

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
Учреждение высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского»**

Институт биологии и биомедицины

Кафедра экологии

**Межфакультетское отделение
«Безопасность жизнедеятельности»**

В.А. Басуров, А.Я. Моничев

**РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ: ПРИРОДА И ИСТОЧНИКИ
ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано для студентов ННГУ всех специальностей

Нижний Новгород

2022

Содержание

1. Общие положения	4
1.1. Физическая природа радиоактивности	4
1.2. Основные виды ионизирующих излучений	6
1.3. Дозиметрические величины и единицы их измерения.....	8
1.4. Регистрация ионизирующих излучений.....	11
1.5. Биологическое действие ионизирующих излучений	13
1.5.1. Механизмы повреждающего воздействия ионизирующих излучений	14
1.5.2. Зависимость «доза-эффект». Лучевая болезнь.....	17
1.5.3. Аварийное облучение	26
1.6. Нормы радиационной безопасности.....	28
2. Источники ионизирующей радиации.....	34
2.1. Естественная радиация.....	34
2.1.1. Космическая радиация.....	36
2.1.2. Земная радиация.....	37
2.1.3. Внутреннее облучение. Радон.....	38
2.1.4. Меры по снижению влияния естественного радиационного фона на организм.....	39
2.2. Техногенные (антропогенные) источники радиации.....	39
2.2.1. Радиация в медицине.....	39
2.2.2. Другие антропогенные источники радиации.....	42
2.3. Атомная энергетика.....	44
2.3.1. Ядерный топливный цикл (ЯТЦ).....	44
2.3.2. Ядерные реакторы.....	45
2.3.3. Развитие атомной энергетики.....	50
2.3.4. Проблемы безопасности ядерных реакторов.....	51
2.3.5. Радиоактивные отходы. Переработка, удаление, захоронение	53
2.3.6. Атомная энергетика как радиационно опасный объект.....	56

1. Общие положения

1.1. Физическая природа радиоактивности

Ионизирующим излучением называется излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в этом веществе ионов разного знака. Представления о возникновении ионизирующих излучений связаны со строением атома.

Атомное ядро — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса, и структура которого определяет химический элемент, к которому относится атом. Размеры ядер различных атомов более чем в 100 тысяч раз меньше размеров самого атома. Масса ядер примерно в 4000 раз больше массы входящих в атом электронов. Атомное ядро состоит из *нуклонов* — положительно заряженных протонов и нейтральных нейтронов, которые связаны между собой при помощи сильного взаимодействия. Атомное ядро, рассматриваемое как класс частиц с определённым числом протонов и нейтронов, принято называть *нуклидом*.

Количество протонов в ядре называется его *зарядовым числом* Z — это число равно порядковому номеру элемента, к которому относится атом в таблице Менделеева. Количество протонов в ядре полностью определяет структуру электронной оболочки нейтрального атома и, таким образом, химические свойства соответствующего элемента. Количество нейтронов в ядре называется его *изотопическим числом* N . Ядра с одинаковым числом протонов и разным числом нейтронов называются *изотопами*. Полное количество нуклонов в ядре называется его *массовым числом* A (очевидно $A=N+Z$) и приблизительно равно средней массе атома, указанной в таблице Менделеева. Для обозначения атомных ядер используется следующая система. В середине ставится символ химического элемента, что однозначно определяет зарядовое число Z ядра; вокруг обозначения элемента указывают все характеризующие ядро его атома числа:

- слева снизу — зарядовое число Z , то есть, то же самое, что указано символом элемента;
- слева сверху — массовое число A ;
- справа снизу — изотопическое число N ;

Например, уран-238:



Лишь небольшая часть нуклидов являются стабильными. В большинстве случаев ядерные силы оказываются неспособны обеспечить их постоянную целостность, и ядра рано или поздно распадаются. Это явление получило название радиоактивности.

Радиоактивность (от лат. *radius* «луч» и *āctīvus* «действенный») – свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав (заряд Z , массовое число A) путём испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов. Соответствующее явление называется *радиоактивным распадом*. Радиоактивностью называют также свойство вещества, содержащего радиоактивные ядра.

Установлено, что радиоактивны все химические элементы с порядковым номером, большим 82 (то есть, начиная с висмута), и многие более лёгкие элементы (прометий и технеций) не имеют стабильных изотопов, а у некоторых элементов, таких как индий, калий, или кальций, часть природных изотопов стабильны, другие же радиоактивны.

Естественная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, встречающихся в природе.

Искусственная радиоактивность – самопроизвольный распад ядер элементов, полученных искусственным путем через соответствующие ядерные реакции.

При каждом акте распада нестабильного нуклида высвобождается энергия, которая и передается дальше в виде излучения. Но хотя все радионуклиды нестабильны, одни из них более нестабильны, чем другие. Например, протактиний-234 распадается почти моментально, а уран-238 очень медленно. Половина всех атомов протактиния в каком-либо радиоактивном источнике распадается за время, чуть большее минуты, в то же время половина всех атомов урана-238 превратится в торий-234 за четыре с половиной миллиарда лет. Время, за которое распадается в среднем половина всех радионуклидов данного типа в любом радиоактивном источнике, называется *периодом полураспада* соответствующего изотопа. Этот процесс продолжается непрерывно. За время, равное одному периоду полураспада, останутся неизменными каждые 50 атомов из 100, за следующий аналогичный промежуток времени 25 из них распадутся.

Любой радиоактивный распад подчинён закону:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (1)$$

N – количество атомов через момент времени t ,

N_0 – начальное количество радионуклидов,

λ – постоянная, характеризующая радиоактивное вещество,

e – экспонента ($e = 2,718281828459045\dots$)

Как и большинство законов физики, в наши дни этот закон формулируют по-разному, чаще всего записывая уравнением:

$$dN/dt = -\lambda N, \dots\dots\dots (2)$$

которое означает, что число распадов за интервал времени t в произвольном веществе пропорциональна числу имеющихся в образце атомов N .

На практике период полураспада определяют, измеряя активность (см. ниже) исследуемого препарата через определенные промежутки времени.

Учитывая, что активность препарата пропорциональна количеству атомов распадающегося вещества, и воспользовавшись законом радиоактивного распада, можно вычислить период полураспада данного вещества.

Радиоактивные ряды (семейства) – цепочка радиоактивных превращений. Это ряды радиоактивных изотопов, в которых каждый последующий образуется в результате радиоактивного распада предыдущего. Каждый радиоактивный ряд начинается изотопом с большим периодом полураспада и заканчивается стабильным изотопом. Выделяют три естественных радиоактивных ряда и один искусственный.

Естественные ряды:

- ряд тория ($4n$) – начинается с нуклида Th-232;
- ряд радия ($4n+2$) – начинается с U-238;
- ряд актиния ($4n+3$) – начинается с U-235

Искусственный ряд:

- ряд нептуния ($4n+1$) – начинается с Np-237.

После альфа- и бета-радиоактивных превращений ряды заканчиваются образованием стабильных изотопов.

1.2. Основные виды ионизирующих излучений

Ионизирующее излучение состоит из заряженных и незаряженных частиц, к которым относятся также фотоны. Энергию частиц ионизирующего излучения измеряют во внесистемных единицах – электрон-вольтах, эВ. $1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Различают корпускулярное и фотонное ионизирующее излучение.

Корпускулярное ионизирующее излучение – поток элементарных частиц с массой покоя, отличной от нуля, образующихся при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, либо генерируемых на ускорителях. К нему относятся: α - и β -частицы, нейтроны (n), протоны (p) и др.

α -излучение – это поток частиц, являющихся ядрами атома гелия и обладающих двумя единицами заряда. Энергия α -частиц, испускаемых различными радионуклидами, лежит в пределах 2–8 МэВ. При этом все ядра данного радионуклида испускают α -частицы, обладающие одной и той же энергией.

β -излучение – это поток электронов или позитронов. При распаде ядер β -активного радионуклида, в отличие от α -распада, различные ядра данного радионуклида испускают β -частицы различной энергии, поэтому энергетический спектр β -частиц непрерывен. Максимальная энергия β -частиц у известных в настоящее время радионуклидов может достигать 3,0–3,5 МэВ.

Нейтроны (нейтронное излучение) – нейтральные элементарные частицы. Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, при прохождении через вещество они взаимодействуют только с ядрами атомов.

В результате этих процессов образуются либо заряженные частицы (ядра отдачи, протоны, нейтроны), либо γ -излучение, вызывающие ионизацию. По характеру взаимодействия со средой, зависящему от уровня энергии нейтронов, они условно разделены на 4 группы:

- 1) тепловые нейтроны 0,0–0,5 кэВ;
- 2) промежуточные нейтроны 0,5–200 кэВ;
- 3) быстрые нейтроны 200 КэВ–20 МэВ;
- 4) релятивистские нейтроны свыше 20 МэВ.

Фотонное излучение – поток электромагнитных колебаний, которые распространяются в вакууме с постоянной скоростью 300000 км/с. К нему относятся γ -излучение, характеристическое, тормозное и рентгеновское излучение.

Обладая одной и той же природой, эти виды электромагнитных излучений различаются условиями образования, а также свойствами: длиной волны и энергией.

Так, γ -излучение испускается при ядерных превращениях или при аннигиляции частиц.

Характеристическое излучение – фотонное излучение с дискретным спектром, испускаемое при изменении энергетического состояния атома, обусловленного перестройкой внутренних электронных оболочек.

Тормозное излучение – связано с изменением кинетической энергии заряженных частиц, имеет непрерывный спектр и возникает в среде, окружающей источник β -излучения, в рентгеновских трубках, в ускорителях электронов и т. п.

Рентгеновское излучение – совокупность тормозного и характеристического излучений, диапазон энергии фотонов которых составляет 1 кэВ–1 МэВ.

Излучения характеризуются по их ионизирующей и проникающей способности.

Ионизирующая способность излучения определяется удельной ионизацией, т. е. числом пар ионов, создаваемых частицей в единице объема массы среды или на единице длины пути. Излучения различных видов обладают различной ионизирующей способностью.

Проникающая способность излучений определяется величиной пробега. Пробегом называется путь, пройденный частицей в веществе до ее полной остановки, обусловленной тем или иным видом взаимодействия.

α -частицы обладают наибольшей ионизирующей способностью и наименьшей проникающей способностью. Их удельная ионизация изменяется от 25 до 60 тыс. пар ионов на 1 см пути в воздухе. Длина пробега этих частиц в воздухе составляет несколько сантиметров, а в мягкой биологической ткани — несколько десятков микрон.

β -излучение имеет существенно меньшую ионизирующую способность и большую проникающую способность. Средняя величина удельной ионизации в воздухе составляет около 100 пар ионов на 1 см пути, а максимальный пробег достигает нескольких метров при больших энергиях.

Наименьшей ионизирующей способностью и наибольшей проникающей способностью обладают фотонные излучения. Во всех процессах взаимодействия электромагнитного излучения со средой часть энергии преобразуется в кинетическую энергию вторичных электронов, которые, проходя через вещество, производят ионизацию. Прохождение фотонного излучения через вещество вообще не может быть охарактеризовано понятием пробега. Ослабление потока электромагнитного излучения в веществе подчиняется экспоненциальному закону и характеризуется коэффициентом ослабления, который зависит от энергии излучения и свойств вещества. Но какой бы ни была толщина слоя вещества, нельзя полностью поглотить поток фотонного излучения, а можно только ослабить его интенсивность в любое число раз.

В этом существенное отличие характера ослабления фотонного излучения от ослабления заряженных частиц, для которых существует минимальная толщина слоя вещества-поглотителя (пробег), где происходит полное поглощение потока заряженных частиц.

1.3. Дозиметрические величины и единицы их измерения

Действия ионизирующего излучения на вещество проявляется в ионизации и возбуждении атомов и молекул, входящих в состав вещества. Количественный мерой этого воздействия служит поглощенная доза D_n – средняя энергия, переданная излучением единице массы вещества. Единица поглощенной дозы – грей (Гр). $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$. На практике применяется также внесистемная единица – $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$.

Поглощенная доза излучения зависит от свойств излучения и поглощающей среды.

Для заряженных частиц (α , β , протонов) небольших энергий, быстрых нейтронов и некоторых других излучений, когда основными процессами их взаимодействия с веществом являются непосредственная ионизация и возбуждение, поглощенная доза служит однозначной характеристикой ионизирующего излучения по его воздействию на среду. Это связано с тем, что между параметрами, характеризующими данные виды излучения (поток, плотность потока и др.) и параметром, характеризующим ионизационную способность излучения в среде – поглощенной дозой, можно установить адекватные прямые зависимости.

Для рентгеновского и γ -излучений таких зависимостей не наблюдается, так как эти виды излучений косвенно ионизирующие. Следовательно, поглощенная доза не может служить характеристикой этих излучений по их воздействию на среду.

До последнего времени в качестве характеристики рентгеновского и γ -излучений по эффекту ионизации используют так называемую экспозиционную дозу. Экспозиционная доза выражает энергию фотонного излучения, преобразованную в кинетическую энергию вторичных

электронов, производящих ионизацию в единице массы атмосферного воздуха.

За единицу экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений принимают *кулон на килограмм (Кл/кг)*. Это такая доза рентгеновского или γ -излучения, при воздействии которой на 1 кг сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях образуются ионы, несущие 1 Кл электричества каждого знака.

На практике до сих пор широко используется внесистемная единица экспозиционной дозы — рентген. 1 *рентген (Р)* — экспозиционная доза рентгеновского и γ -излучений, при которой в 0,001293 г (1 см³ воздуха при нормальных условиях) образуются ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака или $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. При экспозиционной дозе в 1 Р будет образовано $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 0,001293 г атмосферного воздуха.

Исследования биологических эффектов, вызываемых различными ионизирующими излучениями, показали, что повреждение тканей связано не только с количеством поглощенной энергии, но и с ее пространственным распределением, характеризуемым линейной плотностью ионизации. Чем выше линейная плотность ионизации, или, иначе, линейная передача энергии частиц в среде на единицу длины пути (ЛПЭ), тем больше степень биологического повреждения. Чтобы учесть этот эффект, введено понятие эквивалентной дозы.

Доза эквивалентная $H_{T,R}$ — поглощенная доза в органе или ткани $D_{T,R}$, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного излучения W_R :

$$H_{T,R} = W_R D_{T,R} \quad (3)$$

Единицей измерения эквивалентной дозы является Дж·кг⁻¹, имеющий специальное наименование *зиверт (Зв)*.

Значения W_R для фотонов, электронов и мюонов любых энергий составляет 1, для α -частиц, осколков деления, тяжелых ядер — 20. Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы:

- Фотоны любых энергий.....1
- Электроны и мюоны (менее 10 кэВ).....1
- Нейтроны с энергией менее 10 кэВ.....5
- от 10 кэВ до 100 кэВ10
- от 100 кэВ до 2 МэВ.....20
- от 2 МэВ до 20 МэВ.....10
- более 20 МэВ.....5
- Протоны, кроме протонов отдачи, энергия более 2 МэВ.....5
- Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра.....20

Доза эффективная – величина, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности. Она представляет сумму произведений эквивалентной дозы в органе $H_{\tau T}$ на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного органа или ткани W_T :

$$E = \sum_T H_{\tau T} W_T \text{ Equation.3}$$

(4)

где $H_{\tau T}$ – эквивалентная доза в ткани T за время τ .

Единица измерения эффективной дозы – Дж · кг⁻¹, называемая *зивертом* (Зв) (см. также выше).

Значения W_T для отдельных видов ткани и органов приведены ниже:

Вид ткани, орган	W_T
Гонады.....	0,2
Костный мозг, (красный), легкие, желудок.....	0,12
Печень, грудная железа, щитовидная железа.	0,05
Кожа.....	0,01

Поглощенная, экспозиционная и эквивалентная дозы, отнесенные к единице времени, носят название мощности соответствующих доз.

Описанные виды доз относятся к отдельному человеку, то есть являются индивидуальными.

Просуммировав индивидуальные эффективные эквивалентные дозы, полученные группой людей, мы придем к коллективной эффективной эквивалентной дозе, которая измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв).

Следует ввести еще одно определение.

Многие радионуклиды распадаются очень медленно и останутся в отдаленном будущем.

