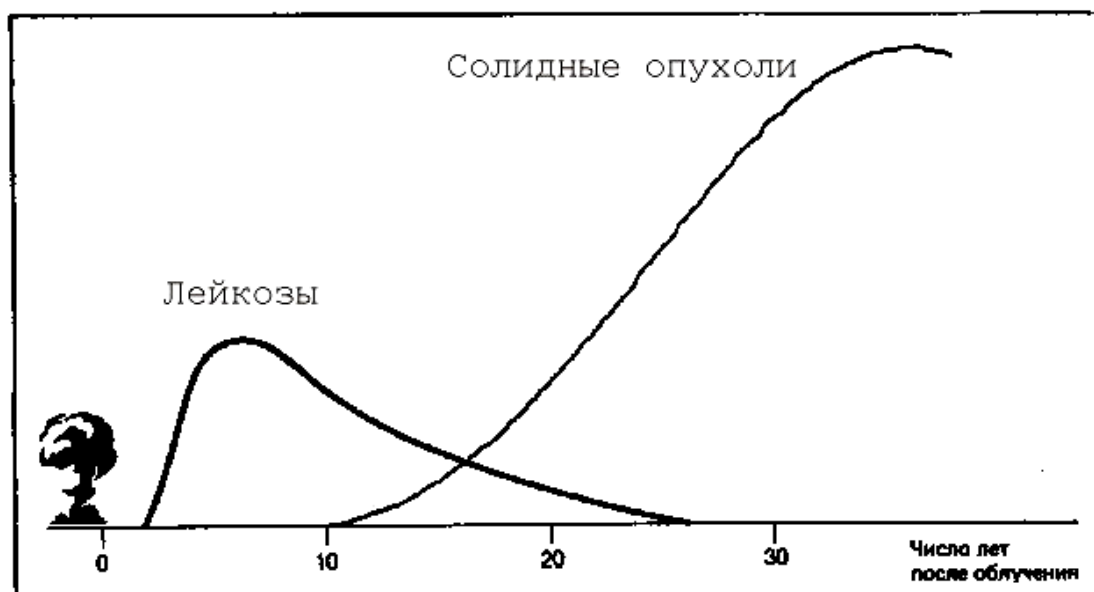


Рис. 5-5. Время появления злокачественных опухолей с момента облучения

Согласно имеющимся данным, первыми в группе раковых заболеваний, поражающих население в результате облучения, будут лейкозы. Они вызывают гибель людей в среднем через 6 лет с момента облучения, гораздо раньше, чем другие виды раковых заболеваний. Согласно оценкам НКДАР ООН, от дозы облучения в 1 Гр в среднем два человека из тысячи умрут от лейкозов. Другими словами, если кто-то получит дозу в 1 Гр при облучении всего тела, то существует один шанс из 500, что этот человек умрет в дальнейшем от лейкоза.

Самыми распространенными видами рака, вызванными действием радиации, оказались рак щитовидной и молочной железы. По оценкам НКДАР, примерно у десяти человек из тысячи облученных отмечается рак щитовидной железы, а у десяти женщин из тысячи — рак молочной железы (в перерасчете на каждый Гр индивидуальной поглощенной дозы). Однако обе разновидности рака, в принципе, излечимы, и поэтому смертность от рака щитовидной железы особенно низка. Следовательно, лишь пять женщин из тысячи на каждый Гр облучения, по-видимому, умрут от рака молочной железы и лишь один человек из тысячи облученных, возможно, умрет от рака щитовидной железы.

Рак легких, напротив, — один из тяжелых видов онкологической патологии. Он тоже принадлежит к распространенным разновидностям раковых заболеваний среди облученных групп населения. Согласно оценкам, из группы людей в тысячу человек, возраст которых в момент облучения превышает 35 лет, вероятно, пять человек умрут от рака легких в расчете на каждый Гр средней индивидуальной дозы облучения.

Рак других органов и тканей, как оказалось, встречается среди облученных групп населения реже. Согласно оценкам НКДАР, вероятность умереть от рака желудка, печени или толстой кишки составляет примерно всего лишь 1/1000 на каждый Гр средней индивидуальной дозы облучения, а риск возникновения рака костных тканей, пищевода, тонкой кишки, мочевого пузыря, поджелудочной железы, прямой кишки и лимфатических тканей еще меньше и составляет примерно от 0,2 до 0,5 на каждую тысячу и на каждый Гр средней индивидуальной дозы облучения.

Дети более чувствительны к облучению, чем взрослые, а при облучении плода риск заболевания раком, по-видимому, еще больше.

Наряду с приведенными сведениями, имеется ряд расхождений между данными наблюдений за пострадавшими в результате атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки и другими исследованиями. Указанные противоречия лишней раз подчеркивают трудности получения оценок в области малых доз на основании сведений, относящихся к большим дозам и полученных из весьма ограниченного числа источников. Поэтому неудивительно, что нет единого мнения по вопросу о том, насколько велик риск заболевания раком при малых

дозах облучения. Чем меньше доза, тем труднее получить статистически достоверный результат.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Генетические последствия действия радиации можно разделить на 3 группы:

1. *Серьезные нарушения развития у потомства облученных родителей.*

К ним относятся:

- эмбриональная и ранняя постнатальная гибель;
- врожденные пороки и задержка развития;
- снижение фертильности;
- изменение морфологических и биохимических признаков.

В их основе лежат «крупные» мутации: — хромосомные, геномные, доминантные генные. Эффекты этой группы проявляются преимущественно в первом и втором поколениях после облучения.

2. *Физиологическая неполноценность потомства:*

- снижение устойчивости к неблагоприятным воздействиям;
- функциональные сдвиги;
- дестабилизация генетического аппарата.

3. *Увеличение риска канцерогенеза,* поскольку мутагенные воздействия на родителей создают наследственную предрасположенность к бластомогенезу у потомства.

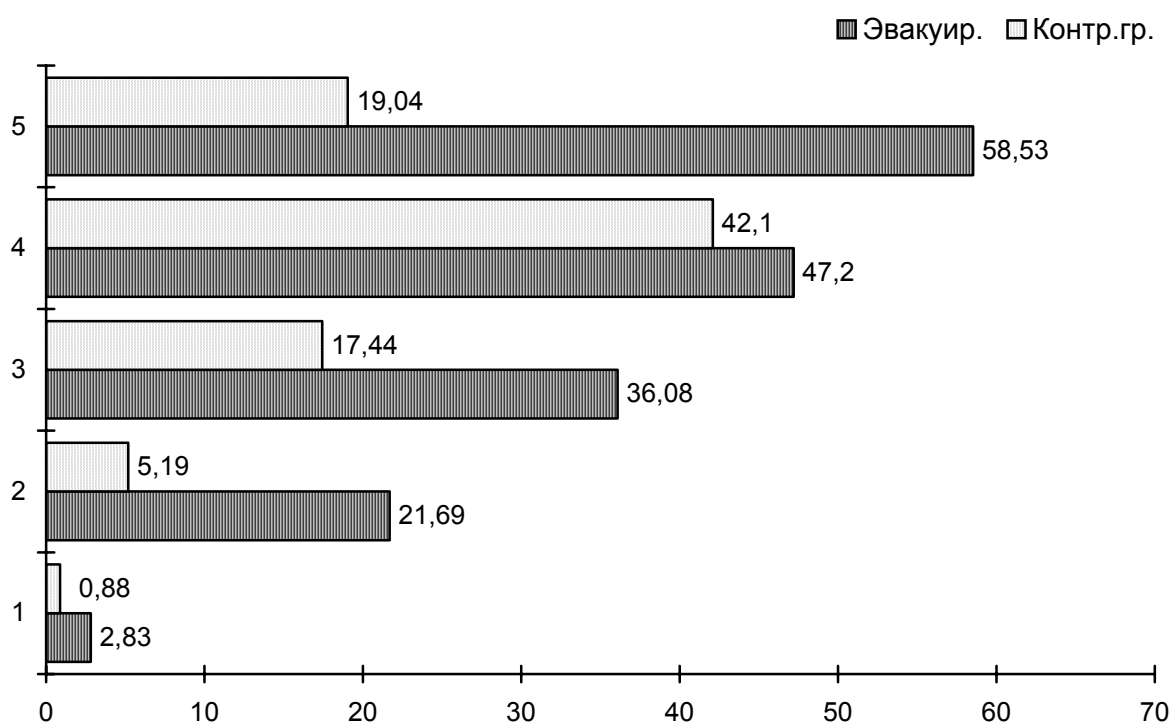


Рис. 5-6. Коэффициенты относительного риска некоторых видов неонкологической патологии среди пострадавших в результате бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки

ОБЩЕСОМАТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

До недавнего времени в постулатах радиобиологии и радиационной медицины отрицались изменения в общесоматической заболеваемости населения после радиоактивного облучения. Тем не менее, 30-летние наблюдения за пострадавшими в результате атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки показывают, что и неонкологическая патология имеет тенденцию к изменению. Японским исследователям удалось рассчитать коэффициенты относительного риска (ОР), приведенные на рисунке 5-6.

Согласно этим данным, наиболее высокий коэффициент ОР имели доброкачественные опухоли матки, затем, по убывающей, располагались: доброкачественные опухоли щитовидной железы, хронические заболевания печени, катаракта, заболеваний сердечно-сосудистой системы. Эти данные во многом напоминают ситуацию с заболеваемостью в регионах бывшего Советского Союза, пострадавших в результате чернобыльской катастрофы.

ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ НАСЕЛЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ ПОСЛЕ КАТАСТРОФЫ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Детерминированные эффекты в виде острых лейкозов (237 случаев) были зарегистрированы среди сотрудников станции, пожарных и участников ликвидации последствий аварии, принимавших участие в тушении пожара, дезактивации территории. Помимо этого наблюдались радиодерматиты за счет облучения кожи β -активными радионуклидами. Острых радиационных синдромов среди населения не отмечено.

Одним из стохастических эффектов, отличающимся от описанных выше известных данных, вскоре после чернобыльской катастрофы был рост злокачественной патологии щитовидной железы у детей, а позже и взрослых.

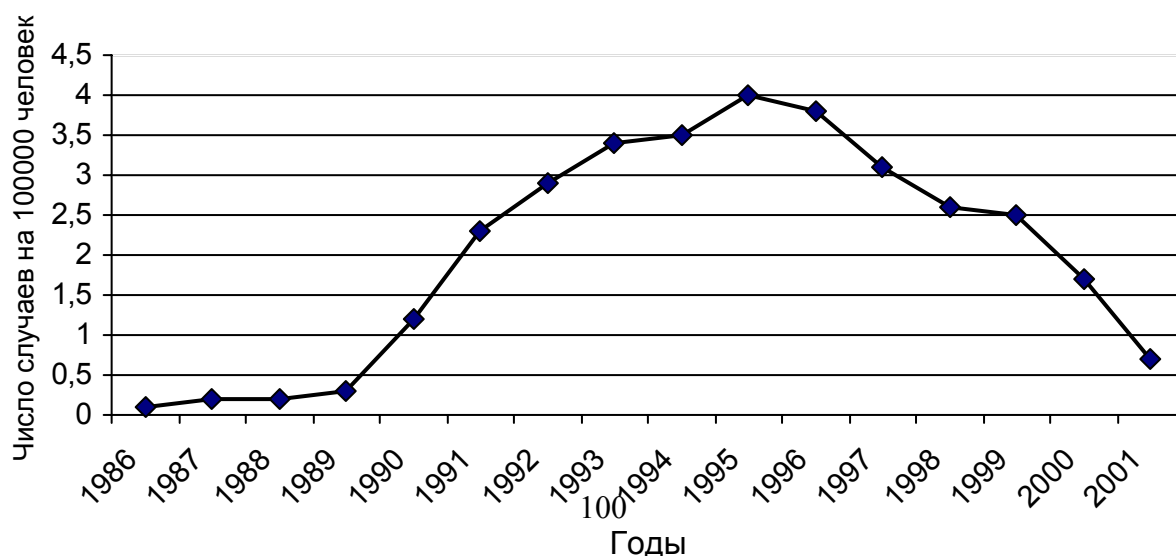


Рис. 5-7. Динамика оперативных вмешательств по поводу рака щитовидной железы среди детей Беларуси (< 15 лет)

До катастрофы рак щитовидной железы был относительно редким заболеванием (1 случай на 2000000 детей). Рост заболеваемости раком щитовидной железы начался через 4 года после катастрофы сначала в Гомельской, а затем в Брестской и других областях (рис. 5-7; 5-8; 5-9).

Среднегодовая заболеваемость раком щитовидной железы у детей к середине 90-х годов возросла приблизительно в 50 раз, у взрослых — более чем в 2 раза. По Беларуси показатель заболеваемости на 100 тысяч населения оказался самым высоким среди европейских стран, где тиреоидный рак является большой редкостью. За 1986–2001 годы в нашей республике было зарегистрировано 8358 случаев рака щитовидной железы. Из них 716 — среди детей, 342 — среди подростков и 7300 среди взрослого населения.

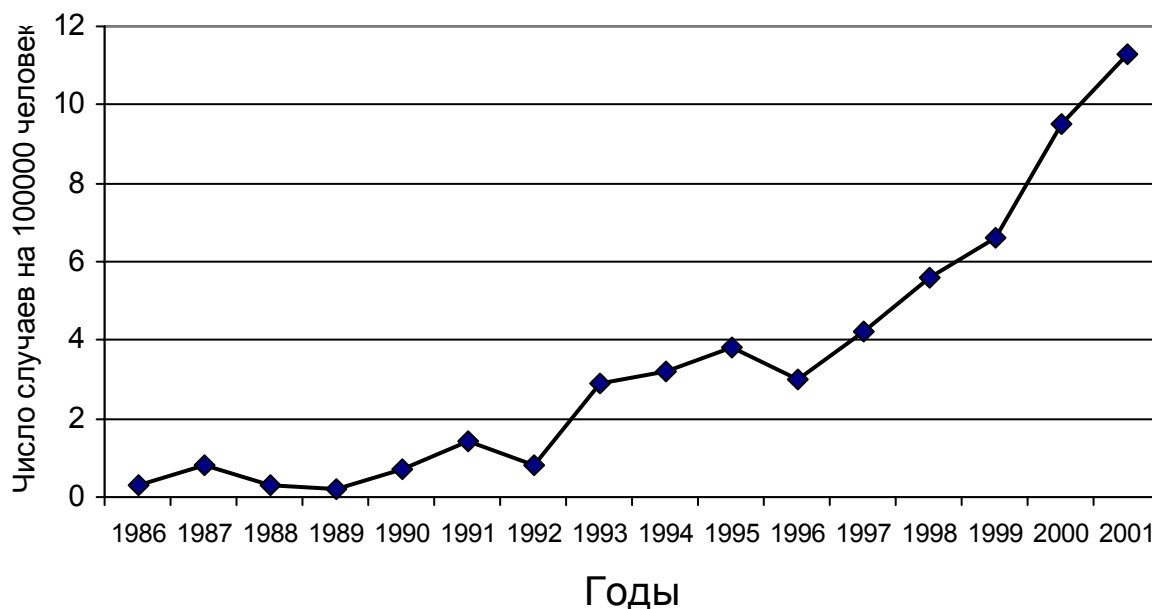


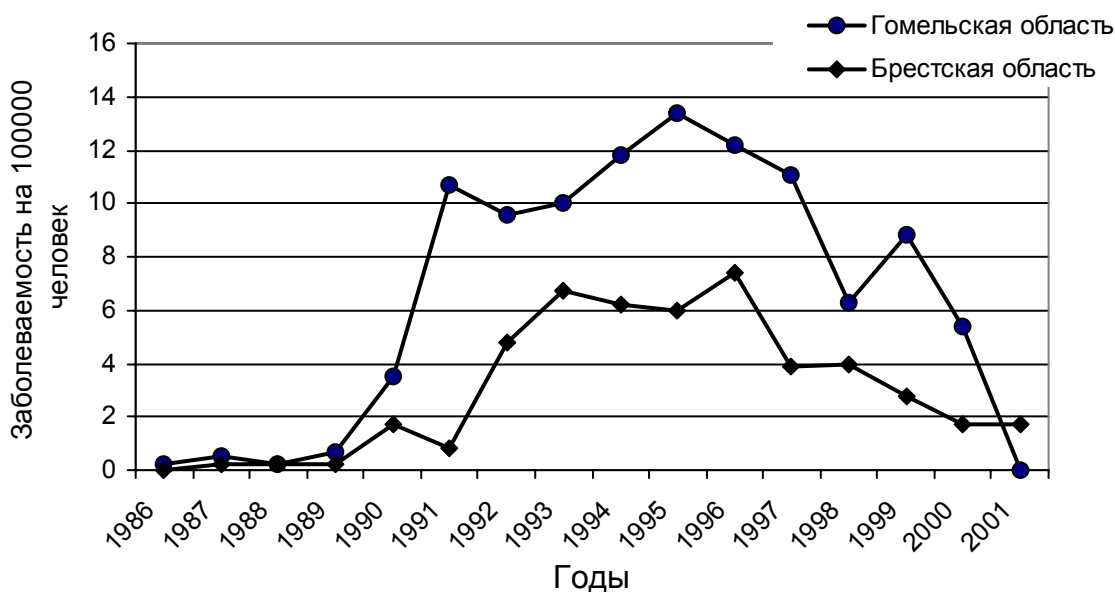
Рис. 5-8. Динамика оперативных вмешательств по поводу рака щитовидной железы среди подростков Беларуси (15–18 лет)

Рис. 5-9. Заболеваемость раком щитовидной железы у детей некоторых областей Беларуси

В целом, в последние годы в структуре онкологической заболеваемости нашей республики произошли определенные изменения: заметно увеличилась частота заболевания опухолями щитовидной железы, органов дыхания (главным образом, за счет новообразований легких), опухолями молочной железы, мочеполовых органов, ободочной и прямой кишки и др. Имеющиеся данные позволяют предполагать, что увеличение заболеваемости раком легких, молочной железы, мочевого пузыря и почки можно связать с воздействием радиационного фактора.

