

А.Г. КАРТАШЕВ

РАДИОЭКОЛОГИЯ

Учебное пособие

ББК 339.16+632.118

Карташев Александр Георгиевич
Радиоэкология. Учебное пособие.

В учебном пособии по специализированному курсу радиационной экологии рассмотрены термины, понятия и закономерности современной радиоэкологии. Представлены основные технологические этапы ядерного цикла с реальными и возможными радиоактивными воздействиями на окружающую среду и человека.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для преподавателей и студентов высших учебных заведений, учителей и всех интересующихся современными экологическими проблемами радиационной безопасности.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие атомной промышленности, распространение ядерных технологий, испытание ядерного оружия и последствия антропогенного радиоактивного изменения среды обитания человека, животных и растений стимулировало радиоэкологическое исследование. Радиоэкология исследует особенности существования организмов, популяций и экосистем в среде, измененной радиоактивными веществами. Современная радиоэкология – системная область знаний, развивающаяся на пересечении физики, высоких технологий, радиохимии, биологии и экологии, формируется по нескольким направлениям.

Радиоэкологии наземных биоценозов, гидробиоценозов и агроценозов.

Исследованием закономерностей влияния, накопления выведения изотопов и радиоустойчивости биосистем в зависимости от их уровня организации занимается экспериментальная радиоэкология.

Радиоэкологический мониторинг глобального и регионального масштаба рассматривается в качестве необходимой составляющей всех этапов ядерно–промышленного цикла.

Введение специализированного курса по специальности экология по радиационной экологии стимулировало издание учебных пособий. Предлагаемое учебное пособие, основанное на лекционном материале по радиоэкологии дает общее представление о современном развитии ядерных технологий их влиянии на природную среду и человека. Рассмотрены биологические механизмы, последствия лучевого воздействия и радиоактивного загрязнения для живых организмов в зависимости от уровня организации.

Представлены концепции нормирования радиоактивного воздействия, лечения и общедоступные способы защиты населения от радиоактивного загрязнения.

Будущее развитие ядерных технологий невозможно без системы радиоэкологического мониторинга, основные принципы и методы которого достаточно подробно рассмотрены в предлагаемом учебном пособии.

Каждое из направлений современной радиоэкологии характеризуется своей спецификой, но к наиболее важным задачам относится экологическая безопасность используемых человеком ядерных технологий.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение

Глава I Ионизирующее излучение

- 1.1. Естественный радиационный фон
- 1.2. Антропогенный радиоактивный фон

Глава II Ядерный топливный цикл

- 2.1. ЯТЦ
- 2.2. Добыча и обогащение урана
- 2.3. Ядерные реакторы
- 2.4. Ядерные отходы
- 2.5. Биосферное загрязнение радиоактивными отходами

Глава III Ядерное оружие

- 3.1. Основные виды ядерного оружия
- 3.2. Использование ядерного оружия
- 3.3. Испытание ядерного оружия
- 3.4. Радиоактивные загрязнения

Глава IV Ядерные технологии

- 4.1. Атомные электростанции
- 4.2. Подземные ядерные взрывы в мирных целях
- 4.3. Использование радионуклидов в науке и технике
- 4.4. Радиоактивные загрязнения

Глава V Аварии на атомных объектах

- 5.1. Радиационная авария
- 5.2. Аварии на военных ядерных объектах
- 5.3. Аварии на ядерных объектах
- 5.4. Чернобыльская катастрофа
- 5.5. Экологические последствия аварий на ядерных установках

Глава VI Биологическое действие ионизирующих излучений

- 6.1. Первичные изменения в живых системах под влиянием ионизирующего излучения
- 6.2. Лучевая болезнь
- 6.3. Онкологические заболевания
- 6.4. Нарушение физиологических функций при облучении
- 6.5. Отдаленные последствия облучения
- 6.6. Генетические последствия облучения
- 6.7. Нормирования радиационных факторов
- 6.8. Профилактика лучевого поражения

Глава VII Экологические последствия радиоактивных загрязнений

- 7.1. Радиоактивное загрязнение атмосферы
- 7.2. Радиоактивное загрязнение гидросферы
- 7.3. Радиоактивное загрязнение литосферы

7.4. Радиоактивное загрязнение биосферы

7.5. Сельское хозяйство в условиях радиоактивного
загрязнения и защита населения

7.6. Основы радиоэкологического мониторинга

ГЛАВА I. ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Как известно, атом состоит из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. Ядро включает в себя положительно заряженные протоны и электрически нейтральные нейтроны.

Протоны и нейтроны в ядре называются нуклонами. Масса атома определяется в основном массой нуклонов в ядре. Массовое число A равно числу нуклонов в ядре. Атомный номер Z равен числу протонов в ядре. Атомы одного и того же химического элемента имеют одинаковый атомный номер.

Нуклиды – это разновидности атомов с данными массовым числом и атомным номером. Например, нуклид кобальта ^{60}Co или нуклиды стронция и цезия – ^{90}Sr , ^{137}Cs . Массовое число нуклида указывается вверху слева от символа химического элемента; атомный номер элемента либо не указывается, либо записывается внизу слева от символа элемента. Иногда используют запись в строчку с указанием только массового числа : $\text{Co}-60$, $\text{Sr}-90$.

Изотопы – атомы одного и того же элемента, которые имеют разные массовые числа. Термин "изотопы" следует применять только в тех случаях, когда речь идет об атомах одного и того же элемента. Если подразумеваются атомы разных химических элементов, то следует использовать термин "нуклиды", не "изотопы", например: смесь радионуклидов неизвестного процентного состава, радионуклиды $\text{Kr}-85$, $\text{I}-131$, $\text{U}-235$, но изотопы углерода $\text{C}-12$ и $\text{C}-14$.

Радионуклид – нуклид, обладающий радиоактивностью.

Изотоп радиоактивный (радиоизотоп) – изотоп, обладающий радиоактивностью.

Явление радиоактивности состоит в самопроизвольном превращении (распаде) атомных ядер, что приводит к изменению их атомного номера или массового числа. Изменение атомного номера приводит к превращению одного химического элемента в другой; при изменении только массового числа происходит превращение изотопов данного элемента. Иногда к явлению радиоактивности относят изменение энергетического состояния ядер, которое сопровождается испусканием гамма-квантов. При изменении лишь энергетического состояния ядер их состав остается неизменным.

Радиоактивное вещество (РВ) – вещество, имеющее в своем составе радионуклиды.

В результате радиоактивных превращений могут возникать заряженные и незаряженные частицы, например: альфа-частицы, бета-частицы, фотоны, нейтроны. Фотоны ядерного происхождения называют также гамма-квантами. Важным свойством частиц, испускаемых при распадах ядер, является их способность прямо или косвенно ионизировать среду, т.е. РВ являются источниками ионизирующего излучения. Ионизировать вещество могут также частицы, которые испускают специальные технические устройства, например: рентгеновские аппараты, электронные микроскопы, ускорители заряженных частиц и др.

Ионизирующее излучение (ИИ) – излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разного знака. (Видимый свет и ультрафиолетовое излучение не относят к ионизирующим излучениям).

ИИ представляет собой поток заряженных и/или незаряженных частиц. Различают непосредственно ИИ и косвенно ИИ. Непосредственно ИИ состоит из заряженных частиц, кинетическая энергия которых достаточна для ионизации при столкновении с атомами вещества, например: альфа-, бета-излучения, протонное излучение ускорителей и т.п. Косвенно ИИ состоит из незаряженных (нейтральных) частиц, взаимодействие которых со средой приводит к возникновению заряженных частиц, способных непосредственно вызывать ионизацию, например: нейтронное излучение, представляющее собой поток нейтронов, рентгеновское или гамма-излучения, представляющие собой электромагнитное излучения.

Смешанное излучение – излучение, состоящее из частиц различного вида.

В зависимости от характера распространения во времени различают **непрерывное** и **импульсное** излучения.

Источник ИИ – устройство или радиоактивное вещество, испускающее или способное испускать ИИ.

Для измерения энергии ИИ обычно используют внесистемную единицу – электрон-вольт (эВ). $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. 1эВ равен энергии, которую приобретает электрон при прохождении разности потенциалов в 1 В. Кратные единицы: килоэлектрон-вольт (кэВ), мегаэлектрон-вольт (МэВ) и т.д.

Гамма-излучение – электромагнитное (фотонное) косвенно ионизирующее излучение, испускаемое при ядерных превращениях (реакциях) или аннигиляции частиц. Обладает высокой проникающей способностью (пробег фотонов в воздухе может достигать сотен метров, в биологической ткани до 10 – 15 см) и поэтому представляет большую опасность как источник внешнего облучения.

Рентгеновское излучение – совокупность тормозного и характеристического излучений, генерируемых рентгеновским аппаратом. (**Тормозное излучение** – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое при изменении скорости заряженных частиц. Возникает в рентгеновской трубке, ускорителях заряженных частиц, в среде, окружающей источник бета-излучения. **Характеристическое излучение** – фотонное

моноэнергетическое излучение; энергия фотонов зависит от материала, из которого изготовлен анод рентгеновской трубки.).

Бета-излучение – непосредственно ионизирующее излучение с непрерывным энергетическим спектром, состоящее из электронов (позитронов), испускаемых при ядерных превращениях. Бета-частицы обладают небольшим пробегом (может достигать 20 м в воздухе и нескольких сантиметров в биологической ткани), тем не менее они опасны при воздействии на кожу, слизистую оболочку и хрусталик глаза, при попадании в легкие и желудочно-кишечный тракт (ЖКТ).

Альфа-излучение – непосредственно ионизирующее излучение, состоящее из альфа-частиц (т.е. ядер гелия), испускаемых при ядерных превращениях. Альфа-частицы имеют малый пробег (до 10 см в воздухе и не более 0,1 мм в биоткани, обычный лист бумаги задерживает альфа-частицы), однако они весьма опасны при загрязнении кожи и слизистой оболочки глаз, при попадании в легкие и ЖКТ, так как на своем пути эти частицы создают высокую **плотность ионизации**.

Нейтронное излучение – косвенно ионизирующее излучение, состоящее из нейтронов – незаряженных частиц, возникающих в ядерных реакциях. По энергии различают четыре основные группы нейтронов: **тепловые** (с наиболее вероятной энергией 0,025 эВ), **промежуточные** (с энергией от 0,1 эВ до 200 кэВ), **быстрые** (с энергией от 200 кэВ до 20 МэВ) и **сверхбыстрые** (с энергией более 20 МэВ). Проникающая способность нейтронов высока: пробег тепловых нейтронов достигает 20 м в воздухе и 3 см в биоткани, быстрых нейтронов – сотен метров в воздухе и 10 см в биоткани, а сверхбыстрые нейтроны могут "пробежать" в воздухе несколько километров. Под действием нейтронов протекают различные ядерные реакции в веществе и происходит его ионизация.

ИИ и РВ имеют ряд специфических особенностей, а именно:

– ИИ не имеют внешних признаков, по которым можно было бы их обнаружить с помощью органов чувств человека, обнаружение возможно только с помощью специальных дозиметрических и радиометрических приборов;

– источники ИИ способны вызывать поражения человека не только при непосредственном соприкосновении с ними, но и на некотором расстоянии от них;

– поражающие свойства РВ не могут быть уничтожены ни химическим, ни каким-либо другим способом, так как процесс радиоактивного распада ядра не зависит от внешних факторов.

Поток частиц Φ – отношение числа частиц N , проникающих через данную поверхность за интервал времени t , к этому интервалу. Единица измерения потока – частица/с.

Плотность потока частиц j – отношение числа частиц, проникающих в элементарную сферу за интервал времени, к площади центрального сечения s этой сферы и к этому интервалу. Единица измерения плотности потока – частица/(см²·с).

$$\varphi = \Delta N / (\Delta s \cdot \Delta t) = \Phi / \Delta s$$

Активность радионуклида в источнике A – мера радиоактивности, она равна отношению числа самопроизвольных ядерных превращений n в этом источнике за малый интервал времени к этому интервалу. Единица активности – беккерель, Бк. 1 Бк равен одному ядерному превращению (распаду) за 1 секунду: 1 Бк=1 расп./с. внесистемная единица – кюри, Ки. 1 Ки= $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк. На практике используют также удельную активность (Бк/кг, Ки/кг) и объемную активность (Бк/л, Ки/л). Активность иногда относят и к площади (например, Бк/м², Ки/м²).

Период полураспада радионуклида $T_{1/2}$ – время, в течение которого число ядер данного радионуклида в результате самопроизвольных ядерных превращений уменьшается в 2 раза.

Внешнее облучение – облучение тела от находящихся вне его источников ионизирующего излучения.

Внутреннее облучение – облучение тела от находящихся внутри него источников ИИ.

Поглощенная доза излучения D – основная дозиметрическая величина. Равна отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме. Единицей измерения поглощенной дозы служит грэй, Гр. 1 Гр=1 Дж/кг. Грэй является мерой количества энергии ИИ любого вида, поглощенной веществом любого типа. внесистемной единицей, которую порой еще можно встретить, является рад. 1 Гр=100 рад.

Эквивалентная доза излучения H – основная дозиметрическая величина в области радиационной безопасности. Введена для оценки возможного ущерба здоровью человека от хронического воздействия ионизирующего излучения при значении эквивалентной дозы за календарный год не более 5 предельно допустимых доз (ПДД), то есть не превышающего 250 мЭв в год. Эквивалентная доза равна произведению поглощенной дозы на средний коэффициент качества k ионизирующего излучения в данном элементе объема биологической ткани. Единица эквивалентной дозы – зиверт, Зв. 1 Зв = 1 Дж/кг. Зиверт равен дозе излучения любого вида, производящей такое же биологическое действие, как и доза образцового рентгеновского излучения в 1 Гр. внесистемная единица – бэр (биологический эквивалент рентгена). 1 Эв = 100 бэр. $H = D \cdot k$.