Коллективную эффективную эквивалентную дозу, которую получают поколения людей от какого-либо радиоактивного источника за все время его существования, называют *ожидаемой (полной) коллективной эффективной эквивалентной дозой*.

Активность препарата – это мера количества радиоактивного вещества.

Определяется активность числом распадающихся атомов в единицу времени, то есть скоростью распада ядер радионуклида.

Единицей измерения активности является одно ядерное превращение в секунду. В системе единиц СИ она получила название *беккерель (Бк)*.

За внесистемную единицу активности принята *кюри (Ки)* – активность такого числа радионуклида, в котором происходит $3,7 \times 10^{10}$ актов распада в

секунду. На практике широко пользуются производными Ки: милликюри — $1 \text{ мКи} = 1 \times 10^{-3} \text{ Ки}$; микрокюри — $1 \text{ мкКи} = 1 \times 10^{-6} \text{ Ки}$.

1.4. Регистрация ионизирующих излучений

Для обнаружения ионизирующих излучений используют их способность облучать вещество среды, в которой они распространяются. Вследствие облучения, какого либо материала происходит изменение физических и химических параметров в материале. К таким изменениям среды относятся: изменения электропроводности веществ (газов, жидкостей, твердых материалов); люминесценция (свечение) некоторых веществ; засвечивание фотопленок; изменение цвета, окраски, прозрачности, сопротивления электрическому току некоторых химических растворов и др. Именно по этим изменениям можно обнаружить источники радиоактивного излучения, также по ним можно определить какое это излучение и дать какую-то его оценку. Основными методами для обнаружения и измерения ионизирующих излучений являются:

- сцинтилляционный,
- фотографический,
- химический,
- ионизационный.

Сцинтилляционный метод. В физике сцинтилляцией называют вспышку света, возникающую при попадании заряженной частицы в среду, обладающую способностью люминесцировать. В некоторых люминофорах, например в сернистом цинке, сцинтилляция (световая вспышка), вызванная заряженными частицами, является достаточно яркой и может наблюдаться невооруженным глазом.

В настоящее время метод сцинтилляций получил современное техническое выражение и широко используется в науке и технике. Сцинтилляции теперь наблюдают и считают не визуально, а с помощью специальных устройств, называемых сцинтилляционными счетчиками. Преимуществом сцинтилляционных счетчиков является очень короткое разрешающее время (10^{-8} с) и очень большая скорость счета частиц, которая на несколько порядков превышает скорость счета ионизационных счетчиков. Важной особенностью сцинтилляционных счетчиков является их способность оценивать энергию регистрируемых частиц, поскольку интенсивность сцинтилляций пропорциональна энергии частиц. Сцинтилляционный счетчик объединил в себе достоинства счетчика Гейгера-Мюллера и пропорционального счетчика и при всем этом он превзошел их по многим показателям.

Фотографический метод. Сущность метода заключается в использовании специальных фотоэмульсий для регистрации быстрых

заряженных частиц. Фотоэмульсии, применяемые для указанных целей, принято называть ядерными.

Заряженные частицы, попадая в слой фотоэмульсии, нанесенный на фотопластинку, вызывают ионизацию молекул фотоэмульсии, вызывающую почернение ее зерен. После химической обработки фотопластинки (проявления и фиксирования) следы (треки), оставленные пролетевшими через фотоэмульсию частицами, становятся видимыми. Их наблюдают с помощью микроскопа.

По форме отмеченного трека, его длине и толщине, по плотности почерневших зерен эмульсии и по многим другим признакам можно установить вид частицы, ее энергию, скорость, направление движения и многие другие характеристики. Одно из основных преимуществ метода толстослойных эмульсий перед другими методами регистрации частиц заключается в том, что с его помощью получают не исчезающие со временем следы частиц, которые в дальнейшем могут быть тщательно изучены. Треки частиц, получаемые в фотоэмульсии, являются тонкими и отчетливыми, что увеличивает точность измерений.

Метод толстослойных эмульсии. Фотоэмульсия содержит большое количество микроскопических кристалликов бромида серебра. Быстрая заряженная частица, проходящая через фотоэмульсию, отрывает электроны от отдельных атомов брома. Цепочка таких кристалликов образует скрытое изображение. При проявлении в этих кристалликах восстанавливается металлическое серебро, и цепочка зерен серебра образует трек частицы. По длине и толщине трека можно оценить энергию и массу частицы. Данный метод играет исключительно важную роль в исследованиях космических лучей и различных превращений, вызываемых элементарными частицами, разогнанными до очень высоких энергий в ускорителях заряженных частиц.

Химический метод. Этот метод основан на свойстве ионизирующих излучений менять структуру некоторых химических элементов. Например, хлороформ в воде при облучении разлагается с образованием соляной кислоты, которая дает цветную реакцию с красителем, добавленным к хлороформу. Двухвалентное железо в кислой среде окисляется в трехвалентное под воздействием свободных радикалов $\text{HO}_2\cdot$ и $\text{OH}\cdot$, образующихся в воде при ее облучении. Трехвалентное железо с красителем дает цветную реакцию. По плотности окраски судят о дозе излучения (поглощенной энергии). На этом принципе основаны химические дозиметры. В современных дозиметрических приборах широкое распространение получил ионизационный метод обнаружения и измерения ионизирующих излучений.

Ионизационный метод. Под воздействием излучений в изолированном объеме происходит ионизация газа, электрически нейтральные атомы (молекулы) газа разделяются на положительные и отрицательные ионы. Если в этот объем поместить два электрода, к которым приложено постоянное напряжение, то между электродами создается электрическое поле. При наличии электрического поля в ионизированном газе возникает направленное

движение заряженных частиц, т.е. через газ проходит электрический ток, называемый ионизационным. Измеряя ионизационный ток, можно судить об интенсивности ионизирующих излучений.

Приборы, работающие на основе ионизационного метода, имеют принципиально одинаковое устройство и включают: воспринимающее устройство (ионизационную камеру или газоразрядный счетчик), усилитель ионизационного тока, регистрирующее устройство (микроамперметр) и источник питания.

Для решения практических задач применяются дозиметрические приборы и комплекты для оценки ионизирующих излучений. Они обеспечивают ведение радиационной разведки, дозиметрического контроля радиоактивного облучения людей и животных, определение степени радиоактивного загрязнения объектов, техники, продовольствия, воды, окружающей среды и др. К дозиметрическим приборам относятся дозиметры (измерители дозы), рентгенометры (измерители мощности дозы), индикаторы радиоактивности, радиометры, спектрометры и др. По месту и условиям эксплуатации дозиметрические приборы подразделяются на индивидуальные, подвижные (смонтированные на наземных машинах, судах и кораблях, летательных аппаратах) и стационарные.

1.5. Биологическое действие ионизирующих излучений

Характер и выраженность биологического действия ионизирующей радиации зависят от ряда физических и биологических факторов:

- *вида ионизирующих излучений;*
- *дозы и её мощности;*
- *кратности облучения;*
- *экспозиции облучения;*
- *вида биологического объекта;*
- *площади облучения и её локализации на теле человека.*

У разных биологических объектов чувствительность к действию ионизирующих излучений (радиочувствительность) различается в сотни и тысячи раз. Мерой радиочувствительности является доза облучения, вызывающая гибель 50 % клеток или органов (ЛД₅₀). Так, для клеток млекопитающих радиочувствительность составляет 2-3,5 Зв, для взрослых млекопитающих – от 3,5-7,0 Зв до 10-12 Зв, для бактерий и дрожжей – 100-450 Зв, а для взрослых насекомых – 300-500 Зв.

Радиочувствительность растений сильно зависит от их фазы развития во время облучения. Они наиболее чувствительны в ранние фазы развития, когда страдают зоны активного роста, т.е. молодые делящиеся клетки. Существует

также видовая и сортовая радиочувствительность растений. Так, лук гибнет при дозе 1,5 Зв, рожь, ячмень – при 4,3 Зв, пшеница, горох – при 4,5 Зв, естественные травы – при 12 Зв.

1.5.1. Механизмы повреждающего воздействия ионизирующих излучений

Под воздействием ионизирующего излучения на организм человека в тканях могут происходить сложные физические и биологические процессы. В результате ионизации живой ткани происходит разрыв молекулярных связей и изменение химической структуры различных соединений, что в свою очередь приводит к гибели клеток (прямое действие радиации).

Еще более существенную роль в формировании биологических последствий играют продукты радиолиза воды, которая составляет 60-70% массы биологической ткани. Под действием ионизирующего излучения на воду образуются свободные радикалы $H\cdot$ и $OH\cdot$, а в присутствии кислорода также свободный радикал гидропероксида ($HO_2\cdot$) и пероксида водорода (H_2O_2), являющиеся сильными окислителями. Продукты радиолиза вступают в химические реакции с молекулами тканей, образуя соединения, не свойственные здоровому организму. Это приводит к нарушению отдельных функций или систем, а также жизнедеятельности организма в целом (косвенное действие радиации).

Интенсивность химических реакций, индуцированных свободными радикалами, повышается, и в них вовлекаются многие сотни и тысячи молекул, не затронутых облучением. В этом состоит специфика действия ионизирующего излучения на биологические объекты, то есть производимый излучением эффект обусловлен не столько количеством поглощенной энергии в облучаемом объекте, сколько той формой, в которой эта энергия передается. Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической и др.), поглощенной биологическим объектом в том же количестве, не приводит к таким изменениям, какие вызывают ионизирующие излучения.

Ионизирующая радиация при воздействии на организм человека может вызвать два вида эффектов, которые клинической медициной относятся к болезням: детерминированные пороговые эффекты (лучевая болезнь, лучевой ожог, лучевая катаракта, лучевое бесплодие, аномалии в развитии плода и др.) и стохастические (вероятностные) беспороговые эффекты (злокачественные опухоли, лейкозы, наследственные болезни).

Степень воздействия радиации зависит от того, является облучение внешним или внутренним (при попадании радиоактивного изотопа внутрь организма). Хотя на практике встречаются случаи и комплексного воздействия.

Внешнее облучение подразделяют на облучение всего тела, местное (облучение части организма), контактное, дробное, острое и хроническое. *Дробное облучение* – облучение, совершаемое многократно с интервалами

между отдельными воздействиями. *Острое облучение* – однократное кратковременное облучение, когда организм получает значительную дозу. Оно может произойти в результате радиационной аварии или грубых нарушений правил радиационной безопасности. *Хроническое облучение* – постоянное действие ионизирующего излучения в течение длительного времени. *Контактное облучение* – это разновидность внешнего облучения, когда радиоактивное вещество или источник ионизирующего излучения соприкасается с кожным покровом организма.

Внутреннее облучение возможно при вдыхании, заглатывании радиоизотопов и проникновении их в организм через кожу. Некоторые вещества поглощаются и накапливаются в конкретных органах, что приводит к высоким локальным дозам радиации.

Биологический эффект при внутреннем облучении организма значительно выше. Это объясняется рядом причин:

1. Время облучения увеличивается и совпадает со временем пребывания радиоактивного вещества в организме.
2. Доза облучения резко возрастает из-за бесконечно малого расстояния до ионизируемой ткани.
3. Отсутствует защитное действие кожи. Альфа-частица из полностью безопасных при внешнем облучении становятся наиболее опасными.
4. Невозможно использовать методы защиты, которые разработаны для внешнего облучения.

Наиболее опасен ингаляционный путь поступления радиоактивных веществ – из-за большого объема легочной вентиляции и более высокого коэффициента захвата и усвоения изотопов из воздуха (табл.1).

При проникновении радиоактивных веществ внутрь организма через органы дыхания в виде пыли, газов, паров часть из них осаждается на слизистой оболочке верхних дыхательных путей, откуда затем может попасть в желудок. Но наибольшую опасность представляют те, которые осаждаются в альвеолах легких (частицы размером менее 5 мкм), и особенно часть тонкодисперсных частиц (размер менее 1 мкм, до 70% задерживается в легких), которые могут проникать в общий кровоток, а затем избирательно отлагаться в различных тканях. Попадание радионуклидов в легкие в количествах значительно превышающих допустимые может сопровождаться различными изменениями в легочной ткани (например, пневмосклероз), а при длительном воздействии может возникнуть рак легких.

Инертные радиоактивные газы (аргон, ксенон, криптон и др.) попадая через легкие в кровь, через некоторое время полностью удаляются из организма. Присутствие их в воздухе определяет радиационную опасность только внешнего облучения.

Мелкодисперсные радиоактивные вещества могут попадать в желудочно-кишечный тракт. При всасывании из ЖКТ, также как и из легких, долю веществ поступающую в кровь характеризует коэффициент всасывания (табл. 1). Далее они, в соответствии с их химическими свойствами,

накапливаются в отдельных органах, подвергая их облучению. Например: радий, кальций, фосфор, стронций, барий накапливаются в костях; церий, прометий, америций, кюрий, редкоземельные элементы, лантан – в печени, плутоний – в легких, костях; йод – в щитовидной железе; уран – в легких, почках, костях; тритий, углерод, рубидий, натрий, кобальт, цезий распределяются в организме равномерно.

Наиболее опасными при попадании внутрь организма оказываются α -излучающие радионуклиды. Пробег α -частиц мал и их энергия полностью поглощается вблизи места нахождения радионуклида. Степень опасности радионуклида также характеризуется скоростью его выведения из организма. Как правило, не задерживаются в организме те радионуклиды, которые одинаковы с элементами употребляемыми человеком с пищей (натрий, хлор, калий и др.). Они выводятся вместе с такими же веществами. Некоторые же элементы, попав в организм, трудно из него удаляются (уран, торий, плутоний).

Время, в течение которого количество данного химического элемента в организме уменьшается вдвое вследствие физиологического обмена, называется периодом биологического полувыведения T_6 . Для радионуклида время нахождения в организме зависит также и от периода полураспада. Поэтому для радионуклидов введено понятие эффективного периода полувыведения.

Эффективным периодом полувыведения $T_{эфф}$ называется время, в течение которого количество радионуклида (его активность) в организме уменьшается вдвое:

$$T_{эфф} = T_{1/2} T_6 / (T_{1/2} + T_6), \quad (6)$$

где $T_{1/2}$ – период полураспада радионуклида.

Из (6) следует, что если период полураспада мал, а период биологического полувыведения велик, то $T_{эфф}$ будет определяться $T_{1/2}$ и наоборот. В качестве примера в табл. 1 приведены значения эффективного периода полувыведения некоторых радионуклидов.

Некоторые радионуклиды с течением времени достигают равновесного состояния в организме. 20 радионуклидов не достигают равновесия в организме за период жизни человека (50 – 70 лет) (в табл.1 обозначены – *). Радионуклиды с большим периодом полураспада производят постоянное облучение организма, даже после прекращения работы с ними. Особенно опасны те из них, которые концентрируются вблизи костного мозга, в костях (стронций, плутоний).

Сочетание физических и химических свойств данного радионуклида определяют степень его радиотоксичности и, соответственно, величины дозовых пределов.

Медицинские последствия у облучённого человека могут иметь различный характер. Воздействие различных видов излучения вызывает изменения как у облучающегося индивидуума, так и у его потомства.

Таблица 1

Всасывание и выведение радиоактивных изотопов организмом

Элемент	Изотоп	Процент всасывания		Период полувыведения, сут.	
		из желудочно-кишечного тракта	из легких	биологический	эффективный
Тритий	^3H	100	100	12	12
Углерод	^{14}C	100	75	10	10
Натрий	^{24}Na	100	75	11	0,6
Фосфор	^{32}P	75	63	257	13,5
Сера	^{35}S	100	75	90	443
Калий	^{40}K	100	75	58	0,52
Кальций	^{45}Ca	60 .	55	16400	152
Рубидий	^{86}Rb	100	75	45	13,2
Стронций*	^{89}Sr	30-80	40-50	13000	50,3
	^{90}Sr				5700
Цирконий	^{95}Zr	0,01-0,05	25	450	56,0
Ниобий	^{95}Nb	0.02-0.2	25	760	33,5
Рутений	^{106}Ru	3	27	16	15
Йод	^{131}I	100	75	138	7,6
Ксенон	^{133}Xe	100	75	—	—
Цезий	^{137}Cs	100	75	70	65
Барий	^{140}Ba	100	75	70	65
Церий	^{144}Ce	0,01-0,05	25	563	191
Полоний	^{210}Po	6	28	30	25
Радон	^{222}Rn	100	75	—	—
Радий*	^{226}Ra	30	408	100	1800
Уран	^{238}U	0,3	25	200	20
Плутоний*	^{239}Pu	0,1-0,01	25	65000	$6,3 \times 10^4$

* - см.текст.