За 1986–1996 гг. показатели заболеваемости злокачественными опухолями у мужчин увеличились на 24,1 %, у женщин — на 22,6 %.

За период с 1979 по 1985 гг. острым и хроническим лейкозом заболело в Беларуси 677 детей в возрасте от 0 до 14 лет, что составило 4,34 случая на



100000 детского населения. Этот уровень заболеваемости лейкозиями детей в Беларуси до Чернобыльской аварии соответствует уровню заболеваемости детей в других странах. В среднем по республике она составила 4,45 на 100.000 детей.

Тем не менее не установлено пока значимой разницы в заболеваемости детей лейкозиями на «чистых» территориях и территориях с загрязнением радиоактивным цезием более 15 Ки/км².

После Чернобыльской катастрофы отмечается увеличение частоты рождаемости детей с врожденными пороками развития (ПР).

Показатель частоты ПР за 1986–1994 гг. составил 4,62 (на загрязненной территории) и 2,55 (в контрольной зоне) на 1000 абортусов. Частота рождения

детей с ПР строгого учета (подлежащих обязательной регистрации) увеличилась по всей республике. Однако, если показатель такого увеличения на «чистых» территориях составляет 39 %, то на территориях, загрязненных цезием-137 с содержанием его 1–15 Ки/км² — 44 %, а на территориях с содержанием цезия-137 более 15 Ки/км² — 79 %.

СОМАТИЧЕСКАЯ ЗАБОЛЕВАЕМОСТЬ

Соматическую заболеваемость необходимо рассматривать в различных группах населения, которые различаются по величине полученных доз облучения. Наибольшие дозы получили участники ликвидации последствий катастрофы на ЧАЭС (1986–1987 гг.) и эвакуированные из зоны отчуждения.

Общая заболеваемость и смертность УЛПА на ЧАЭС

Как показывают данные многолетних наблюдений, общая заболеваемость УЛПА отличается от таковой взрослого населения Беларуси не только значимостью заболеваний, но и более высокими показателями (рис. 5-10).

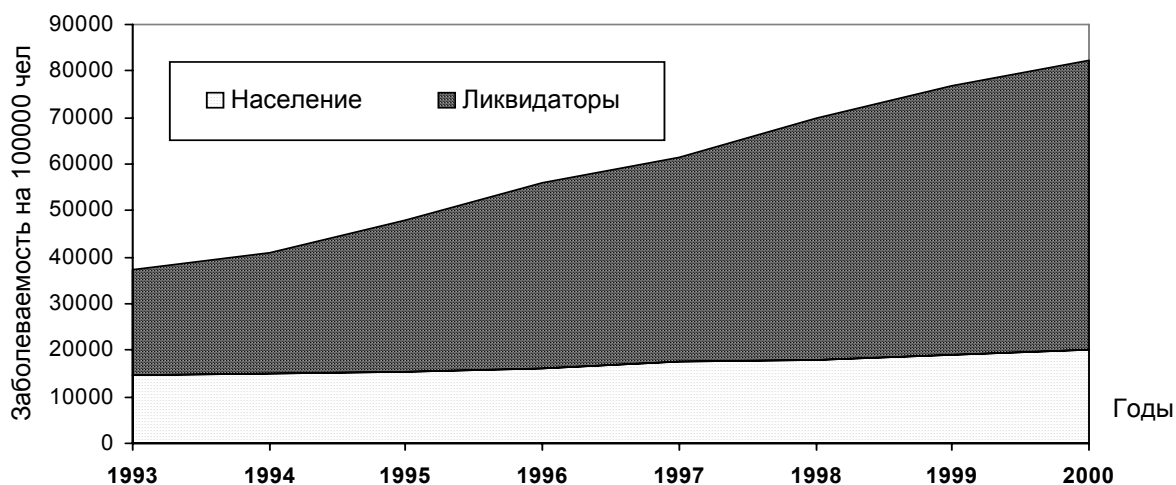


Рис. 5-10. Заболеваемость населения Республики Беларусь и УЛПА болезнями системы кровообращения

Первое ранговое место в разные годы у ликвидаторов занимают болезни системы кровообращения или болезни органов пищеварения. На третьем месте регистрируются болезни нервной системы и органов чувств (рис. 5-11). У взрослого населения Беларуси на первом месте в указанные годы были болезни органов дыхания.

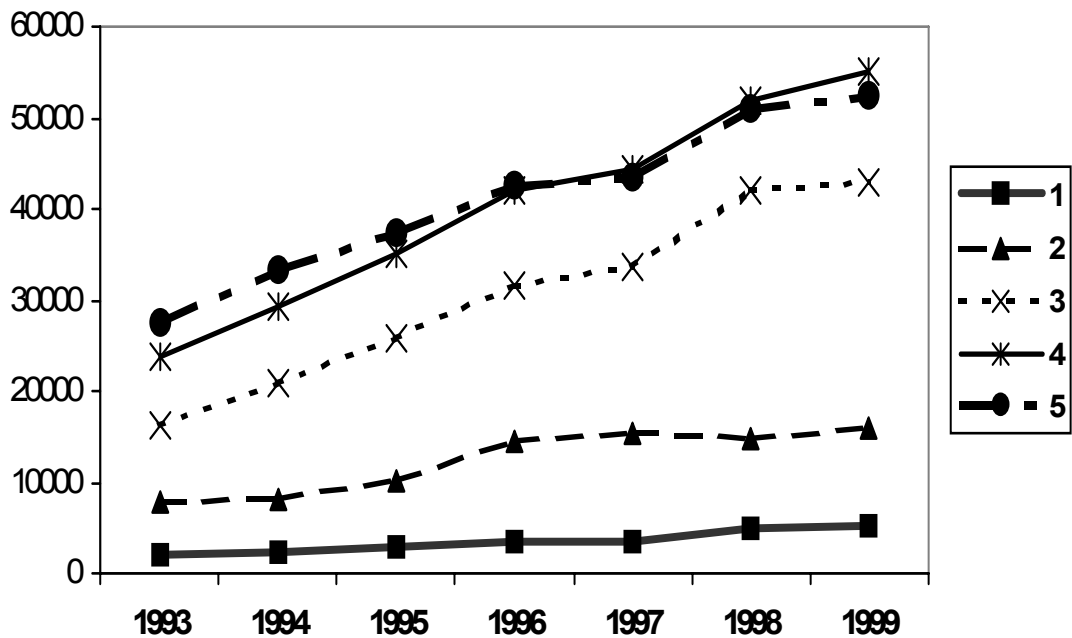


Рис. 5-11. Общая заболеваемость УЛПА (на 100 000 человек):

1 — новообразования; 2 — болезни эндокринной системы, расстройства питания, нарушения обмена веществ и иммунитета; 3 — болезни нервной системы и органов чувств; 4 — болезни органов кровообращения; 5 — болезни органов пищеварения

Сравнение показателей общей заболеваемости ликвидаторов и взрослого населения Беларуси показывает, что относительный риск быть больным у ликвидаторов выше, чем у взрослого населения Беларуси более, чем в два раза, почти по всем классам заболеваний. Так, по классу болезней органов пищеварения относительный риск у УЛПА в 2000 году составил 6,7; по болезням костно-мышечной системы и соединительной ткани — 4,7; по болезням эндокринной системы, расстройствам питания, нарушениям обмена веществ и иммунитета — 4,2; болезням крови и кроветворных органов — 4,3; болезням нервной системы и органов чувств — 4,1; болезням системы кровообращения — 3,3 и эта тенденция наблюдались в 1993—1999 гг.

Соответственно этому происходил и рост смертности среди УЛПА (рис. 5-12). Основными причинами являлись: болезни системы кровообращения, новообразования, травмы и отравления.

Темп прироста смертности от новообразований у ликвидаторов превышает таковой у взрослого населения Беларуси более чем в 8 раз, от болезней системы кровообращения — более чем в 6 раз.

Общая заболеваемость эвакуированного из зоны отчуждения ЧАЭС взрослого населения

В течение 1993—1999 гг. общая заболеваемость взрослого эвакуированного населения возросла с 123100,2 до 252477,2 на 100 тысяч. В

2000 г. ее уровень снизился, но при этом более чем в 2 раза превышает соответствующий показатель по республике в целом.

В структуре общей заболеваемости преобладают болезни системы

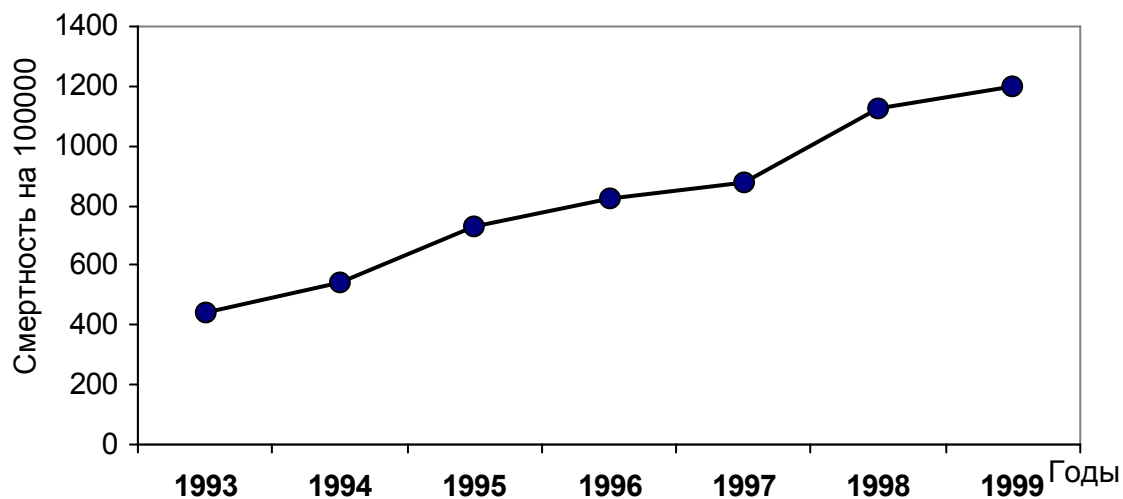


Рис. 5-12. Смертность среди УЛПА (на 100000 человека)

кровообращения. Далее, по убывающей регистрируются болезни органов пищеварения, нервной и костно-мышечной систем (рис. 5-13).

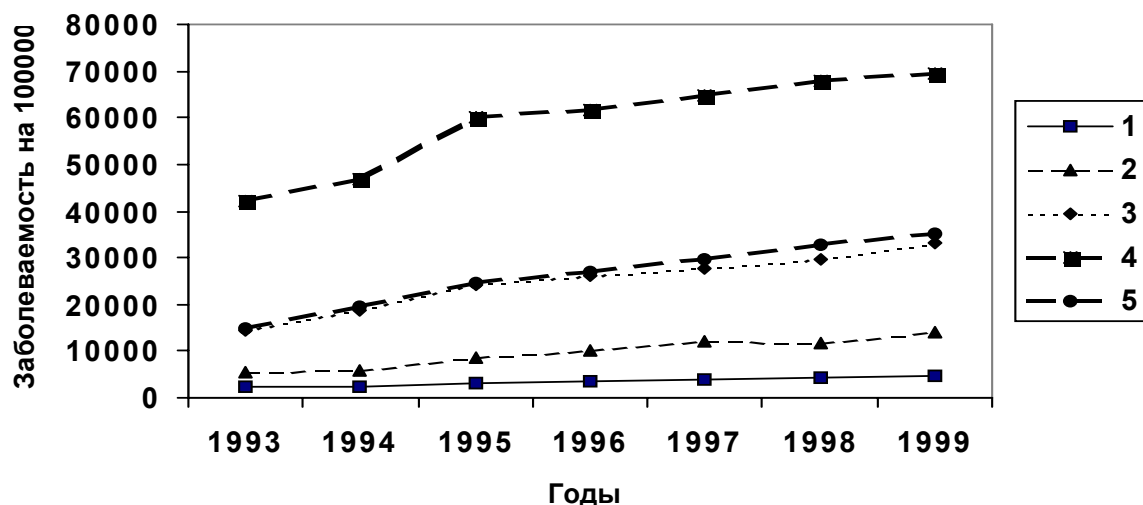


Рис. 5-13. Общая заболеваемость взрослого населения, эвакуированного из зоны отчуждения (на 100000 человек). Условные обозначения — см. рис. 5-11

Смертность взрослого населения среди данной группы в течение последних 8 лет имела тенденцию к снижению, однако ее интенсивные показатели существенно превышают республиканский уровень.

Состояние здоровья лиц, проживающих в зонах первоочередного и последующего отселения или самостоятельно выехавшие из этих зон

В структуре общей заболеваемости взрослых данной группы населения первые ранговые места также занимают болезни органов кровообращения,

болезни органов пищеварения и органов дыхания. У взрослого населения Беларуси на первом месте — болезни органов дыхания, на втором — болезни системы кровообращения, на третьем — болезни нервной системы и органов чувств (рис. 5-14).

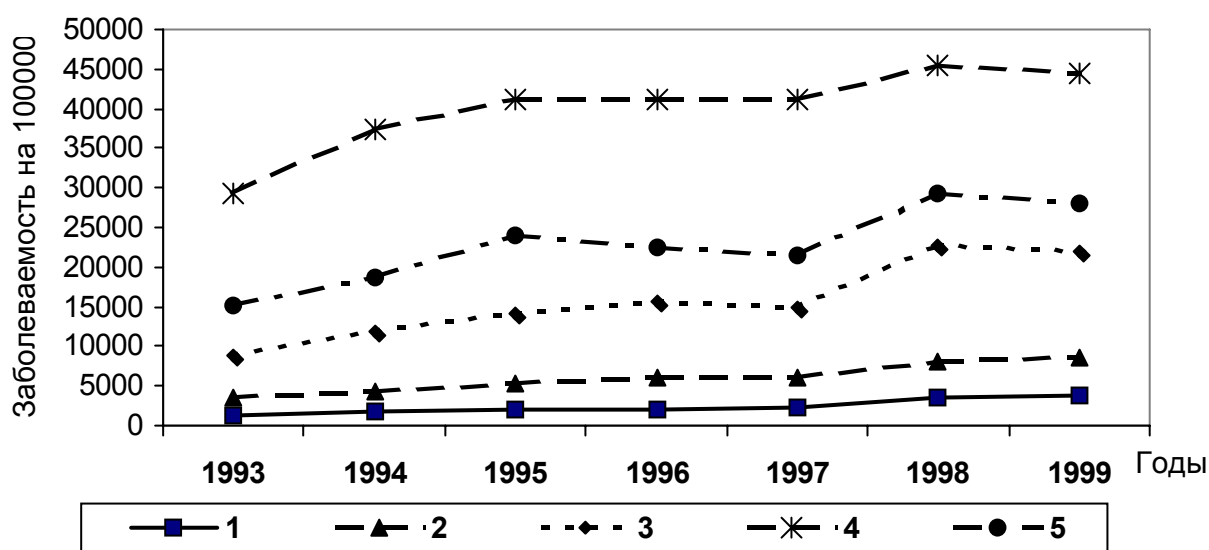


Рис. 5-14. Общая заболеваемость лиц, проживающих в зонах первоочередного и последующего отселения (на 100000 человек). Условные обозначения — см. рис. 5-11

Расчеты показывают, что риск быть больным у данной группы населения по всем классам выше в 1,3 раза, по классу болезней эндокринной системы — в 1,7 раза, крови и кроветворных органов — в 2,2 раза, болезней нервной системы — в 1,5 раза, болезней системы кровообращения — в 1,8 раза, болезней органов пищеварения — в 3 раза, болезней костно-мышечной системы — в 2 раза.