Коэффициент качества излучения k – коэффициент для учета биологической эффективности разных видов ИИ, он равен:

1 – для рентгеновского и гамма-излучения (в общем случае для фотонного излучения коэффициент качества зависит от энергии фотонов: при уменьшении энергии фотонов от 1 МэВ до 5 кэВ коэффициент качества увеличивается с 1 до 2,6);

1 – для электронного, позитронного и бета-излучений;

20 – для альфа-излучения (при E альфа-частиц не более 10 МэВ);

10 – для протонов с энергией не более 10 МэВ;

10 – для нейтронов (в интервале энергий от 0,1 до 10 МэВ);

3 – для нейтронов с энергией меньше 20 кэВ.

Экспозиционная доза D_x (используется только для фотонного излучения) – отношение суммарного заряда Q всех ионов одного знака, созданных в воздухе, когда все электроны и позитроны, освобожденные фотонами в элементарном объеме воздуха, полностью остановились в воздухе, к массе m воздуха в этом элементарном объеме. Единица измерения – кулон/кг, Кл/кг. До сих пор широко используется на практике внесистемная единица – рентген, Р. 1 рентген соответствует образованию в 1 см^3 сухого атмосферного воздуха при нормальных условиях (т.е. при температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.) 2,082 млрд. пар ионов обоих знаков. $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$. $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$. $D_x = Q/m$.

Мощность дозы излучения P (лат.) – отношение приращения дозы за некоторый интервал времени к этому интервалу времени. Единицы мощности дозы: Гр/с, Зв/с, Р/с, а также дольные и кратные единицы.

Естественный радиационный фон – мощность эквивалентной дозы ИИ, создаваемая космическим излучением и излучением естественно распределенных природных радионуклидов в поверхностных слоях Земли, приземной атмосфере, продуктах питания, воде и организме человека.

Нормальным естественным радиационным фоном для России следует считать 10 – 20 мкбэр/ч (0,1 – 0,2 мкЗв/ч), что примерно соответствует мощности экспозиционной дозы на открытой местности 10 – 20 мкР/ч.

Технологически измененный естественный радиационный фон – этот фон обусловлен широким использованием материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов, сжиганием ископаемого топлива, применением сельскохозяйственных удобрений и т.д., причем в некоторых случаях технологический процесс может уменьшать дозу облучения, обусловленную естественным радиационным фоном. Например, при сжигании ископаемого топлива образуется большое количество углекислого газа, который разбавляет содержащийся в атмосфере радиоуглерод $C-14$, что в свою очередь приводит к снижению дозы внутреннего облучения, обусловленной радиоактивным углеродом.

Иногда говорят также о **техногенном** радиационном фоне – под ним подразумевают радиационный фон, сложившийся в результате появления на Земле искусственных радионуклидов, т.е. радионуклидов, образовавшихся при испытаниях ядерного оружия, в результате ядерных аварий, а также поступающих во внешнюю среду при работе предприятий ядерного топливного цикла.

Население в целом подвергается облучению за счет естественного, искусственного радиационных фонов и медицинских процедур.

1.1. Естественный радиационный фон

Радиационный фон на нашей планете складывается под влиянием 3 компонентов:

- 1) излучения, обусловленного космическим излучением;

2) излучения от рассеянных в земной коре, почве, воздухе, воде и других объектах внешней среды естественных радионуклидов;

3) излучения от искусственных радионуклидов, образовавшихся при испытаниях ядерного оружия и выпавших на поверхность Земли в виде локальных, тропосферных или глобальных радиоактивных осадков или поступающих во внешнюю среду при удалении радиоактивных отходов предприятиями атомной промышленности, предприятиями ядерного топливного цикла, предприятиями и учреждениями, работающими с радиоактивными веществами и использующими их в медицине, науке, технике или сельском хозяйстве.

Первые два компонента определяют естественный радиационный фон нашей планеты, третий компонент характеризует радиационное загрязнение биосферы.

Несомненно, что естественное ионизирующее излучение можно рассматривать как один из важнейших факторов эволюции, уровень которого изменялся в геохронологическом аспекте (табл. 1).

Внешнее облучение, обусловленное космическим излучением.

Космическое излучение подразделяют на первичное и вторичное. Первичное излучение состоит из заряженных частиц высокой энергии, приходящих из космического пространства. В свою очередь оно подразделяется на первичное галактическое космическое излучение, первичное солнечное космическое излучение и излучение заряженных частиц, захваченных магнитным полем Земли и образующих так называемые радиационные пояса.

Первичное галактическое космическое излучение состоит в основном из протонов высоких энергий (примерно 90 %), попадающих в нашу Солнечную систему из межзвездного пространства, а также ионов гелия (He-4), которые составляют примерно 10 % первичного космического излучения. Интенсивность других тяжелых ядер значительно меньше. Энергия протонов первичного космического излучения колеблется в широком диапазоне от 1 до 10^{14} МэВ. При энергиях свыше 10^3 МэВ плотность потока протонов экспоненциально падает с увеличением энергии.

Плотность потока первичного космического излучения с течением времени незначительно изменяется периодически в соответствии с 11-летним периодом солнечной активности. Наблюдаются также редкие, но очень сильные возрастания плотности потока излучения (в несколько раз и более) во время мощных вспышек на Солнце. Средний "возраст" галактического космического излучения, достигающего Солнечной системы (время или длительность прохождения этого излучения из Галактики), достигает 2,5 – 33 млн. лет.

Первичное солнечное космическое излучение обусловлено вспышками на Солнце. Солнечные вспышки наблюдаются в виде похожих на пламя ярких протуберанцев – светящихся выступов над поверхностью Солнца [лат. протуберанце – вздуваться]. Максимальной яркости они достигают примерно за 10 минут, а затем медленно гаснут. Во время этих вспышек испускается значительное количество энергии в виде излучения в области видимого, ультрафиолетового и рентгеновского спектров излучения. При наиболее

интенсивных вспышках испускается большое количество заряженных частиц, преимущественно протонов и альфа-частиц.

Солнечное космическое излучение характеризуется относительно низкой энергией, поэтому оно, как правило, не приводит к существенному увеличению дозы внешнего излучения на поверхности Земли. Однако в верхних слоях атмосферы мощность поглощенной дозы может на очень

короткое время увеличиться в 100 раз и более.

Радиационные пояса простираются на расстоянии 1,2 – 8 земных радиусов от экватора. Нижний пояс лежит между 30 и 60 к северу и югу от экватора, внешний пояс – в области более низких широт. Внешний пояс состоит преимущественно из протонов и электронов с небольшим содержанием альфа-частиц. Заряженные частицы попадают в этот пояс в результате их захвата магнитным



Кайнозой	Появление человека	Естественный фон 125 мбэр Σ 392 мбэр Время млн. лет назад
	Освоение огня	
	Конец ледниковой эпохи	
	10 тыс. лет	
	Приручение животных	
	Начало земледелия	
	Выплавка металлов	
Научно-техническая революция, 200 лет		
Искусственная радиоактивность в биосфере, 40 лет		

Рис. 1 Сопоставление геохронологического хода естественного фона радиации на поверхности Земли с основными этапами биологической эволюции (по Степанову, 1988)

полам Земли и двигаются по спиральям вокруг силовых линий магнитного поля, отражаясь в районе полюсов вследствие увеличения плотности силовых линий магнитного поля в полярных областях. Внутренний пояс состоит в основном из протонов с энергиями от нескольких сотен МэВ. Плотность потока частиц в радиационных поясах меняется вместе с изменением плотности потока первичного космического излучения в пределах 11-летнего солнечного цикла. Первичное космическое излучение почти полностью исчезает на высоте 20 км.

Взаимодействуя на высоте около 20 км над уровнем моря с ядрами атомов, присутствующих в воздухе, частицы высоких энергий первичного космического излучения образуют вторичное высокоэнергетическое излучение, состоящее из нейтронов, протонов, мезонов, электронов, фотонов и т.п. Частицы с меньшими энергиями теряют свою энергию в результате процессов ионизации. Таким образом возникает **вторичное космическое излучение**. Многие из частиц вторичного космического излучения обладают достаточной энергией для того, чтобы вызвать ряд последующих ядерных взаимодействий с ядрами азота и кислорода, присутствующими в атмосфере. В этих реакциях образуются различные продукты активации (так называемые космогенные радионуклиды). Население Земли подвергается воздействию практически только вторичного космического излучения.

Существенную роль среди вторичного космического излучения играют протоны высоких энергий, нейтроны и пионы, которые, взаимодействуя с ядрами атомов, содержащимися в воздухе, сами создают новые вторичные частицы (каскады). По мере развития этого процесса происходит резкое увеличение числа вторичных частиц (образование ливней).

Протоны и нейтроны вторичного космического излучения образуются преимущественно в верхних слоях атмосферы. Вследствие быстрой потери энергии в результате ионизации и взаимодействия с ядрами атомов плотность потока этих частиц резко уменьшается с уменьшением высоты над уровнем моря. Поэтому их вклад в суммарную мощность дозы на уровне моря составляет всего несколько процентов. Основной вклад в мощность поглощенной дозы в атмосфере (за исключением ее самых нижних слоев)

вносят электроны, образующиеся при распаде мюонов, при ионизации воздуха, производимой другими заряженными частицами, или во время каскадных ливней. Плотность потока частиц космического излучения варьирует во времени вследствие модуляции в пределах солнечной активности, солнечных вспышек или в результате изменения атмосферного давления и/или температуры. Интенсивность ионизации в атмосфере максимальна во время минимума солнечной активности и достигает своего минимального значения во время максимальной активности Солнца.

Суммарная годовая эффективная эквивалентная доза космического излучения на уровне моря составляет 0,3 мЗв, или 0,03 бэр (примерно соответствует мощности дозы гамма-излучения 3,4 мкР/ч), при этом на ионизирующий компонент космического излучения приходится 93 % дозы, на нейтронный компонент – 7 %.

Эффективная эквивалентная доза, $H_{эф}$ – сумма средних эквивалентных доз H_t в различных органах, взвешенных с коэффициентами W_t :

$$H_{эф} = \sum_t W_t H_t$$

Взвешивающие коэффициенты W_t характеризуют отношение риска стохастического эффекта облучения данного органа (ткани) к суммарному риску стохастического эффекта при равномерном облучении всего тела. Они позволяют выровнять риск облучения вне зависимости от того, облучается все тело равномерно или неравномерно. Числовые значения взвешивающих коэффициентов определяются экспериментально и рекомендуются для применения Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ). Очевидно, что сумма W_t равна 1 (см. табл. 1).

Средняя эквивалентная доза H_t – среднее значение эквивалентной дозы H в ткани или органе T с массой m_t .

Таблица 1

Значения взвешивающих коэффициентов

Орган (ткань)	Взвешивающий коэффициент W_t
Гонады	0,25
Молочная железа	0,15
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Щитовидная железа	0,03
Костные поверхности	0,03
Остальные органы и ткани	0,30 (в сумме)

Среднепопуляционная мощность дозы внешнего облучения для населения всего земного шара от космогенного радионуклидов составляет $2 \cdot 10^{-10}$ Гр/ч (0,02 микрограда в час).

Коллективная (популяционная) мощность дозы P_s , предназначена для количественной оценки возможных соматико–стохастических эффектов в результате воздействия ИИ на группы людей. При использовании такой величины предполагается наличие линейной зависимости "доза – биологический эффект" для любой ткани, облучаемой любым видом ИИ, как правило, в дозах, не превышающих допустимые значения для профессионального воздействия.

Если большое число лиц $N(P)$ находится в поле излучения с мощностью дозы от P до $P+dP$, то величина P_s , определяемая как

$$P_s = \int_0^{\infty} PN(P) dP,$$

есть коллективная (популяционная) мощность дозы.

Коллективная (популяционная) доза за некоторый период времени от t_1 до t_2 есть результат интегрирования по времени коллективной мощности дозы:

$$D_s = \int_{t_1}^{t_2} P_s(t) dt$$

В случае, когда происходит облучение населения всего земного шара от какого–либо источника (например, при испытании ядерного оружия в атмосфере или от предприятий ядерно–энергетического цикла), коллективная доза называется глобальной. Если воздействие радиационного фактора распространяется на население определенного региона, используется термин "региональная коллективная доза".

Важно иметь в виду, что одни и те же люди или группы людей могут находиться в сфере воздействия нескольких различных источников (например, естественного радиационного фона, глобальных радиоактивных выпадений, медицинского облучения, выбросов АЭС, профессионального облучения и т.п.) и, следовательно, вносить свой вклад в формирование различных коллективных доз.

Внешнее облучение, обусловленное естественными радионуклидами. В биосфере Земли содержится более 60 естественных радионуклидов. Их можно подразделить на две категории: первичные и космогенные.

Космогенные радионуклиды непрерывно образуются в основном в атмосфере при взаимодействии космического излучения преимущественно с ядрами атомов азота, кислорода и аргона, а затем поступают на земную поверхность с атмосферными осадками. К ним относятся $H-3$, $C-14$, $Be-7$, $Na-22$ и др. (всего 14 радионуклидов). Главными реакциями образования $C-14$ и $H-3$ являются: $^{14}N+n \rightarrow ^{12}C+^3H$ и $^{14}N+n \rightarrow ^{14}C+p$. Тритий и радиоуглерод $C-14$ являются космогенными источниками последующего внутреннего облучения человека на Земле. Основными космогенными источниками внешнего облучения являются радионуклиды $Be-7$, $Na-22$ и $Na-24$, однако на уровне Земли они не вносят существенного вклада в суммарную дозу внешнего гамма–излучения.