1.5.2. Зависимость «доза-эффект». Лучевая болезнь

Ионизирующая радиация обладает чрезвычайно высокой биологической эффективностью вообще. Однако, устойчивость различных организмов к ее воздействию очень сильно различается. Мера чувствительности к действию ионизирующего излучения называется радиочувствительностью. Она сильно различается уже в пределах одного вида. Радиочувствительность индивида также зависит от возраста и пола (наиболее устойчив зрелый возраст). В пределах же одного организма различные клетки и ткани еще более сильно различаются по радиочувствительности.

Клетки имеют тенденцию быть радиочувствительными, если у них есть три свойства:

- клетки имеют высокую скорость деления;
- клетки имеют возможность делиться долго в будущем;
- клетки не являются специализированными.

Таким образом, молодые и быстро растущие ткани наиболее радиочувствительны. Поэтому-то ткани и органы с интенсивно делящимися клетками наиболее чувствительны к радиации. Это, в первую очередь, органы систем кроветворения (костный мозг, селезенка) и пищеварительной системы (слизистая оболочка тонкой кишки), половые железы.

Причиной гибели организма обычно является поражение какого-либо одного органа, критического в данной ситуации. В диапазоне доз 3–9 Гр критической является кровеносная система. Гибель облученного организма наблюдается на 7–15 сутки после лучевого воздействия. Поражение кроветворения проявляется и при не смертельных лучевых поражениях. При лучевом поражении снижается также количество лейкоцитов. И в сочетании все это способствует развитию инфекционных осложнений.

При увеличении дозы радиации до 10–100 Гр, организмы погибают на 3–5 сутки, то есть тогда, когда "костномозговой синдром" еще не успел развиваться. Это происходит из-за того, что выходит из строя другой критический орган – кишечник. Он поражается и при меньших дозах, в диапазоне, когда гибель происходит из-за угнетения кроветворения, но при этом "синдром кишечника" не определяет исхода лучевой болезни, хотя и усугубляет ее тяжесть.

При еще больших дозах радиации (200–1000 Гр), непосредственной причиной гибели облученного организма является массовое разрушение клеток центральной нервной системы.

При дозах свыше 10 Гр клетки эпителия тонкого кишечника не выживают. Произойдет процесс проникновения внутрикишечных бактерий прямо в кровоток через оголенные капилляры. Инфекция быстро распространяется по телу в то время, когда его иммунная система так сильно потрясена потерей лейкоцитов. В связи с невозможностью удалить тонкий кишечник хирургическим путем острое облучение тела дозой в 1000 бэр считается предельной для выживания.

Таким образом, если говорить о радиочувствительности организма в целом, то она определяется чувствительностью к радиации клеток костного мозга и от их способности к восстановлению.

Нарушения биологических процессов могут быть либо обратимыми, когда нормальная работа клеток облученной ткани полностью восстанавливается, либо необратимыми, ведущими к поражению отдельных органов или всего организма и возникновению *лучевой болезни*.

Различают две формы лучевой болезни – острую и хроническую.

Острая форма возникает в результате облучения большими дозами в короткий промежуток времени. При дозах порядка тысяч рад поражение организма может быть мгновенным («смерть под лучом»). Острая лучевая болезнь может возникнуть и при попадании внутрь организма больших количеств радионуклидов. Вероятность возникновения вредных эффектов всегда растет с увеличением дозы облучения. Но если и степень тяжести вредных эффектов облучения возрастает с увеличением дозы, и выявляются они, начиная с какого-то порога, то такие эффекты называются *нестохастическими (пороговыми)*. К ним, например, относятся нарушение воспроизводительной функции, косметические повреждения кожи, помутнение хрусталика глаза (лучевая катаракта), дистрофические повреждения разных тканей и т.д.

Если же вероятность возникновения последствий облучения человека существует при сколь угодно малых дозах облучения, то эффекты их вызывающие называются *стохастическими* (см. выше). Основные стохастические эффекты – это канцерогенные (лейкемия и другие формы злокачественных новообразований) и генетические эффекты.

Цель радиационной защиты – предотвращение нестохастических эффектов и ограничение вероятности возникновения стохастических эффектов до уровней, считающихся приемлемыми.

Разнообразные формы проявления поражающего действия радиации на организм называют *лучевой болезнью*. В результате относительно равномерного действия т.н. "острых эффектов" развивается острая лучевая болезнь.

Термин "острые эффекты" применяется в отношении эффектов, которые проявляются в течение времени от нескольких часов до нескольких месяцев после получения дозы. Эффекты облучения всего тела показаны в таблице 2.

Термин "доклинический" означает, что эффект настолько слаб, что его нельзя определить обычным медицинским обследованием. Это не значит, что эффект отсутствует. Такие эффекты, как возросший риск некоторых форм раковых заболеваний или генетические эффекты в потомстве могут не проявляться много лет. Это означает, что медицинское обследование не способно доказать или опровергнуть наличие полученной дозы величиной до 100 бэр на все тело.

В "терапевтическом диапазоне" 100–1000 бэр наиболее критической проблемой будет поддержание минимального количества клеток циркулирующей крови. Так как многие кровяные клетки происходят от стержневых клеток в костном мозге, то эффекты, которые происходят в этом диапазоне, как отмечалось выше, называют "синдром костного мозга". Красный костный мозг и элементы кроветворной системы теряют

способность нормально функционировать при поглощённой дозе 0,5–1 Гр, но обладают высокой способностью к регенерации. При этом снижается количество тромбоцитов¹, что является одной из причин кровоточивости.

Лейкемия в данном случае означает падение количества лейкоцитов². Пурпура означает мелкие образования (пятна) красного или пурпурного цвета на коже, возникшие при разрыве капилляров и истечении небольшого количества крови в подкожном слое. Эпиляция означает выпадение волос.

Таблица 2

Клинические эффекты острых доз облучения

Критерии оценки	Доклинич. диапазон, бэр	Терапевтический диапазон 100- 1000 бэр			Летальный диапазон более 1000 бэр	
	менее 100	100-200	200-600	600-1000	1000-5000	более 5000
случаи рвоты	нет	100 бэр-5%; 200 бэр-50%	300 бэр-100%	100%	100%	
острый период	—	3 часа	2 часа	1 час	30 минут	
критический орган	нет	красный костный мозг			ЖКТ	ЦНС
характерный признак	нет	умеренная лейкемия	сильная лейкемия, инфекция, пурпура, эпилепсия (более 300 бэр)		понос, лихорадка, потеря электролитов	конвульсия, дрожь, атаксия
терапия	психотерапия	обследование крови	переливание крови, антибиотики	возможна пересадка костного мозга	поддержание электролитов	успокоительные, болеутоляющие
Прогноз	превосходный	хороший	сдержанный	сдержанный	безнадежный	
Смертность	нет	нет	0 - 80%	80 - 90%	90 - 100%	

В следующем диапазоне доз от 1 до 5 тысяч бэр наиболее критичным органом будет тонкий кишечник. Таким образом, эффекты в этом диапазоне называются "гастроэнтеростинальный синдром". Причиной поражения является внедрение бактерий в кровотоки. Баланс электролита нарушается из-за истечения плазмы крови в ЖКТ через разрушенные реснички.

¹ Тромбоциты -вид зрелых клеток крови, играют важную роль в организме при формировании кровяных сгустков; нормальное количество тромбоцитов около 200000 на мм³ крови.

² Лейкоциты (от греческого leukos -белый и kytos - вместилище, здесь - клетка), бесцветные клетки крови человека и животных. Образуются в органах кроветворения. Все типы лейкоцитов (лимфоциты, моноциты, базофилы, эозинофилы и нейтрофилы) имеют ядро и способны к активному движению. В организме поглощают бактерии и отмершие клетки, вырабатывают антитела. В 1 мм³ крови здорового человека содержится 4 - 9 тыс. лейкоцитов.

Рот и пищевод не радиочувствительны, как и все мышцы и соединительные ткани тела. Нужны значительные дозы, чтобы на них появились язвы. Желудок более чувствителен. При дозах в несколько сот бэр основные и пристеночные клетки понижают или прекращают полностью свою секреторную деятельность по выделению HCl и пепсина, которые помогают в пищеварении. В последующий период эти клетки опять возобновляют свою деятельность до нормального уровня. Толстый кишечник по чувствительности к облучению схож с желудком. Дозы свыше 1000 бэр приводят к образованию в нем язв.

Последний дозовый диапазон, свыше 5000 бэр назван "синдром ЦНС" из-за эффектов в нервной системе. Центральная нервная система (ЦНС) состоит, в основном, из мышечной и соединительной тканей. Замещение ее клеток в течение всей жизни не происходит. Поэтому она устойчива к облучению. ЦНС выдерживает дозы до 5000 бэр прежде, чем будет замечен эффект воздействия. Эта система обычно вырабатывает и передает электрические сигналы, необходимые для сокращения сердечной мышцы при работе сердца и сокращения мышц диафрагмы при дыхании. При высоких дозах эти сигналы поступают с перебоями или прекращаются на время. Это приводит к смерти облученного индивидуума через несколько часов.

Таким образом, если построить кривую зависимости сроков гибели облучаемых организмов от дозы облучения, на ней будут отчетливо наблюдаться три характерных участка, соответствующих диапазонам "костномозговой", "кишечной" и "нервной" форм гибели.

При этом важно понимать, что не принимался во внимание физиологический стресс. Этот фактор может сильно изменить некоторые представленные числовые данные.

В процессе развития острой лучевой болезни просматривается определенная периодичность. Различают три периода в ее течении: период формирования, период восстановления и период исходов, т.е. отдаленных последствий. Период формирования, в свою очередь, можно четко разделить на три фазы:

- Первая фаза — исчезает аппетит, появляются тошнота, рвота, слабость, потливость, сонливость, учащение пульса, изменение кровяного давления и состава крови. Пострадавший испытывает состояние опьянения. Это результат раздражения ЦНС. Такое состояние продолжается от нескольких часов до 2 — 3 дней.

- Вторая фаза — фаза кажущегося благополучия, которое в зависимости от поглощенной дозы может продолжаться от 14 до 32 дней. Признаки болезни исчезают, самочувствие нормализуется: периферическая кровь еще справляется с основными функциями. При этом самоускоряясь идут цепные свободно-радикальные реакции. Объективно регистрируются резкое снижение лейкоцитов в крови и другие физиологические нарушения.

- Третья фаза (фаза выраженных клинических проявлений) характеризуется резким ухудшением состояния больных, возобновляются

проявления начальной фазы болезни, а также появляются обширные кровоизлияния под кожей, кровотечения из носа, десен. Развиваются язвенные поражения слизистых оболочек. Третья фаза лучевой болезни длится 1-3 недели у больных подвергшихся лечению и при благоприятном течении переходит в фазу раннего восстановления. Ее продолжительность 2-2,5 месяца, хотя отдельные проявления еще имеют место.

Если воздействию радиации подвергается лишь часть организма, то величина смертельной дозы существенно возрастает. Если, например, вне зоны облучения оказывается хотя бы небольшая часть костного мозга, то непораженная его часть снабжает жизнеспособными клетками пострадавший организм и обеспечивает его выживание, даже при облучении смертельными дозами радиации в условиях общего облучения.

Репродуктивная система весьма уязвима к действию радиации. Производство сперматозоидов (молодых клеток спермы) у мужчин понижается или прекращается при низких дозах. Однократное облучение семенников в дозах 0,1–0,2 Гр приводит к временной стерильности с последующим полным восстановлением, дозы от 2 Гр и выше приводят к почти полной стерильности, восстановление функции наступает только через несколько лет. Семенники значительно лучше выдерживают разовое облучение, чем дробное (продолжительное). Однократное облучение в дозе более 3 Гр приводит к необратимой стерильности яичников. Аналогичные дозы, растянутые во времени не влияют на детородную функцию женщины.

Вся информация, представленная выше, дана для случаев облучения в течение короткого временного интервала. Во многих случаях (например, работе в радиационно-опасных условиях) доза накапливается индивидуумом постоянно на протяжении многих лет. В этих условиях получают возможность работать биологические восстановительные механизмы.

Хроническая лучевая болезнь может развиваться при систематически повторяющемся облучении ниже тех доз, которые вызывают острую форму. Наиболее характерными признаками хронической лучевой болезни являются изменения в крови, ряд симптомов со стороны нервной системы, локальные поражения кожи, поражения хрусталика, пневмоклероз (при ингаляции ^{239}Pu), снижение иммунореактивности организма. Как и при остром облучении возможны отдаленные последствия – лейкозы, злокачественные новообразования, раннее старение – одно из коварных свойств ионизирующего излучения.

Процесс восстановления после прекращения облучения идет очень медленно. Сущностью процесса восстановления, как при острой, так и при хронической лучевой болезни, является процесс размножения клеток, сохранивших жизнеспособность, и на этой основе восстановление функциональной активности органов. Скорость восстановления оценивается по величине периода полувосстановления – времени, необходимом для восстановления, например, костного мозга на 50%. Для человека это 25–45 дней. Остаточные явления могут исчезнуть значительно позднее в течение 1,5–2 лет, либо сохранятся до конца жизни.

Но даже полное восстановление организма не гарантирует его в будущем от опасности проявления отдаленных последствий действия ионизирующих излучений, а его потомство – от наследственных или врожденных нарушений.

Эти последствия могут наблюдаться в периоде нескольких лет после острого облучения. Их тяжесть в основном зависит от величины дозы, мощности дозы, возраста на момент облучения и состояния здоровья пострадавшего. Последствия обычно делят на две категории: генетические последствия, которые скажутся на потомстве облученного, и соматические последствия, которые произойдут с самим пострадавшим. Нет сомнений, что радиоактивное излучение является мутагеном, то есть причиной генетических мутаций. Всемирной организацией здравоохранения хорошо определены более 200 различных условий или болезней, которые генетически передаются от родителей потомству. Большинство из них не смертельны, а многие практически незаметны. Действительно, мутации с большими отклонениями в строении (лишние отростки или недостающие основные органы и т. д.) обычно не жизнеспособны. Довольно строгие стандарты «гарантии качества» в человеческом организме обычно приводят к спонтанному выкидышу на ранней стадии беременности.

Около 10% всех новорожденных имеют те или иные спонтанные генетические дефекты. Около половины всех случаев самопроизвольного выкидыша также связано с аномалиями в генетическом материале. Но даже если дети с наследственными дефектами рождаются живыми, то вероятность для них дожить до своего первого дня рождения в 5 раз меньше, чем для нормальных детей. В список заболеваний, к которым, как считают биологи, приводят генетические мутации можно включить: врожденные катаракты, анемия, мышечная дистрофия, болезнь Дауна, эпилепсия, низкий гамма-глобулин, дисбаланс стероидов, альбиносизм, диабет, астма.

Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) при оценке риска появления наследственных дефектов у человека использует два подхода. При одном подходе пытаются определить непосредственный эффект данной дозы облучения, при другом стараются определить дозу, при которой удваивается частота появления потомков с той или иной разновидностью наследственных дефектов по сравнению с нормальными радиационными условиями.

Для людей сформулированы относительно надежные оценки. Они сводятся к следующему:

- за счет естественного радиационного фона у человека возникает не более 5% общего числа спонтанных мутаций, все остальные — за счет других факторов;

- существует зависимость радиационно-генетического эффекта от мощности дозы излучения. По мере ее снижения число мутаций, вызываемых одной и той же дозой, сильно уменьшается;
- удваивающая доза для лейкозов 0,5 Гр, для других мутаций 1 Гр;
- облучение каждого поколения населения в дозе 0,01 Зв, на протяжении бесконечно длительного времени увеличит частоту самопроизвольных мутаций на 1%. Иными словами, если воздействовать в этой дозе на многие поколения, то на каждый миллион родившихся следовало бы ожидать от 50 до 1000 мутаций дополнительно к 25 тыс. самопроизвольных.