Смертность взрослого населения в этой группе также имела, в целом, тенденцию к росту.

СОСТОЯНИЕ ЗДОРОВЬЯ ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ

Анализ состояния здоровья детей и подростков свидетельствует, что с момента аварии заболеваемость выросла в целом и по большинству классов болезней. Наиболее значительный прирост заболеваемости регистрировался до 1993 года. Затем до 1996 г. наблюдалось снижение показателей, а в течение 1996–1998 гг. их повторный рост. В последние два года (1999–2000 гг.), как и в целом по республике, наметилась тенденция снижения уровней как первичной, так и общей заболеваемости.

В динамике с 1993 по 1999 г. отмечался рост общей заболеваемости детей по классу болезней костно-мышечной системы и соединительной ткани, врожденных аномалий, нервной системы и органов чувств, новообразований,

мочеполовой системы, психических расстройств, органов пищеварения, органов дыхания и др.

Несмотря на то, что уровень общей заболеваемости детей по классу болезней эндокринной системы в целом с 1993 года снижается, следует отметить высокие уровни и прирост общей заболеваемости узловыми формами зоба. Среди болезней органов пищеварения отмечается высокий уровень общей заболеваемости гастритами и дуоденитами.

В структуре общей заболеваемости детей 1-е место занимают болезни органов дыхания (45,5 %), 2-е — органов пищеварения (12,7 %), 3-е — нервной системы и органов чувств (11,6 %), далее — болезни эндокринной системы, расстройства питания, нарушения обмена веществ и иммунитета (4,2 %); кожи и подкожной клетчатки (3,6 %); инфекционные и паразитарные болезни (3,6 %); симптомы, признаки и неточно обозначенные состояния (3,0 %); болезни костно-мышечной системы и соединительной ткани (2,8 %); болезни крови и кроветворных органов (2,5 %); психические расстройства (2,4 %); болезни системы кровообращения (2,2 %); болезни мочеполовой системы (2,2 %); травмы и отравления (2,0 %); врожденные аномалии (1,2 %); новообразования (0,3 %).

ДИСПАНСЕРИЗАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ РБ, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ВОЗДЕЙСТВИЮ РАДИАЦИИ

5 мая 1993 г. было принято Постановление Совета Министров РБ N 283 «О создании Белорусского Государственного регистра лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС», утверждено Положение о Белорусском Государственном регистре лиц, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на ЧАЭС.

Цель создания Государственного регистра — обеспечение контроля за состоянием здоровья населения, подвергшегося радиационному воздействию вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС, а также получение достоверных данных о медико-биологических последствиях катастрофы.

Государственный регистр включает четыре уровня наблюдения — республиканский, областной (Минский городской), районный и уровень лечебно-профилактического учреждения, осуществляющего диспансеризацию.

Включению в Государственный регистр подлежат 7 групп лиц первичного учета. Эти лица по Приказу МЗ РБ № 122 от 13.04.1999 г. «Порядок проведения диспансеризации граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС» подлежат специальной диспансеризации.

ЗАДАЧИ СПЕЦИАЛЬНОЙ ДИСПАНСЕРИЗАЦИИ

Основными задачами спецдиспансеризации являются:

- раннее выявление больных, обследование, уточнение диагноза, организация лечения;
- выявление лиц с факторами риска, способствующими возникновению и развитию заболеваний;
- динамическое наблюдение за состоянием здоровья лиц, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС;
- проведение профилактических, реабилитационных и оздоровительных мероприятий среди наблюдаемого контингента населения.

Диспансерные осмотры и наблюдения за лицами, пострадавшими от катастрофы на ЧАЭС, а также оказание им медицинской помощи и проведение лечебно-профилактических мероприятий осуществляются лечебно-профилактическими учреждениями по месту жительства или работы.

Объемы и кратность профилактических осмотров населения, предусмотренные настоящим положением, — минимальные и обязательные для выполнения на всей территории республики.

ГРУППЫ ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА, ПЕРИОДИЧНОСТЬ И ОБЪЕМ ДИСПАНСЕРНОГО НАБЛЮДЕНИЯ

1. ПЕРВАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: лица, принимавшие участие в работах по ликвидации аварии и ее последствий.

Подгруппа 1. Лица, принимавшие участие в работах по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в пределах зоны эвакуации в 1986–1987 годах. Частота медицинского наблюдения — 1 раз в год. Объем обследования: осмотр терапевтом, эндокринологом, офтальмологом, отоларингологом, невропатологом, гинекологом (для женщин), онкологом;

- анализ крови общий, формула крови с подсчетом количества тромбоцитов;
- ЭКГ;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

Подгруппа 2. Лица, принимавшие участие в работах по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1988–1989 гг. в пределах зоны эвакуации, а также лица, принимавшие участие в 1986–1987 гг. в работах по строительству, дезактивации, по жизнеобеспечению в зонах первоочередного и последующего отселения.

Подлежат диспансерному наблюдению по месту жительства или работы.

Частота медицинского наблюдения — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр терапевтом;

- анализ крови общий, формула крови;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

2. ВТОРАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: лица, эвакуированные или самостоятельно покинувшие зоны эвакуации в 1986 году. Частота медицинского наблюдения детей — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр педиатром, эндокринологом, невропатологом, отоларингологом, офтальмологом;
- анализ крови общий, формула крови с подсчетом количества тромбоцитов;
- УЗИ щитовидной железы;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

Частота медицинского обследования взрослых — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр терапевтом, эндокринологом, невропатологом, отоларингологом;
- анализ крови общий, формула крови с подсчетом количества тромбоцитов;
- УЗИ щитовидной железы;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

3. ТРЕТЬЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: лица, проживающие в зонах первоочередного и последующего отселения или самостоятельно выехавшие из этих зон после катастрофы.

Подлежат диспансерному наблюдению по месту жительства. Частота медицинского наблюдения детей — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр педиатром;
- анализ крови общий, формула крови;
- для лиц, проживающих на загрязненных радионуклидами территориях проводится радиометрический контроль не менее 1 раза в год;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

Частота медицинского наблюдения взрослых — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр терапевтом;
- анализ крови общий, формула крови;
- для лиц, проживающих на загрязненных радионуклидами территориях, проводится радиометрический контроль не менее 1 раза в год;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

4. ЧЕТВЕРТАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: дети, родившиеся от лиц, отнесенных к 1–3 группам первичного учета, за исключением детей, отнесенных к 3-й группе первичного учета. Подлежат диспансерному

наблюдению по месту жительства. Частота медицинского наблюдения — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр педиатром;
- анализ крови общий, формула крови;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

5. ПЯТАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: лица, проживающие в зоне с правом на отселение и зоне проживания с периодическим радиационным контролем, а также жители других населенных пунктов, где средняя эквивалентная доза облучения превышает 1 мЗв в год.

Подлежат диспансерному наблюдению по месту жительства. Частота медицинского наблюдения детей — 1 раз в год. Объем обследования:

- осмотр педиатром;
- анализ крови общий, формула крови;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

Частота наблюдения взрослых — не реже 1 раза в 2 года. Объем медицинского обследования:

- осмотр терапевтом;
- анализ крови общий, формула крови;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

6. ШЕСТАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА: лица, участвовавшие в ликвидации или пострадавшие от аварий и их последствий на других атомных объектах гражданского или военного назначения, а также пострадавшие от этих аварий или в результате испытаний, учений и иных работ, связанных с любыми видами ядерных установок, включая ядерное оружие, что подтверждается соответствующими документами ведомств, в ведении которых находятся указанные объекты. Подлежат диспансерному наблюдению по месту жительства. Частота наблюдения — 1 раз в год. Объем медицинского обследования:

- осмотр терапевтом;
- анализ крови общий, формула крови;
- осмотр другими специалистами по показаниям.

Дети и подростки, находившиеся с 26 апреля по 31 мая 1986 г. на территориях радиоактивного загрязнения (включая детей, находившихся во внутриутробном состоянии) при обнаружении у них заболеваний кроветворных органов (острые лейкозы), щитовидной железы (аденома, рак) и злокачественных опухолей наблюдаются специализированными учреждениями по профилю заболевания.

7. СЕДЬМАЯ ГРУППА ПЕРВИЧНОГО УЧЕТА — инвалиды вследствие катастрофы на ЧАЭС из числа граждан, не имеющих статуса «пострадавший от

катастрофы на ЧАЭС», а также дети и подростки при обнаружении у них заболеваний кроветворных органов (острые лейкозы), щитовидной железы (аденома, рак) и злокачественных опухолей, если они не отнесены к другим группам первичного учета. Сюда относятся также дети, подростки и взрослые.

Частота обследования — 1 раз в год. Объем обследования — врачи по профилю основного заболевания в т.ч. онколог, эндокринолог, гематолог, а также терапевт, (терапевт подростковый, педиатр). Анализ крови общий с формулой. Другие исследования по профилю основного заболевания.

Г Л А В А 6 . Контроль радиационной безопасности. Международная шкала ядерных событий. Концепция защиты населения Республики Беларусь при авариях на ядерных физических установках. Принципы снижения дозовых нагрузок на организм

Широкое распространение и применение источников ионизирующего излучения в науке, промышленности, медицине и сельском хозяйстве диктует необходимость применения и постоянного совершенствования системы мер государственного и международного контроля за обеспечением радиационной безопасности.

Мировая общественность проявляет серьезную озабоченность по поводу правового регулирования использования радиоактивных материалов, регламентации дозовых нагрузок на человека. Создан ряд межправительственных (МАГАТЭ, ЕВРАТОМ, ВОЗ, МОТ) и неправительственных (МКРЗ, ФИРЭ) международных организаций, на рекомендациях которых основано правовое регулирование использования источников ионизирующего излучения в различных странах. Основные экспертные органы:

1. МКРЗ (ICRP) — Международная комиссия по радиологической защите — независимый, неправительственный орган. Ее цель — установление основных принципов радиационной защиты и публикация соответствующих рекомендаций. Эти принципы и рекомендации образуют основу для регламентации облучения персонала и населения на национальном уровне с учетом научно-технического потенциала, социально-экономических и природных условий в этих странах. Этим занимаются национальные комиссии по радиологической защите — НКРЗ. Как правило, нормативно-правовая документация, издаваемая НКРЗ, по основным положениям не выходит за рамки рекомендаций МКРЗ и не противоречит им.

2. МАГАТЭ (IAEA) — Международное агентство по атомной энергии — это международная межправительственная организация для осуществления сотрудничества в использовании ядерной энергии в мирных целях. В настоящее время ее членами являются 122 государства, в том числе и Республика Беларусь. Агентство оказывает содействие в развитии ядерной инфраструктуры государств-членов путем передачи соответствующих данных, специальных знаний и технологий. Значительная часть деятельности агентства посвящена развитию ядерной энергетики, включая вопросы ее безопасности и обращения с отходами, проверке использования ядерных технологий исключительно для мирных целей. В середине 1994 г. была завершена работа над международной конвенцией о ядерной безопасности. Конвенция регулирует безопасность расположенных на суше гражданских атомных станций.

3. НКДАР ООН (UNSCEAR) — Научный комитет по действию атомной радиации, образованный Генеральной Ассамблеей ООН в 1955 г. Он предназначен для сбора, изучения и распространения информации по наблюдавшимся уровням ионизирующего облучения и радиоактивности (естественной и антропогенной) окружающей среды, а также по последствиям такого облучения для человека и окружающей среды.

Для предотвращения появления детерминированных эффектов облучения и сведения к минимуму вероятности появления соматико-стохастических последствий необходимо ограничивать дозы внешнего и внутреннего облучения персонала, отдельных лиц из населения и всего населения при применении, хранении и транспортировке радиоактивных веществ, использовании ядерных реакторов, ускорителей заряженных частиц, рентгеновских аппаратов и других источников ионизирующих излучений. Система радиационной безопасности предприятия призвана обеспечивать уменьшение радиоактивного загрязнения окружающей среды и снижение дозовых нагрузок на людей до соответствующих порогов.

Радиационная безопасность — это комплекс мероприятий (административных, технических, санитарно-гигиенических и других мероприятий), ограничивающих облучение различных категорий населения в пределах допустимых порогов и обеспечивающих снижение радиоактивного загрязнения окружающей среды до наиболее низких уровней, достигаемых приемлемыми для общества средствами (с учетом социальных и экономических факторов).

В настоящее время все страны, использующие атомную энергию, имеют национальные нормы и правила радиационной безопасности, основанные на рекомендациях МКРЗ. Основным документом, регламентирующим облучение различных категорий населения в Республике Беларусь — «НОРМЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ» (НРБ-2000).

НРБ-2000 базируются на трех основных принципах радиационной безопасности:

1. Не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения человека от всех источников излучения (принцип нормирования);

2. Исключение всякого необоснованного облучения: запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования);

3. Снижение дозы излучения до возможно низкого уровня: поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации). Доза должна быть настолько низкой, насколько это возможно и достижимо с учетом социально-экономического и научного потенциала страны.

Нормирование радиационного воздействия осуществляется дифференцированно для разных категорий облучаемых лиц. Категория облучаемых лиц — это условно выделяемая группа населения, отличающаяся по степени контакта с ионизирующим излучением.

НРБ-2000 установлены 2 категории облучаемых лиц:

1) **персонал** (профессиональные работники), т. е. лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с ИИИ (пример: врач-рентгенолог, лаборант радиоизотопной лаборатории).

2) **все население**, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Уровень облучения лиц этих категорий определяется по критической группе. **Критическая группа** — небольшая по численности группа лиц из населения (не менее 10 человек) однородная по одному или нескольким признакам — условиям проживания, возрасту, полу, социальным или профессиональным условиям, которая подвергается наибольшему радиационному воздействию по данному пути облучения от данного источника излучения.

Для категорий облучаемых лиц установлены **три класса нормативов**:

1) основные пределы доз (ПД);

2) допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и другие;

3) контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень

радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Предел дозы (ПД) — величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов сохраняется при этом на приемлемом уровне.

Предел годового поступления (ПГП) — допустимый уровень поступления данного радионуклида в организм в течение года, который при монофакторном воздействии приводит к облучению условного человека ожидаемой дозой, равной соответствующему пределу годовой дозы.

Уровень контрольный — значение контролируемой величины дозы, мощности дозы, радиоактивного загрязнения и т.д., устанавливаемое для оперативного радиационного контроля, с целью закрепления достигнутого уровня радиационной безопасности, обеспечения дальнейшего снижения облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды. Контрольные уровни устанавливаются администрацией учреждения и учитывают достигнутый в учреждении уровень радиационной безопасности и обеспечивают условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого. Контрольные уровни, принятые в учреждении, всегда ниже допустимых уровней.

Основные пределы доз облучения приведены в таблице 6-1. Основные пределы доз не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения. Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) — 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) — 70 мЗв.