Первичные радионуклиды делят на две группы: радионуклиды уранового и ториевого семейств и радионуклиды, находящиеся вне этих радиоактивных семейств. В первую группу входят 32 радионуклида, среди которых такие долгоживущие нуклиды, как торий–232 (период полураспада 14,1 млрд. лет), уран–238 (4,51 млрд. лет), уран–235 (70 млн. лет), радий–226 (1602 года), свинец–210 (22,3 года) и др; во вторую группу – 11 долгоживущих радионуклидов, которые присутствуют в различных объектах среды с момента образования Земли и имеют период полураспада от 10^7 до 10^{15} лет (калий–40, рубидий–87 и др).

Из первичных радионуклидов основной вклад в дозу внешнего облучения вносят гамма–излучающие нуклиды уранового и ториевого рядов, а также калий–40. Главными источниками внешнего гамма–облучения в воздухе ториевой серии являются торий–228 и астатий–228, в урановом ряду 99 % дозы определяется гамма–излучением свинца–214 и висмута–214.

Содержание радионуклидов земного происхождения в почве определяется как активностью исходных горных пород, так и характером процессов почвообразования. На удельную активность естественных радионуклидов в почве влияют: активность горных пород, из которых она образовалась; процессы выщелачивания почв грунтовыми водами; сорбция радионуклидов почвами и некоторые другие факторы.

Энергия гамма–излучения, испускаемого этими радионуклидами, не превышает 2,6 МэВ, и поэтому оно частично поглощается почвой. Основной вклад в дозу излучения над поверхностью Земли вносят нуклиды, содержащиеся в верхнем 30–сантиметровом слое почвы.

Следует отметить, что уран–238 является не только родоначальником радиоактивного ряда. В результате спонтанного деления он образует большое количество других радионуклидов – продуктов деления. Количество естественных продуктов деления в земной коре довольно велико, но средняя концентрация активности их в почве чрезвычайно мала и обусловленные ими дозы незначительны. Например, общее количество стронция–90 в земной коре оценивается равным $5 \cdot 10^{16}$ Бк (1,35 млн Ки), его средняя удельная активность в почве равна $2 \cdot 10^{-6}$ Бк/кг, формируемая им годовая доза облучения красного костного мозга составляет около 10 – 11 Гр (10^{-9} рад).

Типичный диапазон мощности поглощенной дозы в воздухе на высоте 1 м от поверхности Земли от всех естественных радионуклидов составляет от 37 до 94 нГр/ч (примерно соответствует мощности дозы гамма–излучения 3,7 – 9,4 мкР/ч).

Среднепопуляционная мощность дозы внешнего облучения для населения всего земного шара принята равной 45 нГр/ч (4,5 мкР/ч), а мощность дозы от космогенных радионуклидов – 0,2 нГр/ч.

Если человек находится в помещении, доза внешнего облучения формируется под влиянием двух противоположно действующих факторов: экранирования внешнего излучения зданием и излучения естественных радионуклидов, находящихся в материалах, из которых построено здание. В зависимости от концентрации в различных строительных материалах

радионуклидов K-40, Ra-226 и Th-232 мощность поглощенной дозы гамма-излучения в зданиях изменяется от 30 до 230 нГр/ч (от 3 до 23 мкР/ч). В среднем в кирпичных, каменных, бетонных зданиях мощность дозы в 2–3 раза больше, чем в деревянных домах и домах из синтетических материалов, где она обычно составляет 40–50 нГр/ч (4–5 мкР/ч).

Районы с повышенным естественным фоном. На земном шаре имеются районы, где мощность поглощенной дозы в воздухе вне помещений значительно превышает среднее значение (около 5 мкР/ч), характерное для районов с "нормальным" радиационным фоном. Это – провинции Лацио и Кампанья в Италии, районы в штатах Керала и Тамилнад в Индии, в штатах Эспириту-Санту, Минас-Жерайс и Рио-де-Жанейро в Бразилии, ряд районов во Франции, Иране, Нигерии, на Мадагаскаре и в некоторых других странах мира. Так, отмечены места в штате Минас-Жерайс, где мощность поглощенной дозы в воздухе достигает 28 мкГр/ч (примерно соответствует 2800 мкР/ч). Во Франции в ряде районов типичное значение мощности поглощенной дозы в воздухе достигает 2 мкГр/ч (200 мкР/ч); в этой стране обнаружен также небольшой район, где мощность поглощенной дозы составляет 100 мкГр/ч (10 тыс. мкР/ч).

Основные источники ионизирующего излучения в биосфере Земли представлены в таблице 2

Внутреннее облучение от космогенных радионуклидов. Имеющиеся во внешней (по отношению к человеку) среде радионуклиды поступают внутрь организма человека с вдыхаемым воздухом, продуктами питания и питьевой водой.

Вклад космогенных радионуклидов в суммарную дозу, обусловленную естественным радиационным фоном, невелик. Среди большого числа космогенных радионуклидов лишь четыре радионуклида (H-3, Be-7, C-14 и Na-22) вносят некоторый вклад в эту дозу.

Тритий – радиоактивный изотоп с периодом полураспада 12,3 года. Тритий – чистый бета-излучатель с максимальной энергией 18 кэВ. Образуется в атмосфере, литосфере и гидросфере. Основным источником естественного трития является атмосфера, где он образуется в результате взаимодействия протонов и нейтронов космического излучения с ядрами атомов азота, кислорода и аргона. Основной реакцией является реакция типа $^{14}\text{N} + n \rightarrow ^{12}\text{C} + ^3\text{H}$ при энергии нейтронов более 4,4 МэВ. Около 99 % всего образующегося ^3H превращается в НТО – тритиевую воду (Т – тритий) и участвует в круговороте воды в биосфере. Большая часть этого трития содержится в морях и океанах в результате поступления его туда с дождем или прямого обмена парами воды между воздухом и морской водой. До начала проведения испытаний ядерного оружия в атмосфере содержание H-3 в воде в различных районах земного шара колебалось от 200 до 900 мБк/л. Около 30 % общего количества естественного трития содержится в глубоких слоях океанов, около 35 % – в верхних, хорошо перемешивающихся слоях океана, около 27 % – в земной поверхности и живом веществе, около 6,8 % – в стратосфере и лишь 0,4 % – в тропосфере. На долю

континентальных районов приходится около 30 % общего количества естественного трития.

Бериллий-7 – радиоактивный изотоп бериллия с периодом полураспада 53,3 суток, гамма-излучатель с энергией квантов 0,477 МэВ. Средняя концентрация Be-7 в приземных слоях атмосферного воздуха в районе умеренных широт составляет примерно 3 мБк/м³, а в дождевой воде – 700 Бк/м³. Основным источником поступления этого радионуклида в организм человека является потребление зеленых овощей. Поглощенная доза облучения всего тела взрослого человека оценивается равной 0,08 мкГр (8 микрорад) в год.

Углерод-14 встречается в природе вместе с другими изотопами углерода (¹²C и ¹³C). Изотоп C-14 является чистым бета-излучателем с максимальной энергией бета-частиц 0,156 МэВ. Период полураспада радиоуглерода составляет 5730 лет. Естественный радиоактивный нуклид C-14 образуется в верхних слоях атмосферы при взаимодействии нейтронов космического излучения с ядрами стабильных атомов азота по реакции ¹⁴N(n,p)¹⁴C. Скорость его образования оценивается в 10¹⁵ Бк/г.

В 19-м веке удельная активность естественного радиоуглерода в живом веществе была равна 227 мБк/г C, что соответствует общему содержанию его в атмосфере 1,4·10¹⁷ Бк. Однако в 20-м веке удельная активность C-14 в воздухе

Таблица 2

Источник излучения в биосфере и их основные характеристики
(по: [Тихомиров, 1972])

Источник	Вид излучения	Длительность облучения	Мощность поглощенной дозы	Площадь действия	Участие в биогенных циклах	Воздействие на организмы и их сообщества
Естественный фон	α, β, γ	Миллиарды лет	10^3 Гр/год	Весь земной шар	+	Генетическое
Фосфорные удобрения	α, β, γ	Хроническое	Ниже естественного фона	Миллионы км ²	+	Генетическое
Каменноугольная зола	α, β, γ	— «—	То же	Тысячи км ²	+	Генетическое
Радиоактивные отходы газообразные	α, β, γ	— «—	Выше естественного фона	Сотни км ²	+	Отдаленное генетическое
жидкие и твердые	α, β, γ	— «—	То же	Сотни га	Потенциально возможно	Соматическое и (возможно) генетическое
Аварийные выбросы излучения из радиоактивного облака выпадения	α, β, γ	Острое	До 10 Гр/ч	Несколько га	—	Соматическое и генетическое
	α, β, γ	Хроническое	До 0,1 Гр/ч	Сотни км ²	—	То же
Ядерные испытания мгновенное излучение	η, γ	Острое	До 10^4 Гр/ч	Несколько км ²	—	— «—
локальные выпадения	α, β, γ	Преимущественно в течение недели	До 10^2 Гр/ч	То же	+	— «—
долгоживущие радионуклиды стратосферных и локальных выпадений	α, β, γ	Хроническое (сотни лет)	Ниже естественного фона	Весь земной шар	+	Отдаленное генетическое
Ядерная война мгновенное излучение	η, γ	Острое	До 10^5 Гр/ч	Тысячи км ²	—	Соматическое и генетическое
локальные выпадения	α, β, γ	Преимущественно в течение недели	До 10^2 Гр/ч	Сотни тысяч км ²	+	То же
загрязнение долгоживущими нуклидами стратосферных и тропосферных выпадений	α, β, γ	Хроническое (сотни лет)	До 0,01–0 Гр/ч	Весь земной шар	+	Соматическое (возможно), отдаленные генетические эффекты
Ядерные энергетические установки без защиты и мощные точечные источники гамма-излучения, используемые в радиоэкологических исследованиях	η, γ	Периодическое	До 10^3 Гр/ч	Сотни га	—	Соматическое и генетическое

снизилась вследствие его разбавления углеродом, выделяющимся при сгорании ископаемого топлива (угля, нефти, природного газа). Оценочные расчеты показали, что если бы не проводились испытания ядерного оружия в атмосфере, то в результате такого разбавления концентрация изотопа С-14 в живой материи к 1950 г. должна была снизиться на 3,2 к 1969 г. – на 5,9, а к 2000 г. – на 23 %. В результате проведения испытаний ядерного оружия в атмосфере, а также работы ядерных реакторов в окружающую среду поступает дополнительное количество изотопа С-14.

Среднее содержание углерода в теле взрослого человека массой 70 кг равно 16 кг, т.е. 23 % массы всего тела. Годовая поглощенная доза от С-14, содержащегося в различных органах и тканях тела человека, составляет: 1,3 мкГр – для всего тела; 0,6 мкГр – для легких; 0,5 мкГр – для гонад; 32 мкГр – для клеток эндоста; 2,2 мкГр – для красного костного мозга.

Натрий-22 – радиоактивный изотоп натрия с периодом полураспада 2,62 года. Бета- и гамма-излучатель с максимальной энергией бета частиц 1,82 МэВ, гамма-квантов – 1,275 МэВ. Суммарная активность, равная $0,4 \cdot 10^{15}$ Бк, распределяется таим образом: 25 % – стратосфера; 1,7 % – тропосфера; 21 % – поверхность Земли и органическое вещество; 44 % – верхние перемешивающиеся слои океана; 8 % – глубокие слои океана. Концентрация в воздухе у поверхности Земли составляет $3 \cdot 10^{-4}$ мБк/м³. Годовая поглощенная доза от космогенного Na-22 за счет внутреннего облучения в некоторых органах и тканях человека (мкГр): гонады – 0,14; красный костный мозг – 0,22; эндостальные клетки – 0,27; щитовидная железа – 0,12; толстая кишка – 0,14; другие ткани – 0,10.

Внутреннее облучение от рассеянных во внешней среде естественных радионуклидов. Из этой категории рассмотрим в основном те радионуклиды, которые дают наиболее высокий вклад в эффективную эквивалентную дозу. Необходимо иметь в виду, что в целом эффективная эквивалентная доза внутреннего облучения вдвое больше дозы внешнего облучения.

Углерод-14 попадает в организм человека через органы дыхания и органы пищеварения. Среднегодовая эффективная эквивалентная доза (на все тело) за счет поступления этого изотопа равна 12 мкЗв.

Калий-40 – радиоактивный изотоп калия с периодом полураспада $1,3 \cdot 10^9$ лет. Бета- и гамма излучатель с максимальной энергией бета-частиц 1,322 МэВ, гамма-квантов – 1,46 МэВ. Содержание калия во всем теле человека меняется в зависимости от возраста и пола. Наибольшее содержание калия – у молодых мужчин, минимальное – у пожилых женщин. Для взрослого мужчины среднее содержание К-40 составляет примерно 2 г на 1 кг массы тела. Концентрация калия в различных органах и тканях человека варьирует в широких пределах: 0,5 г калия на 1 кг костной ткани; 4,4 г на 1 кг красного костного мозга; 2,1 г на 1 кг легких или яичек; 1,35 г на 1 кг яичников. Средние дозы за год, создаваемые К-40 при такой концентрации калия, равны, мкГр: 270 – для красного костного мозга; 140–180 – для легких, гонад и эндостальных

клеток в целом для всего тела человека. Среднегодовая эффективная эквивалентная доза составляет 180 мкЗв.

Рубидий-87 – радиоактивный изотоп рубидия с периодом полураспада $4,8 \cdot 10^{10}$ лет. Распад Rb-87 сопровождается испусканием бета-частиц с максимальной энергией 0,274 МэВ. Среднее содержание в теле человека составляет $1,7 \cdot 10^{-3}$ %. Содержание Rb-87 в земной коре равно примерно 0,03 % по массе. Сведений о его содержании и поведении во внешней среде почти нет. О метаболизме рубидия в организме человека также известно очень мало. Предполагают, что в организме человека он распределяется так же, как и калий, поскольку эти два элемента обладают сходными химическими свойствами. Поглощенная доза за год, создаваемая рубидием-87 в теле человека, колеблется от 3 до 14 мкГр в зависимости от органа или ткани. Среднегодовая эффективная эквивалентная доза равна 6 мкЗв.