Имеющийся в настоящее время обширный экспериментальный материал и клинические наблюдения показали, что под влиянием облучения могут возникать новообразования практически во всех органах. Однако наиболее частыми следует считать лейкоз (рак крови), злокачественные опухоли кожи, костей, молочной железы и яичников. При этом кожные и костные опухоли возникают чаще всего при местном облучении, а остальные, как правило, в результате тотального воздействия.

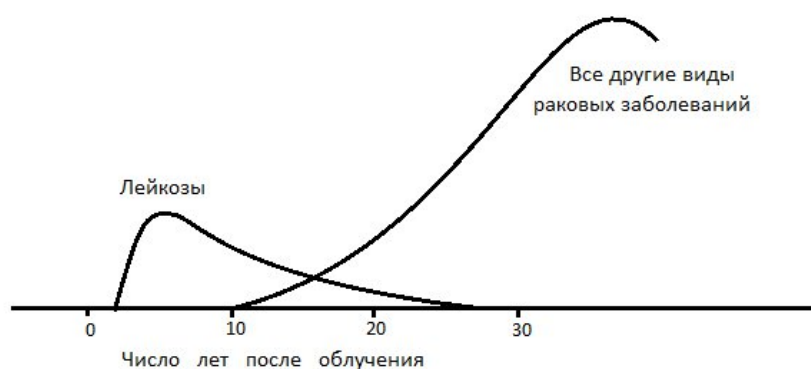


Рис.1. Вероятность возникновения онкологических заболеваний после однократного общего внешнего облучения в дозе 0,01 Гр.

На рис. 1 представлена относительная среднестатистическая вероятность заболевания после равномерного однократного облучения тела дозой в 0,01 Гр. График построен на основании результатов обследования людей, переживших атомную бомбардировку в Японии. Показано ориентировочное время появления лейкозов и других форм рака с момента облучения. Видно, что после двухлетнего скрытого периода развиваются лейкозы, достигая максимальной частоты через 6–7 лет, затем частота заболеваний плавно уменьшается и через 25 лет практически сводится к нулю. Другие опухоли начинают появляться через 10 лет после облучения и до 36–40 лет частота их нарастает. Однако, для построения всей кривой пока нет достаточной информации.

Риск возникновения раковых заболеваний приведен в табл.3. Все величины в табл.3. – это ожидаемые дополнительные случаи раковых заболеваний на миллион человек в год от каждой дозы излучения в 1 бэр, если принята за основу линейная беспороговая концепция (рекомендация НКДАР).

Таблица 3

Оценка риска дополнительных случаев раковых заболеваний

Случаи на миллион человек в год при облучении дозой в 10 мЗв	
Вид ракового заболевания	Избыточный риск
Лейкемия, взрослые	1,1
Щитовидная железа, мужчины	2,2
Щитовидная железа, женщины	5,8
Грудь женщины	5,8
Легкие мужчины	3,6
Легкие женщины	3,9

В соответствии с НРБ-99 (п. 1.5) для наиболее полной оценки вреда, который может быть нанесен здоровью в результате облучения в малых дозах, определяется ущерб, количественно учитывающего как эффекты облучения отдельных органов и тканей тела, отличающиеся радиочувствительностью к ионизирующему излучению, так и всего организма в целом. В соответствии с общепринятой в мире линейной беспороговой теорией зависимости риска стохастических эффектов от дозы, величина риска пропорциональна дозе излучения и связана с дозой через линейные коэффициенты радиационного риска, приведенные в таблице:

Таблица 4

Риск радиобиологических эффектов в зависимости от дозы

Облучаемая группа населения	Коэффициент риска злокачественных новообразований, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Коэффициент риска наследственных эффектов, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$	Сумма, $\times 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$
Все население	5,5	0,2	5,7
Взрослые	4,1	0,1	4,2

Усредненная величина коэффициента риска, используемая для установления пределов доз персонала и населения, принята равной $0,05 \text{ Зв}^{-1}$.

В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года устанавливаются исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска:

- для персонала – $1,0 \times 10^{-3}$;
- для населения – $5,0 \times 10^{-5}$.

Уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} .

При обосновании защиты от источников потенциального облучения в течение года принимаются следующие граничные значения обобщенного риска (произведение вероятности события, приводящего к облучению, и вероятности смерти, связанной с облучением):

- персонал - $2,0 \times 10^{-4}$, год⁻¹;
- население - $1,0 \times 10^{-5}$, год⁻¹.

1.5.3. Аварийное облучение

Принятие решений о мерах защиты населения в случае радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании прогнозируемой дозы в соответствии с Нормами радиационной безопасности НРБ-99 (см.п. 1.5) .

Доза внешнего облучения накапливается в организме в течение всего времени пребывания на загрязненной территории, причем накопление дозы в организме происходит неравномерно. Большая ее часть накапливается в первые часы и дни после выпадения радионуклидов, когда уровень радиации наиболее высокий. В первые сутки накапливается 50 % суммарной дозы до полного распада радиоактивных веществ, за четверо суток – 60 %. Поэтому особенно важно обеспечить защиту от радиации в первые четверо суток после аварии. Доза, полученная живым организмом в течение 4-х суток подряд (в любом распределении по дням), называется однократной. При продолжительном облучении в организме, наряду с процессами поражения, происходят и процессы восстановления. В связи с этим и суммарная доза облучения, вызывающая один и тот же эффект, при продолжительном многократном облучении более высокая, чем при однократном.

При попадании в организм с пищей, большая часть радионуклидов проходит кишечник транзитом и выделяется из организма. Однако, при этом они вызывают радиационное поражение слизистой оболочки желудочно-кишечного тракта. Другая часть изотопов, биологически наиболее активных, к которым в первую очередь относятся йод-131, стронций-90 и цезий-137, обладает высокой радиоактивностью и почти полностью всасываются в кишечник, распределяясь по органам и тканям организма. Органы и ткани, в которых происходит избирательная концентрация радионуклида, вследствие

чего они подвергаются наибольшему облучению и повреждению, называются критическими. Так, наибольшее количество радиоактивного йода концентрируется в щитовидной железе. Поскольку в первые дни после аварии радионуклиды йода (от йода-128 до йода-139) составляют 20-80 % суммарной активности следа, то щитовидная железа облучается в тысячи раз сильнее, чем другие органы. Это приводит к ее воспалению, некрозу, полному прекращению функции, что является причиной истощения и гибели организма. Радиоизотопы стронция концентрируются в костной ткани, нарушая функции кроветворения костного мозга. Цезий-137 равномерно распределяется в мышечной ткани и поэтому менее опасен, чем радиоизотопы йода и стронция. Для всех радионуклидов, а их вследствие аварии выделяется более 200, критическими органами будут кроветворная система и половые железы (гонады).

Как уже отмечалось, попавшие в организм радиоактивные изотопы выводятся из него. Большая часть радиоактивных веществ выделяется из организма с калом, меньшая с мочой и потом. У сельскохозяйственных животных РВ выделяются также с молоком (с 1 л молока выделяется 1 % поступившего за сутки йода-131, 0,1-0,9 % изотопов стронция и бария, до 2 % цезия-137. У птиц наибольшее количество изотопов выделяется с яйцами.

С точки зрения аварийного облучения большое значение имеют рассмотренные выше характеристики: период биологического полувыведения, эффективный период полувыведения.

Особую опасность на загрязненной местности несут в себе так называемые «горячие» частицы. Это частицы микрометровых и субмикрометровых размеров, которые обладают на несколько порядков большей абсолютной активностью, чем средняя активность частиц данного аэрозоля. При внешнем облучении они не могут причинить сколь-нибудь заметный урон здоровью человека. Однако, попадая в дыхательные органы или желудочно-кишечный тракт, могут вызвать острые радиационные поражения и даже с летальным исходом. Поэтому при работе на загрязненной территории даже при низких уровнях радиации, на объектах должны работать системы очистки воздуха, а люди, находящиеся на открытой местности, должны использовать индивидуальные средства защиты органов дыхания.

Действие ионизирующих излучений на растительный покров. В зависимости от размеров частиц, густоты травостоя или плотности насаждений, формы листа и характера его поверхности (гладкая или опушенная), на растениях задерживается от 10 до 25 % оседающей на землю радиоактивной пыли. Радиоактивные вещества, выпадающие на растения, не

только загрязняют поверхность, но и всасываются через листья внутрь, а оказавшись в почве, начинают поступать в растения через корневую систему. Поскольку для этого нужно некоторое время, то короткоживущие изотопы успевают распасться. Поэтому из почвы поступают долгоживущие, и в первую очередь стронций-90. Эти изотопы депонируют в листьях, стеблях и значительно меньше (до 2 %) — в зерне.

При выпадении радиоактивных веществ на лесные массивы, продукты деления задерживаются преимущественно кронами деревьев (40-90 %), причем лиственных пород лучше, чем хвойных. Атмосферные осадки и ветер перемещают радиоизотопы под полог лесов. Часть их проникает внутрь древесных пород и распространяется либо равномерно по всему стволу (береза), либо преимущественно в наружных слоях ствола (сосна). Значительное количество радиоактивных веществ в лесах поглощается грибами и ягодами и содержится в мясе зверей и птиц.

Радиоактивные осадки загрязняют также не укрытые продовольствие, корма, воду. Вследствие этого они могут оказаться опасными для потребления людьми и животными. Оседая на дно водоемов, радиоактивные вещества заражают обитателей водоемов и придонную растительность. Заражение водоемов усиливается за счет смывания изотопов с окружающей территории дождями и талыми водами. Крупные водоемы, особенно быстротекущие реки, быстро очищаются от радионуклидов; в мелких водоемах, шахтных колодцах загрязнение сохраняется длительное время.

Выше рассмотрено поражающее воздействие на людей, животных и растительность ионизирующих излучений техногенного происхождения, которые могут иметь место в результате радиационной аварии или вследствие нахождения техногенных источников ионизирующего излучения вне контроля человека по другим причинам (утраченные, рассеянные в окружающей среде по различным причинам и др.). Однако население подвергается облучению и от других искусственных, а также природных (естественных) излучений (фоновое облучение). На эти облучения законодательством и нормативными документами установлены основные дозовые пределы облучения и предусмотрены меры по ограничению облучения населения в контролируемых условиях и в условиях радиационной аварии (в неконтролируемых условиях).

1.6. Нормы радиационной безопасности

Вопросы радиационной безопасности регламентируется Федеральным законом «О радиационной безопасности населения», нормами радиационной безопасности (НРБ–99) и другими правилами и положениями. В законе «О

радиационной безопасности населения» говорится: «Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения» (статья 1).

«Граждане Российской Федерации, иностранные граждане и лица без гражданства, проживающие на территории Российской Федерации, имеют право на радиационную безопасность. Это право обеспечивается за счет проведения комплекса мероприятий по предотвращению радиационного воздействия на организм человека ионизирующего излучения выше установленных норм, правил и нормативов, выполнения гражданами и организациями, осуществляющими деятельность с использованием источников ионизирующего излучения, требований к обеспечению радиационной безопасности» (статья 22).

Гигиеническая регламентация ионизирующего излучения осуществляется Нормами радиационной безопасности НРБ–99 (Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523 - 09).

При обеспечения радиационной безопасности руководствуются следующими основными принципами:

- непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- 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);
- 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).

Основные дозовые пределы облучения и допустимые уровни устанавливаются для следующих категорий облучаемых лиц:

- персонал – лица, работающие с техногенными источниками (группа А) или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б);
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливают три класса нормативов: основные пределы доз (ПД), табл. 5, допустимые уровни, соответствующие основным пределам доз, и контрольные уровни.

Основные дозовые пределы облучения лиц из персонала и населения не включают в себя дозы от природных, медицинских источников ионизирующего излучения и дозу вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Годовая эффективная доза облучения равна сумме эффективной дозы внешнего облучения, накопленной за календарный год, и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же период. Интервал времени для определения величины ожидаемой эффективной дозы устанавливается равным 50 лет для лиц из персонала и 70 лет – для лиц из населения.

При проведении обоснованных медицинских рентгенорадиологических обследований в связи с профессиональной деятельностью или в рамках медико-юридических процедур, а также рентгенорадиологических профилактических медицинских и научных исследований практически здоровых лиц, не получающих прямой пользы для своего здоровья от процедур, связанных с облучением, годовая эффективная доза не должна превышать 1 мЗв.

Таблица 5

Основные пределы доз (извлечение из НРБ–99)

Нормируемые величины*	Пределы доз, мЗв	
	Персонал (группа А)**	Население
Эффективная доза эквивалентная доза за год:	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
в хрусталике глаза***	150	15
коже****	500	50
кистях и стопах	500	50

Примечания:

* Допускается одновременное облучение до указанных пределов по всем нормируемым величинам.

** Основные пределы доз, как и все остальные допустимые уровни облучения персонала группы В, равны 1/4 значений для персонала группы А. Далее в тексте все нормативные значения для категории персонал приводятся только для группы А.

*** 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 табл. 6 приведены значения допустимого радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды, спецобуви средств индивидуальной защиты персонала.

Таблица 6

Допустимые уровни радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей, кожи, спецодежды и средств индивидуальной защиты, част/(см² • мин) (извлечение из НРБ–99)

Объект загрязнения	α -Активные нуклиды		β -Активные нуклиды
	отдельные	прочие	
Неповрежденная кожа, полотенца, спецбелье, внутренняя поверхность лицевых частей средств индивидуальной защиты	2	2	200
Основная спецодежда, внутренняя поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, наружная поверхность спецобуви	5	20	2000
Наружная поверхность дополнительных средств индивидуальной защиты, снимаемой в саншлюзах	50	200	10000
Поверхности помещений постоянного пребывания персонала и находящегося в них оборудования	5	20	2000
Поверхности помещений периодического пребывания персонала и находящегося в них оборудования	50	200	10000

В отношении природных источников облучения, таких как радон (см. п. 2.1.3) действуют следующие нормы радиационной безопасности. 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 ЭРОА Rn + 4,6•ЭРОА Tn не превышала 100 Бк/м³, а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2мкЗв/ч.

В эксплуатируемых жилых и общественных зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых и общественных помещений ЭРОА Rn + 4,6•ЭРОА Tn 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 случае возникновения аварии (см. учебно-методическое пособие «Радиационная безопасность: аварии в атомной энергетике и ядерное оружие») необходимо обеспечивать максимально возможное превышение пользы от снижения дозы облучения над ущербом, связанным с проведением этих мероприятий.

Если предполагаемая доза излучения за короткий срок (2 суток) достигает уровней, при превышении которых возможны детерминированные эффекты (табл. 7), необходимо срочное вмешательство (меры защиты).

Таблица 7

**Прогнозируемые уровни облучения,
при которых необходимо срочное вмешательство**

Орган или ткань	Поглощенная доза в органе или ткани за 2 суток, Гр
Все тело	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0,1

При хроническом облучении в течение жизни защитные мероприятия становятся обязательными, если годовые поглощенные дозы превышают значения, приведенные в таблице 8. Превышение этих доз приводит к серьезным детерминированным эффектам.

Таблица 8

Уровни вмешательства при хроническом облучении

Орган или ткань	Годовая поглощенная доза, Гр
Гонады	0,2
Хрусталик глаза	0,1
Красный костный мозг	0,4

Уровни вмешательства для временного отселения населения составляют: для начала временного отселения – 30 мЗв в месяц, для окончания временного отселения 10 мЗв в месяц. Если прогнозируется, что накопленная за один месяц доза будет находиться выше указанных уровней в

течение года, следует решать вопрос об отселении населения на постоянное место жительства.

Принятие решений о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, и уровней загрязнения с уровнями А и Б, приведенными в табл. 9-11.