Таблица 6-1

Основные пределы доз

| Нормируемые величины* | Пределы доз | |
|--|--|--|
| | Персонал | Население |
| Эффективная доза | 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год | 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год |
| Эквивалентная доза за год в хрусталике глаза** | 150 мЗв | 15 мЗв |
| Коже*** | 500 мЗв | 50 мЗв |
| Кистях и стопах | 500 мЗв | 50 мЗв |

Примечания: * Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам. ** Относится к дозе на глубине 300 мг/см². *** Относится к среднему по площади в 1 см² значению в базальном слое кожи толщиной 5 мг/см² под покровным слоем толщиной 5 мг/см². На ладонях толщина покровного слоя — 40 мг/см². Указанным пределом допускается облучение всей кожи человека при условии, что в пределах усредненного облучения любого 1 см² площади кожи этот предел не будет превышен. Предел дозы при облучении кожи лица обеспечивает непревышение предела дозы на хрусталик от бета-частиц.

В стандартных условиях монофакторного поступления радионуклидов годовое поступление радионуклидов через органы дыхания и среднегодовая объемная активность их во вдыхаемом воздухе не должны превышать числовых значений ПГП и ДОА, приведенных НРБ-2000, где пределы доз взяты равными 20 мЗв в год для персонала и 1 мЗв в год для населения.

В условиях нестандартного поступления радионуклидов величины ПГП и ДОА устанавливаются методическими указаниями республиканского органа санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения Республики Беларусь.

Требования Норм не распространяются на источники излучения, создающие при любых условиях обращения с ними:

- индивидуальную годовую эффективную дозу не более 10 мкЗв;
- индивидуальную годовую эквивалентную дозу в коже не более 50 мЗв и в хрусталике не более 15 мЗв;
- коллективную эффективную годовую дозу не более 1 чел.-Зв, либо когда при коллективной дозе более 1 чел.-Зв оценка по принципу оптимизации показывает нецелесообразность снижения коллективной дозы.

Требования Норм не распространяются также на космическое излучение на поверхности Земли и внутреннее облучение человека, создаваемое природным калием, на которые практически невозможно влиять.

В отношении всех источников облучения населения следует принимать меры как по снижению дозы облучения у отдельных лиц, так и по уменьшению числа лиц, подвергающихся облучению, в соответствии с принципом оптимизации.

Ограничение облучения населения осуществляется регламентацией или контролем следующих параметров:

- радиоактивного загрязнения объектов окружающей среды (воды, воздуха, пищевых продуктов и т.п.);
- радиационной безопасности технологических процессов, которые могут привести к загрязнению радионуклидами объектов окружающей среды;
- доз облучения, полученных при проведении медицинских диагностических и лечебных процедур;

- техногенно-повышенного фона, обусловленного строительными материалами, химическими удобрениями, сжиганием органического топлива и т.п.;

Регламентация и контроль за облучением населения — компетенция Министерства здравоохранения Республики Беларусь, и осуществляются они на основе информации ведомств и служб Государственного санитарного надзора.

В НРБ-2000 для населения предусмотрено ограничение природного облучения, обусловленного суммарным воздействием дочерних продуктов радона и торона. При проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

В эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать 200 Бк/м³. При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Защитные мероприятия должны проводиться также, если мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

В соответствии с законом Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» от 05.01.98 г. одним из основных элементов организации безопасности населения республики является создание системы контроля и учета степени облучения населения при проведении медицинских рентгенологических исследований. Этот вид радиационного воздействия определяет более 40–50 % дополнительно к фоновому облучению населения. В соответствии с постановлением Совета Министров Республики Беларусь «О единой государственной системе контроля и первичного учета индивидуальных доз облучения» организация контроля и первичного учета индивидуальных доз облучения при проведении рентгенологических исследований осуществляется администрацией лечебного учреждения.

Во избежание необоснованного переоблучения пациентов рекомендуются допустимые контрольные уровни для трех категорий обследуемых, нуждающихся в рентгенологической помощи разной степени. В зависимости от цели и показаний к проведению рентгенодиагностических исследований выделяют три категории пациентов: **АД, БД, ВД**. Отнесение обследуемых лиц к

той или иной категории определяет индивидуальную предельную дозу, устанавливаемую по значению эффективной дозы.

Категория **АД** — пациенты, которым рентгенодиагностические исследования назначаются в связи с наличием или подозрением онкологического заболевания, а так же в ургентной практике (травмы, кровотечения и др.). Для этой категории дозовый контрольный уровень рекомендован таким образом, чтобы облучение не могло вызвать непосредственных лучевых поражений.

Категория **БД** — пациенты, которым рентгенодиагностические исследования проводятся по клиническим показаниям с целью установления (уточнения) диагноза или выбора тактики лечения при заболеваниях неонкологического характера. Для этой категории дозовый контрольный уровень рекомендован в 10 раз ниже, чем для категории АД, для предотвращения риска появления стохастических (соматических и генетических) последствий облучения.

Категория **ВД** — пациенты, которым рентгенодиагностические исследования проводятся с профилактической целью, а также периодические исследования после радикального лечения по поводу злокачественных опухолей. В категорию ВД также включены группы риска: работающие во вредных условиях, связанных с воздействием ионизирующих излучений, с предопухолевыми заболеваниями (фиброаденоматоз, лейкоплакия и др.).

Величины дозовых контрольных уровней, рекомендуемых для пациентов при рентгенодиагностических исследованиях, приведены в таблице 6-2.

Таблица 6-2

| Категории пациентов | Рекомендуемый дозовый контрольный уровень, эффективная доза, мЗв/год |
|----------------------------|---|
| АД | 150 |
| БД | 15 |
| ВД | 1,5 |

Допускается многократное обследование пациентов в течение года при условии, что суммарное значение эффективной дозы не превысит рекомендуемого контрольного уровня для данной категории. Рентгенодиагностические исследования не проводятся (за исключением жизненных медицинских показаний) женщинам, относящимся к категориям БД и ВД в период установленной или возможной беременности и детям до 15 лет, относящимся к категории ВД.

Необходимо отметить, что гигиеническое нормирование действия ионизирующих излучений на организм человека в странах бывшего Советского Союза основано на пороговой концепции. Вся философия и концепция радиационной защиты МКРЗ, национальных комитетов и экспертных комиссий

экономически развитых европейских стран и США построена на понятии **допустимого приемлемого риска**. Основной постулат предложенной концепции: «Фактически, абсолютная безопасность невозможна. Поэтому необходимо определить не безопасные уровни облучения, а установить — какой безопасный уровень является **достаточно безопасным**». Таким образом, основной принцип радиационной защиты в соответствии с концепцией допустимого риска состоит в следующем: поддержание риска на обоснованно оцененном приемлемом уровне и означает безопасность. Категория приемлемого (допустимого) риска определяется в основном социально-экономическими, психологическими, нравственно-этическими и политическими факторами. Снижение же радиационного риска (как впрочем и другие виды антропогенных рисков) ниже значения, оцененного как социально приемлемое, наносит совершенно очевидный вред обществу в связи с косвенными необоснованными затратами, связанными с ужесточением регламентов. Однако сами величины дозовых пределов в странах бывшего Советского Союза не выходят за рамки рекомендаций МКРЗ.

Основным документом, регламентирующим требования по обеспечению радиационной безопасности различных категорий облучаемых лиц, а также по охране окружающей среды от загрязнения радиоактивными веществами являются «**ОСНОВНЫЕ САНИТАРНЫЕ ПРАВИЛА** работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений». Выполнение требований основных санитарных правил обеспечивает не превышение установленных основных дозовых пределов. В санитарных правилах регламентируются основные требования к радиационной безопасности. В частности:

- требования к размещению, оборудованию, оснащению и организации работ на объектах, использующих источники ионизирующих излучений;
- правила обращения с радиоактивными веществами и отходами;
- правила работы с закрытыми и открытыми источниками ионизирующего излучения;
- требования к дезактивации помещений и оборудования;
- мероприятия по предупреждению и ликвидации радиационных аварий;
- правила использования средств индивидуальной защиты и личной гигиены;
- порядок проведения радиационного контроля.

Основные требования безопасности при работе с источниками ионизирующего излучения зависят от типа используемого на предприятии источника: закрытый или открытый источник ионизирующего излучения.

Закрытый источник — радионуклидный источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем

радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан. Кроме радионуклидных источников к закрытым источникам ионизирующего излучения относят устройства, генерирующие ионизирующее излучение (например, рентгеновский аппарат).

При работе с закрытыми источниками ионизирующего излучения человек подвергается только внешнему облучению.

Открытый источник — радионуклидный источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду. При работе с открытыми источниками ионизирующего излучения возможно загрязнение окружающей среды и попадание радионуклидов внутрь организма, поэтому человек подвергается не только внешнему, но и внутреннему облучению.

Все работы с открытыми радиоактивными веществами подразделяются на **три класса**. Класс работ устанавливается в зависимости от:

- степени радиационной опасности нуклида как потенциального источника внутреннего облучения (по степени радиационной опасности в зависимости от минимально значимой активности и радиотоксичности нуклиды делятся на четыре группы — А, Б, В, Г);
- фактической активности источника на рабочем месте.

Классом работ определяются требования к размещению, набору и оборудованию помещений, в которых проводятся работы с открытыми источниками. Наиболее жесткие требования по радиационной безопасности предъявляются для помещений с первым классом работ. Все объекты, использующие источники ионизирующего излучения, находятся на учете в органах Государственного санитарного надзора и Министерства внутренних дел.

Радиационный дозиметрический контроль (контроль за соблюдением допустимых уровней облучения и индивидуальный дозиметрический контроль) проводится службой радиационной безопасности, либо специально выделенным лицом. Если годовая эффективная эквивалентная доза на персонал предприятия не превышает $1/3$ ПДД, то индивидуальный дозиметрический контроль можно не проводить.

Радиационному контролю подлежат:

- радиационные характеристики источников излучения, выбросов в атмосферу, жидких и твердых радиоактивных отходов;
- радиационные факторы, создаваемые технологическим процессом на рабочих местах и в окружающей среде;
- радиационные факторы на загрязненных территориях и в зданиях с повышенным уровнем природного облучения;
- уровни облучения персонала и населения от всех источников

излучения, на которые распространяется действие настоящих Норм.

Основными контролируемыми параметрами являются:

- годовая эффективная и эквивалентная дозы;
- поступление радионуклидов в организм и их содержание в организме для оценки годового поступления;
- объемная или удельная активность радионуклидов в воздухе, воде, продуктах питания, строительных материалах и других;
- радиоактивное загрязнение кожных покровов, одежды, обуви, рабочих поверхностей;
- доза и мощность дозы внешнего излучения;
- плотность потока частиц и фотонов.

При возникновении опасности повышенного, по сравнению с естественным фоном, облучения отдельных контингентов населения в результате радиационной аварии Министерство здравоохранения устанавливает временные дозовые пределы и допустимые уровни облучения населения для данного региона и участвует в выработке необходимых организационных мероприятий по обеспечению радиационной безопасности на данных территориях.

В настоящее время на планете работает более 400 атомных электростанций (АЭС), строится еще более 100. Кроме того, действует большое число отдельных ядерных реакторов. При выработке атомной энергии в них накапливается огромное количество радиоактивных веществ, образующихся при физическом распаде ядер атомов топлива. Поэтому именно реакторы и являются в первую очередь потенциальным источником радиационной опасности. К 1987 году в мире зарегистрированы 284 серьезные атомные аварии на АЭС, которые сопровождались выбросом в окружающую среду радиоактивных материалов.

Наряду с этим инциденты периодически возникают и в радиохимическом производстве, только на предприятиях бывшего СССР их произошло более 250, а самые тяжелые из них те, которые связаны с возникновением самоподдерживающейся цепной реакции. К 1994 году в США было 9 таких происшествий, в России — 7 (наиболее значительные из них на ПО «Маяк» в Челябинске–65, Сибирском химическом комбинате в Томске–7, горно-химическом комбинате в Красноярске–26).

В 1990 году группой экспертов МАГАТЭ и ЕВРАТОМ была предложена **МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКАЛА ЯДЕРНЫХ СОБЫТИЙ** (Приложение 2). События, классифицируемые в шкале, относятся только к радиационной безопасности. Промышленные аварии или другие события, не связанные с ядерными или радиационными операциями, не классифицируются и определяются как «выходящие за рамки шкалы».

Шкала разделена на 2 большие части: нижние три уровня (1–3) относятся к происшествиям (инцидентам), а верхние уровни (4–7) к авариям. Очень незначительные события, не влияющие на радиационную безопасность, классифицируются как события ниже уровня шкалы, или нулевого уровня. Все ядерные установки проектируются таким образом, что существует ряд слоев безопасности, предотвращающих возникновение значительного воздействия на площадке и за ее пределами. Безопасность обеспечивается за счет применения системы барьеров (топливная матрица, оболочки ТВЭЛов, контур теплоносителя, герметичные помещения, фильтры), системы технических и организационных мер. Совокупность этих слоев безопасности называют «глубокоэшелонированной защитой».

События рассматриваются с точки зрения трех критериев безопасности:

1) события, связанные с ухудшением глубокоэшелонированной защиты, включают происшествия 1–3 уровней.

2) воздействие за пределами площадки, т. е. происходит воздействие на окружающую среду и здоровье населения — диапазон уровней шкалы от 3 до 7;

3) воздействие на площадке, т. е. это диапазон уровней от 2 (значительное загрязнение поверхностей и/или облучение персонала) до 5 (серьезная авария на станции — серьезное повреждение активной зоны ядерного реактора);

В случае аварии на ядерном реакторе (другой ядерно-физической установке) на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению, проводится комплекс мероприятий по защите населения и персонала. В зависимости от складывающейся обстановки могут быть приняты следующие **меры по защите людей и окружающей среды от ионизирующих излучений:**

1) ограничение пребывания на открытой местности (временное укрытие в домах и убежищах);

2) проведение экстренных мер защиты:

– защита органов дыхания специальными (респиратор, противогаз) и подручными средствами (носовые платки, полотенца, бумажные салфетки);

– герметизация жилых и служебных помещений на время рассеивания радиоактивных веществ в воздухе и формирования радиоактивного загрязнения территории;

3) йодная профилактика;

4) эвакуация и переселение;

5) дезактивация территорий, зданий и сооружений;

6) захоронение образовавшихся в результате дезактивационных мероприятий радиоактивных отходов, а также отходов промышленного и сельскохозяйственного производства с повышенным содержанием радионуклидов;

7) ограничение свободного доступа населения на территории с высокими уровнями радиоактивного загрязнения и прекращение хозяйственной деятельности;

8) репрофилирование в лесном и сельском хозяйстве, и обеспечение радиационно-безопасных условий труда;

9) исключение или ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов;

10) меры по снижению содержания радиоактивных веществ в сельхозпродукции общественного сектора и продуктах ее переработки;

11) меры по снижению загрязненности сельхозпродукции из личных подсобных хозяйств;

12) благоустройство населенных пунктов;

13) информирование населения о радиационной обстановке;

14) социальные и другие дополнительные меры.

В Республике Беларусь в настоящее время нет атомных электростанций и других объектов ядерно-энергетического цикла. Однако в приграничных районах сопредельных государств (Россия, Украина, Литва) функционируют четыре АЭС (Смоленская, Чернобыльская, Ровенская, Игналинская). Опыт Чернобыльской катастрофы показал, что аварии на них могут привести к масштабному загрязнению территории Беларуси и дополнительному облучению населения, что требует разработки превентивных мер защиты. В связи с этим в республике была принята **КОНЦЕПЦИЯ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПРИ АВАРИЯХ НА ЯДЕРНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ (ЯФУ)**.

Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС согласована Национальной комиссией по радиационной защите, одобрена коллегией Министерства здравоохранения и утверждена Главным Государственным санитарным врачом 28 мая 1993 года. Ее цель — обоснование защитных мероприятий, предотвращающих возникновение детерминированных эффектов (острая лучевая болезнь, лучевой гипотиреоз, лучевая катаракта и др.), а также ограничивающих риск стохастических эффектов (онкологические заболевания) и гигиенических последствий.

При радиационной аварии на АЭС рассматриваются следующие основные **факторы радиационного воздействия**:

– внешнее гамма-излучение от радиоактивного облака;

– внутреннее облучение при поступлении радиоактивных веществ через органы дыхания;

– контактное облучение вследствие радиоактивного загрязнения кожных покровов и одежды;

– внешнее гамма-излучение от радиоактивных веществ, осевших на поверхность земли и местные объекты;

– внутреннее облучение в результате потребления загрязненных пищевых продуктов и воды.