Однако основной вклад во внутреннее облучение человека вносят радионуклиды, входящие в состав естественных радиоактивных семейств урана-238 и тория-232. Важно отметить, что большинство из образующихся при этом радионуклидов излучают кроме бета-частиц и гамма-квантов также и альфа-частицы, которые создают на своем пути в веществе, в том числе и в биологической ткани, высокую плотность ионизации атомов и молекул вещества. Особо следует выделить свинец-210, полоний-210, радий-226, радон-220 (Th-220, торон-220), которые вносят наибольший вклад в поглощенную дозу.

Уран-238 ($T_{1/2}=4,51 \cdot 10^9$ лет) и **торий-232** ($T_{1/2}=1,41 \cdot 10^{10}$ лет) попадают в организм человека в основном с пищевым рационом. В районах с нормальным естественным радиационным фоном годовое поступление этих радионуклидов в организм человека оценивается следующим образом: U-238 – 5 Бк, Th-232 – 10 Бк (считается, что вкладом поступления тория-232 в организм с продуктами питания и водой можно пренебречь из-за низкого значения коэффициента всасывания тория из ЖКТ в кровь), причем вклад питьевой воды в суммарное поступление этих двух радионуклидов незначителен.

Радий-226 ($T_{1/2}=1602$ года) поступает в организм человека в основном также через ЖКТ. При нормальном естественном радиационном фоне среднее поступление оценивается примерно 15 Бк в год.

Уран, радий и торий являются остеотропными радионуклидами: их доля в скелете составляет 70–90 % от общего содержания в теле человека.

Свинец-210 ($T_{1/2}=22,3$ года) и **полоний-210** ($T_{1/2}=138,4$ сут) поступают в организм человека в основном с пищей. Pb-210 – типичный остеотропный радионуклид, а Po-210 накапливается преимущественно в мягких тканях. С вдыхаемым воздухом в организм человека поступает в среднем 4 и 1 Бк в год Pb-210 и Po-210 соответственно. С продуктами питания в организм людей, проживающих в районах с нормальным радиационным фоном, в среднем за год поступает по 40 Бк Pb-210 и Po-210. Оба радионуклида интенсивно концентрируются в рыбе и моллюсках, поэтому люди, потребляющие много рыбы и других даров моря, могут получить относительно высокие дозы облучения. На Крайнем Севере десятки тысяч людей питаются

преимущественно мясом северного оленя (карибу), в котором эти радионуклиды присутствуют в довольно высокой концентрации. Они попадают в организм оленей зимой, когда те питаются лишайниками, в которых накапливаются оба нуклида. Дозы внутреннего облучения человека от полония-210 при этом могут в 35 раз превышать средний уровень. Люди, живущие в Западной Австралии в местах с повышенной концентрацией урана, получают за счет поступления в их организм Рb-210 и Po-210 дозы, в 75 раз превосходящие средний уровень, поскольку едят мясо и требуху овец и кенгуру.

Дополнительное количество этих радионуклидов поступает через органы дыхания при курении. При температуре сгорания табака оба радионуклида становятся летучими. 10 % свинца-210 и 20 % полония-210, содержащихся в табаке сигарет, попадают в легкие человека вместе с основной струей дыма. Среднее годовое поступление Рb-210 и Po-210 в легкие человека, выкуривающего одну пачку сигарет в сутки, составляет 16 и 60 мБк соответственно.

Радон-222 – естественный инертный радиоактивный, невидимый, не имеющий вкуса и запаха тяжелый газ (в 7,5 раза тяжелее воздуха), образующийся при распаде радия-226. Период полураспада 3,823 суток. Радон-220 образуется при распаде тория-232, период полураспада 55 с. Вклад радона-222 в дозу облучения примерно в 20 раз больше, чем радона-220. Эти радиоизотопы встречаются во многих природных материалах, откуда они могут частично диффундировать в окружающую среду (атмосферный воздух, воду). Скорость поступления радона в атмосферу сильно зависит от типа почвы, времени суток, сезона и метеорологических условий. Наибольшая концентрация этих изотопов наблюдается в приземном слое воздуха.

Вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада радон ответственен примерно за 3/4 годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы облучения, получаемой населением от земных источников радиации, и примерно половину этой дозы от всех естественных источников ионизирующего излучения. Человек большую часть дозы, обусловленной радоном, получает вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в закрытых, непрветриваемых помещениях. В зонах с умеренным климатом концентрация радона в закрытых помещениях примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе.

Герметизация помещений с целью утепления затрудняет выход радиоактивного газа из помещений. Концентрация радона в верхних этажах многоэтажных домов, как правило, ниже, чем на 1-м этаже. Скорость проникновения исходящего из земли радона в помещения фактически определяется толщиной и целостностью межэтажных перекрытий, т.е. количеством трещин и микротрещин в них. После заделки щелей в полу и стенах помещения концентрация радона в нем уменьшается. Даже при оклейке стен обоями скорость эмиссии радона снижается примерно на 30 %.

Еще один источник поступления радона в жилые помещения представляют собой вода и природный или сжиженный газ, которым

пользуются для обогрева жилищ и приготовления пищи. Концентрация радона в помещениях заметно возрастает, если кухонные плиты, отопительные и другие нагревательные устройства, в которых сжигается газ, не снабжены вытяжкой. Воды из открытых водоемов обычно содержит чрезвычайно мало радона, но вода из глубоких колодцев и артезианских скважин характеризуется высокой концентрацией этого газа. Наибольшая зарегистрированная удельная радиоактивность воды в системах водоснабжения составила 100 млн. Бк/м³, наименьшая равна нулю.

Однако наибольшую опасность представляет не питье воды, а попадание паров воды с высоким содержанием радона в легкие человека вместе с вдыхаемым воздухом, что чаще всего происходит в ванной комнате. При обследовании домов в Финляндии оказалось, что в среднем концентрация радона в ванной комнате примерно в 40 раз выше, чем в жилых помещениях. После отключения 7-минутного душа прошло более полутора часов, прежде чем содержание радона вновь упало до исходного уровня.

Эффективная эквивалентная доза облучения от радона и его дочерних продуктов составляет в среднем около 1 мЗв (100 мбэр) в год, т.е. половину всей годовой дозы (2 мЗв), получаемой человеком в среднем от всех естественных источников радиации.

1.2. Антропогенный радиоактивный фон

Под антропогенными радиоактивными воздействиями на окружающую среду понимают извлекаемые из недр земли естественные радионуклиды более 60, искусственные радионуклиды порядка нескольких сотен и техногенные источники излучения таблица 3.

Облучение человека при медицинских обследованиях и радиационной терапии. Использование ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в медицине для диагностики и радиотерапии является основным источником искусственного облучения человека, превышающим воздействие всех других искусственных источников.

Дозы облучения создаются:

- при рентгеновской диагностике человека;
- диагностике состояния отдельных органов (печени, легких, почек, щитовидной железы и др.) с помощью радиоактивных фармацевтических препаратов (³²P, ⁵⁷Cr, ^{99m}Tc, ¹³³I, ¹⁹⁸Au, ²⁰³Hg и др.) вводимых внутрь организма;
- при радиотерапии с использованием радиоактивных источников (кобальт-60 – 75,6 % всех терапевтических установок; цезий-137 – 5,6 %), бетатронов (6,9 %), линейных ускорителей (10,7 %) и различных радиофармпрепаратов (1,2 %).

Максимальная средняя годовая доза от рентгенодиагностических процедур приходится на костный мозг, ЖКТ и все тело: 1310, 860 и 1386 мкГр/г соответственно. Следует иметь в виду, что средняя эффективная эквивалентная доза облучения населения земного шара, проживающего в районах с "нормальным" природным радиационным фоном, составляет 2200 мкЗв/г.

Поглощенная доза в гонадах при рентгеноскопии, рентгенографии и флюорографии составляет соответственно 166, 169 и 0,9 мкГр в год. При этом генетически значимая доза от этих диагностических процедур составляет соответственно 77,149 и 1 мкГр в год.

Поглощенная доза в органе, облучаемом с целью терапии, очень велика и обычно составляет 20–60 Гр за несколько сеансов. Побочным вредным эффек-

Таблица 3

Действие ионизирующих излучений на внешнюю среду (по Р.Б. Плетту, 1968)

Источник	Тип излучения	Продолжительность облучения	Доза для внешней среды	Вторичная наведенная активность	Действие огня и взрыва	Общая территория, подверженная воздействию	Прямые эффекты	Включение радиоизотопов в миграцию
Естественная (фоновая) радиация	α, β, γ	Несколько миллиардов лет	0,1–0,5 Р/год	Нет	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Медицинское и профессиональное облучение	Обычно во внешнюю среду излучение не высвобождается							
Гамма-поля с ^{60}Co (до 4000 кюри)	γ	Хроническое, несколько лет	До нескольких тысяч Р/год	Нет	Нет	Сотни гектаров	Есть	Нет
Реакторы с защитой	η, γ	Прерывистое	До величин, равных нескольким фоновым	Незначительная	Нет	Несколько гектаров	Нет	Незначительное
Реакторы без защиты	η, γ	Прерывистое	До 100000 Р/ч	Есть	Нет	Сотни гектаров	Есть	То же
Выбросы реакторов	α, β, γ	Непрерывное	Выше фоновой	Нет	Нет	Сотни квадратных километров	Нет	Есть
Сброс отходов	α, β, γ	Непрерывное	Незначительно выше фоновой	Нет	Нет	Сотни гектаров	Нет	Возможно
Авария	α, β, γ	Острое	До нескольких тысяч Р/ч	Нет	Есть	Некоторые гектаров	Есть	Нет
Ядерные испытания	α, β, γ	Острое	До нескольких миллионов Р/ч	Есть	Есть	Сотни квадратных километров	Есть	Нет
Радиоактивные осадки после аварий и ядерных испытаний	α, β, γ	Хроническое, тысячи лет	До величин, радиоактивность равных нескольким фоновым	Нет	Нет	Вся Земля	Нет	Есть
Ядерная война	α, β, γ	Острое	До сотни миллионов Р/ч	Есть	Есть	Тысячи квадратных километров	Есть	Нет
Радиоактивные осадки в ядерной войне	α, β, γ	Хроническое, тысячи лет	До нескольких Р/ч	Нет	Нет	Вся Земля	Есть	Есть

том являются поглощенная доза в гонадах на 1 Гр поверхностной дозы первичного излучения на поверхности тела. С учетом рассеянного излучения поглощенные дозы в гонадах могут достигать для женщин 0,607 Гр на 1 Гр поверхностной дозы (при терапии яичников), а для мужчин – 0,845 Гр (при облучении коленных чашечек).

Предметы широкого потребления являются дополнительным источником облучения человека. Так, часы с циферблатом, содержащим радий–226, создают мощность дозы 0,074 мкГр/ч. Мягкое рентгеновское излучение цветного телевизора создает на расстоянии 250 см от экрана мощность дозы, равную 0,003 мкГр/ч, а на расстоянии 5 см от экрана – 100 мкГр/ч (10 миллирад/ч).

Сравнительный анализ усредненных доз облучения от природных ионизирующих источников и искусственных показывает явное доминирование последних в облучении населения таблица 4.

Прекращение испытаний ядерного оружия несомненно положительно сказывается на глобальной радиоэкологической ситуации, в то время как увеличение количества АЭС и радиоактивные отходы ядерной промышленности повышают опасность локального и глобального загрязнения биосферы.

ГЛАВА II ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

2.1. Ядерный топливный цикл

Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) представляет собой последовательность технологических операций по использованию радиоактивных элементов для производства энергии. В современной технологии ЯТЦ включает: добычу урановой руды, производство уранового концентрата типа: U_3O_8 – октооксида урана или $Na_2U_2O_7$ – диуранта натрия; изготовление гексафторида урана UF_6 обогащение ураном 235; изготовление топлива для ядерных реакторов. В атомных реакторах в результате управляемой ядерной реакции происходит выделение энергии: тепловой или электрической. осуществляется переработка отработанного ядерного топлива (ОЯТ) и захоронение радиоактивных отходов.

Существуют два вида ядерного топливного цикла: разомкнутый – открытый и замкнутый – закрытый. В первом типе ЯТЦ отработанное ядерное топливо – высокоактивные радиоактивные отходы с остаточными делящимися изотопами изымаются из реакторов и поступают на хранение. Разомкнутые ЯТЦ характеризуются невысокой эффективностью использования природного урана в пределах 1 % и высоким уровнем радиоактивных отходов. Второй тип ЯТЦ (Рис. 1) включает переработку отработанного ядерного топлива на радиохимических заводах с целью возврата в цикл невыгоревшего урана–235, урана 238 и изотопов плутония, образующихся при работе реакторов.