Таблица 9

**Критерии для принятия неотложных решений
в начальном периоде радиационной аварии**

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр			
	на все тело		щитовидная железа, легкие, кожа	
	уровень А	уровень Б	уровень А	уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика: взрослые	-	-	250*	2500*
	-	-	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000

* Только для щитовидной железы

Таблица 10

**Критерии для принятия решений об отселении и ограничении
потребления загрязненных пищевых продуктов**

Меры защиты	Предотвращаемая эффективная доза, мЗв	
	уровень А	уровень Б
Ограничение потребления загрязненных пищевых продуктов и питьевой воды	5 за первый год 1 /год в последующие годы	50 за первый год 10 /год в последующие годы
Отселение	50 за первый год	500 за первый год
	1000 за все время отселения	

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, не превосходит уровень А, нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Таблица 11

**Критерии для принятия решений об ограничении потребления
загрязненных продуктов питания в первый год после возникновения
аварии**

Радионуклиды	Удельная активность радионуклида в пищевых продуктах, кБк/кг	
	уровень А	уровень Б

^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs	1	10
^{90}Sr	0,1	1,0
^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am	0,01	0,1

2. Источники ионизирующей радиации

2.1. Естественная радиация

В законодательстве Российской Федерации естественная радиация трактуется как доза излучения, создаваемая космическим излучением и излучением природных радионуклидов, естественно распределенных в земле, воде, воздухе, других элементах биосферы, пищевых продуктах и организме человека. Естественный радиационный фон, измененный в результате деятельности человека, называется техногенно измененным радиационным фоном.

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (рис. 2). Большинство из них таковы, что избежать облучения от них совершенно невозможно. На протяжении всей истории существования Земли разные виды излучения падают на поверхность Земли из космоса и поступают от радиоактивных веществ, находящихся в земной коре. Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи; в этом случае говорят о внешнем облучении. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или в воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним.

Облучению от естественных источников радиации подвергается любой житель Земли, однако одни из них получают большие дозы, чем другие. Это зависит, в частности, от того, где они живут. Уровень радиации в некоторых местах земного шара, там, где залегают особенно радиоактивные породы, оказывается значительно выше среднего, а в других местах, соответственно, ниже. Доза облучения зависит также от образа жизни людей. Применение некоторых строительных материалов, использование газа для приготовления пищи, открытых угольных жаровень, герметизация помещений и даже полеты на самолетах – все это увеличивает уровень облучения за счет естественных источников радиации.

Земные источники радиации в сумме ответственны за большую часть облучения, которому подвергается человек за счет естественной радиации. В среднем они обеспечивают более $\frac{5}{6}$ годовой эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением, в основном вследствие внутреннего облучения. Остальную часть вносят космические лучи, главным образом путем внешнего облучения (рис. 3).

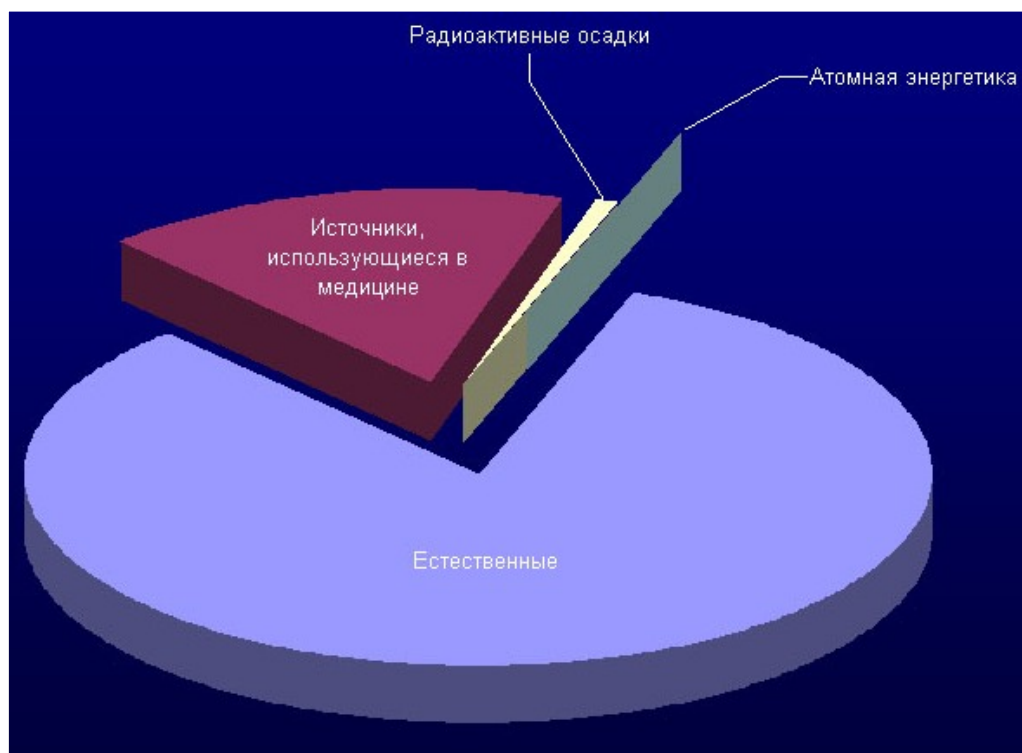


Рис. 2. Различные источники радиации

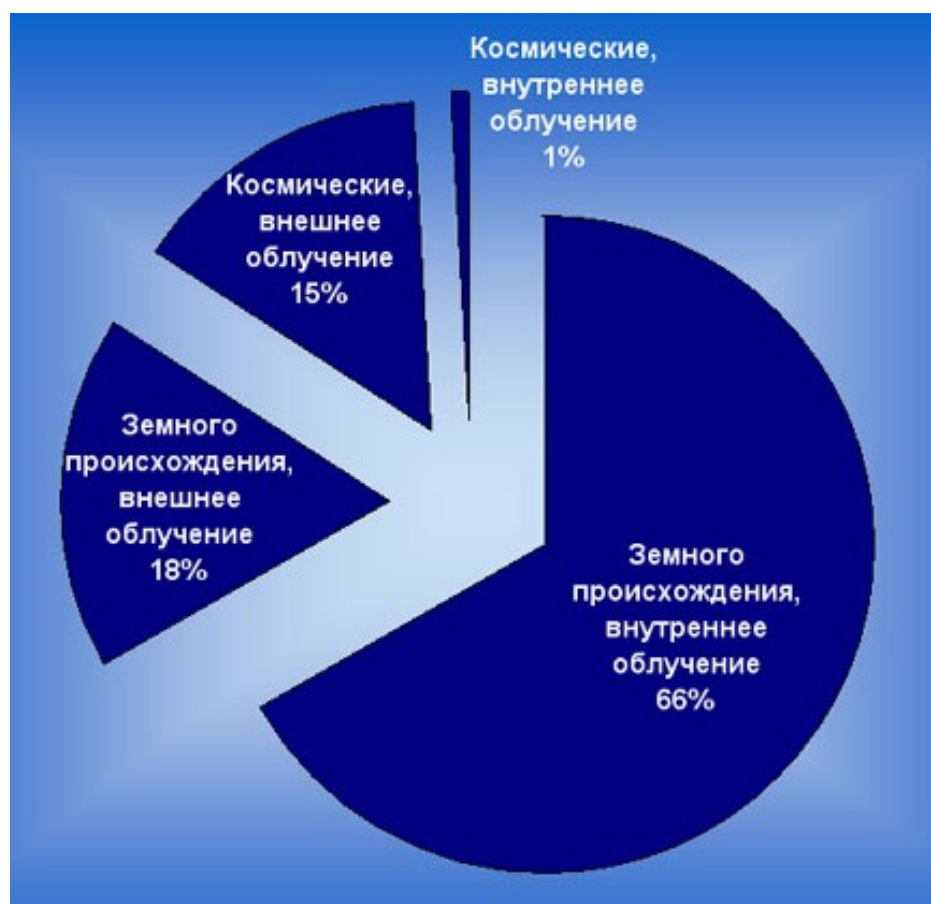


Рис. 3. Естественные источники радиации

2.1.1. Космическая радиация

Космические лучи – элементарные частицы и ядра атомов, родившиеся и ускоренные до высоких энергий во Вселенной.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации. Космические лучи в основном приходят к нам из глубин Вселенной, но некоторая их часть рождается на Солнце во время солнечных вспышек. Космические лучи могут достигать поверхности Земли или взаимодействовать с ее атмосферой, порождая вторичное излучение и приводя к образованию различных радионуклидов.

Нет такого места на Земле, куда бы не падал этот невидимый космический душ. Но одни участки земной поверхности более подвержены его действию, чем другие. Северный и Южный полюсы получают больше радиации, чем экваториальные области, из-за наличия у Земли магнитного поля, отклоняющего заряженные частицы (из которых в основном и состоят космические лучи). Существеннее, однако, то, что уровень облучения растет с высотой, поскольку при этом над нами остается все меньше воздуха, играющего роль защитного экрана.

Люди, живущие на уровне моря, получают в среднем из-за космических лучей эффективную эквивалентную дозу около 300 мкЗв в год; для людей же, живущих выше 2000 м над уровнем моря, это величина в несколько раз больше. Еще более интенсивному, хотя и относительно непродолжительному облучению, подвергаются экипажи и пассажиры самолетов. При подъеме с высоты 4000 м (максимальная высота, на которой расположены человеческие поселения: деревни шерпов на склонах Эвереста) до 12000 м (максимальная высота полета трансконтинентальных авиалайнеров) уровень облучения за счет космических лучей возрастает примерно в 25 раз и продолжает расти при дальнейшем увеличении высоты до 20000 м (максимальная высота полета сверхзвуковых реактивных самолетов) и выше.

При перелете из Нью-Йорка в Париж пассажир обычного турбореактивного самолета получает дозу около 50 мкЗв, а пассажир сверхзвукового самолета – на 20% меньше, хотя подвергается более интенсивному облучению. Это объясняется тем, что во втором случае перелет занимает гораздо меньше времени. Всего за счет использования воздушного транспорта человечество получает в год коллективную эффективную эквивалентную дозу около 2000 чел-Зв.

2.1.2. Земная радиация

Земная радиация обусловлена совокупностью излучения радионуклидов, содержащихся в горных породах, почве, воде, атмосфере.

Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, – это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от урана-238 и тория-232 – долгоживущих изотопов, включившихся в состав Земли с самого ее рождения.

Разумеется, уровни земной радиации неодинаковы для разных мест земного шара и зависят от концентрации радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они примерно одного порядка. Так, согласно исследованиям, проведенным во Франции, ФРГ, Италии, Японии и США, примерно 95% населения этих стран живет в местах, где мощность дозы облучения в среднем составляет от 0,3 до 0,6 мЗв в год. Но некоторые группы населения получают значительно большие дозы облучения: около 3% получает в среднем 1 миллизиверт в год, а около 1,5% – более 1,4 мЗв в год. Есть, однако, такие места, где уровни земной радиации намного выше.

Неподалеку от города Посус-ди-Кал-дас в Бразилии, расположенного в 200 км к северу от Сан-Паулу, есть небольшая возвышенность. Как оказалось, здесь уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает 250 мЗв в год. По каким-то причинам возвышенность оказалась необитаемой. Однако лишь чуть меньшие уровни радиации были зарегистрированы на морском курорте, расположенном в 600 км к востоку от этой возвышенности.

Гуарапари – небольшой город с населением 12000 человек – каждое лето становится местом отдыха примерно 30000 курортников. На отдельных участках его пляжей зарегистрирован уровень радиации 175 мЗв в год. Радиация на улицах города оказалась намного ниже – от 8 до 15 мЗв в год, – но все же значительно превышала средний уровень. Сходная ситуация наблюдается в рыбацкой деревушке Меаипе, расположенной в 50 км к югу от Гуарапари. Оба населенных пункта стоят на песках, богатых торием.

В другой части света, на юго-западе Индии, 70000 человек живут на узкой прибрежной полосе длиной 55 км, вдоль которой также тянутся пески, богатые торием. Исследования показали, что население указанной территории получает дозы от 3,8 до 17 мЗв в год на человека.

Эти территории в Бразилии и Индии являются наиболее хорошо изученными «горячими точками» нашей планеты. Но в Иране, например в районе городка Рамсер, где быют ключи, богатые радием, были зарегистрированы уровни радиации до 400 мЗв в год. Известны и другие места на земном шаре с высоким уровнем радиации, например во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре.

По подсчетам НКДАР ООН средняя эффективная эквивалентная доза внешнего облучения, которую человек получает за год от земных источников естественной радиации, составляет примерно 350 мкЗв, т.е. чуть больше средней индивидуальной дозы облучения из-за радиационного фона, создаваемого космическими лучами на уровне моря.

2.1.3. Внутреннее облучение. Радон

Внутреннее облучение населения от естественных источников на две трети происходит от попадания радиоактивных веществ в организм с пищей, водой и воздухом. В среднем человек получает около 180 мкЗв/год за счет калия-40, который усваивается организмом вместе с нерадиоактивным калием, необходимым для жизнедеятельности. Нуклиды свинца-210, полония-210 концентрируются в рыбе и моллюсках. Поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, получают относительно высокие дозы внутреннего облучения. Жители северных районов, питающиеся мясом оленя, тоже подвергаются более высокому облучению, потому что лишайник, который употребляют олени в пищу зимой, концентрирует в себе значительные количества радиоактивных изотопов полония и свинца.

Ученые установили, что наиболее весомым из всех естественных источников радиации является радиоактивный газ радон – это невидимый, не имеющий ни вкуса, ни запаха газ, который в 7,5 раз тяжелее воздуха. В природе радон встречается в двух основных видах: радон-222 и радон-220. Основная часть радиации исходит не от самого радона, а от дочерних продуктов распада, поэтому значительную часть дозы облучения человек получает от радионуклидов радона, попадающих в организм вместе с вдыхаемым воздухом.

Радон высвобождается из земной коры повсеместно, поэтому максимальную часть облучения от него человек получает, находясь в закрытом, непрветриваемом помещении нижних этажей зданий, куда газ просачивается через фундамент и пол. Концентрация его в закрытых помещениях обычно в 8 раз выше, чем на улице, а на верхних этажах ниже, чем на первом.

Дерево, кирпич, бетон выделяют небольшое количество газа, а вот гранит и железо – значительно больше. Очень радиоактивны глиноземы. Относительно высокой радиоактивностью обладают некоторые отходы промышленности, используемые в строительстве, например, кирпич из красной глины (отходы производства алюминия), доменный шлак (в черной металлургии), золевая пыль (образуется при сжигании угля).

Другими источниками поступления радона в жилые помещения являются вода и природный газ. Надо помнить, что в сырой воде его намного больше, а при кипячении радон улетучивается, поэтому основную опасность представляет собой его попадание в легкие с парами воды. Чаще всего это происходит в ванной комнате при приеме горячего душа.

Точно такую же опасность радон представляет, смешиваясь под землей с природным газом, который при сжигании в кухонных плитах, отопительных и других нагревательных приборах попадает в помещение. Концентрация его сильно увеличивается при отсутствии хороших вытяжных систем.

Также нельзя забывать, что при сжигании угля значительная часть его компонентов спекается в шлак или золу, где концентрируются радиоактивные вещества. Более легкая их часть – зольная пыль уносится в воздух, что также приводит к дополнительному облучению людей.

2.1.4. Меры по снижению влияния естественного радиационного фона на организм

Каковы же могут быть инженерные мероприятия, снижающие повышение радиационного фона в помещениях вследствие естественной радиации? Это, прежде всего, усиленная вентиляция, создающая увеличенный воздухообмен с желательным преобладанием притока над вытяжкой, т.е. созданием в помещениях подпора особенно в нижних этажах, в частности подвалах и подполье, что будет способствовать уменьшению концентрации радона. Кроме того, может быть рекомендована окраска внутренних поверхностей стен масляной краской или оклейка их слоем воздухонепроницаемых материалов.

С целью уменьшения воздействия радиации, которое может быть неблагоприятным, необходимо распространить знания радиационной гигиены и безопасности на все население, а не оставлять их только достоянием лиц, работающих с источниками радиационного излучения. Необходимо обеспечить население нужным количеством дозиметрических приборов.

Определенную роль может сыграть правильное питание. Прежде всего, в рационе всегда должны быть свежие овощи, фрукты и зелень. Также эффективной защитой против радиации, следствием которой, как известно, может быть развитие опухолей, является селен. Он содержится в пшенице, белом хлебе, орехах кешью, редиске. Значительно увеличить поступление селена в организм можно за счет приема биологически активных добавок с этим элементом, полученных на основе водорослей хлорелла или ламинария. Продуктами с антирадиоактивным действием являются морковь, растительное масло, творог и другие, содержащие витамин А.