Концепция предусматривает защитные мероприятия на период первых 10 дней после аварии. Основным критерий для принятия решения о мерах защиты — мощность экспозиционной дозы на местности и индивидуальная доза облучения, прогнозируемая от начала аварии до 10 суток после нее.

При мощности экспозиционной дозы, превышающей ее фоновое значение для данной местности **на 20 мкР/час**, проводятся следующие мероприятия:

- 1) запрещение потребления молока местного производства и листовых овощей;
- 2) ограничение пребывания людей на открытой местности;
- 3) герметизация жилых и служебных помещений (плотное закрытие дверей, окон, дымоходов, вентиляционных отверстий, отключение вентиляции при отсутствии фильтров);
- 4) проведение йодной профилактики.

При мощности экспозиционной дозы, равной **2,5 мР/час**, проводятся следующие мероприятия по защите населения:

- 1) запрещение потребления молока местного производства и листовых овощей;
- 2) ограничение пребывания людей на открытой местности;
- 3) герметизация жилых и служебных помещений (плотное закрытие дверей, окон, дымоходов, вентиляционных отверстий, отключение вентиляции при отсутствии фильтров);
- 4) прекращение работы детских дошкольных учреждений, школ и учебных заведений, прекращаются все виды деятельности, кроме необходимых для жизнеобеспечения населения; при необходимости пребывания вне помещения — защита органов дыхания и кожных покровов;
- 5) проведение йодной профилактики.

Если мощность экспозиционной дозы достигает **5 мР/час**, помимо использования всех защитных мероприятий, принимается решение об эвакуации детей и беременных женщин. Доза их общего облучения до эвакуации не должна превышать 10 мЗв.

Решение об эвакуации остального (взрослого) населения принимается, если мощность экспозиционной дозы составляет **25 мР/час**. Доза их общего облучения до эвакуации не должна превышать 50 мЗв .

Эвакуация детей и беременных женщин осуществляется при ожидаемой дозе на щитовидную железу, равной 200 мЗв; эвакуация остального населения — при ожидаемой дозе на щитовидную железу — 500 мЗв. Решение об эвакуации в зависимости от дозы облучения щитовидной железы принимается на основании дозиметрических замеров, выполненных в первые сутки после

аварии с учетом эффективности проводимой йодной профилактики. Эвакуация населения проводится за пределы 100-километровой зоны АЭС.

На территории Беларуси устанавливаются **2 зоны первоочередных защитных мероприятий**:

1. Зона возможной эвакуации в радиусе 30 км от Игналинской и Чернобыльской АЭС. В случае аварии на этих АЭС в зонах возможной эвакуации вводится режим чрезвычайного положения.

2. Зона профилактических мероприятий в радиусе 100 км от этих АЭС.

Радиационная защита щитовидной железы

Йодная блокада щитовидной железы проводится препаратами стабильного йода: йодидом калия (KI), антиструмином, водным раствором KI или спиртовой настойкой йода (5 % йодная настойка).

Однократный прием для взрослого человека — 125 мг йодида калия. Защитный эффект однократного приема йодида калия длится 24 ч. Взрослому человеку допускается прием йодида калия по 125 мг в течение 10 суток, (суммарная доза 1250 мг). При отсутствии KI можно провести его замену приемом 5 % раствора йодной настойки, антиструмином (125 мг KI), или нанесением сетки спиртовой настойки йода на внутреннюю поверхность предплечья (закрашенная поверхность должна быть диаметром около 3–5 см).

При использовании йодной настойки руководствуются правилами, приведенными ниже. Раствор йода водно-спиртовой (5 %-ная йодная настойка) показан детям от 2 лет и старше, а также взрослым по 3–5 капель на стакан молока или воды после еды 3 раза в день в течение 7 суток. Детям до двух лет йодную настойку дают в дозе по 1–2 капли на 100 мл молока или питательной смеси 3 раза в день в течение 7 суток.

- Дети старше 3 лет принимают 60–65 мг йодида калия 1 раз в сутки в течение 10 суток (суммарная доза 600–650 мг).

- Дети моложе 3 лет принимают 60–65 мг йодида калия 1 раз в сутки в течении 2 суток (суммарная доза 120–130 мг).

- Беременные и кормящие новорожденных женщины принимают по 125 мг 1 раз в сутки в течении 2 суток (суммарная доза 250 мг).

- Новорожденным, находящимся на грудном вскармливании, йодид калия не назначается: они получают необходимое количество йода с молоком матери, которая принимает препарат в дозе 125 мг 1 раз в сутки (но не более 2 раз за 2 суток).

- При проведении йодной профилактики особое внимание следует уделять беременным женщинам. Беспрепятственно проникая через плаценту, йод в большом количестве поглощается фетальной щитовидной железой, подавляет ее функцию и дальнейшее развитие. Фармакологические дозы неорганического йода существенно тормозят окисление йода в тиреоцитах

плода, ингибируют его органификацию и блокируют освобождение гормонов из железы. Поэтому, при необходимости продления йодной профилактики для беременных, наряду с введением блокирующей дозы йода необходим дополнительный прием перхлората калия. Это соединение снижает захват любых изотопов йода (в том числе стабильного), что обеспечивает в последующем ускоренное его выведение. В этом случае беременным можно проводить йодную профилактику до 7 суток приемом 125 мг KI в комбинации с дополнительным приемом перхлората калия в дозе 750 мг один раз в день.

- Йодную профилактику проводят до устранения прямой угрозы поступления в организм радиоактивных изотопов йода (но не более 10 (7) дней).

- Прием алкоголя во время йодной профилактики категорически запрещен.

При проведении йодной профилактики необходимо помнить о возможных **побочных действиях препаратов стабильного йода**. Существует 2 типа побочных реакций на йодистые препараты:

1. *Интра tireоидные* — эффекты, проявляющиеся в самой щитовидной железе. Потенциально возможно формирование аутоиммунного тиреоидита (или манифестация его скрытых, субклинических форм), токсической аденомы щитовидной железы («Йод-Базедов» феномен при узловом зобе или тиреоидной автономии), либо рецидива диффузного токсического зоба.

2. *Экстратиреоидные* — эффекты, развивающиеся со стороны других органов. Как правило, они наблюдаются не более чем у 5 % населения. К ним можно отнести побочные эффекты у детей со стороны желудочно-кишечного тракта (рвота, абдоменалгия, диарея), и у взрослых — сыпь на коже и затруднение дыхания. Побочное действие препаратов йода главным образом обнаруживалось при превышении рекомендуемой дозы или гиперчувствительности к йоду. Поэтому радиозащитную блокаду щитовидной железы препаратами стабильного йода в целом следует признать безопасной.

Для обеспечения высокой эффективности йодной профилактики необходимо обеспечить прием препарата стабильного йода в возможно более короткие сроки после поступления в организм его радиоактивных изотопов. Практически стопроцентная блокада щитовидной железы наблюдается при профилактическом приеме препаратов стабильного йода за 6 часов до поступления радиоизотопов йода. Прием йодида калия через 1 час после попадания в организм радиоактивного йода (с вдыхаемым воздухом или пищевыми продуктами) уменьшает дозу облучения щитовидной железы на 90 %, через 2 часа — на 85 %, через 3 часа — на 60 %, через 6 часов — на 50 %, через 8 часов — на 0 %.

Населению, проживающему или работающему в 30-километровых зонах Игналинской и Чернобыльской АЭС, препарат йодида калия в однократной дозе раздается бесплатно поквартально для приема в случае аварии. Остальное необходимое количество препарата хранится на ФАПах, в участковых и центральных районных больницах, расположенных на территории 30-километровых зон.

Необходимый запас йодида калия для населения, проживающего в зонах от 30 до 100 км от действующих АЭС, хранится на ФАПах, участковых и центральных районных больницах, расположенных на территориях в зоне от 30 до 100 км.

Кроме того, таблетированные препараты йодида калия имеются в стандартной упаковке из резервов гражданской обороны АИ-2 (аптечка индивидуальная): в гнезде № 6 размещен пластмассовый пенал, содержащий «Радиозащитное средство № 2» — таблетки KI в дозе 125 мг.

Информация о превышении радиоактивного фона на территориях в пределах 100-километровой зоны от функционирующих АЭС на 20 мкР/час по сравнению с предыдущим измерением передается службами Главгидромета районным штабам Гражданской обороны, отсюда она поступает главным врачам районных территориальных медицинских объединений (РТМО) и является критерием для начала йодной профилактики.

Решение о начале йодной профилактики на территориях в пределах 100-километровой зоны от АЭС принимают главные врачи РТМО на основании информации, поступившей из районных штабов Гражданской обороны. Информация, поступившая от других ведомств и служб, не является основанием для принятия решений о необходимости проведения йодной профилактики.

В результате Чернобыльской катастрофы значительная часть территории Республики Беларусь (около 23 %) оказалась загрязненной радионуклидами. Население пострадавших районов (свыше 2 млн. человек) подвергается избыточному, по отношению к естественному фону, радиационному воздействию. Суммарная доза облучения, которую получает человек, складывается из 2 составляющих:

- **внешнее облучение;**
- **внутреннее облучение.**

Внешнее облучение преобладает при высоких плотностях загрязнения территории (свыше 5 Ки/км²). Наиболее эффективно ограничить воздействие внешнего облучения можно за счет отселения людей с загрязненных земель. Однако процесс этот весьма дорогостоящий, требующий значительных финансовых вложений.

Внутреннее облучение обеспечивается, в основном, поступлением радионуклидов с продуктами питания (около 94 %), в меньшей степени — с водой (около 5 %) и лишь очень небольшая часть приходится на ингаляционное поступление (около 1 %). Большая часть населения нашей республики получает дозу именно за счет внутреннего облучения. Для ограничения внутреннего облучения на пути радионуклидов в организм необходимо поставить целый ряд барьеров, которые будут препятствовать проникновению радионуклидов в организм, способствовать ускоренному выведению уже попавших в организм радионуклидов, а также снижать их неблагоприятное воздействие.

ПРИНЦИПЫ СНИЖЕНИЯ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ОРГАНИЗМ ПРИ ПРОЖИВАНИИ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЯХ

Все мероприятия по снижению дозовых нагрузок на население при проживании на загрязненных радионуклидами территориях можно условно разделить на две группы: мероприятия, проводимые государством на национальном уровне (пункты 1–5) и мероприятия, проводимые населением самостоятельно (Приложение 3).

1. СИСТЕМА РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

В процессе радиационного контроля измеряются следующие параметры:

- мощность экспозиционной дозы;
- плотность потока частиц;
- концентрация радионуклидов в воде, воздухе, почве, продуктах питания, организме человека.

В Законе РБ «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате чернобыльской катастрофы» (1991г.) определены 3 уровня радиационного контроля:

- 1) государственный;
- 2) ведомственный;
- 3) общественный.

Радиационный контроль проводится на следующих территориях (зонах):

- зона А — территория, загрязненная в результате чернобыльской аварии;
- зона Б — территория вероятного радиационного воздействия выбросов АЭС (30-километровые зоны вокруг Игналинской и Чернобыльской АЭС);
- зона В — остальная территория республики.

Принадлежностью территории к той или иной зоне определяется кратность и объем исследований продуктов питания и воды на содержание радионуклидов.

Продукты питания и сырье для их производства, заготовленное на территории радиоактивного загрязнения, должны иметь сертификат с

указанием места производства и содержания радионуклидов. Содержание радионуклидов в продукции не должно превышать *Республиканские допустимые уровни* (РДУ) содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде, которые регулярно пересматриваются и утверждаются Главным государственным санитарным врачом РБ и Председателем НКРЗ при Совмине РБ.

2. РАЦИОНАЛЬНОЕ ВЕДЕНИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

В зависимости от уровня и характера загрязнения почв радионуклидами в республике разработаны типовые схемы севооборота. Уровень содержания радионуклидов в выращенной продукции зависит от ряда факторов:

- вид и сорт выращиваемых культур;
- тип и кислотность почвы;
- механический состав почвы;
- обеспеченность минеральными веществами;
- содержание органических веществ в почве.

С целью снижения содержания радионуклидов в сельхозпродукции до республиканских допустимых уровней разработан комплекс специальных защитных мероприятий.

Подбор культур

Подбор культур и сортов с минимальным накоплением радионуклидов — наиболее доступное средство снижения их поступления из почвы в растения. Установленные закономерности поступления радионуклидов в продукцию различных культур являются теоретической основой для переспециализации растениеводства. Они были положены в основу мероприятий в первые годы после аварии (выведение из севооборота культур с высокими коэффициентами перехода радионуклидов, изменение структуры посевных площадей) и используются при разработке рекомендаций по растениеводству в сельском хозяйстве (особенно эффективно в овощеводстве и при возделывании картофеля).

Обработка почвы

Богатые органическими веществами черноземы сорбируют на себе радионуклиды, снижая их поступление в растения. Песчаные и супесчаные почвы слабо поглощают радионуклиды. Поэтому продукты, выращенные на черноземах, содержат в 50–100 раз меньше радионуклидов. Для улучшения поглощения радионуклидов частицами почвы рекомендуется вносить в нее глинистые минералы (болюсы).

Известкование кислых почв

При кислой реакции почвы радионуклиды легче переходят из почвы в растения. Для снижения кислотности рекомендуется известкование почвы. При

этом содержание радионуклидов в овощах снизится в 5–10 раз, во фруктах и ягодах — в 4–5 раз. Снижается накопление стронция-90, так как содержащийся в извести кальций — его конкурент.

Внесение минеральных удобрений

Фосфорные удобрения способствуют связыванию стронция-90, калийные — цезия-137. Повышенные дозы азотных удобрений усиливают накопление радионуклидов в растениях. Поэтому рекомендуется увеличить внесение калийных и фосфорных удобрений, не изменяя количество азотных. Органические удобрения, обогащая почву, препятствуют накоплению радионуклидов в растениях, однако при их избыточном количестве в растениях повышается содержание нитратов.

Ведение животноводства

Для снижения содержания радионуклидов при производстве мясомолочных продуктов проводятся следующие мероприятия:

- исключение из севооборота кормовых культур, накапливающих радионуклиды;
- получение чистых кормов путем рационального ведения растениеводства;
- использование специальных схем и приемов выращивания молодняка и откорма крупного рогатого скота:
 - выпас скота на окультуренных пастбищах;
 - перевод животных в загрязненных районах за 1,5–2 месяца до убоя с пастбищ на стойловое содержание или на завозные «чистые» корма;
- введение в корма для животных цезий-связывающих препаратов (ферроцианаты), снижающих содержание радиоцезия в молоке в 2–5 раз.

3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ

- Переработка цельного молока, загрязненного радионуклидами на молочные продукты.

При переработке наблюдается снижение содержания радионуклидов: в сливках, твороге — в 4–6 раз; в сыре — в 8–10 раз; в сливочном масле — в 8–10 раз; в топленом масле — 90–100 раз.

- Переработка загрязненного радионуклидами мяса (производство консервов, фарша, колбас).

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ДОБАВОК В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Пищевые добавки — это природные или синтезируемые вещества, преднамеренно вводимые в пищевые продукты для придания им заданных свойств, не употребляемые сами по себе в качестве пищевых продуктов.

Введение пищевых добавок направлено на повышение устойчивости организма к радиационному воздействию и выведение радионуклидов из организма.

В Беларуси принята специальная программа по производству продуктов питания с пищевыми добавками, снижающими действие радиации. К ним можно отнести:

- пищевые продукты: морская капуста, фруктовые добавки;
- вытяжки из фруктов и растений: масляный раствор β -каротина, экстракт корня солодки;
- витамины: В₁, В₂;
- фруктовые добавки, богатые микроэлементами, витаминами и пектиновыми веществами.

Указанные пищевые добавки используются для производства хлебобулочных и кондитерских изделий (хлеб «Нарочанский», «Двинский», пряники, печенье, торты, пирожные, зефир), безалкогольные напитки (соки, поливитаминные напитки «Асаблівы», «Абисиб», «Надзея», «Слуцкий оригинальный»), пиво («Былинное»), майонез («Рябинка»).

5. ПРОВЕДЕНИЕ САНИТАРНО-ПРОСВЕТИТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СРЕДИ НАСЕЛЕНИЯ по ведению здорового образа жизни, рациональному питанию в условиях радиации и радиационной обстановке.