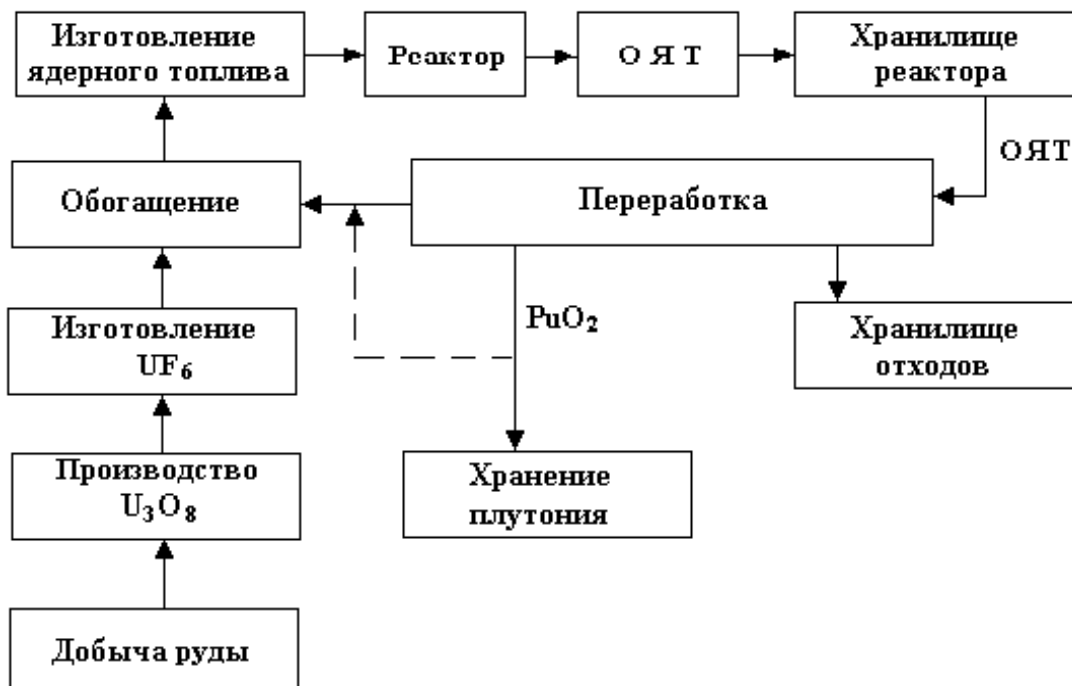


Рис. Схема замкнутого ядерного топливного цикла

Замкнутые ЯТЦ в свою очередь подразделяются на циклы с регенерацией урана и с регенерацией плутония. В последнем случае утилизация энергетического и оружейного плутония предполагает создания технологий производства смешанного уран–плутониевого топлива из диоксидов урана (UO_2) и плутония (PuO_2) для реакторов на быстрых и тепловых нейтронах.

Замкнутые ЯТЦ более эффективно используют природный уран, экологически более безопасны и могут достаточно широко использовать отработанное ядерное топливо и накопленный в военных целях оружейный плутоний. В настоящее время в России доминируют ядерные установки с разомкнутым ЯТЦ. Предполагается постепенный переход в течении 2005–2010 г. к замкнутым типам ЯТЦ.

Необходимо отметить, что из 34 стран, использующих ядерную энергетику только Англия, Россия, Франция, Индия и Япония перерабатывают отработанное ядерное топливо и только Англия, Россия и Франция перерабатывают ОЯТ других государств. Рассмотрим более детально каждый из этапов ЯТЦ и оценим уровни радиоактивного загрязнения окружающей среды.

2.2. Добыча и обогащение урана

В связи с тем, что начальным этапом ядерного топливного цикла является добыча и обогащение урана разработка урановых месторождений

осуществляется оценка промышленных запасов строительства рудников и обогатительного производства следует отметить, что немногие страны занимаются разработкой урановых месторождений. Расходы на восстановление природной среды сани -

Таблица 4

Основные источники облучения населения и обусловленные ими
Эффективные эквивалентные дозы, мБэгод (по Рамзаеву, 1992)

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

рование, экологический мониторинг уранодобычи как правило более чем в 2 раза превышают цену урана на мировом рынке. Радиоактивная руда, содержащая от 0,05 % до 0,3 % урана добывается открытым, подземным и

комбинированным способами. После предварительного дробления и радиометрической сепарации, т.е. разделение добытой горной породы на кондиционные руды, содержащие уран и некондиционные породы.

Извлечение урана из руды происходит на гидрометаллургических заводах, где осуществляется дробление руды, измельчение и выщелачивание серной кислотой в присутствии окислителей (MnO_2). В результате окисления плохо растворимая 4-валентная форма урана переходит в хорошо растворимую 6-валентную. В процессе выщелачивания около 90 % урана растворяется. После сепарации пульпы нерастворимая часть вместе с частью радиоактивных элементов: торий, радий и т.д. и тяжелыми металлами поступает в хвостохранилища.

В зависимости от химического состава урана концентраты радиоактивных элементов изготавливаются в виде октооксида урана U_3O_8 или диуранта натрия $Na_2U_2O_7$. Следовательно, конечным продуктом начальной стадии ядерного топливного цикла является изготовление уранового концентрата, содержащего 70 % – 80 % урана.

Для ядерной энергетики используются уран-235, поддерживающий цепную реакцию деления. В связи с тем, что концентрация урана-235 в природном уране составляет 0,7 % необходимо обогащение до 2,4 %– 25 % в зависимости от типов ядерных реакторов. Предварительно производится доочистка природного урана – афоринаж от бора, кадмия, гафния, которые поглощают нейтроны и редкоземельных элементов: гадолиния, европия, самария. Экстракционная очистка уранового концентрата после растворения в азотной кислоте производится с помощью трибутилфосфата. Изотопное обогащение урана проводится с гексафторидом урана. Технология получения гексафторида урана включает производство чистого фтора, измельчение тетрафторида (UF_4) или оксида урана в виде порошка, сжигание его факеле фтора.

Последующая фильтрация гексафторида урана, его конденсация в системе холодных ловушек и изотопное обогащение приводит к получению ядерного топлива. Технологическое разделение изотопов происходит на газовых центрифугах с предварительной фильтрацией химических примесей в газодиффузионных установках. Таким образом, конечным продуктом производства ядерного топлива является диоксид порошка, топливные таблетки, тепловыделяющие элементы – твэлы и тепловыделяющие сборки. Обогащение урана в России производится в г. Северске (Томск-7), Красноярске-45, Ангарске и Верхнем Нейвинске. В изготовление ядерного топлива участвует завод химконцентратов в Новосибирске и машиностроительный завод электростали.

2.3. Ядерные реакторы

Ядерным реактором называется технологическое устройство, в котором происходит самоподдерживающаяся контролируемая цепная реакция деления ядер тяжелых элементов под действием нейтронов.

В ядерном реакторе осуществляется самоподдерживающийся процесс следующих друг за другом актов деления ядер $U-235$ под действием нейтронов. Основной частью ядерного реактора является **активная зона**, в которой находится делящийся материал. В реакции деления ядра образуются два радиоактивных осколка в виде атомов различных элементов и нейтроны. По мере работы реактора число атомов ядерного топлива в нем постепенно уменьшается, "выгорает", а количество осколков, напротив, увеличивается. За активной зоной обычно находится **отражатель** U , или **экран**, который частично отбрасывает уходящие нейтроны обратно в активную зону и тем самым способствует протеканию цепной реакции. За экраном располагается **биологическая защита** от ионизирующего излучения, которая выполнена в виде толстых бетонных стен или баков с водой.

Для управления цепной реакцией служат специальные **управляющие стержни**, изготовленные из материалов, способных сильно поглощать нейтроны. Введение таких стержней в активную зону приводит к уменьшению количества свободных нейтронов и тем самым к задержке или даже к полному прекращению цепной реакции.

При работе реактора в активной зоне и частично в отражателе выделяется громадное количество энергии, которая в конечном счете проявляется в виде тепла. Для того, чтобы реактор не перегревался и не разрушался, тепло из него необходимо непрерывно отводить. Для этого через активную зону постоянно прокачивается газ, или вода, или какое-нибудь другое вещество, отбирающее тепло из активной зоны и передающее его затем атмосферному воздуху, воде реки или пару, идущему в турбину электростанции. При этом вещество теплоносителя становится радиоактивными результате его активации нейтронами.

В зависимости от назначения все ядерные реакторы подразделяются на энергетические и реакторы для получения излучений. К первому типу относятся: электроэнергетические ядерные реакторы АЭС, электроэнергетические – термоэлектрические реакторы с безмашинным преобразованием тепловой энергии в электрическую. Высокотемпературные теплоэнергетические реакторы, производящие тепловую энергию, используемую в химической и металлургической промышленности. Теплоэнергетические реакторы, вырабатывающие энергию теплоснабжения, а также судовые, ракетных двигателей, двухцелевые реакторы–размножители.

Ко второму типу относятся: исследовательские ядерные реакторы, промышленные, использующие для производства плутония и радиоактивных изотопов, облучательные, хемоядерные, активационные, биомедицинские и реакторы лазеры.

В качестве сырья в реакторах различного типа используются: уран–235, уран–233, уран–238, плутоний–239, торий–232. По физическим характеристикам ядерные реакторы подразделяются на реакторы на тепловых и быстрых нейтронах, реакторы размножители, уранового, плутониевого и

ториевого цикла. В России наиболее распространенными являются реакторы типа: ВВЭР, РБМК и БН.

ВВЭР – водо–водяной энергетический реактор, в котором вода используется в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя. Загружается природным ураном (66 т) и обогащенным до 3 %–4% ураном–235. Электрическая мощность порядка 1000 МВт. РБМК – реактор большой мощности канальный, работает на тепловых нейтронах, замедлителем служит графит, теплоносителем – вода. В качестве ядерного топлива используется диоксид урана, обогащенный ураном–235 до 2 %, запрессованный в трубки из сплава циркония. Твэлы по 18 штук монтируются в тепловыделяющие сборки – ТВС, помещенную в вертикально расположенную трубу технологический канал, по которой прокачивается вода. В реакторе 1690 рабочих каналов, содержащих около 200 т. урана. Электрическая мощность 1000 МВт, тепловая ~ 3200 МВт. Реактор такого типа располагается на Чернобыльской АЭС.

БН–реакторы на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем без замедлителя. Позволяет использовать в качестве топлива уран–238 и торий–232.

В 1994 г. в мире работало 430 ядерных энергоблоков с общей мощностью порядка 350 тыс. МВт.

2.4. Ядерные отходы

Технологически измененный естественный радиационный фон. Для оценки изменения естественного радиационного фона под влиянием хозяйственной деятельности человека используют термин "технологически измененный (или повышенный) естественный радиационный фон". В него не включают поступившие в окружающую среду искусственные радиоактивные вещества от испытаний ядерного оружия и от работы предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Однако к нему относят такие источники, как геотермические электростанции, создающие в среднем выброс около $4 \cdot 10^{14}$ Бк Rn–222 на 1 ГВт/г выработанной электроэнергии; фосфорные удобрения, содержащие, например, Ra–226 и U–238 до 70 Бк/кг в кольском апатите и 400 Бк/кг в фосфорите; дополнительное облучение при полетах в самолете; радий–226, прометий–147 и тритий, используемые для светосоставов постоянного действия; цветные телевизоры, а также электронные и электрические устройства, содержащие радионуклиды или излучающие рентгеновское излучение; радионуклид Po–210, используемый для снятия статистического заряда в некоторых производствах; пожарные дымовые детекторы, содержащие Ra–226, Pu–238 или Am–241; керамическая и стеклянная посуда, содержащая уран и торий и др.

Уголь, сжигаемый в промышленных энергетических установках или жилых домах, содержит естественные радиоактивные K–40, а также U–238 и Th–232 в равновесии с их продуктами распада. В угольной золе содержится в среднем такая удельная активность, Бк/кг: 265 – ^{40}K , 200 – ^{238}U , 240 – ^{226}Ra , 930 – ^{210}Pb , 1700 – ^{210}Po , 70 – ^{232}Th , 110 – ^{238}Th и 130 – ^{228}Ra . Количество

выброшенных в атмосферу радионуклидов зависит от зольности угля и эффективности очистных фильтров сжигающих устройств. ТЭЦ различного типа выбрасывают в атмосферу от 1 до 20 % общего количества образующейся золы. Индивидуальная средняя доза облучения в районе ТЭС электрической мощностью 1 ГВт (район радиусом 20 км, площадью около 1000 км²) составляет 5,3 мкЗв/г, при этом костный мозг получает 145 мкЗв, легкие – 420 мкЗв, костная ткань – 1140 мкЗв.

Удобрения, применяемые в сельском хозяйстве, содержат немалое количество радионуклидов, которые после внесения их в почву проходят по пищевым цепям и поступают в живые организмы. Мировая добыча фосфатных руд составляет около 1,3 млн. тонн в год. Одними из самых чистых в мире считаются отечественные удобрения, однако это связано не с технологией их изготовления, а с качеством исходных пород.

Тройной суперфосфат, выпускаемый в США, содержит, Бк/кг: 2100 – ²³⁸U, 1800 – ²³⁰Th, 780 – ²²⁶Ra, 48 – ²³²Th.

Азотно–фосфорно–калиевые удобрения (Бельгия) содержат, Бк/кг: 470 – ²³⁸U, 210 – ²²⁶Ra, 5900 – ⁴⁰K.

Радиоактивные вещества поступают в природную среду на всех стадиях работы ядерного топливного цикла:

- добыча и переработка урановых и ториевых руд;
- обогащение урана изотопом ²³⁵U;
- изготовление тепловыделяющих элементов (ТВЭлов);
- получение ядерной энергии в ядерных реакторах;
- переработка отработавшего ядерного топлива на радиохимических предприятиях и извлечение из него делящихся веществ и радионуклидов, представляющих интерес для народного хозяйства;
- переработка, хранение и захоронение радиоактивных отходов.

Для обеспечения всех стадий ЯТЦ необходима также транспортировка радиоактивных материалов.

Основными источниками потенциальной ядерной опасности на территории России являются предприятия по производству расщепляющегося материала для ядерного оружия – Арзамас–16, Челябинск–40, Красноярск–45, Томск–7, действующие 11 АЭС, которые дают около 12 % электроэнергии для нашей страны (всего на территории России действует 31 энергетический реактор, 6 реакторов продолжают строиться) и 7 атомных ледоколов; кроме этого, в бывшем СССР насчитывалось 170 атомных подлодок, на которых находились 324 реактора.