2.2. Техногенные (антропогенные) источники радиации

2.2.1. Радиация в медицине

В настоящее время основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных источников радиации, вносят медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности. Во многих странах этот источник ответствен практически за всю дозу, получаемую от техногенных источников радиации.

Радиация используется в медицине, как в диагностических целях, так и для лечения. Одним из самых распространенных медицинских приборов является рентгеновский аппарат. Получают все более широкое

распространение и новые сложные диагностические методы, опирающиеся на использование радиоизотопов. Как ни парадоксально, но одним из основных способов борьбы с раком является лучевая терапия.

Понятно, что индивидуальные дозы, получаемые разными людьми, сильно варьируют – от нуля (у тех, кто ни разу не проходил даже рентгенологического обследования) до многих тысяч среднегодовых «естественных» доз (у пациентов, которые лечатся от рака). Неизвестно, сколько человек ежегодно подвергается облучению в медицинских целях, какие дозы они получают, и какие органы и ткани при этом облучаются.

В принципе облучение в медицине направлено на исцеление больного. Однако нередко дозы оказываются неоправданно высокими: их можно было бы существенно уменьшить без снижения эффективности, причем польза от такого уменьшения была бы весьма существенна, поскольку дозы, получаемые от облучения в медицинских целях, составляют значительную часть суммарной дозы облучения от техногенных источников.

Даже в пределах одной страны дозы очень сильно варьируют от клиники к клинике. Исследования, проведенные в ФРГ, Великобритании и США, показывают, что дозы, получаемые пациентами, могут различаться в сто раз. Известно также, что иногда облучению подвергается вдвое большая площадь поверхности тела, чем это необходимо. Наконец, установлено, что излишнее радиационное облучение часто бывает обусловлено неудовлетворительным состоянием или эксплуатацией оборудования.

Тем не менее, известны случаи, когда дозы облучения действительно были снижены благодаря усовершенствованию оборудования и повышению квалификации персонала. Иногда для существенного повышения эффективности диагностики нужно лишь слегка увеличить дозу. Как бы то ни было, пациент должен получать минимальную дозу при обследовании.

Первые данные о канцерогенности ионизирующей радиации получены в результате наблюдения за больными, которые часто подвергались воздействию радиации. Наблюдение за когортой женщин, больных туберкулезом, показало, что частое флюорографическое обследование, применявшееся для контроля над пневмотораксом, одним из методов лечения туберкулеза, приводило через 10-15 лет после начала лечения к повышению риска рака молочной железы. Наиболее высокие показатели риска были зафиксированы у женщин, которым частое флюорографическое обследование производилось в подростковом и детском возрасте. Рост вероятности определения рака в зависимости от дозы облучения носил линейный характер. Показано, что облучение молочной железы дозой в 1 Гр увеличивает риск рака этого органа на 60%. Необходимо отметить, что молочная железа – один из наиболее радиочувствительных органов, степень которой зависит от возраста. Так, в период роста и развития радиочувствительность молочной железы выше, чем после 50 лет.

Данные о канцерогенном риске, связанном с маммографией, указывают на то, что, несмотря на возможное небольшое повышение риска развития рака молочной железы, в результате облучения (поглощенная железой доза

обычно равна 3 мГр) в конечном счете этот тип обследования снижает смертность от рака этого органа. Расчеты, проведенные в Швеции, показали, что маммографический скрининг³ 100 тыс. женщин в возрасте 50-69 лет в результате облучения может привести к смерти от рака молочной железы от 1 до 5 женщин. В то же время в результате скрининга смертность от рака молочной железы снизилась на 25%, т.е. в результате скрининга были сохранены жизни 560 женщин.

При скрининге рака легкого с использованием низкодозовой спиральной компьютерной томографии эффективная доза составляет 0,2-1 МэВ, которая может привести к развитию 1-5 случаев смерти от рака на 100 тыс. обследуемых.

Радиоизотопы используются для исследования различных процессов, протекающих в организме, и для локализации опухолей. За последние 30 лет их применение сильно возросло, и все же они и сейчас применяются реже, чем рентгенологические обследования. Информация об использовании радиоизотопов довольно ограничена, но имеющиеся данные позволяют предположить, что в промышленно развитых странах на 1000 жителей приходится лишь 10-40 обследований. Результаты одного исследования, проведенного в Японии, показывают, что годовая эффективная эквивалентная доза составляет ~ 20 мкЗв на человека. Коллективные эффективные эквивалентные дозы лежат в диапазоне от 20 чел-Зв на 1 млн. жителей в Австралии до ~ 150 чел-Зв в США.

Во всем мире имеется также около 4000 радиотерапевтических установок, которые используются для лечения рака. Суммарные дозы для каждого пациента очень велики, однако это, как правило, уже тяжелобольные люди и вряд ли у них будут дети. Кроме того, такие дозы получает сравнительно небольшое число людей, поэтому вклад в коллективную дозу оказывается весьма незначительным.

Коллективные дозы облучения при некоторых других методах лучевой диагностики, в частности, флюорографии, выше в силу их массового применения. Поэтому принятие решения о каждой дополнительной лучевой диагностической процедуре должно быть обосновано.

Лучевая терапия повышает риск возникновения второй злокачественной опухоли у онкологических больных. Повышение риска лейкоза и лимфомы отмечено у больных, получивших радиотерапию по поводу рака шейки и тела матки и лимфогранулематоза. Лучевая терапия рака молочной железы также повышает риск рака легкого. По-видимому, эта же причина в определенной мере способствует и частому развитию рака второй молочной железы. На основании тщательного анализа роли лучевой терапии в возникновении вторых опухолей было сделано заключение, что радиотерапия ответственна за 5-10% всех вторых опухолей. Роль же других факторов, в т.ч. химиотерапии, гормонального статуса, а в большей степени

³ Под скринингом понимают применение различных методов исследования, позволяющих диагностировать опухоль на ранней стадии, когда еще нет симптомов болезни. Целью скрининга является раннее активное выявление бессимптомного рака и его лечение.

факторов образа жизни, которые причинно были связаны и с первыми опухолями, а именно курение, потребление алкоголя, питание, представляется более значимой.

Для лечебных целей в учреждениях санаторного типа используют радон-222 – у этого изотопа период полураспада 3,83 дня. С этим связаны замечательные свойства радона – он легко диффундирует через кожу, разносится кровью по организму и концентрируется в периферической нервной системе, в местах воспалений и в жировой ткани. Именно эти места оказываются под радиоактивным обстрелом.

Радоновые ванны нормализуют периферическое кровообращение и работу сердца, выравнивают артериальное давление, улучшают состав крови. Стимулируется моторная и секреторная функция желудка, печени и поджелудочной железы, улучшается кровообращение в печени. Радоновые ванны снижают повышенную функцию щитовидной железы и яичников. Благоприятное действие радоновые процедуры оказывают на основной обмен, углеводный и жировой обмен. Эти ванны стимулируют иммунологические реакции организма, оказывают обезболивающее, противовоспалительное, десенсибилизирующее действие. На ЦНС радоновые ванны оказывают успокаивающее действие, на периферическую - обезболивающее. Радоновые процедуры оказывают свое действие через центры нервной и эндокринной регуляции, иммунокомпетентную систему организма. Излучение радона оказывает местное стимулирующее влияние на рост, регенерацию тканей. Особенностью радоновых процедур является мягкость, успокаивающий характер действия.

Используются либо природные радоновые воды с концентрацией от нескольких единиц до нескольких сотен нКи/л на радоновых курортах, либо искусственно приготавливаемых с концентрацией 40-80- нКи/л. Последние получают добавлением в воду ванны концентрированного водного раствора, приготавливаемого в лабораториях с использованием генераторов радона.

2.2.2. Другие антропогенные источники радиации

В первую очередь следует обратить внимание на используемые человеком энергетические источники. Уголь, подобно большинству других природных материалов, содержит определенное, хотя и малое, количество первичных радионуклидов. Последние, извлеченные вместе с углем из недр земли, после сжигания угля попадают в окружающую среду, где могут служить источником облучения людей.

Хотя концентрация радионуклидов в разных угольных пластах различается в сотни раз, в основном уголь содержит меньше радионуклидов, чем земная кора в среднем. Но при сжигании угля большая часть его минеральных компонентов спекается в шлак или золу, куда в основном и попадают радиоактивные вещества. Большая часть золы и шлаки остаются на дне топки электросиловой станции. Однако более легкая зольная пыль

уносится тягой в трубу электростанции. Количество этой пыли зависит от отношения к проблемам загрязнения окружающей среды и от средств, вкладываемых в сооружение очистных устройств.

Выбросы тепловых электростанций, приводят к дополнительному облучению людей, а оседая на землю, частички могут вновь вернуться в воздух в составе пыли. Согласно текущим оценкам, производство каждого гига watt-года электроэнергии обходится человечеству в 2 чел-Зв ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозы облучения.

На приготовление пищи, и отопление жилых домов расходуется меньше угля, но зато больше зольной пыли выбрасывается в воздух в пересчете на единицу топлива. Таким образом, из печек и каминов всего мира вылетает в атмосферу зольной пыли, возможно, не меньше, чем из труб электростанций. Кроме того, в отличие от большинства электростанций жилые дома имеют относительно невысокие трубы и расположены обычно в центре населенных пунктов, поэтому, гораздо большая часть загрязнений попадает непосредственно на людей.

Немного известно также о вкладе в облучение населения от зольной пыли, собираемой очистными устройствами. В некоторых странах более трети ее используется в хозяйстве, в основном в качестве добавки к цементам и бетонам. Иногда бетон на $4/5$ состоит из зольной пыли. Она используется также при строительстве дорог и для улучшения структуры почв в сельском хозяйстве. Все эти применения могут привести к увеличению радиационного облучения, но сведений по этим вопросам публикуется крайне мало.

Еще один источник облучения населения – термальные водоемы. Некоторые страны эксплуатируют подземные резервуары пара и горячей воды для производства электроэнергии и отопления домов; один такой источник вращает турбины электростанции в Лардерелло в Италии с начала нашего века. Измерения эмиссии радона на этой и еще на двух, значительно более мелких, электростанциях в Италии показали, что на каждый гига watt-год вырабатываемой ими электроэнергии приходится ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза 6 чел-Зв, т. е. в три раза больше аналогичной дозы облучения от электростанций, работающих на угле. Однако, поскольку суммарная мощность энергетических установок, работающих на геотермальных источниках, составляет всего 0,1% мировой мощности, геотермальная энергетика вносит ничтожный вклад в радиационное облучение населения. Но этот вклад может стать весьма весомым, поскольку ряд данных свидетельствует о том, что запасы этого вида энергетических ресурсов очень велики.

Добыча фосфатов ведется во многих местах земного шара; они используются главным образом для производства удобрений. Большинство разрабатываемых в настоящее время фосфатных месторождений содержит уран, присутствующий там в довольно высокой концентрации. В процессе добычи и переработки руды выделяется радон, да и сами удобрения радиоактивны, и содержащиеся в них радиоизотопы проникают из почвы в пищевые культуры. Радиоактивное загрязнение в этом случае бывает

обыкновенно незначительным, но возрастает, если удобрения вносят в землю в жидком виде или если содержащие фосфаты вещества скармливают скоту. Такие вещества действительно широко используются в качестве кормовых добавок, что может привести к значительному повышению содержания радиоактивности в молоке.

2.3. Атомная энергетика

Атомная энергетика, область техники, основанная на использовании реакции деления атомных ядер для выработки теплоты и производства электроэнергии. Такие электростанции работают более чем в 30 странах. Ядерный сектор энергетики наиболее значителен во Франции, Бельгии, Финляндии, Швеции, Болгарии и Швейцарии, т.е. в тех промышленно развитых странах, где недостаточно природных энергоресурсов. Эти страны производят от четверти до половины своей электроэнергии на АЭС. США производят на АЭС только восьмую часть своей электроэнергии, но это составляет около одной пятой ее мирового производства.

Атомная энергетика остается предметом острых дебатов. Сторонники и противники атомной энергетики резко расходятся в оценках ее безопасности, надежности и экономической эффективности. Кроме того, широко распространено мнение о возможной утечке ядерного топлива из сферы производства электроэнергии и его использовании для производства ядерного оружия.

2.3.1. Ядерный топливный цикл (ЯТЦ)

Атомная энергетика – это сложное производство, включающее множество промышленных процессов, которые вместе образуют топливный цикл. Существуют разные типы топливных циклов, зависящие от типа реактора и от того, как протекает конечная стадия цикла.

Обычно ядерный топливный цикл (ЯТЦ) состоит из следующих процессов. В рудниках добывается урановая руда. Руда измельчается для отделения диоксида урана, а радиоактивные отходы идут в отвал. Полученный оксид урана (желтый кек) преобразуется в гексафторид урана – газообразное соединение. Для повышения концентрации урана-235 гексафторид урана обогащают на заводах по разделению изотопов. Затем обогащенный уран снова переводят в твердый диоксид урана, из которого изготавливают топливные таблетки. Из таблеток собирают тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы), которые объединяют в сборки для ввода в активную зону ядерного реактора АЭС. Извлеченное из реактора отработанное топливо имеет высокий уровень радиации и после охлаждения на территории электростанции отправляется в специальное хранилище. Предусматривается также удаление отходов с низким уровнем радиации, накапливающихся в ходе эксплуатации и технического обслуживания станции. По истечении срока службы и сам реактор должен быть выведен из

эксплуатации (с дезактивацией и удалением в отходы узлов реактора). Каждый этап топливного цикла регламентируется так, чтобы обеспечивались безопасность людей и защита окружающей среды.

2.3.2. Ядерные реакторы

Промышленные ядерные реакторы первоначально разрабатывались лишь в странах, обладающих ядерным оружием. США, СССР, Великобритания и Франция активно исследовали разные варианты ядерных реакторов. Однако впоследствии в атомной энергетике стали доминировать три основных типа реакторов, различающиеся, главным образом, топливом, теплоносителем, применяемым для поддержания нужной температуры активной зоны, и замедлителем, используемым для снижения скорости нейтронов, выделяющихся в процессе распада и необходимых для поддержания цепной реакции.

Среди них первый (и наиболее распространенный) тип – это реактор на обогащенном уране, в котором и теплоносителем, и замедлителем является обычная, или «легкая», вода (легководный реактор). Существуют две основные разновидности легководного реактора: реактор, в котором пар, вращающий турбины, образуется непосредственно в активной зоне (кипящий реактор), и реактор, в котором пар образуется во внешнем, или втором, контуре, связанном с первым контуром теплообменниками и парогенераторами (ВВЭР, см. ниже). Разработка легководного реактора началась еще по программам вооруженных сил США. Так, в 1950-х годах компании «Дженерал электрик» и «Вестингауз» разрабатывали легководные реакторы для подводных лодок и авианосцев ВМФ США. Эти фирмы были также привлечены к реализации военных программ разработки технологий регенерации и обогащения ядерного топлива. В том же десятилетии в Советском Союзе был разработан кипящий реактор с графитовым замедлителем.

Второй тип реактора, который нашел практическое применение, – газоохлаждаемый реактор (с графитовым замедлителем). Его создание также было тесно связано с ранними программами разработки ядерного оружия. В конце 1940-х – начале 1950-х годов Великобритания и Франция, стремясь к созданию собственных атомных бомб, уделяли основное внимание разработке газоохлаждаемых реакторов, которые довольно эффективно вырабатывают оружейный плутоний и к тому же могут работать на природном уране.

Третий тип реактора, имевший коммерческий успех, – это реактор, в котором и теплоносителем, и замедлителем является тяжелая вода, а топливом тоже природный уран. В начале ядерного века потенциальные преимущества тяжеловодного реактора исследовались в ряде стран. Однако затем производство таких реакторов сосредоточилось главным образом в Канаде отчасти из-за ее обширных запасов урана.

В настоящее время в мире существует пять типов ядерных реакторов. Это реактор ВВЭР (Водо-Водяной Энергетический реактор), РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный), реактор на тяжелой воде, реактор с шаровой засыпкой и газовым контуром, реактор на быстрых нейтронах. У каждого типа реактора есть особенности конструкции, отличающие его от других, хотя, безусловно, отдельные элементы конструкции могут заимствоваться из других типов. ВВЭР строились в основном на территории бывшего СССР и в Восточной Европе, реакторов типа РБМК много в России, странах Западной Европы и Юго-Восточной Азии, реакторы на тяжелой воде в основном строились в Америке.