Значительная часть поглощенной дозы на организм человека формируется за счет внутреннего облучения при употреблении продуктов питания с подворья, дачных участков, даров леса, рыбалки. Поэтому необходимо целенаправленно снабжать население республики информацией (специальными знаниями) по доступным способам снижения дозы и защите от радиации в реальных условиях проживания на загрязненных радионуклидами территориях.

Рекомендации для населения по питанию и здоровому образу жизни в условиях радиации изложены в приложении 3.

Радон — это бесцветный, невидимый, не имеющий вкуса и запаха инертный газ, примерно в 7,5 раза тяжелее воздуха; образуется в процессе радиоактивного распада радионуклидов урановых и ториевого рядов. Существует три естественных (природных) изотопа радона:

- радон-222 ($T_{1/2}$ — 3,8 дня; ряд распада U-238);
- радон-220 или торон ($T_{1/2}$ — 55 секунд; ряд распада Th-232);
- радон-219 или актинон ($T_{1/2}$ — 4 секунды; ряд распада U-235).

Все изотопы радона являются альфа-излучателями; дальнейший распад их дочерних продуктов сопровождается испусканием альфа- и бета-частиц. Большая часть радона и торона физически связана с материалом, в котором находятся их предшественники. Однако некоторая часть может диффундировать от места образования в другую среду. Из-за относительно большого периода полураспада радон-222 может диффундировать на большие расстояния (в пределах нескольких метров). Миграция актинона ограничивается несколькими миллиметрами и обычно он не достигает поверхности материала. Небольшая часть торона может выделяться и мигрировать в пределах нескольких сантиметров. Поэтому, за исключением богатых торием мест, концентрации радона-219 и 220 пренебрежимо малы, по сравнению с радоном-222.

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ РАДОНА

Основные источники радона: грунт, строительные материалы, грунтовые воды, природный газ, уголь, рудники, отвалы, образующиеся при добыче фосфорных удобрений, растения, геотермальные электростанции, предприятия ядерного топливного цикла (табл. 1).

Главным источником поступления радона в атмосферу являются почва и грунтовые породы. Средние концентрации радона в почвенном воздухе (до 6–7 Бк/л) на несколько порядков выше его концентраций в атмосферном воздухе ($\approx 4,4 \cdot 10^{-3}$ Бк/л). Благодаря этой разности концентраций происходит постоянное выделение почвенного радона в атмосферу. Процесс выделения радона из структурной частицы породы в окружающую среду неясен, но несомненно, что основная роль принадлежит диффузии. После выхода газа в окружающую водную или воздушную среду дальнейшее перемещение происходит также за счет диффузии и конвекции, а также геомеханических сил. Множество факторов влияет на процесс попадания радона в воздух из почвы. Дождь, снег, мороз и повышение атмосферного давления снижают интенсивность эксгаляции, тогда как повышение температуры и увеличение скорости ветра вызывают ее усиление. Следовательно, концентрация радона в почве больше зимой и в периоды дождей. Перенос и рассеяние радона в воздухе зависят от вертикального градиента температур; направления и силы ветра, турбулентности воздуха. В результате процессов температурной конвекции и

действия ветров в атмосфере происходит турбулентная диффузия, эффективно рассеивающая радон. Суточный максимум концентрации наблюдается в ночные часы, когда атмосфера наименее подвижна. Минимум наблюдается днем, когда вертикальное смешивание благодаря турбулентной диффузии максимально. Влияют также другие метеорологические условия, приводящие к тому, что концентрация радона на высоте уже нескольких метров от поверхности земли падает в десятки раз. В целом, в воздухе концентрация радона и его дочерних продуктов распада зависит от места, времени года и суток, высоты над уровнем моря и метеорологических условий.

Таблица 1

Источники радона в атмосфере Земли и их интенсивность

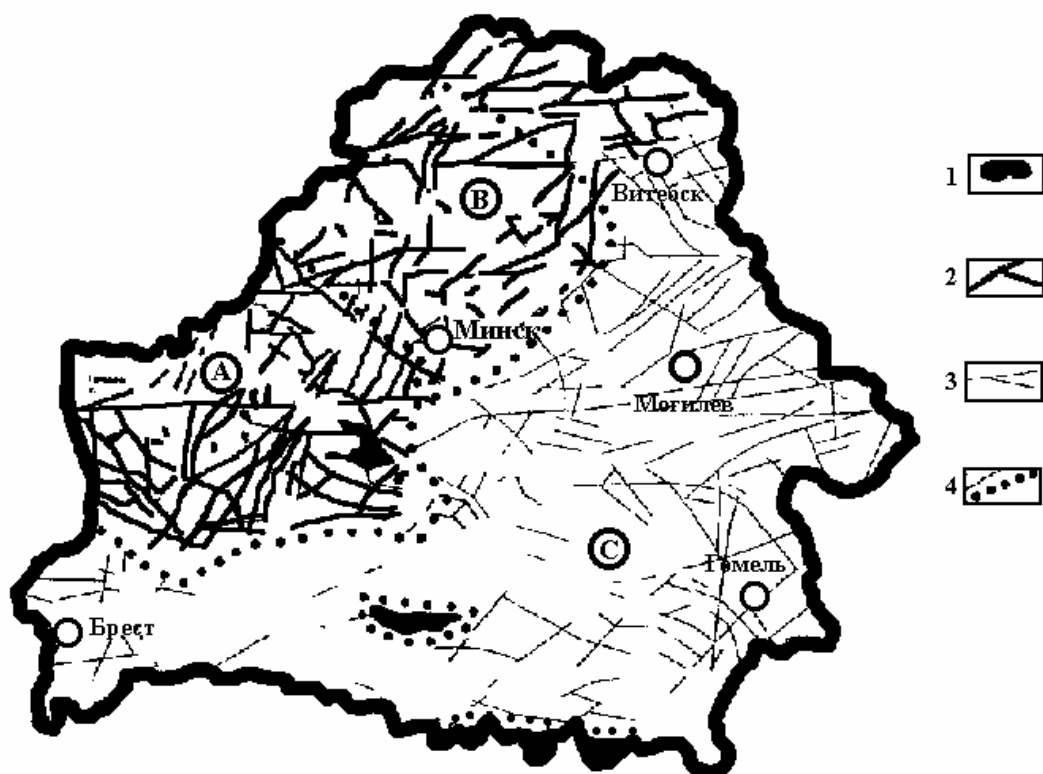
| Источник | Мощность выделения, Ки/год |
|---------------------------|-----------------------------------|
| Выход из почвы | $2 \cdot 10^9$ |
| Грунтовые воды | $5 \cdot 10^8$ |
| Океан | $3 \cdot 10^7$ |
| Фосфатные отходы | $2 \cdot 10^6$ |
| Урановые отходы реакторов | $2 \cdot 10^4$ |
| Угольные отходы | $2 \cdot 10^4$ |
| Сжигание угля | $0,9 \cdot 10^3$ |
| Природный газ | $1 \cdot 10^3$ |

С геологической точки зрения, более 40 % территории Республики Беларусь являются потенциально радоноопасными. Это связано с неглубоким залеганием гранитных пород и с широким распространением активных зон тектонических нарушений, дренирующих глубинные зоны эманирования. По данным радиометрических исследований ПО «Беларусьгеология» наиболее потенциально радоноопасными являются следующие территории:

а) на юге республики — зоны, связанные с Микашевичско-Житковичским горстом и выступами Украинского кристаллического щита;

б) на западе республики — территория, связанная с Белорусским кристаллическим массивом. Степень потенциальной радоновой опасности различных территорий Республики Беларусь представлена на рисунке 1.

В 1994–96 гг. исследованиями Геофизической экспедиции ПО «Беларусьгеология» установлено аномально высокое содержание радона в почвенном воздухе надразломных зон на Скидельском, Рогачевском, Дубровенском и Горецко-Шкловском участках. Содержание радона в почвенном воздухе зон активных разломов возрастает до $15,0\text{--}20,0$ кБк/м³ (при среднефоновых концентрациях около $1,0$ кБк/м³). Аналогичные данные получены при радиометрическом обследовании зон активных разломов Минска и его окрестностей. Пересекая территорию города с юго-запада на северо-восток и с юго-востока на северо-запад, эти разломы создают серьезную опасность радонового загрязнения воздуха жилых и производственных помещений (ширина зон эманирования вдоль этих разломов достигает $1,0\text{--}1,5$ км). Необходимо отметить факт более высоких концентраций радона в воздухе зоны разлома



Щемяслица–Уручье (средние — около $6,0 \text{ кБк/м}^3$, максимальные — $18,0\text{--}22,0 \text{ кБк/м}^3$) по сравнению с концентрациями в зоне разлома Сосны–Семково (средние — около $3,0 \text{ кБк/м}^3$, максимальные — $10,0 \text{ кБк/м}^3$).

Рис. 1. Схема районирования Беларуси по степени потенциальной радоновой опасности: 1 — выходы или участки неглубокого (80–100 м) залегания кристаллических пород преимущественно кислого состава (радоноопасные территории); 2 — зоны разрывных нарушений с высокой вероятностью эманирования; 3 — разрывные нарушения с неустановленной вероятностью радоновых контаминаций; 4 — территории с различным проявлением радоновых эманаций: А — чрезвычайно опасного эманирования, связанные с выходами кристаллических пород или с их неглубоким (от $-0,1$ до $-0,2$ км, абс.) залеганием; В — территории потенциально опасного эманирования, связанные со среднеглубоким (от $-0,2$ до $-0,5$ км, абс.) залеганием кристаллического фундамента; С — практически не изученные территории.

В 1996 г. проводились скрининговые исследования содержания радона в воздухе жилых помещений на отдельных радононосных территориях 7 районов. Среднее содержание радона в воздухе обследованных жилых помещений составило $34,8 \text{ Бк/м}^3$, что соответствует обычным концентрациям радона в домах (30 Бк/м^3). В отдельных случаях концентрации радона в воздухе помещений достигали 400 Бк/м^3 (Дзержинский район Минской области). Индивидуальные дозы облучения легких при этом могут достигать $20\text{--}30 \text{ мЗв/год}$.

Радон и продукты его распада появляются внутри помещений вследствие их эксгаляции из стен, потолков, полов (табл. 2). Концентрация первичных источников (т. е. радионуклидов ряда урана и тория) в различных типах материалов зависит от их происхождения. Некоторые материалы определяются как более радиоактивные. Сюда относятся фосфогипс, газобетон с квасцовым

глинистым сланцем и отвалы урановых рудников. Материалами с низкой активностью являются дерево, природный гипс, песок и гравий. Фосфогипс, широко использовавшийся в Японии, является побочным продуктом при производстве фосфорных удобрений, красный глиняный кирпич — побочный продукт при получении глинозема из боксита, отвалы образуются в процессе добычи и переработки урановой руды, кальций–силикатный шлак (отход при переработке фосфорных руд) используется в США.

Таблица 2

Действие изолирующих покрытий на стенах на уменьшение интенсивности эксгаляции радона

| Материал | Толщина стен (см) | Интенсивность эксгаляции,* 10^{-3} Бк/м ² ·с | | |
|--------------|-------------------|---|-------------|---------------|
| | | Не оштукатурен | Оштукатурен | Покрыт обоями |
| Легкий бетон | 24 | 1,5 | 1,9 | 1,1 |
| Известняк | 24 | 0,1 | 1,4 | 0,4 |
| Газобетон | 24 | 0,3 | 0,67 | 0,56 |

В некоторых странах, например, в Швеции, в имеющихся строениях среднегодовая эквивалентная равновесная концентрация радона доходит до 400 Бк/м³, что обуславливает большую дозу. В этой связи предусмотрена реконструкция помещений с доведением активности по радону до 200 Бк/м³. В новых зданиях этот предел не должен быть выше 70 Бк/м³. В других странах нормативы эквивалентной равновесной концентрации радона в воздухе жилых помещений равны от 70–200 Бк/м³. МКРЗ рекомендует для вновь строящихся зданий уровень не выше 100 Бк/м³. В Республике Беларусь в соответствии с НРБ-2000 предусмотрено:

- при проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не должна превышать 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не должна превышать мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч;
- в эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать 200 Бк/м³. При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Защитные мероприятия должны проводиться также, если мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещении превышает мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/ч.

Радон, содержащийся в воде, нередко бывает значительным источником радона и продуктов его распада в воздухе жилых и производственных помещений. По оценкам НКДАР ООН среди жителей Земли менее 1 % потребляет воду с удельной радиоактивностью более 1000000 Бк/м³ и менее 10

% пьют воду с концентрацией радона превышающей 100000 Бк/м³. Следует учитывать, что при кипячении основная масса радона улетучивается. Гораздо большую опасность представляет попадание радона вместе с парами воды. Средние значения удельной радиоактивности воздуха, обусловленной растворенным в воде радоном, в разных помещениях такие: ванная комната — 8,5 кБк/м³, кухня — 3,0 кБк/м³, жилая комната — 0,20 кБк/м³, т.е., в среднем, концентрация радона в ванной комнате в 40 раз выше, чем в жилых комнатах, и в 3 раза выше, чем на кухне.

Природный газ также может быть существенным источником радона в воздухе помещений. Однако система транспортировки газа, хранения и подачи в отдаленные концы сети в силу распада радона будет приводить к уменьшению его концентрации. Относительный вклад различных источников радона в его общее поступление в воздух помещений представлен в таблице 3.

Таблица 3

Удельный вес источников радона в типичном доме

| Источник | Доля от общего поступления, % |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| Почва и горные породы под зданием | ≈70 |
| Внешний воздух | 13 |
| Строительные материалы | 7 |
| Вода | 5 |
| Природный газ | 4 |
| Другие источники | ≈2 |

Суммируя перечисленное, можно сказать, что концентрация радона в воздухе помещений зависит в основном от четырех факторов:

- активной и пассивной диффузии радона из грунта через фундамент и поверхности подвальных помещений зданий;
- эксгаляции радона из строительных материалов и изделий, из которых построено здание;
- эксгаляции радона из воды и газа;
- влияния климата, образа жизни, степени вентиляции помещения.

Меры, направленные на снижение концентрации радона в воздухе помещений:

- тщательная изоляция жилых помещений от почвы и грунта;
- обычная покраска (уменьшает эксгаляцию радона из строительных материалов на 32–87 %) и оклеивание стен обоями;
- улучшение вентиляции жилых помещений и активная вентиляция погребов;
- использование материалов, отвечающих требованиям радиационной безопасности.

ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ ЗА СЧЕТ РАДОНА

Радон и продукты его распада вносят значительный вклад в облучение человека. Основную часть дозы человек получает в закрытых помещениях. Считается, что концентрация радона в закрытых помещениях в зонах с умеренным климатом в среднем в 8 раз выше, чем в наружном воздухе. Концентрация дочерних продуктов распада превышает концентрацию радона более чем в 200 раз.

Ингаляционный путь поступления в организм изотопов радона и их дочерних продуктов распада считается наиболее опасным. Это связано с хорошей поглощающей способностью органов дыхания. Полнота осаждения аэрозолей зависит от многих факторов, точный учет которых невозможен, например: концентрации аэрозольных частиц, их физико-химического состояния, частоты и глубины дыхания, размеров частиц, индивидуальных особенностей дыхательной системы. Сам по себе радон из-за короткого периода нахождения в легких (акт дыхания) не играет роли первичного фактора, обуславливающего дозовую нагрузку на легкие. Все дочерние продукты распада радона-222: полоний-218, свинец-214, висмут-214, полоний-214 и свинец-210 — также быстро удаляются из легких. Часть продуктов распада радона, образующихся в воздухе помещений, взаимодействует с аэрозольными частицами. Связанные продукты распада радона могут накапливаться при дыхании в носоглотке, трахее, легочной паренхиме. Осевшие частицы подвергаются распаду путем испускания альфа-, бета-частиц или гамма-квантов. При внутреннем облучении представляет опасность, в основном, альфа-излучение. Аэрозольные частицы, сорбирующие продукты распада радона, имеют диаметр в среднем 0,1 мкм. Ткань-мишень накопления дочерних продуктов распада радона в дыхательном тракте — эпителий в трахеобронхиальной области и альвеолярная область в легких. Биологический период полувыведения продуктов распада радона составляет от 10 мин до 4,8 час для трахеобронхиальной области и от 6 до 60 час для легких. Пробег в тканях альфа-частицы Po-218 с энергией 6 МэВ и Po-214 с энергией 7,68 МэВ равен соответственно 47 и 71 мкм. Это расстояние вполне сопоставимо с расстоянием от поверхности эпителия до ядра базальной клетки, что и обуславливает ее повреждение.