Несмотря на повышенные требования по безопасной работе ядерных реакторов, количество нарушений их эксплуатации остается высоким, в частности, на АЭС в 1991 г. было 164 таких нарушения, в 1992 г. – 204, в 1993 г. – 200. Однако уже хорошо известно, что потенциальная опасность имеет свойство реализовываться: 1957 г. – на Северном Урале вблизи г. Кыштым взрыв на военном предприятии "Маяк" с катастрофическими последствиями, 1974–1975 гг. – аварии на Ленинградской АЭС, 1978 г. – пожар на Белоярской

АЭС, 1986 г. – катастрофа на Чернобыльской АЭС, 1993 г. – авария на Сибирском химическом комбинате (Томск–7).

Добыча урановой (ториевой) руды производится подземным способом (шахты), открытым (карьеры), а в последние два десятилетия также методом подземного выщелачивания металла на месте его залегания – это зависит от конкретных горно–геологических условий и концентрации металла в руде (концентрация урана в руде в виде U_{308} колеблется от 0,1 до 3%). Подземный способ применяют обычно для месторождений с высоким содержанием урана, залегающих в крепких породах на глубине более 200–300 м. На меньших глубинах и с низким содержанием металла применяют открытые способы.

При добыче руды подземным и открытым способами образуются газообразные, жидкие и твердые радиоактивные отходы (РАО). Газообразные радиоактивные выбросы состоят главным образом из $Rn-222$. В среднем образуется от 0,4 до 8 ГБк $Rn-222$ на 1 т добываемой руды (разброс зависит от ее качества). Жидкие отходы в основном определяются шахтными водами, образующимися при дренаже, а также водой для технологических целей. Твердые отходы состоят из горной породы и руды с очень низким содержанием урана.

Добытую руду транспортируют на обогатительную фабрику, обычно расположенную неподалеку. Обогащение урановой руды происходит в процессах грохочения, дробления, измельчения и последующего перевода в растворимую в воде двуокись урана UO_2 . При этом металлы, образующие нерастворимые сульфиды, переходят в шламы. Вместе с сульфидами из процесса уходят также продукты распада урана – радий и его радиационно–опасные дочерние нуклиды, а также Ва, Pb, Bi, Al, Fe, Са, ионы SO_4 и песок. Урановые отходы (хвосты) с обогатительных заводов сбрасываются в виде суспензии, состоящей на 50 % из твердой фракции. Обычно около 85 % активности содержится в илистой фракции. Количество радиоактивных аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу их хвостохранилища, зависит от размеров их высохшей части, которая в свою очередь определяется метеорологическими и климатическими факторами. Кстати, радий является радиоактивным элементом, играющим большую роль в технике и медицине, и его можно добывать промышленным способом из шламов, накапливающихся в хвостохранилищах в огромном количестве. Так, при 0,2 % содержании урана в руде на каждые 200 т получаемого урана (годовая потребность АЭС мощностью 1 ГВт) образуется 100 тыс. тонн РАО.

Вблизи действующих обогатительных фабрик в Северной Америке к 1985 г. скопилось 120 млн. т отходов, и если положение не изменится, то к концу века эта величина возрастает до 500 млн т. Эти отходы будут оставаться радиоактивными в течение миллионов лет, т.е. будут являться главными долгоживущими источниками облучения населения. Их вклад можно значительно уменьшить, если отвалы покрыть асфальтом или поливинилхлоридом. Конечно, покрытия необходимо будет регулярно менять и также захоранивать.

Урановый концентрат, поступающий с обогатительных фабрик, подвергается дальнейшей переработке на урановых химических и аффинажно-металлургических заводах с целью извлечения урана и очистки его от посторонних примесей, прежде всего от атомов элементов, имеющих большие сечения захвата тепловых и резонансных нейтронов.

На стадии аффинажа получают полуфабрикат, пригодный для производства металлического урана или гексафторида урана. (Аффинаж – металлургический процесс получения металлов высокой чистоты путем их разделения и отделения от них различных примесей).

Как известно, в цепной самоподдерживающейся реакции деления ядер под действием тепловых нейтронов участвует только изотоп урана U-235, содержание которого в природном уране составляет 0,71 % (остальная часть принадлежит U-238). Для ядерного топлива необходимо обогащать природную смесь урана изотопом ^{235}U , а это, в свою очередь, требует разделения легкого и тяжелого изотопов урана.

Гексафторид урана (UF_6) по своим свойствам близок к идеальному газу и является пока единственным соединением, пригодным для разделения изотопов ^{235}U и ^{238}U . Эта задача решается с помощью молекулярнокинетических методов (газодиффузия, термодиффузия, центрифугирование) или электромагнитного метода. Для получения UF_6 используют, как правило, тетрафторид или очищенную двуокись урана. Необходимо отметить, что UF_6 , а также F_2 и фтористый водород, используемые как реагенты, – весьма токсические газы.

В результате такой переработки образуются газообразные и жидкие РАО (в основном альфа- и бета-излучатели), однако дозы облучения населения от них намного меньше, чем на других стадиях ЯТЦ. Обогащенный уран служит исходным сырьем для производства твэлов ядерных реакторов (твэл состоит из урансодержащего сердечника, заключенного в металлическую оболочку).

В конце 1989 г. в 26 странах эксплуатировалось в общей сложности 416 энергетических ядерных реакторов суммарной мощностью 274 ГВт, еще около 100 реакторов строилось.

Большое количество радиоактивных отходов получается в процессе переработки ОЯТ. При переработке из него извлекается уран и плутоний для повторного использования в ядерных реакторах, а также некоторые долгоживущие радионуклиды, которые могут быть использованы в народнохозяйственных целях (^{137}Cs , ^{90}Sr и др.). Перед поступлением на переработку твэлы обычно выдерживают не менее 120 суток, чтобы распались до минимального уровня короткоживущие радионуклиды, главным образом I-131.

Значительный вклад в загрязнение биосферы и глобальную дозу облучения населения всего мира вносят долгоживущие радионуклиды ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и изотопы трансурановых элементов, присутствующие в выбросах заводов по переработке облученного ядерного топлива. Для радиохимического завода (РХЗ) мощностью 1500 тонн тяжелого металла (тм) в год, который перерабатывает облученное топливо от легководных АЭС, расчетное значение индивидуальной годово

эффективности эквивалентной дозы в районе завода (на расстоянии до 100 км) составляет около 250 мкЗв (25 мбэр). Суммарная мощность радиохимического производства в Томске—7 позволяет переработать не менее 5000 ттм в год.

Радиоактивные отходы, образующие при переработке топлива, как правило, смешиваются с большим количеством нерадиоактивных химических отходов. Химические отходы сами по себе могут представлять большую опасность для окружающей среды и здоровья людей. Химические отходы переработки можно разделить на три категории. К первой категории относятся кислотные отходы, получаемые на стадии растворения отработанного топлива. Обычно используется азотная кислота, хотя возможно использование и других кислот. Агрессивность этих кислот (рН обычно меньше 1) порождает ряд серьезных проблем при обращении с отходами, часто приводит к утечкам в трубопроводах, вызывая загрязнение грунтовых вод. Кислоты также ускоряют скорости реакций других составляющих отходов, приводя к образованию горючих газов, например, водорода. Кроме того, высокая кислотность приводит к увеличению мобильности таких радиоактивных веществ, как плутоний.

Вторая категория химических отходов – разнообразные связывающие вещества, добавляемые для снижения реактивности отходов или для осаждения. Некоторые из этих веществ, например циан (CN), в кислой среде могут образовывать ядовитые газы и другие опасные соединения.

Третья категория химических отходов включает в себя разнообразные органические растворители, такие как трихлорэтилен, трибутилфосфат и др. Многие из них, например, четыреххлористый углерод, известны как активные канцерогены. Кроме того, растворители могут отравить грунтовые воды на большой территории.

На заключительной стадии ЯЦГ производится захоронение высокордиоактивных отходов. При этом возникает немало проблем, т.к. для дезактивации радиоактивных отходов необходимо время, равное примерно 20 периодам полураспада (нетрудно представить сложность задачи, если вспомнить, что период полураспада, например, Pu-239, которым начинены атомные боеголовки, равен 24400 лет, т.е. человечество сегодня закладывает мину замедленного действия своему будущему).

Хранить ли РАО в течение сотен тысячелетий в соляных шахтах, в герметичных (до поры, до времени) емкостях глубоко под землей или на дне океана, просто сбрасывать в море или отправлять в космос ? Вопросы захоронения отходов в целом решаются правительствами разных стран по-разному. В этой связи необходимо отметить тенденцию роста ввоза импортных грязных отходов в Россию. По оценке "Гринпис", в период с 1967 по 1993 г. более 90 иностранных фирм предприняли 96 попыток экспортировать 34 млн.т опасных отходов на территорию России. В 1991 году было сделано 6 попыток продаж опасных отходов в 1992 – 27 и в 1993 – уже 31 попытка. В основном предложения исходили из Германии – 28 млн.т США, Австрии, Италии, Бельгии, Канады, Финляндии и др. Среди предложенных отходов 10 млн.т шлака и пепла мусоросжигательных заводов, отфильтрованная пыль, пестициды, химикаты, пластиковые, радиоактивные и другие отходы. Более

4000 т отходов благополучно было доставлено и размещено на российской территории, в том числе радиоактивные и ртутные отходы. Безусловно, эти далеко не полные данные – лишь малая часть того, что происходит на самом деле.

На территории России для захоронения РАО имеются 15 полигонов, которые являются источниками потенциальной радиационной опасности. Томск–7, например, зарывает контейнеры в землю на глубину 100–200 м, закачивает жидкие отходы в геологические пласты – при этом не исключена вероятность попадания радиоактивных веществ в водоносные пласты, некоторые отправляет и в рек Томь.

Достаточно надежных способов захоронения РАО пока не разработано. Во многих странах ведутся исследования по отверждению отходов с целью их последующего захоронения в геологически стабильных районах на суше, на дне океана или в расположенных под ним пластах. Предполагается, что захороненные таким образом РАО не будут источником облучения населения в обозримом будущем. Делаются попытки предсказать судьбу захороненных радиоактивных материалов. Предварительные оптимистические оценки показали, что заметное количество этих радиоактивных веществ достигнет биосферы через 10^5 - 10^6 лет.

2.5. Биосферное загрязнение радиоактивными отходами

Радиоактивные отходы, тяжелые металлы. Токсичные химические соединения – далеко не полный перечень биологически активных веществ ядерного топливного цикла, загрязняющих окружающую среду. Показательным в этом отношении является экологическая ситуация на одном из первых урановых рудников СССР Майлуу–Суу в Киргизии. В течение 22 летней эксплуатации урановых месторождений изготовлено более $10 \cdot 10^3$ тонн уранового концентрата. Радиоактивные отходы более $4 \cdot 10^6$ тонн с суммарной активностью порядка $50 \cdot 10^3$ Кюри заскладированы в 23 хвостохранилищах (Алешин и др. 2000). В Киргизии хвостохранилища создавались при перегораживании дамбами горных балок, рек и ручьев с последующей 70 см покрытием грунтом: 20 см – глиняная подушка, 50–60 см – гравийно песчаная смесь. Размещение радиоактивных отходов в пойме селеопасных рек, подмывающих откосы и дамбы хвостохранилищ, приводит к систематическому, хроническому радиоактивному загрязнению рек, воды которых используются для орошения сельскохозяйственных культур.

Содержание радионуклидов в воде вниз по течению на расстоянии более 30 км в десятки и сотни раз превышают фоновые значения. Следовательно, радионуклиды и тяжелые металлы в течении сотен рек будут загрязнять воды рек, включаться и накапливаться в пищевых цепях, увеличивая ареал экологического риска. В настоящее время в Майлуу–Суу, заболевания гепатитом и онкологическими формами в 3–5 раз превышают средние значения по Киргизии. Обобщенные данные радиоактивных отходов ЯТЦ приведены в табл 1 и 2

Как видно из анализа данных, представленных в таблицах 1 и 2 реальные значения радиоактивных загрязнений в десятки и сотни раз превышают предельно допустимые значения. Характерно, что радиоактивные загрязнения в обозримом промежутке времени 100–200 лет становятся все более опасными. Во–первых, расширятся области их распространения, во–вторых, происходит накопление их пищевых цепях, а значит увеличивается концентрация в сельскохозяйственных продуктах. По степени опасности основные радионуклиды ранжируются следующим образом – таблицы 5, 6, 7.