Параметры этих реакторов представлены в таблице 12.

Таблица 12

Параметры некоторых ядерных реакторов

Параметры сравнения	ВВЭР	РБМК	Реактор на тяжелой воде
Тепловыделитель	4.5%-й обогащенный уран	2.8%-й обогащенный уран	2-3%-й обогащенный уран
Замедлитель и его свойства	Легкая вода. Очень хорошо замедляет нейтроны, очень сильно поглощает нейтроны. Очень дешева.	Графит. Хорошо замедляет нейтроны, почти не поглощает нейтроны. Достаточно дешев.	Тяжелая вода. Очень хорошо замедляет нейтроны, почти не поглощает нейтроны. Очень дорога в производстве.
Особенности активной зоны, определяемые параметрами замедлителя	Тесное расположение тепловыделяющих элементов, необходимость повышенного обогащения урана	Достаточно редкое расположение тепловыделяющих элементов, возможность использования низкообогащенного урана или отработанного топлива ВВЭР	Достаточно редкое расположение тепловыделяющих элементов, возможность использования низкообогащенного урана или отработанного топлива ВВЭР
Количество контуров	Два	Один	Два
Теплоноситель	Легкая вода в обоих контурах. Одновременно является замедлителем.	Легкая вода. Замедляющий эффект незначителен.	Тяжелая вода в первом контуре, легкая вода во втором. Тяжелая вода одновременно является замедлителем.
Регулирование	Раствор борной кислоты в теплоносителе. Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.	Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.	Регулирующие стержни из бороциркониевого сплава и оксида европия.
Перегрузки топлива	1 раз в 4-6 месяцев, с полной остановкой реактора и вскрытием его корпуса. Каждый тепловыделяющий элемент переставляется внутри реактора трижды до его окончательного извлечения.	В процессе работы, с помощью специальной перегрузочной машины, позволяющей перезагружать отдельные тепловыделяющие элементы. Каждый тепловыделяющий элемент переставляется внутри реактора несколько раз до его окончательного извлечения.	Раз в несколько месяцев, с полной остановкой реактора.
Наружный отражатель	Наружный металлический корпус.	Графитовая кладка толщиной 65 см. Наружный корпус не обязателен, но желателен по соображениям безопасности	Наружный металлический корпус.

ВВЭР. Реакторы ВВЭР являются самым распространенным типом реакторов в России. Весьма привлекательны дешевизна используемого в них теплоносителя-замедлителя и относительная безопасность в эксплуатации, несмотря на необходимость использования в этих реакторах обогащенного урана. Из самого названия реактора ВВЭР следует, что у него и замедлителем, и теплоносителем является обычная легкая вода. В качестве топлива используется обогащенный до 4,5% урана.

РБМК. РБМК построен по несколько другому принципу, чем ВВЭР. Прежде всего в его активной зоне происходит кипение – из реактора поступает пароводная смесь, которая, проходя через сепараторы, делится на воду, возвращающуюся на вход реактора, и пар, который идет непосредственно на турбину. Электричество, вырабатываемое турбиной, тратится, как и в реакторе ВВЭР, также на работу циркуляционных насосов. Его принципиальная схема – на рис.4.

Электрическая мощность РБМК – 1000 Мвт. АЭС с реакторами РБМК составляют заметную долю в атомной энергетике. Так, ими оснащены Ленинградская, Курская, Чернобыльская, Смоленская, Игналинская АЭС.

Проводя сравнение различных типов ядерных реакторов, стоит остановиться на двух наиболее распространенных в нашей стране и в мире типах этих аппаратов: ВВЭР и РБМК. Наиболее принципиальные различия: ВВЭР – корпусной реактор (давление держится корпусом реактора); РБМК – канальный реактор (давление держится независимо в каждом канале); в ВВЭР теплоноситель и замедлитель – одна и та же вода (дополнительный замедлитель не вводится), в РБМК замедлитель – графит, а теплоноситель – вода; в ВВЭР пар образуется во втором корпусе парогенератора, в РБМК пар образуется непосредственно в активной зоне реактора (кипящий реактор) и прямо идет на турбину – нет второго контура. Из-за различного строения активных зон параметры работы у этих реакторов также разные. Для безопасности реактора имеет значение такой параметр, как *коэффициент реактивности* – его можно образно представить как величину, показывающую, как изменения того или иного другого параметра реактора повлияет на интенсивность цепной реакции в нем. Если этот коэффициент положительный, то при увеличении параметра, по которому приводится коэффициент, цепная реакция в реакторе при отсутствии каких-либо других воздействий будет нарастать и в конце станет возможным переход ее в неуправляемую и каскадно нарастающую – произойдет разгон реактора. При разгоне реактора происходит интенсивное тепловыделение, приводящее к расплавлению тепловыделителей, стеканию их расплава в нижнюю часть активной зоны, что может привести к разрушению корпуса реактора и выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду.

В таблице 13 приведены показатели реактивности для РБМК и ВВЭР.

В реакторе ВВЭР при появлении в активной зоне пара или при повышении температуры теплоносителя, приводящего к снижению его плотности, падает количество столкновений нейтронов с атомами молекул теплоносителя, уменьшается замедление нейтронов, вследствие чего все они уходят за пределы активной зоны, не реагируя с другими ядрами. Реактор останавливается.

Сравнительная характеристика РБМК и ВВЭР

Коэффициенты реактивности	ВВЭР	РБМК
Паровой (при наличии пара в активной зоне)	При появлении в активной зоне пара реактор глохнет	При появлении в активной зоне пара реактор разгоняется
Температуры теплоносителя	При повышении температуры теплоносителя реактор глохнет	При повышении температуры теплоносителя реактор разгоняется
Плотности теплоносителя	При снижении плотности теплоносителя (в частности, при повышении его температуры) реактор глохнет	При снижении плотности теплоносителя (в частности, при повышении его температуры) реактор разгоняется

В реакторе РБМК при вскипании воды или повышении ее температуры, приводящее к снижению ее плотности, уходит ее нейтронопоглощающее действие (замедлитель в этом реакторе и так уже есть, а у пара коэффициент поглощения нейтронов гораздо ниже, чем у воды). В реакторе нарастает цепная реакция и он разгоняется, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему повышению температуры воды и ее вскипанию.

Следовательно, при возникновении нештатных ситуаций работы реактора, сопровождающихся его разгоном, реактор ВВЭР заглохнет, а реактор РБМК продолжит разгон с нарастающей интенсивностью, что может привести к очень интенсивному тепловыделению, результатом которого будет расплавление активной зоны реактора. Данное последствие очень опасно, так как при контакте расплавленных циркониевых оболочек с водой происходит разложение ее на водород и кислород, образующих крайне взрывчатый гремучий газ, при взрыве которого неизбежно разрушение активной зоны и выброс радиоактивных топлива и графита в окружающую среду. Именно по такому пути развивались события при аварии на Чернобыльской АЭС. Поэтому в реакторе РБМК как нигде важна роль защитных систем, которые будут или предотвращать разгон реактора, или экстренно его охлаждать в случае разгона, гася подъем температуры и вскипание теплоносителя. Современные реакторы типа РБМК оборудованы достаточно эффективными подобными системами, практически сводящими на нет риск развития аварии (на Чернобыльской АЭС в ночь аварии по преступной халатности в нарушение всех инструкций и запретов были полностью отключены все системы аварийной защиты), но о подобной возможности следует помнить.

Если подвести итог, то реактор РБМК требует меньшего обогащения топлива, обладает лучшими возможностями по наработке делящегося материала (плутония), имеет непрерывный эксплуатационный цикл, но более потенциально опасен в эксплуатации. Степень этой опасности зависит от качества систем аварийной защиты и квалификации эксплуатационного персонала. Кроме того, вследствие отсутствия второго контура у РБМК больше радиационные выбросы в атмосферу в течение эксплуатации.

Реактор на тяжелой воде. В Канаде и Америке разработчики ядерных реакторов при решении проблемы о поддержании в реакторе цепной реакции предпочли использовать в качестве замедлителя тяжелую воду. У тяжелой воды очень низкая степень поглощения нейтронов и очень высокие замедляющие свойства, превышающие аналогичные свойства графита. Вследствие этого реакторы на тяжелой воде работают на необогащенном топливе, что позволяет не строить сложные и опасные предприятия по обогащению урана.

Реактор с шаровой засыпкой. В реакторе с шаровой засыпкой активная зона имеет форму шара, в который засыпаны тепловыделяющие элементы, также шарообразные. Каждый элемент представляет из себя графитовую сферу, в которую вкраплены частицы оксида урана. Через реактор прокачивается газ – чаще всего используется углекислота CO_2 . Газ подается в активную зону под давлением и впоследствии поступает на теплообменник. Регулирование реактора осуществляется стержнями из поглотителя, вставляемыми в активную зону.

Реактор на быстрых нейтронах. Реактор на быстрых нейтронах очень сильно отличается от реакторов всех остальных типов. Его основное назначение – обеспечение расширенного воспроизводства делящегося плутония из урана-238 с целью сжигания всего или значительной части природного урана, а также имеющихся запасов обедненного урана. При развитии энергетики реакторов на быстрых нейтронах может быть решена задача самообеспечения ядерной энергетики топливом.

В реакторе на быстрых нейтронах нет замедлителя. В связи с этим в качестве топлива используется не уран-235, а плутоний и уран-238, которые могут делиться от быстрых нейтронов. Плутоний необходим для обеспечения достаточной плотности нейтронного потока, которую не может обеспечить один уран-238. Тепловыделение реактора на быстрых нейтронах в десять-пятнадцать раз превосходит тепловыделение реакторов на медленных нейтронах, в связи с чем вместо воды (которая просто не справится с таким объемом энергии для передачи) используется расплав натрия (его температура на входе – 370 градусов, а на выходе – 550). В настоящее время реакторы на быстрых нейтронах широкого распространения не получили, в основном из-за сложности конструкции и проблемы получения достаточно устойчивых материалов для конструкционных деталей. В России имеется только один реактор такого типа (на Белоярской АЭС). Считается, что такие реакторы имеют большое будущее.

Если подводить итог, то стоит сказать следующее. Реакторы ВВЭР достаточно безопасны в эксплуатации, но требуют высокообогащенного урана. Реакторы РБМК безопасны лишь при правильной их эксплуатации и хорошо разработанных системах защиты, но зато способны использовать малообогащенное топливо или даже отработанное топливо ВВЭР-ов. Реакторы на тяжелой воде всем хороши, но уж больно дорого добывать тяжелую воду. Технология производства реакторов с шаровой засыпкой еще недостаточно хорошо разработана, хотя этот тип реакторов стоило бы признать наиболее приемлемым для широкого применения, в частности, из-за отсутствия катастрофических последствий при аварии с разгоном реактора. За реакторами на быстрых нейтронах – будущее производства топлива для ядерной энергетики, эти реакторы наиболее эффективно используют ядерное топливо, но их конструкция очень сложна и пока еще малонадежна.

2.3.3. Развитие атомной энергетики

После Второй мировой войны в электроэнергетику во всем мире были инвестированы десятки миллиардов долларов. Этот строительный бум был вызван быстрым ростом спроса на электроэнергию, по темпам значительно превзошедшим рост населения и национального дохода. Основной упор делался на тепловые электростанции (ТЭС), работающие на угле и, в меньшей степени, на нефти и газе, а также на гидроэлектростанциях. АЭС промышленного типа до 1969 года не было. К 1973 году практически во всех промышленно развитых странах оказались исчерпанными ресурсы крупномасштабной гидроэнергетики. Скачок цен на энергоносители после 1973 года, быстрый рост потребности в электроэнергии, а также растущая озабоченность возможностью утраты независимости национальной энергетики – все это способствовало утверждению взгляда на атомную энергетику как на единственный реальный альтернативный источник энергии в обозримом будущем. Эмбарго на арабскую нефть 1973–1974 гг. породило дополнительную волну заказов и оптимистических прогнозов развития атомной энергетики.

Но каждый следующий год вносил свои коррективы в эти прогнозы. С одной стороны, атомная энергетика имела своих сторонников в правительствах, в урановой промышленности, исследовательских лабораториях и среди влиятельных энергетических компаний. С другой стороны, возникла сильная оппозиция, в которой объединились группы, защищающие интересы населения, чистоту окружающей среды и права потребителей. Споры, которые продолжаются и по сей день, сосредоточились главным образом вокруг вопросов вредного влияния различных этапов топливного цикла на окружающую среду, вероятности аварий реакторов и их возможных последствий, организации строительства и эксплуатации реакторов, приемлемых вариантов захоронения ядерных отходов, потенциальной возможности саботажа и нападения террористов на

АЭС, а также вопросов умножения национальных и международных усилий в области нераспространения ядерного оружия.

Инвестиции в атомную энергетику, подобно инвестициям в другие области производства электроэнергии, экономически оправданы, если выполняются два условия: стоимость киловатт-часа не больше, чем при самом дешевом альтернативном способе производства, и ожидаемая потребность в электроэнергии, достаточно высокая, чтобы произведенная энергия могла продаваться по цене, превышающей ее себестоимость. В начале 1970-х годов мировые экономические перспективы выглядели очень благоприятными для атомной энергетики: быстро росли как потребность в электроэнергии, так и цены на основные виды топлива – уголь и нефть. Что же касается стоимости строительства АЭС, то почти все специалисты были убеждены, что она будет стабильной или даже станет снижаться. Однако в начале 1980-х годов стало ясно, что эти оценки ошибочны: рост спроса на электроэнергию прекратился, цены на природное топливо не только больше не росли, но даже начали снижаться, а строительство АЭС обходилось значительно дороже, чем предполагалось в самом пессимистическом прогнозе. В результате атомная энергетика повсюду вступила в полосу серьезных экономических трудностей, причем наиболее серьезными они оказались в стране, где она возникла и развивалась наиболее интенсивно, – в США.

Если провести сравнительный анализ экономики атомной энергетики в США, то становится понятным, почему эта отрасль промышленности потеряла конкурентоспособность. С начала 1970-х годов резко выросли затраты на АЭС. Затраты на обычную ТЭС складываются из прямых и косвенных капиталовложений, затрат на топливо, эксплуатационных расходов и расходов на техническое обслуживание. За срок службы ТЭС, работающей на угле, затраты на топливо составляют в среднем 50–60% всех затрат. В случае же АЭС доминируют капиталовложения в развитие отрасли и перспективные научные разработки, составляя около 70% всех затрат. Капитальные затраты на новые ядерные реакторы в среднем значительно превышают расходы на топливо угольных ТЭС за весь срок их службы, чем сводится на нет преимущество экономии на топливе в случае АЭС.

2.3.4. Проблемы безопасности ядерных реакторов

Чернобыльская катастрофа и другие аварии ядерных реакторов в 1970-1980-е годы, помимо прочего, ясно показали, что такие аварии часто непредсказуемы. Например, в Чернобыле реактор 4-го энергоблока был серьезно поврежден в результате резкого скачка мощности, возникшего во время планового его выключения. Реактор находился в бетонной оболочке и был оборудован системой аварийного расхолаживания и другими современными системами безопасности. Но никому и в голову не приходило, что при выключении реактора может произойти резкий скачок мощности и газообразный водород, образовавшийся в реакторе после такого скачка,

смешавшись с воздухом, взорвется так, что разрушит здание реактора (более подробно см. учебно-методическое пособие «Радиационная безопасность: аварии в атомной энергетике и ядерное оружие»).

В Соединенных Штатах предприятия, строящие и эксплуатирующие ядерные реакторы, тоже столкнулись с множеством проблем безопасности, что замедляло строительство, заставляя вносить многочисленные изменения в проектные показатели и эксплуатационные нормативы, и приводило к увеличению затрат и себестоимости электроэнергии. По-видимому, было два основных источника этих трудностей. Один из них – недостаток знаний и опыта в этой новой отрасли энергетике. Другой – развитие технологии ядерных реакторов, в ходе которого возникают новые проблемы. Но остаются и старые, такие, как коррозия труб парогенераторов и растрескивание трубопроводов кипящих реакторов. Не решены до конца и другие проблемы безопасности, например повреждения, вызываемые резкими изменениями расхода теплоносителя.