Наиболее важные факторы, влияющие на формирование дозы на дыхательный тракт за счет радона и продуктов его распада:

- концентрация радона в помещениях;
- фактор равновесия продуктов распада;
- характеристика аэрозолей, их задержание и очистка в дыхательных путях;
- величина дыхания;
- время амортизации жилища.

Целевой программой «Радон» Российской Федерации установлено, что около 1 % населения (примерно 1,5 млн. человек) получают за счет радона

эффективную дозу более 6–12 мЗв/год. В настоящее время считается, что концентрация радона в 20 Бк/м³ увеличивает дозу облучения на 1 мЗв. Из этой величины становится очевидной проблема радона. Более того, установлено, что доза на дыхательный тракт сильно зависит от возраста. В возрасте около 6 лет она имеет максимум и примерно в 2,5 раза больше дозы, формирующейся в возрасте 30 лет. Ротовое дыхание у ребенка ведет к большему поступлению радона, чем дыхание через нос, что делает необходимым санацию верхних дыхательных путей у детей. Показано, что ингаляция радона сопровождается неравномерным распределением дозы облучения в органах и тканях человека (табл. 4).

Таблица 4

Мощность дозы в некоторых органах и тканях при постоянной ингаляции воздуха с концентрацией радона 37 Бк/м³ при дыхании 13,8 л/мин

| Орган или ткань | ЭД, нЗв/час |
|-----------------|-------------|
| Легкие | 0,55 |
| Печень | 0,16 |
| Почки | 0,18 |
| Надпочечники | 0,41 |
| Мышцы | 0,16 |
| Костный мозг | 0,36 |
| Гонады | 1,05 |

МЕДИЦИНСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ РАДОНОМ

В настоящее время имеются эпидемиологические данные о связи радона с заболеваемостью раком легких. Все они основываются на данных по шахтерам, занятым на работе в урановых рудниках со значительными дозами облучения (содержание радона в горнорудных разработках достигает 100–500 кБк/м³). Показано, что риск рака легких у шахтеров составляет $(1-5) \cdot 10^{-4}$. Эти данные не могут служить основой для объяснения действия малых доз излучения.

В 1995 г. представителями Федеральной службы здравоохранения США радон признан второй основной причиной возникновения рака легких в США, причем, было обнаружено, что около 12 % всех домов содержат радон в количествах, способных вызвать раковые заболевания. По данным Научного Комитета ООН по действию атомной радиации около 20 % всех заболеваний раком легких обусловлено воздействием радона и его дочерних продуктов (²¹⁴Pb, ²¹²Pb, ²¹⁴Bi, ²¹²Bi, ²¹⁸Po, ²¹⁶Po и др.). Подсчитано, что от 5 до 20 тысяч человек в год умирает от рака легких радоновой этиологии (табл. 5). Радон в питьевой воде может вызвать дополнительно 30–600 случаев рака легких в год (данные по США). Для сравнения можно отметить, что смертность от онкологических заболеваний легких у некурящих людей равна 34 на миллион, а у курящих — 590 на миллион.

**Риск возникновения рака легких у населения
(число случаев на 1000 человек) в сопоставлении с концентрацией радона**

| Концентрация радона, кБк/м³ | Риск заболевания у курящих | Риск заболев. у некурящих | Риск заболевания у всего населения |
|---|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| 20 | 10 | 1 | 3 |
| 100 | 50 | 5 | 15 |
| 200 | 100 | 10 | 30 |
| 400 | 200 | 20 | 60 |

Растворимость радона в липидах примерно в 15 раз выше, чем в крови. Костный мозг взрослых, как известно, содержит до 40 г жира. Отсюда, видимо не случайно, имеются данные о связи между активностью радона, накапливающегося в жировых клетках костного мозга и лейкозом. Более того, показано, что в тот же возрастной период, когда у человека формируется максимальная эффективная доза от облучения радоном, наблюдается всплеск заболеваемости острым миелоидным лейкозом.

Международная шкала ядерных событий

| Уровень | Название | Критерии | Примеры |
|------------------|--|---|--|
| Ниже 0 | Отклонение | Не влияет на безопасность | |
| ИНЦИДЕНТЫ | | | |
| 1 | Аномалия | Аномалия, выходящая за рамки предписанного режима эксплуатации. Она может быть обусловлена отказом оборудования, ошибкой человека или неправильным выполнением процедур. | |
| 2 | Инцидент | Инциденты, сопровождающиеся значительным отказом устройств обеспечения безопасности, но при сохранении достаточной глубокоэшелонированной защиты, обеспечивающей компенсацию дополнительных отказов. Событие, приводящее к дозе облучения персонала, превышающей установленный годовой дозовый предел или событие, которое приводит к наличию на установке значительных количеств радиоактивности в зонах, не предназначенных для этого по проекту, и которое требует применения корректирующих мер. | |
| 3 | Серьезный инцидент | <ul style="list-style-type: none"> • Внешний выброс радиоактивности, превышающий установленные пределы и ведущий к дозе облучения за пределами площадки порядка десятых долей мЗв. При таком выбросе защитные мероприятия за пределами площадки могут не понадобиться. События на площадке, приводящие к дозам облучения персонала, достаточным для возникновения острых воздействий на здоровье или событие, приводящее к серьезному распространению загрязнения. Например, нескольких тысяч тераБк активности, содержащихся в выбросе во вторую защитную оболочку, когда материал может быть возвращен в соответствующую зону хранения. • Инциденты, при которых дальнейший отказ систем безопасности может привести к аварийным условиям или ситуация, в которой системы безопасности будут не в состоянии предотвратить аварию в случае возникновения определенных иницирующих событий. | АЭС Вандельос Испания, 1989 г. |
| АВАРИИ: | | | |
| 4 | Авария в пределах АЭС, не сопровождаемая значительным риском за пределами площадки | Внешний выброс радиоактивности, приводящий к дозе облучения за пределами площадки порядка нескольких мЗв. При таком выбросе необходимость в защитных действиях за пределами площадки обычно маловероятна, за исключением, возможно, местного контроля продуктов питания. | Завод по переработке топлива, Уиндскейл Соединенное Королевство, 1973 г. |

| | | | |
|---|---|--|---|
| | | <ul style="list-style-type: none"> • Значительное повреждение ядерной установки. Такая авария может включать в себя повреждение ядерной установки, в результате которого возникают серьезные проблемы с восстановительными работами, как, например, частичное расплавление активной зоны энергетического реактора и сравнимые события на нереакторных установках. • Облучение одного или нескольких работников, которое приводит к переоблучению с высокой вероятностью ранней смерти. | <p>АЭС Сен-Лоран, Франция, 1980 г.</p> <p>Критическая сборка в Буэнос-Айресе, 1983 г.</p> |
| 5 | Авария, сопровождаемая риском за пределами площадки | <ul style="list-style-type: none"> • Внешний выброс радиоактивного материала в количествах, радиологически эквивалентных сотням или тысячам тераВq I-131. Такой выброс может привести к частичному осуществлению контрмер, предусматриваемых планами противоаварийных мероприятий с целью снижения вероятности воздействия на здоровье. • Серьезное повреждение ядерной установки. Оно может представлять собой серьезное повреждение значительной части активной зоны энергетического реактора, крупную аварию, связанную с критичностью или крупный пожар или взрыв с выбросом больших количеств радиоактивности в пределах установки. | <p>Реактор в Уиндскейл, Соединенное Королевство, 1957 г.</p> <p>АЭС Три-Майл-Айленд, США, 1979 г.</p> |
| 6 | Серьезная авария | <ul style="list-style-type: none"> • Внешний выброс радиоактивных материалов в количествах, радиологически эквивалентных тысячам/десяткам тысяч терабеккерелей I-131. После такого выброса вероятно полное осуществление контрмер, предусматриваемых местными планами противоаварийных мероприятий с целью ограничения серьезных воздействий на здоровье. | <p>Завод по переработке топлива в Кыштыме, Россия, 1957 г.</p> |
| 7 | Крупная авария | <p>Внешний выброс значительной части радиоактивного материала на крупной установке (например: из активной зоны энергетического реактора). Обычно он состоит из смеси коротко- и долгоживущих радиоактивных продуктов деления (в количествах, радиологически эквивалентных</p> | <p>Чернобыльская АЭС, 1986 г.</p> |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | десяткам тысяч тераВq I-131). Такой выброс приводит к возможности острых воздействий на здоровье людей; задержанным воздействиям на здоровье в больших районах, возможно, охватывающих территории нескольких стран; к долговременным экологическим последствиям. | |
|--|--|--|--|

Рекомендации для населения по питанию и здоровому образу жизни в условиях радиации

1. МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ПОСТУПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ

1.1. Ограничение и/или исключение из рациона продуктов питания, накапливающих радионуклиды в значительных количествах.

Известно, что растения в разной степени накапливают радионуклиды. Наибольшим накоплением отличаются растения, корневая система которых расположена неглубоко, так как основное количество радионуклидов содержится именно в поверхностном 1–5 сантиметровом слое (около 95 % от всех радиоактивных веществ, содержащихся в почве). Высокое их содержание отмечается в коре деревьев, валежнике, мхе, лишайниках, а также в грибах и ягодах. Сбор грибов и ягод, заготовка лекарственного сырья, выпас скота и заготовка сена в лесах разрешается при плотности загрязнения цезием-137 до 2 Ки/км.кв.

Овощи. По способности накапливать Cs-137 в порядке убывания основные овощные культуры распределяются следующим образом: сладкий перец, капуста, картофель, свекла, щавель, салат, редис, лук, чеснок, морковь, огурцы, помидоры (первые в 10–15 раз больше, чем последние).

Фрукты. Обычно фрукты не содержат значительного количества радионуклидов. Однако иной раз наблюдается поверхностное загрязнение, особенно около плодоножек, цветоножек, или всей поверхностью плода при сборе фруктов (особенно поврежденных) на загрязненной земле. Поэтому при сборе овощей и фруктов надо свести к минимуму их контакт с почвой, а перед закладкой на хранение тщательно очистить от земли.

Ягоды. Черника, брусника, черная и красная смородина, клюква более интенсивно, а земляника, крыжовник, белая смородина, малина и рябина менее интенсивно накапливают радионуклиды.

Грибы. Условно грибы можно разделить на четыре группы. Больше всего радионуклидов накапливают *грибы-аккумуляторы*: польский гриб, горкуша, краснушка, моховик желто-бурый, рыжик, масленок осенний (особенно поздние), козляк, колпак кольчатый. В плодовых телах этих видов уже при загрязнении почв, близких к фоновым значениям (0,1–0,2 Ки/км²), содержание радионуклидов может превышать допустимые уровни. Груздь настоящий и черный, подгруздок черный, волнушку розовую, лисичку желтую, подберезовик, зеленку можно отнести к другой группе *грибов, сильно*

накапливающим радионуклиды. Боровик, подосиновик, сыроежка обыкновенная, опята осенние, подзеленка — *грибы, средне накапливающие радионуклиды.* Меньше всего накапливают радионуклиды *грибы-дискриминаторы радионуклидов:* шампиньон, опенок зимний, вешенка, строчок обыкновенный, сыроежка цельная и буреющая, зонтик пестрый, дождевик шиповатый. Однако необходимо помнить, что определяющий фактор накопления радионуклидов в грибах — плотность загрязнения территории в месте заготовки. Поэтому при высокой плотности загрязнения (более 15 Ки/км²) содержание радионуклидов может превышать допустимые уровни даже в так называемых грибах-дискриминаторах. В шляпке гриба накапливается больше цезия, чем в ножке.

Мясо. Больше цезия содержится в мясе старых животных, стронция — в костях молодых. Наибольшая концентрация радионуклидов определяется в легких, почках, печени, наименьшая — в сале, жире. Содержание радиоактивных веществ относительно меньше в свинине, чем в говядине, баранине и мясе птицы. Известно, что в каждом последующем звене пищевой цепи происходит концентрирование загрязняющих веществ (в том числе и радионуклидов) примерно в 10 раз. Поэтому для охотников и рыболовов особенно важно знать, что мясо диких животных содержит значительное количество радионуклидов. Больше всего накапливают радионуклиды кабан и заяц, несколько меньше — лось, олень. Рекомендации по конкретным местам охоты и рыбной ловли можно получить в лесхозах и районных обществах охотников и рыболовов.

Рыба. Загрязнение рыб цезием-137 зависит от места их обитания. Рыбу рекомендуется ловить в реках и проточных водоемах. Наиболее загрязненными являются хищные и придонные рыбы (щука, окунь, карп, карась, сом, линь), наименее загрязненными обитатели верхних слоев воды (плотва, голавль, судак, лещ, уклея, красноперка).

1.2. Кулинарная и технологическая обработка продуктов питания.

Перед приготовлением и употреблением продуктов рекомендуется соблюдать следующие правила:

- тщательно очищать грибы от лесного мусора, хорошо промывать, вымачивать в солевом растворе. Перед приготовлением блюд грибы рекомендуется прокипятить несколько раз со сливом отвара. Такой режим обработки снижает концентрацию радионуклидов в 100 и более раз;
- тщательно очищать корнеплоды от кожуры, удалять ботву у корнеплодов и венчики; удалять кочерыжки и верхние листья у капусты; овощи и корнеплоды тщательно мыть и предварительно вымачивать со сливом рассола, желателно отваривать (в вареном картофеле количество радионуклидов уменьшается в 2 раза);

- при засолке или мариновании овощей, фруктов, грибов (не употреблять рассол или маринад в пищу!) содержание радионуклидов снижается в 1,5–2 раза;
- рыбу перед приготовлением рекомендуется тщательно очищать, вымывать и обязательно удалять голову, плавники и внутренности;
- значительно снизить концентрацию радионуклидов в мясе можно путем следующей обработки: промыть в проточной воде, замочить в солевом растворе воды на 2–3 часа, слить, залить новой порцией воды, довести до кипения, опять слить, залить новой водой и варить до готовности. Кроме того, необходимо учитывать следующие факты:
 - засолка и предварительное вымачивание солонины (четырёх разовая обработка со сменой рассола) снижает содержание цезия-137 в 3–10 раз;
 - при обычной варке из мяса, печени и легких в бульон переходит примерно 50 % стронция и цезия, а из костей — до 1 %, поэтому не рекомендуется употреблять мясо-костные бульоны.
 - сало содержит меньше радионуклидов, чем другие продукты животноводства. При его перетопке 95 % цезия остается в шкварке и продукт (жир) становится практически чистым.

1.3. Ограничение употребления «местных» продуктов, особенно лесных: грибов и ягод.

Рекомендации по сбору грибов и ягод можно получить в лесхозах, лесничествах и районных центрах гигиены и эпидемиологии. Заготовку «даров леса» следует проводить с учетом плотности загрязнения почвы и особенностей накопления радионуклидов. Для всех собираемых грибов и ягод проверка на содержание радионуклидов обязательна.

Заготовка березового сока разрешена на территориях с плотностью загрязнения до 15 Ки /км², с последующим проведением радиометрии. Участки для сбора сока следует выбирать на сухих местах, так как во влажных условиях произрастания деревьев содержание радиоцезия в березовом соке повышается.

2. МЕРОПРИЯТИЯ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ ВСАСЫВАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНИЗМ

Действие радионуклидов, попавших в организм, можно уменьшить, ограничив их всасывание. Для этого руководствуются следующими принципами.

2.1. Принцип конкурентного замещения.