Таблица 5

Характеристика радиоактивных отходов и выбросов при добыче и переработке урановых руд (Котенко Е.А. 1993)

Тип РАО	Удельный объем РАО	Компоненты выбросов (пыль, радионуклиды, аэрозоли)
<u>Жидкие РАО</u>		
Откачиваемые подземные воды Сточные воды спецпрачечных и душевых АБК Жидкая фаза рудной пульпы хвостов ГМЗ (промывочная вода, верхний слив сгустителей, фильтрат)	До 2000м ² /сут и более От 100 до 300 м ² /сут Переработка 1 т руды на ГМЗ дает 4 т жидких отходов. Объем воды в хвостах равен по массе твердой их части.	Накапливание естественных радионуклидов в почвах и донных лах гидрографической сети при сборе неочищенных шахтных вод общей активностью 10–50 Бк/л (ПДК для водоемов 0,111 Бк/л). Радионуклиды: U ²³⁸ , Ra ²²⁶ , Rn ²²² , Th ²³⁰ , Pa ²¹⁰ , Pb ²¹⁰ . Утечка загрязненных отходов через основания дамб и почву хвостохранилищ.
<u>Твердые РАО</u>		
Отвалы пустых пород с фоновой ативностью Склады забалансовых урановых руд. Отвалы хвостов радиометрической сортировки руд. Отвалы неиспользуемых, попутно добываемых полезных ископаемых. Хранилища хвостов кучного выщелачивания. Хвостохранилища ГМЗ	На 1 т руды на карьерах 8–10 т и более отходов, на рудниках – 0,2–0,3 т и более От 5 до 25–30% пустых пород (забалансовых руд) из–за разубоживания На 1 т руды образуется от 1,3–1,6 т РАО на рудниках; до 10–15 т и более на карьерах.	Рудничная пыль: U ²³⁸ , Ra ²²⁶ , Th ²³⁰ , Pb ²¹⁰ , Pa ²¹⁰ Пыление пляжей и дамб хвостохранилищ Rn ²²² .
<u>Газообразные РАО</u>		

<p>Вентиляционные выбросы подземных рудников. Загрязнение атмосферы на карьерах (добычные и вскрышные работы).</p> <p>Вентиляционные выбросы ГМЗ.</p> <p>Дробильно–обогатительная фабрика (ДСФ), дробильно–сортировочный комплекс (ДСК), радиометрическая обогатительная фабрика (РОФ).</p> <p>Отвалы и склады пустых пород и забалансовых руд. Отвалы хвостов РОФ и кучного вщелачивания. Хвостохранилища ГМЗ.</p>	<p>Рудник средней производительности с рудами, содержащими десятки доли процента урана, выбрасывает в атмосферу до 8,10 Бк/сут радона–222 и радиоактивную пыль с радиоактивными аэрозолями. Объем выбросов зависит от общерудничного дебита радона, запыленности рудничной атмосферы, проветриваемого объема, производительности рудника по горной массе.</p> <p>Объем радиоактивных вентиляционных выбросов ГМЗ зависит от содержания урана и других естественных радионуклидов в руде и от производительности ГМЗ (в среднем $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/сут). Выброс долгоживущих альфаактивных аэрозолей может достигать нескольких миллионов Бк/сут.</p>	<p>Рудничная пыль: Rn²²², U²³⁸, Ra²²⁶, Th²³⁰, Pb²¹⁰, альфаактивные аэрозоли.</p> <p>Пыление отвалов хвостов РОФ и кучного вщелачивания дамб и пляжей хвостохранилищ ГМЗ, радионоруды.</p>
---	---	--

Таблица 6

Характеристика радиоактивного загрязнения основных элементов окружающей среды в результате деятельности уранодобывающих и перерабатывающих предприятий (Мосинц В.Н. 1993)

Элементы окружающей среды	Радиационно–опасные факторы	Единицы измерения	Фоновые значения		Предельно допустимые концентрации сверх фона	Диапазон фактически зарегистрированных значений	Примечание
			Среднее	Характерный диапазон			
Воздух	Эквивалентная равновесная концентрация дочерних продуктов радона	Бк/м ³	1,8	0,1...10,0	37 (для жилых домов 200)	185...260	На расстоянии 100...150 м от источника выброса

	Суммарная α -активность долгоживущих радионуклидов уранового ряда	Бк/м ³	0,01	0,001... 10	12,0	4...40	На расстоянии 100...150 м от источника выброса
Вода	По содержанию Ra ²²⁶ и дочерних продуктов его распада	Бк/м ³	37	1,11... 111	111 (для водоемов, для сбросных вод в расчете на их разбавление 185)	300...500 3700...5500 10000... 50000 10000... 80000	При геологоразведочных и горно-подготовительных работах. При очистных работах. В неочищенных шахтных водах. В жидкой фазе хвостов ГМЗ.
Почвы	Суммарная α -активность долгоживущих радионуклидов уранового ряда	Бк/м ³	370	90...700	600-1200	1000-7400	В санитарно-защитной зоне действующих предприятий
Отвалы горных пород	α -активность γ -активность	Бк/м ³ МкР/ч	240 12	150... 1000 10...60	600-1200 20	1000... 12900 20...200	Отвалы пород, забалансовых руд, хвосты радиометрического обогащения и кучного выщелачивания

Хвосты ГМЗ	Эксколяция радона с поверхности	Бк/ (м ² с)	0,016	0,004... 0,053	1,0 (в бывшем СССР по данным МКРЗ 0,74) 600–1200	1,7...30,0	На сухих пляжах хвостохран илищ
	α-активность твердой фазы	Бк/кг		370... 700		1100...2730 0	
	γ-активность твердой фазы	мкР/ч		10...60		100...1400	
					10		

Таблица 7

Допустимые концентрации некоторых радиоактивных веществ
в питьевой воде

Изотоп	Группа опасности	Допустимая концентрация, 10 ⁻⁸ Ки/л*
<i>Наиболее опасные</i>		
Радий-226	А	0,0054
Плутоний-239	А	0,22
<i>Опасные</i>		
Стронций-90	Б	0,04
Рутений-106	Б	1,2
Йод-131	Б	0,1
Уран обогащенный (ядерное топливо)	Б	0,22
<i>Менее опасные</i>		
Фосфор-32	В	1,9
Кобальт-АО	В	3,5
Стронций-89	В	1,2
Цирконий-95	В	6,2
Ниобий	В	9,6
Рутений-103	В	8,0
Йод-133	В	0,37
Йод-135	В	1,2
Цезий-134	В	0,86
Цезий-137	В	1,5
<i>Наименее опасные</i>		
Тритий-3	Г	400
Углерод	Г	82

Торий-232	Г	0,002
-----------	---	-------

* 10^{-8} кюри на литр соответствует 0,01 микрокюри на литр. Как вы помните, 1000000 микрокюри равен 1 кюри. Поэтому, например, предельно допустимая концентрация для рутения составляет $1,2 \times 10^{-8}$ Ки/л = 0,00000012 Ки/л.

Расположенные на Урале ядерные предприятия сбрасывают большое количество радионуклидов в окружающую среду. Так в р. Теча было сброшено более $76 \cdot 10^6$ м³ жидких радиоактивных отходов. Накапливаясь в донных отложениях радионуклиды загрязняют пойменные почвы табл. 8

Таблица 8

Содержание радионуклидов в почвах прирусловой поймы р. Течи

Место отбора	Глубина, см	Sr ⁹⁰ Бк/кг	Cs ¹³⁷ Бк/кг
Лобаново Правый берег 153 км	0–10	291+60	838+300
	10–20	230+50	266+70
	20–30	172+20	300+200
Левый берег	0–10	136+10	280+40
	10–20	228+45	585+200
	20–30	292+80	530+200
Анчугово правый берег 167 км	0–10	932+25	1200+400
	10–20	608+115	670+400
	20–30	562+12	340+100
левый берег	0–10	320+30	488+157
	10–20	324+40	505+200
	20–30	278+35	375+190
Бугаево правый берег 184 км	0–10	195+75	275+150
	10–20	266+100	170+70
	20–30	338+160	370+300
левый берег	0–10	654+115	690+150
	10–20	544+80	430+220
	20–30	692+200	430+100
Першино правый берег 214 км	0–10	280+120	242+25
	10–20	75+50	39+6
	20–30	34+20	21+12
левый берег	0–10	680+136	417+40
	10–20	1006+200	695+70
	20–30	616+98	245+45
Затеченское правый берег 237 км	0–10	1500+278	775+100
	10–20	277+98	60+16
	20–30	212+50	13+4

(Позолина В.Н., Молчанова И.В. и др).

Накопления Sr^{90} в травянистых растениях – 1200–2016 Бк/кг сухого веса, что 200 раз превышает контрольный уровень. Sr^{137} накапливается в травянистых растениях до уровня 40 Бк/кг. Установлено также повышенное содержание Sr^{90} в листьях, коре и древесине деревьев.

С целью оценки общего уровня загрязненности биосферы рассмотрим данные по основным ядерным предприятиям России, табл. 9

Таблица 9

Наработка плутония, высокорadioактивных отходов
и радиоактивные выбросы в атмосферу на перерабатывающих
производствах в Челябинске–65, Томске–7
и Красноярске–26 в 1992 г. (по Кохрану и др., 1993)

Изотоп	Время полураспада	Челябинск–65 (Кюри/год)	Томск–7 (Кюри/год)	Красноярск–26 (Кюри/год)
Атмосферные выбросы				
H–3	12,26	1 800	160	77
C–14	5730	120	17	9
Kr–85	10,72	2 300 000	330 000	170 000
I–131	0,022	–	2	1
Xe–131m	0,033	–	190	95
Xe–133	0,014	–	540	270
Высокорadioактивные отходы				

Sr-90	29,3	22 000 000	2 500 000	1 200 000
Y-90	–	22 000 000	2 500 000	1 200 000
Zr-65	0,18	7 500	43 000 000	21 000 000
Nb-95m	0,18	7 500	43 000 000	21 000 000
Tc-99	213 000	4 500	330	160
Ru-106	1,02	24 000 000	7 800 000	3 900 000
Rh-106m	1,02	24 000 000	7 800 000	3 900 000
I-129	16 000 000	13	0,8	0,4
Ce-144	0,78	50 000 000	58 000 000	29 000 000
Pr-144m	–	50 000 000	58 000 000	29 000 000
Cs-137	30,17	29 000 000	2 700 000	1 300 000
Ba-137m	30,17	29 000 000	2 700 000	1 300 000
Np-237	–	12	–	–
Am-241	432,2	216 800	160	81
Cm-242	162,9	90 000	97	49
Cm-243	28,5	3 200	0,002	0,001
Cm-245	8,500	26	–	–
Cm-246	4,780	3	–	–
Cm (всего)	–	337 000	97	49
Извлеченные из отработанного топлива изотопы (тонн/год)				
Np-237	0,100	–	–	–
U (всего)	325,7*	1 733#	866,4#	–
Pu (всего)	2,97**	0,748##	0,374##	–

* 98,27 % U-238; 1,25 % U-235; 0,4499 % U-236; 0,2417 % U-234.

** 64,24 % Pu-239; 20,11 % Pu-240; 11,28 % Pu-241; 2,952 % Pu-242; 1,427 % Pu-238.

99,33 % U-238; 0,6566 % U-235; 0,00919 % U-236.

95,15 % Pu-239; 4,605 % Pu-240; 0,2376 % Pu-241; 0,004407 % Pu-242; 0,02956 % Pu-238.

Таким образом, добыча, обогащение и использование радиоактивных элементов в ядерном топливном цикле приводит к существенной трансформации окружающей среды. В природной среде накапливаются радиоактивные элементы с неуклонно расширяющимся во времени и пространстве ареалами. Не удивительно, что большинство атомных держав, перестают добывать уран, потому что мировая цена обогащенного урана в два раза ниже затрат на рекультивацию и экологический мониторинг по ликвидации экологических последствий горнодобывающих и обогатительных предприятий ЯТЦ.

ГЛАВА III. ЯДЕРНОЕ ОРУЖИЕ

3.1. Основные виды ядерного оружия

Открытие в 1930 г. процесса деления урана и развитие цепной реакции тяжелых изотопов привели к созданию ядерного оружия. Наиболее активно

делятся нечетные изотопы трансуранового ряда: уран–233, уран–235, плутоний–239. Расход делящего материала на одну атомную бомбу составляет 20 кг урана–235 или 5 кг плутония–239. Количество энергии, выделяющейся при полном делении 1 кг урана–235 эквивалентно взрыву 20 кт тринитротолуола (ТНТ). Мощность 1 т ТНТ равняется $1,2 \cdot 10^9$ калорий энергии. При взрыве атомной бомбы и большого выделения энергии в центре взрыва образуется высокая температура и давление, при котором вещество превращается в плазму разлетается и теряется критическая масса.

Водородная бомба основана на реакциях синтеза атомов водорода в гелий. Для протекания термоядерных реакций необходима высокая температура 10^7 – 10^8 °С и плотность вещества. Поэтому в качестве детонатора используется атомный заряд, который обеспечивает необходимые температуры для термоядерного взрыва. При взрыве водородной бомбы выделяемая энергия эквивалентна сотням килотонн и мегатонн тротилового эквивалента. Как правило водородными взрывными устройствами оснащаются стратегические ракеты, разрушающие крупные по площади или сильно укрепленные объекты.

Нейтронная бомба – разновидность водородной бомбы для уничтожения живой силы противника усиленным нейтронным потоком. Конструктивно состоит из двух устройств: атомного детонатора и тритиевого термоядерного устройства. Мощность и высота взрыва определяет характер воздействия: ударная волна и пожары или радиоактивность.

По своему предназначению ядерное оружие подразделяется на стратегическое, оружие театра военных действий и тактическое. Наиболее мощные стратегические ядерные заряды подразделяются на баллистические ракеты наземного базирования – дальность порядка 10000 км, баллистические ракеты морского базирования – дальность 5000 км и стратегические бомбардировщики. В соответствии с подписанными договорами о сокращении ядерного вооружения к 2003 г. в России и США должно остаться не более 3500 ядерных боезарядов в каждой из стран.

3.2. Использование ядерного оружия

Впервые ядерное оружие использовалось в военных целях 6 и 9 августа 1945 г. американцами в Японии. Взрыв урановой бомбы мощностью 15 кт тринитротолуола над Хиросимой был произведен на высоте 580 м. Над Нагасаки на высоте 503 м взорвалась плутониевая бомба мощностью 21 кт ТНТ. Три главные факторы взрыва определили трагические последствия Хиросимы и Нагасаки: тепловое излучение, ударная волна и излучение. В момент взрыва температура в центре достигала несколько миллионов градусов. Образовавшийся огненный шар с максимальной температурой по краям порядка 7000° С сжигал людей, постройки и деревья. Ударная волна, составляющая 50 % мощности взрыва разрушила 90 % зданий в радиусе 4 – 5 км от эпицентра взрыва. Высвобождающие 17 % энергии в виде излучения, облучали жителей городов гамма-излучением и нейтронами. Несмотря на то,

что только 3 % излучений достигали поверхности, последствия облучения оказались катастрофичными. В результате атомных взрывов в Хиросиме погибло около $140 \cdot 10^3$ человек, в Нагасаке – $70 \cdot 10^3$ человек.