Среди тех, кто настаивает на необходимости продолжать поиск безопасных и экономичных путей развития атомной энергетике, можно выделить два основных направления. Сторонники первого полагают, что все усилия должны быть сосредоточены на устранении недоверия общества к безопасности ядерных технологий. Для этого необходимо разрабатывать новые реакторы, более безопасные, чем существующие легководные. Здесь представляют интерес два типа реакторов: «технологически предельно безопасный» реактор и «модульный» высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.

Прототип модульного газоохлаждаемого реактора разрабатывался в Германии, а также в США и Японии. В отличие от легководного реактора, конструкция модульного газоохлаждаемого реактора такова, что безопасность его работы обеспечивается пассивно – без прямых действий операторов или электрической либо механической системы защиты. В технологически предельно безопасных реакторах тоже применяется система пассивной защиты. Такой реактор, идея которого была предложена в Швеции, по-видимому, не продвинулся далее стадии проектирования. Но он получил серьезную поддержку в США среди тех, кто видит у него потенциальные преимущества перед модульным газоохлаждаемым реактором. Но будущее обоих вариантов туманно из-за их неопределенной стоимости, трудностей разработки, а также спорного будущего самой атомной энергетике.

Сторонники другого направления полагают, что до того момента, когда развитым странам потребуются новые электростанции, осталось мало времени для разработки новых реакторных технологий. По их мнению, первоочередная задача состоит в том, чтобы стимулировать вложение средств в атомную энергетику.

Но помимо этих двух перспектив развития атомной энергетике сформировалась и совсем иная точка зрения. Она возлагает надежды на более полную утилизацию подведенной энергии, возобновляемые энергоресурсы (солнечные батареи и т.д.) и на энергосбережение. По мнению сторонников

этой точки зрения, если передовые страны переключатся на разработку более экономичных источников света, бытовых электроприборов, отопительного оборудования и кондиционеров, то сэкономленной электроэнергии будет достаточно, чтобы обойтись безо всех существующих АЭС. Наблюдающееся значительное уменьшение потребления электроэнергии показывает, что экономичность может быть важным фактором ограничения спроса на электроэнергию.

Таким образом, атомная энергетика пока не выдержала испытаний на экономичность, безопасность и расположение общественности. Ее будущее теперь зависит от того, насколько эффективно и надежно будет осуществляться контроль за строительством и эксплуатацией АЭС, а также насколько успешно будет решен ряд других проблем, таких, как проблема удаления радиоактивных отходов. Будущее атомной энергетике зависит также от жизнеспособности и экспансии ее сильных конкурентов – ТЭС, работающих на угле, новых энергосберегающих технологий и возобновляемых энергоресурсов.

2.3.5. Радиоактивные отходы. Переработка, удаление, захоронение

В целях правильной обработки радиоактивные отходы обычно подразделяются на отходы низкого, высокого и промежуточного уровней радиоактивности.

Отходы низкого уровня радиоактивности. Создается много низкорadioактивных отходов, подлежащих удалению, на заводах по переработке урановой руды, в исследовательских лабораториях, в системах охлаждения и промывки атомных реакторов, в больницах, отходосжигательных печах и системах вентиляции зданий. Загрязнение этого типа обычно является легким, однако объем загрязненных отходов весьма велик.

Отходы высокого уровня радиоактивности. Высокорадиоактивные отходы представляют собой использованное («отработавшее») топливо из ядерных реакторов, а также агрессивные жидкости, остающиеся после переработки такого топлива с целью извлечения плутония и урана. Объем высокорадиоактивных отходов относительно мал, но большая их часть остается радиоактивной в течение долгого времени.

Отходы промежуточного уровня радиоактивности. К этой категории относятся разнообразные типы отходов, не попадающие ни в одну из двух категорий, отмеченных выше. Она включает конструктивные узлы реакторов, материалы, сильно загрязненное оборудование и стоки.

Выбрасываемые отходы могут быть газами или частицами, взвешенными в воздухе в форме аэрозолей. Твердые частицы выбрасываются в виде пыли или дыма; жидкие частицы обычно образуют туман. Воздушные потоки, переносящие эти аэрозоли или газы, подлежат очистке перед выбросом в атмосферу.

Твердые радиоактивные отходы могут возникать в результате добычи и переработки радиоактивных руд, производства ядерных топлив,

деятельности лабораторий и механической обработки материалов на заводах по производству топлив. Физические и химические процессы очистки воздуха и обработки жидкостей дают полужидкие отходы и концентраты. Радиоактивное загрязнение оборудования и рабочих тел происходит при всех указанных типах работ, и загрязненные материалы должны быть переработаны или удалены.

Радиация, существующая на свалках радиоактивных отходов, вызывается распадом атомов радиоактивных веществ, присутствующих в отходах. Столкновение продукта распада с атомом в воздухе, теле человека или материале приводит к выбиванию электрона, так что образуется положительно заряженный атом. Выбитый электрон может присоединиться к другому атому, зарядив его отрицательно. Заряженные таким образом атомы, называемые ионами, могут нарушить равновесие в тканях тела и вызвать разрушение клеток.

Радиоактивные изотопы некоторых элементов имеют период полураспада, измеряющийся лишь секундами. С другой стороны, изотоп углерода ^{14}C , широко используемый в биологических исследованиях, имеет период полураспада 5568 лет.

Безусловно, инженеры, занимающиеся переработкой радиоактивных отходов, должны обеспечить защиту для сотен будущих поколений и составить подробное описание мест и методов переработки долгоживущих отходов.

В любом реакторном топливе образуются сотни продуктов деления, и их периоды полураспада имеют значения от секунд до тысяч лет. При удалении таких отходов особое внимание надо уделять долгоживущим продуктам деления, в частности изотопу стронция ^{90}Sr и изотопу цезия ^{137}Cs , которые опасны для живых тканей.

Газообразные отходы. Поскольку радиоактивные материалы в воздухе и газах крайне опасны, для очистки несущего их воздушного потока нужно использовать высокоэффективную систему. Предельную осторожность следует проявлять при удалении загрязненного очистителя и извлекаемых из него материалов. Загрязняющие атмосферу газы могут представлять собой, например, изотоп аргона ^{41}Ar в выходящем из атомных реакторов воздушном потоке или коррозионно-активные газы, содержащие пары кислот, которые образуются в процессах извлечения металлов, используемых в производстве ядерных топлив. Инертные газы, в частности аргон, обычно выбрасываются через дымовые трубы большой высоты и рассеиваются в атмосфере.

Для обработки растворимых или химически активных газов, содержащих радиоактивные элементы или соединения, можно применять газоабсорбционные методы, в том числе насадочные колонны, твердые абсорбенты и реакции типа «твердое вещество – газ». Радиоактивные частицы или аэрозоли можно удалять с помощью обычного оборудования для воздухо- и газоочистки. Очищенный газ может выпускаться в атмосферу, однако извлеченные из него материалы становятся жидкими или твердыми отходами, которые подлежат удалению другими методами.

Жидкие отходы. Радиоактивные вещества, растворенные в воде или других жидкостях, можно удалить методами химического осаждения. Так, радиоактивный стронций быстро удаляется путем добавления нерадиоактивного стронция в качестве носителя либо путем добавления бария и свинца. Низкорadioактивные отходы, содержащие коллоидные и взвешенные частицы твердых материалов, можно очистить обычными методами водоочистки, используя коагулянты, глину и полиэлектrolиты. Фильтрование потока жидкости повышает степень очистки.

Растворимые радиоактивные отходы можно обрабатывать ионообменными смолами, анионными либо катионными, или посредством полной деминерализации. Необходима предварительная очистка жидких отходов перед вводом их в ионообменник с целью удаления всех частиц, которые могли бы покрыть слой смолы. Можно также использовать абсорбционные свойства глины для извлечения радиоактивных катионов из жидких отходов, сливаемых в почву. Удаление отработавших смол и глин – проблема удаления твердых отходов (см. ниже). Обычно отработавшие смолы сжигаются для концентрирования радиоактивных материалов в золе или же подвергаются захоронению. Загрязненные глины можно отвердить путем обжига.

Выпаривание – наиболее эффективный способ разделения радиоактивных отходов на две фракции: высокорadioактивную густую массу и незагрязненную жидкость. С этой целью использовались перегонные кубы, паровое сжатие и испарители взрывного вскипания.

Процессы биохимической обработки имеют ограниченное применение, поскольку большинство радиоактивных материалов – неорганические вещества. Микроорганизмы могут концентрировать только те радиоактивные вещества, которыми они питаются.

Оседание радиоактивных материалов на металлических деталях канализационной сети зданий может представлять опасность для рабочего персонала лабораторий и больниц. Для очистки таких сетей, загрязненных низкоактивными радиоизотопами, обычно используются кислотные или щелочные растворы.

Сбрасывание низкорadioактивных жидких отходов в окружающую среду вошло в практику радиоизотопных лабораторий. Хотя высокорadioактивные жидкие отходы надо хранить в течение многих лет, а возможно, и веков. Контейнеры с отходами хранятся под землей, чтобы предотвратить вскипание жидкости в результате выделения тепла при распаде содержащихся в них радиоактивных веществ.

Захоронение жидких отходов низкого и промежуточного уровней радиоактивности в землю возможно при определенных климатических и геологических условиях. Жидкие отходы до сих пор сливались в землю через специальные колодцы, канавы и земляные отстойники. Много продуктов деления адсорбируется на почвах. В настоящее время исследуется возможность захоронения высокорadioактивных жидких отходов в

естественных и искусственных подземных пустотах, в подземных либо подводных полостях гранита, мерзлой глине или соляных шахтах и куполах.

Твердые отходы. Такие отходы могут удаляться путем захоронения, сжигания или переплавки (в случае металлических отходов). Места захоронения для удаления загрязненных твердых отходов и лома имеются в различных регионах США и России, а также во Франции, Германии, Бельгии, Швеции и других странах. Захоронение производится в котлованах или пустотах с покрытием землей либо бетоном. На выбор места захоронения влияют рельеф местности, геологическое строение пластов, почвенные, гидрологические и метеорологические характеристики и возможности доставки.

Лабораторные работы могут породить большие количества сжигаемых загрязненных отходов, среди которых фильтровальная бумага, абсорбирующие материалы, одежда, перчатки, тряпки, деревянные предметы. Объем таких твердых отходов может быть уменьшен путем сжигания, причем зола и летучие радиоактивные вещества удаляются по отдельности. Сжигание горючих отходов будет использоваться и впредь как важный метод удаления.

Переработка урановой руды и другие процессы в атомной промышленности ведут к появлению больших количеств загрязненного чугуна и стального оборудования. Такие материалы могут быть вновь использованы: при переплавке уран уносится со шлаком и уже не представляет опасности для здоровья.

2.3.6. Атомная энергетика как радиационно опасный объект

Атомные электростанции являются источником облучения, вокруг которого ведутся интенсивные споры, хотя в настоящее время они вносят весьма незначительный вклад в суммарное облучение населения. При нормальной работе ядерных установок выбросы радиоактивных материалов в окружающую среду очень невелики.

Как уже отмечалось, атомные электростанции являются лишь частью ядерного топливного цикла, который начинается с добычи и обогащения урановой руды. Следующий этап – производство ядерного топлива. Отработанное в АЭС ядерное топливо иногда подвергают вторичной обработке, чтобы извлечь из него уран и плутоний. Заканчивается цикл, как правило, захоронением радиоактивных отходов.

На каждой стадии ядерного топливного цикла в окружающую среду попадают радиоактивные вещества. Доза облучения от ядерного реактора зависит от времени и расстояния. Чем дальше человек живет от атомной электростанции, тем меньшую дозу он получает. Несмотря на это, наряду с АЭС, расположенными в отдаленных районах, имеются и такие, которые находятся недалеко от крупных населенных пунктов. Каждый реактор выбрасывает в окружающую среду целый ряд радионуклидов с разными периодами полураспада. Большинство радионуклидов распадается быстро и

поэтому имеет лишь местное значение. Однако некоторые из них живут достаточно долго и могут распространяться на значительные расстояния, а определенная часть изотопов остается в окружающей среде практически бесконечно.

При этом различные радионуклиды также ведут себя по-разному: одни распространяются в окружающей среде быстро, другие – чрезвычайно медленно.

Примерно половина всей урановой руды добывается открытым способом, а половина – шахтным. И рудники, и обогатительные фабрики служат источником загрязнения окружающей среды радиоактивными веществами. Обогатительные же фабрики создают проблему долговременного загрязнения: в процессе переработки руды образуется огромное количество отходов – «хвостов».

Эти отходы будут оставаться радиоактивными в течение миллионов лет. Таким образом, отходы являются главным долгоживущим источником облучения населения, связанным с атомной энергетикой. Однако их вклад в облучение можно значительно уменьшить, если отвалы заасфальтировать или покрыть их поливинилхлоридом. Конечно, покрытия необходимо будет регулярно менять.

Урановый концентрат, поступающий с обогатительной фабрики, подвергается дальнейшей переработке и очистке и на специальных заводах превращается в ядерное топливо. В результате такой переработки образуются газообразные и жидкие радиоактивные отходы, однако дозы облучения от них намного меньше, чем на других стадиях ядерного топливного цикла.

В мировом масштабе примерно 10% использованного на АЭС ядерного топлива направляется на переработку для извлечения урана и плутония с целью повторного их использования.

В п. 2.3.5 мы уже касались проблем, связанных с последней стадией ядерного топливного цикла – захоронением высокоактивных отходов АЭС. Эти проблемы находятся в ведении правительств соответствующих стран. В некоторых странах ведутся исследования по отверждению отходов с целью последующего их захоронения в геологически стабильных районах на суше, на дне океана или в расположенных под ними пластах. Предполагается, что захороненные таким образом радиоактивные отходы не будут источником облучения населения в обозримом будущем.

Ядерный топливный цикл сопровождается также образованием большого количества долгоживущих радионуклидов, которые распространяются по всему земному шару. Коллективную эффективную ожидаемую эквивалентную дозу облучения такими изотопами оценивают в 670 чел-Зв на каждый гигаватт-год вырабатываемой электроэнергии, из которых на первые 500 лет после выброса приходится не менее 3%.

Таким образом, от долгоживущих радионуклидов все население Земли получает примерно такую же среднегодовую дозу облучения, как и население, живущее вблизи АЭС, от короткоживущих радионуклидов, при этом долгоживущие изотопы оказывают свое воздействие в течение гораздо

более длительного времени – 90% всей дозы население получит за время от тысячи до сотен миллионов лет после выброса. Следовательно, люди, живущие вблизи АЭС, даже при нормальной работе реактора получают всю дозу сполна от короткоживущих изотопов и малую часть дозы от долгоживущих.

Люди, проживающие вблизи ядерных реакторов, без сомнения, получают гораздо большие дозы, чем население в среднем. Тем не менее в настоящее время эти дозы обычно не превышают нескольких процентов естественного радиационного фона.

Все приведенные выше цифры, конечно, получены в предположении, что ядерные реакторы работают нормально. Однако количество радиоактивных веществ, поступивших в окружающую среду при авариях, может оказаться гораздо больше.

Рекомендуемая литература

1. Безопасность жизнедеятельности. Учебник / Под ред. С.В. Белова– М.: Высшая школа. 2004. – 447 с.
2. Безопасность жизнедеятельности: Учебник / Под ред. Э.А. Арустамова. – М.: ИД «Дашков и К⁰», 2003. – 496 с.
3. Русак О.Н., Малаян К.Р., Занько Н.Г. Безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие / Под ред. О.Н. Русака. – СПб.: Изд-во «Лань», 2002. – 448 с.
4. Занько Н.Г., Ретнев В.М. Медико-биологические основы безопасности жизнедеятельности. Учебник. – М, 2004. – 288 с.
5. Старков В.Д., Мигунов В.И. Радиационная экология. – Тюмень: ФГУ ИПП «Тюмень», 2003. – 304 с.
6. Кузнецов В.М., Чеченов Х.Д. Российская и мировая атомная энергетика. – М.: Издательского Московского гуманитарного университета, 2008. – 764 с.