Радионуклиды по своим химическим свойствам и, соответственно, путям метаболизма сходны с некоторыми стабильными элементами — цезий с калием и рубидием; стронций с кальцием; плутоний с трехвалентным железом. При введении в рацион продуктов, содержащих эти стабильные элементы, они

будут конкурировать с радиоактивными элементами, и снижать их всасывание. Источниками их поступления в организм являются следующие продукты:

- **Калий** (суточная потребность организма 3 г/сут): картофель, урюк, изюм, чернослив, курага, чай, орехи, лимон, фасоль, пшеница, рожь.
- **Рубидий**: красный виноград.
- **Кальций** (1 г/сут): молоко и молочные продукты, яйца, бобовые, зеленый лук, укроп, петрушка, репа, хрен, шпинат.
- **Железо** (15–30 мг/сут): мясо, рыба, зеленые овощи, ржаной хлеб, семена подсолнечника, яблоки, изюм, салат, черноплодная рябина. Лучше усваивается железо животного происхождения.

2.2. Принцип связывания радионуклидов в желудочно-кишечном тракте.

Для населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях, рекомендуется употребление продуктов, богатых пектинами, фитатами, антиционатами, которые связывают радионуклиды в ЖКТ. Пектины — это кислые полисахариды, которые с ионами металлов образуют стойкие нерастворимые соединения, которые выводятся из организма. Кроме того, усиливается перистальтика кишечника. Однако при избыточном употреблении может развиваться дисбактериоз. Источниками поступления указанных соединений в организм являются ягоды, фрукты и овощи:

- **пектины**: баклажаны, груши, свекла, смородина, морковь, яблоки, огурцы, мармелад, перец, зефир, тыква, соки с мякотью.
- **фитаты**: зерновые, бобовые.
- **антоцианы**: темноокрашенные плоды и ягоды, черноплодная рябина, слива, черная смородина, виноград, вишня.

3. МЕРОПРИЯТИЯ, НАПРАВЛЕННЫЕ НА УСКОРЕНИЕ ВЫВЕДЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ИЗ ОРГАНИЗМА

3.1. Усиление перистальтики кишечника, которое обеспечивается употреблением продуктов, богатых клетчаткой:

- хлеб грубого помола;
- овощи (капуста, свекла, морковь);
- фрукты (чернослив);
- крупы (гречка, овсянка, пшено).

3.2. Регулярный пассаж желчи и мочи обеспечивается при употреблении:

- дополнительного количества жидкостей (чай, соки, морсы, компоты);
- настоев трав, обладающих мочегонным и желчегонным действием (ромашка, зверобой, бессмертник, мята, шиповник, укроп).

3.3. Стимуляция лимфатического дренажа.

Лимфатическая система осуществляет региональную и общую детоксикацию. Для стимуляции используют различные лекарственные травы: овес обыкновенный (семена, овсяные хлопья), листья черной смородины, плоды шиповника, подорожник, цветки календулы, кукурузные рыльца.

4. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ДЕЙСТВИЯ РАДИОНУКЛИДОВ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ МОЛЕКУЛЫ

4.1. насыщение организма антиоксидантами, которые препятствуют перекисному окислению липидов.

Ввиду того, что большинство компонентов загрязнения биосферы (в том числе и радионуклиды) являются прооксидантами и обладают иммуноповреждающим эффектом, целесообразно введение продуктов, обладающих антиоксидантными свойствами и мембранстабилизирующим эффектом. Антиоксиданты — это соединения различной химической природы, способные тормозить или устранять свободнорадикальное окисление органических веществ (перекисное окисление липидов). Антиоксидантными свойствами обладают витамины А, С и Е. Их источниками поступления в организм являются:

– **Витамин С** (70–100 мг/сут): шиповник, черная смородина, сладкий перец, облепиха, черноплодная рябина, земляника, томаты, цитрусовые, капуста (даже квашеная), зеленый лук.

– **Витамин Е** (12–17 мг/сут): облепиха, кукуруза, бобовые, нерафинированные растительные масла (лучше оливковое), гречка, семечки подсолнуха, семена злаковых.

– **Витамин А** (1–1,5 мг/сут, 1/3 — витамин А, 2/3 — бета-каротины): говяжья печень, сливочное масло, яичный желток. Бета-каротины: морковь, красный сладкий перец, петрушка, щавель, сельдерей.

4.2. Исключение из рациона продуктов, содержащих прооксиданты:

Прооксиданты — это соединения различной химической природы, способствующие свободнорадикальному окислению органических веществ. Значительные их количества содержатся в ревене и красной смородине.

4.3. насыщение организма микроэлементами.

Основными источниками поступления микроэлементов в организм являются следующие продукты:

– **Йод** (50–180 мкг/день): морская капуста, морские продукты, рыба, фасоль, гречневая крупа, чеснок, салат, свекла, огурцы, черноплодная рябина, йодированная соль (при приготовлении пищи солить в конце варки, с закрытой крышкой).

– **Цинк** (16 мг/сут): кукуруза, грецкие орехи, овсяная крупа, рис, горох, фасоль, семена подсолнечника и тыквы, картофель, капуста (особенно цветная), свекла, морковь, щавель, желток яйца, печень, говядина, креветка, сельдь, судак.

– **Медь** (2 мг/сут): растительные продукты — свекла, картофель, яблоки, горох, фасоль, орехи, соя, овсянка, гречка, а так же сыр, печень, рыба, мясо. Цинк наряду с медью является кофактором для фермента Zn-Cu-зависимая супероксиддисмутаза, который необходим для функционирования антиоксидантной и иммунной системы организма.

– **Селен** (100 мкг/сут): чеснок, зерновые (особенно рис, ячмень, овес), рыба. Селен входит в состав фермента глутатионпероксидаза, участвующего в обезвреживании свободных радикалов.

– **Кобальт** (100 мкг/сут): щавель, груша, укроп, свекла, зеленый лук, черная смородина, рыба, морковь, клюква, рябина, орехи, горох, фасоль, бобы. Кобальт необходим для системы кроветворения, входит в состав витамина В₁₂.

4.4. Правильный режим питания.

Это понятие включает:

- употребление достаточного количества полноценного белка, при этом:
 - повышается устойчивость к хроническому внутреннему облучению;
 - снижается всасывание радионуклидов;
 - повышается резистентность организма к инфекциям.
- не злоупотреблять пищей, богатой жирами, так как:
 - они являются основой для перекисного окисления липидов;
 - участвуют в образовании радиотоксинов (поражается иммунная система);
 - являются проводниками в организм и накопителями гидрофобных ксенобиотиков, которые потенцируют действие ионизирующего излучения (пестициды).

4.5. Употребление пищевых добавок.

Введение таких пищевых добавок направлено на повышение устойчивости организма к радиационному воздействию и выведение радионуклидов из организма. К ним можно отнести:

– **зерна проросшей пшеницы** (Cell Guard, Cell Senti), которые содержат значительное количество антиоксидантов и иммуномодуляторов. Курсовой прием составляет три недели ежедневно натошак за 30 минут до еды по схеме. Прием таблеток сочетается с обязательным приемом жидкости в количестве 6–8 стаканов в течение дня для взрослых и 5–6 стаканов для детей.

– **спирулина** (из сине-зеленых водорослей) содержит до 70 % протеинов; в состав ее входят все незаменимые аминокислоты, большинство витаминов и минеральных веществ;

– *абисиб* (из хвои пихты сибирской). Поливитаминный комплекс, содержащий микроэлементы, фитонциды, хлорофиллин. Стимулирует кроветворение, обладает радио- и гепатозащитным действием, противовоспалительным и иммуномодулирующим эффектом;

– *мипровит* (из культуры мицелия высших грибов). Содержит все незаменимые аминокислоты, эссенциальные фосфолипиды, ненасыщенные жирные кислоты, минеральные вещества, витамины группы В, никотиновую, фолиевую и пантотеновую кислоты, биотин. Обладает иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами, антианемическим действием, нормализует биоценоз кишечника.

4.6. Мероприятия по повышению адаптационно-компенсаторных возможностей организма:

- соблюдение режима труда и отдыха;
- прием адаптогенов;
- уменьшение психологической дизадаптации;
- массаж;
- гидротерапия;
- светолечение;
- электролечение;
- теплогрязелечение;
- минеральные воды;
- витаминпрофилактика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барабой, В. А.* Ионизирующая радиация в нашей жизни / В. А. Барабой/ М.: «Наука», 1991.
2. *Биологические* эффекты при длительном поступлении радионуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. *Булдаков, Л. А.* Радиоактивные вещества и человек / Л. А. Булдаков. М.: «Энергоиздат», 1990.
4. *Вредные* химические вещества. Радиоактивные вещества / под общ. ред. академика АМН СССР Л. А. Ильина. Л.: «Химия», 1990.
5. *Габович, Р. Д.* Курс радиационной гигиены / Р. Д. Габович, О. А. Ластков. Киев, 1969.
6. *Гофман, Д.* Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящего и будущего поколений / Д. Гофман. Минск: «Вышэйшая школа», 1994.
7. *Соматические* эффекты хронического гамма-облучения / Ю. Г. Григорьев [и др.] М.: Энергоатомиздат, 1986.
8. *Гусев, Н. Г.* Радиоактивные выбросы в биосфере : справоч. / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. М.: Энергоатомиздат, 1991.
9. *Гуськова, А. К.* Лучевая болезнь человека / А. К. Гуськова, Г. Д. Байсоголов. М.: Медицина, 1971.
10. *Демидчик, Ю. Е.* Thyroid Cancer After Chernobyl, 18.02.2002 г., Нагасаки (цитировано с разрешения автора).
11. *Жербин, Е. А.* Радиационная гематология / Е. А. Жербин, А. Б. Чухловин. М.: Медицина, 1989.
12. *Закон РБ «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС».* 1991.
13. *Закон РБ «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС».* 1991.
14. *Ильин, Л. А.* Радиационная гигиена / Л. А. Ильин, В. Ф. Кириллов, И. П. Коренков М.: Медицина, 1999.
15. Информационный бюллетень № 52–57, РНУИЦ. 1996.
16. *Каталог* доз облучения жителей населенных пунктов Республики Беларусь. Минск: МЗ, 1992.
17. *Киреев, П. М.* Хроническая лучевая болезнь / П. М. Киреев. М.: Медицина, 1968.
18. *Концепция* защитных мер для населения, проживающего на загрязненной радионуклидами территории Беларуси. Минск: Госкомчернобыль РБ, 1993.
19. *Концепция* проживания на загрязненной радионуклидами территории в результате катастрофы на ЧАЭС. Минск: АНРБ. 1990.
20. *Кузин, А. М.* Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли / А. М. Кузин. М.: «Наука», 1991.
21. *Лобач, Д. И.* Радон : уч.-мет. пособие / Д. И. Лобач, Н. Н. Тушин. Минск, 1997.
22. *Максимов, М. Т.* Радиоактивные загрязнения и их измерения : учеб. пособие / М. Т. Максимов, Г. О. Оджагов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
23. *Маргулис, У. Я.* Радиация и защита / У. Я. Маргулис М.: Атомиздат, 1974.
24. Радон в природных и техногенных комплексах Беларуси / А. В. Матвеев [и др.] // Літасфера, 1996. № 5. С. 151–159.
25. *Нестеренко, В. Б.* Радиационная защита населения / В. Б. Нестеренко. Минск, 1997.

26. *Нестеренко, В. Б.* Радиационный мониторинг жителей и продуктов питания в Чернобыльской зоне Беларуси / В. Б. Нестеренко. Минск, 1998.
27. *Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000).* ГН 2.6.1.8-127. 2000. Минск: РЦГЭ МЗ РБ, 2000. 115 с.
28. *Отчет* Научного Комитета ООН по действию атомной радиации Генеральной Ассамблее. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2001. Т. № 1. С. 28–47.
29. *Памятка* для населения, проживающего на территории, загрязненной радиоактивными веществами. Минск: МЧС РБ, 1997.
30. *Пилипцевич, Н. Н.* Анализ заболеваемости и смертности населения, пострадавшего вследствие катастрофы на ЧАЭС, за 1993–2000 гг. Медико-биологические аспекты аварии на Чернобыльской АЭС / Н. Н. Пилипцевич, И. В. Малахова, С. И. Антипова. 2001. № 1. С. 3–79.
31. *Положение* «О контроле радиоактивного загрязнения после Чернобыльской катастрофы в РБ». Минск: МЧС РБ, 1995.
32. *Приказ № 66 МЗРБ* «Об организации системы социально-гигиенического мониторинга в РБ». Минск, 1997.
33. *Радиационная гигиена.* Информационный бюллетень. Минск: МЗ РБ, РЦГЭ, 1996.
34. *Радиация, последствия аварии на ЧАЭС, меры по противорадиационной защите населения :* метод. пособие Минского Обл ЦГЭ и БелГИУВ. Минск, 1991.
35. *Радиация. Дозы, эффекты, риск.* М.: «Мир», 1990.
36. *Радиоактивные вещества :* справоч. / под общей ред. Л. А. Ильина. Лн.: «Химия», 1990.
37. *Рекомендации* Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60. Ч. 1. МКРЗ. М.: Энергоатомиздат, 1994.
38. *Сафронов, Е. И.* Лучевая болезнь от внутреннего облучения / Е. И. Сафронов. Л.: Медицина, 1972.
39. *Сборник* радиационных материалов для специалистов по социальной защите населения, пострадавшего от катастрофы на ЧАЭС. М.: РНУИЦ, 1997.
40. *Сивинцев, Ю. В.* Насколько опасно облучение / Ю. В. Сивинцев. М., 1991.
41. *Вредные химические вещества, радиоактивные вещества :* справоч. / под общ. ред. академика АМН СССР Л. А. Ильина. Л.: «Химия», 1990.
42. *Справочник* по радиационной безопасности / под ред. В.Ф. Козова. М.: «Энергоиздат», 1991.
43. *Чернобыльская катастрофа: причины и последствия.* М., 1993.
44. *Чернобыльский след* на Беларуси. Минск, Главгидромет, 1992.
45. *Широков, Ю. М.* Ядерная физика / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин. М.: «Наука», 1972.
46. *Adult Health Study Report 7. Noncancer Disease Incidence in the Atomic-bomb Survivors, 1958–86.* Radiation Effects Research Foundation, RERF 1–92.
47. *Nagasaki Symposium on Chernobyl: Update and Future.* Edditor: Sh. Nagataki, Elsevier, Amsterdam, 1994.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----|
| Предисловие | 3 |
| Список сокращений | 5 |
| Глава 1. Введение в радиационную медицину. Радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Дозиметрия. Радиационный фон Земли. Уровни облучения населения от различных источников радиационного фона (<i>Л. А. Квиткевич</i>)..... | 8 |
| Глава 2. Физические и биологические основы действия ионизирующих излучений (<i>А. Р. Аветисов</i>)..... | 29 |
| Глава 3. Радиочувствительность. Радиационное поражение человека (<i>О. К. Синякова</i>) | 45 |
| Глава 4. Радиоэкологическая ситуация в Республике Беларусь после катастрофы на ЧАЭС (<i>О. М. Жерко</i>)..... | 67 |
| Глава 5. Медико-биологические последствия облучения. Структура заболеваемости и диспансеризация населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях (<i>А. Н. Стожаров</i>)..... | 85 |
| Глава 6. Контроль радиационной безопасности. Международная шкала ядерных событий. Концепция защиты населения Республики Беларусь при авариях на ядерных физических установках. Принципы снижения дозовых нагрузок на организм (<i>С. И. Сычик</i>) | 105 |
| Приложение 1. Радон (<i>Л. А. Квиткевич</i>) | 124 |
| Приложение 2. Международная шкала ядерных событий | 132 |
| Приложение 3. Рекомендации для населения по питанию и здоровому образу жизни в условиях действия радиации (<i>С. И. Сычик</i>) | 134 |
| Литература | 141 |

Учебное издание

Стожаров Александр Николаевич
Квиткевич Людмила Александровна
Аветисов Арам Рубенович и др.

РАДИАЦИОННАЯ МЕДИЦИНА

Учебно-методическое пособие

Издание третье

Ответственный за выпуск А. Н. Стожаров
Редактор Л. И. Жук
Компьютерная верстка О. Н. Быховцевой

Подписано в печать 01.02.07. Формат 60×84/16. Бумага писчая «Снегурочка».
Печать офсетная. Гарнитура «Times».
Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 11,26. Тираж 500 экз. Заказ 210.
Издатель и полиграфическое исполнение –
Белорусский государственный медицинский университет
ЛИ № 02330/0133420 от 14.10.2004; ЛП № 02330/0131503 от 27.08.2004.
220030, г. Минск, ул. Ленинградская, 6.