Необходимо отметить, что при облучении в отличие от других факторов поражения, период воздействия протекает в течение более длительного времени. В течении первых двух недель после взрыва смерть наступала в результате ожогов. В течение последующих двух месяцев значительно возросло поражение от острой лучевой болезни, вследствие разрушения кроветворных органов. Последующие смертельные исходы и заболеваний в течении 4–6 месяцев были связаны с общим снижением сопротивляемости, иммунитета, повышением инфекционных заболеваний. В дальнейшем значительно возросли онкологические заболевания: опухоли, лейкемии, которые продолжают до сих пор.

Следовательно, основной особенностью последствий применения ядерного оружия является длительный в течении десятков лет характер воздействия, выражающейся в росте онкологических заболеваний.

3.3. Испытания ядерного оружия

Испытания ядерного оружия происходило повсеместно по землей, под водой, над землей, в атмосфере и стратосфере. Ядерные взрывы проводят на специальных полигонах – охраняемых территориях, предназначенных для проведения комплекса исследований ядерных зарядов. Ядерные державы: Россия, США, Великобритания, КНР и Франция в последние годы проводили испытания ядерного оружия на Новоземельном и Семипалатинском, Невадском, Лобнорском и Тихоокеанском полигонах. Помимо испытательного полигона США проводили опытные взрывы на четырех группах островов в Тихом океане, в штате Нью-Мексико, Яляске. В СССР проводились испытания также в Тоцке Оренбургской области, в районе ракетного полигона "Капустин Яр" и так называемые подземные взрывы в мирных целях более чем в сотне районах. Великобритания проводила дополнительные ядерные испытания у западного побережья Австралии, на о. Рождества и островах Малдана. Франция проводила ядерные взрывы в Африке, на атоллах Муруроа в Тихом океане. Следовательно, в течение 50 лет пять ядерных держав проводили испытание ядерного оружия практически во всех регионах Земли. Так общее количество ядерных испытаний США составило 1056. Китай провел 43 испытания: наземных 6, в атмосфере 17, 20 – подземных. В СССР проведено 715 испытаний, 207 – атмосферных, 508 – подземных и подводных. Самые мощные атмосферные взрывы с полной мощностью до 58 Мт ТНТ проводились на Новой Земле при испытаниях водородных бомб. Великобританией проведено 43 взрыва: 21 – в атмосфере, 24 – подземных и подводных. Францией – 198 из них 45 – в атмосфере, 153 – подземных и подводных. Усредненное энерговыделение по всем ядерным испытаниям по данным Минатома Российская Федерация составило 261,965 Мт ТНТ, в США – 218, 86 Мт ТНТ.

В пересчете на энергию бомбы сброшенной в Хиросиме эквивалентной 15 кт, ядерные испытания в мировом масштабе соответствуют взрыву 32000 атомных бомб, взорванных над Хиросимой. Следовательно, с точки зрения радиоактивных загрязнений планеты человечество в течение 50 лет вело крупномасштабную ядерную войну с самим собой. Несомненно, что последствия такой войны будут оказывать влияние на человечество в течение сотен лет.

3.4. Радиоактивное загрязнение

Несомненно, что полувековое испытание ядерного оружия привело к глобальному загрязнению радионуклидами всех сред биосферы. Испытания ядерного оружия в атмосфере были начаты США в 1945 г. Наиболее интенсивные испытания проводились в 1954–1958 гг. и в 1961–1962 гг. В первый период большую часть испытаний провели США, во время второго периода – Советский Союз. В 1963 г. большинство стран подписали Договор об ограничении испытаний ядерного оружия (кроме подземных). После этого лишь Франция и Китай провели серию испытаний ядерного оружия в атмосфере (последнее из них – в 1980 г.).

Всего за период с 1945 по 1980 г. включительно было испытано в атмосфере 511 ядерных устройств различных типов и мощности. Общая мощность взорванных в атмосфере ядерных устройств эквивалентна 545,5 Мт тринитротолуола (тротилового эквивалента) – в пересчете на мощность бомбы, сброшенной на Хиросиму (20 кг), это 27275 хиросимских бомб. Взрыву мощностью 1 Мт соответствует $1,45 \cdot 10^{26}$ актов деления ядерного материала.

В момент взрыва первоначальная смесь продуктов деления содержит до нескольких сотен радионуклидов, большинство из которых имеет ничтожную концентрацию или из-за короткого периода полураспада быстро распадается. Кроме первичных радионуклидов в окружающей среде образуется значительное количество вторичных радионуклидов в результате активации вещества среды нейтронами, испускаемыми при взрыве. В радиоактивных продуктах взрыва также присутствует в мелкодисперсной форме большое количество неразделившихся ^{238}U , ^{235}U и ^{239}Pu . Почти каждый изотоп является родоначальником цепочки распада. Например, ^{90}Kr (33 с, бета–минус–распад) $\text{M} \rightarrow ^{90}\text{Rb}$ (2,7 минуты, то же) $\rightarrow ^{90}\text{Sr}$ (28 лет, то же) $\rightarrow ^{90}\text{Y}$ (65 часов, тоже) $\rightarrow ^{90}\text{Zn}$ (стабильный).

Основной вклад в формирование дозы облучения населения вносят долгоживущие радионуклиды. После атмосферного взрыва около 50 % образовавшихся активных продуктов выпадают в районе испытаний (в радиусе около 100 км) на земную или водную поверхность (площадью примерно 30000 км²) – это так называемые локальные радиоактивные осадки. Остальная часть уходит в тропосферу и/или стратосферу. В тропосферу попадают мелкие аэрозольные частицы и находятся там до 30 суток, в течение которых они выпадают на Землю. Благодаря воздушным течениям тропосферные осадки выпадают за многие сотни и тысячи километров от места взрыва. В

стратосферу уходит большая часть радионуклидов, которые глобально перемешиваются в стратосфере и затем в течение долгого времени (месяцы и годы) выпадают в различном количестве на различные участки поверхности всего земного шара (глобальные выпадения). В Северном полушарии, где проводилось большинство испытаний, выпадает и большее количество радиоактивных осадков.

Радиоактивные вещества, образующиеся при ядерных взрывах, оказывают радиационное воздействие на людей – внутреннее облучение (от вдыхания радиоактивных веществ, содержащихся в приземном слое воздуха, и употребления в пищу продуктов питания и питьевой воды, загрязненных радионуклидами) и внешнее облучение (от радиоактивных веществ, присутствующих в приземном воздухе или выпавших на поверхность земли).

НКДАР – Национальная комиссия по действию атомной радиации (Россия) – выделяет 21 радионуклид, которые образовались при испытаниях ядерного оружия и которые вносят тот или иной вклад в дозу облучения населения. Среди них, кроме того, выделены радионуклиды, вклад каждого из которых в ожидаемую эффективную эквивалентную дозу превышает 1 % (за 100 % принята ожидаемая доза от всех дозообразующих радионуклидов ядерного взрыва). Это следующие 8 радионуклидов (в порядке уменьшения вклада в ожидаемую дозу) – ^{14}C , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{106}Ru , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^3H и ^{131}I . Большая часть дозы облучения населения земного шара от радионуклидов ^{95}Zr ($T_{1/2}=60$ суток), ^{106}Ru (368 суток), ^{144}Ce (284 суток) и ^{131}I (8,04 суток), образовавшихся в результате всех проведенных до 1980 г. испытаний, уже сформирована. Значительная часть дозы от ^{90}Sr ($T_{1/2}=28,6$ лет) и ^{137}Cs (30,2 лет) будет сформирована к 2000 году. Если испытания ядерного оружия не возобновятся, то дозы от трития ($T_{1/2}=12,3$ года) и радиоуглерода (5730 лет) будут сформированы в течение 3–го тысячелетия.

Как известно, природное содержание трития составляет не более $5,2 \cdot 10^{12}$ Бк (5,2 тераБк, ТБк). В результате испытаний ядерного оружия (в основном термоядерного) в атмосферу поступило $2,4 \cdot 10^{20}$ Бк трития, который активно включился в гидрологический цикл, и Мировой океан является сегодня основным депо хранения этого радионуклида.

Природное образование радиоактивного С–14 в атмосфере космическими нейтронами составляет $1 \cdot 10^{15}$ Бк (1 петаБк, ПБк). При испытаниях ядерного оружия радиоуглерод образуется при захвате азотом воздуха нейтронов, испускаемых во время ядерного взрыва. Суммарная активность ^{14}C , накопившаяся в результате испытаний оружия, проведенных до 1981 г., составила 220 ПБк.

Стронций–90 – чистый бета–излучатель со средней энергией 0,196 МэВ. При его распаде образуется другой бета–излучающий радионуклид – иттрий–90 ($T_{1/2}=61,1$ часа, средняя энергия бета–частиц 0,935 МэВ). Исторически сложилось так, что именно ^{90}Sr был объектом пристального внимания ученых всего мира в течение длительного времени, поэтому получены обширные сведения о его поведении в окружающей среде. Общее количество Sr–90, образованного в результате всех проведенных до 1981 г. испытаний, составило

600 ПБк. За вычетом локальных выпадений общее глобальное накопление Sr-90 составляло к концу 1980 г. около 400 ПБк.

Цезий-137 – радионуклид, излучающий бета-частицы со средней энергией 0,171 МэВ. При его распаде образуется дочерний радионуклид ^{137m}Ba , который распадается с периодом полураспада 2,55 минуты, при этом испускаются гамма-кванты с энергией 0,662 МэВ. Количество Cs-137, попавшего в атмосферу до 1981 г., равно 960 ПБк.

Нуклиды Sr-90 и Cs-137 в составе глобальных осадков выпадают в водно-растворимой форме.

Иод-131 – радионуклид, излучающий бета-частицы (средняя энергия частиц 0,182 МэВ) и гамма-кванты (энергия основных линий гамма-квантов 0,36 и 0,72 МэВ). Общее количество ^{131}I , поступившего в атмосферу, согласно оценкам, равно $7 \cdot 10^{20}$ Бк. Основным источником поступления радиоактивного иода в организм людей – молоко (в трех районах, где оно является важным компонентом рациона человека).

По расчетам специалистов, полная ожидаемая доза (коммитентная доза) от всех радионуклидов, образовавшихся при ядерных испытаниях, составит примерно 4000 мкэВ (т.е. 400 мбэр) и будет почти полностью реализована более чем за тысячу лет, а до 2000 года – только 7,7 % от этой дозы. Очень малые дозы от наиболее долго живущих радионуклидов ядерных взрывов люди будут получать еще на протяжении миллионов лет. Так, Pu-328 имеет период полураспада, равный 87,7 лет, общее количество этого радионуклида, образовавшееся при проведении испытаний, составляет 330 ТБк; Pu-239 – 24100 лет, 7,8 ПБк; Pu-240 – 6570 лет, 5,2 ПБк; Pu-241 – 14,4 лет, 1700 ПБк; Pu-242 – 376000 лет, 160 ТБк; Am-241 (образуется при распаде Pu-241) – 433 года 5,5 ПБк; Ag-39 – 269 лет, 1,2 ПБк и т.д.

В результате проведения ядерных взрывов образуется большое количество искусственных радионуклидов наиболее опасным из которых является несвойственный природе радионуклид плутоний-239. В зависимости от длительности периода после взрыва радиоактивные осадки выпадают в виде относительно крупных частиц больше 100 мкм в ближней зоне: шириной несколько десятков и длиной в несколько сотен километров. В течение первых двух суток радиоактивные аэрозоли, выпадая на землю образуют поверхностное загрязнение. Как правило это продукты деления урана-238, плутония-239, невыгоревшее ядерное топливо и материалы с наведенной радиацией.

Тропосферное выпадение с высоты 11–16 км осуществляется мелкодисперсными несколько микрометров радионуклидами в течении 20–30 суток и распространяется на тысячи километров. Стратосферные или глобальные выпадения радиоактивных осадков с размерами десятых долей микрометра происходят на высоте до 30 км и распределяются по всей поверхности земного шара. Подземные и подводные ядерные взрывы, суммарное количество которых равно 1520 приводят к радиоактивному загрязнению грунтовых вод и океанов. необходимо также учитывать сбросы в моря и океаны жидких и твердых радиоактивных. Общая активность

радиоактивных отходов, захороненных в 47 местах Мирового океана странами без СССР составляет $1,24 \cdot 10^6$ Км. СССР в течении 1959–1992 г. сбрасывал в акватории Северных морей радиоактивные отходы: жидкие с суммарной активностью $15,1 \cdot 10^3$ Ки – Баренцево море, Карское – $8,5 \cdot 10^3$ Ки, Белое – $0,002 \cdot 10^3$ Ки, Балтийское – 0,2 Ки, общая активность твердых РАО составила $16 \cdot 10^3$ Ки. В морях Дальнего Востока суммарная активность жидких РАО равняется $12,3 \cdot 10^3$ Ки, твердых – $6,2 \cdot 10^3$ Ки. Также в заливах архипелага Новая Земля было затоплено 7 атомных реакторов подводных лодок и экранная сборка ядерного реактора с невыгруженным отработанным ядерным топливом ледокола "Ленин". В Карском море затоплено 3 ядерных реактора, на Дальнем Востоке – 3.

Известные регионы затопления РАО: Северо–Восточный Тихоокеанский – 16 районов, Западный Тихоокеанский – 5 районов; Северо–Западный Атлантический – 11 районов; Северо–Восточный Атлантический – 15 районов; Арктический – 31 район; Северо–Западный Тихоокеанский – 10 районов позволяют говорить о глобальном долговременном радиоактивном загрязнении океанов ядерными державами.

Испытания ядерных устройств на Семипалатинском полигоне в Казахстане: 124 наземных, атмосферных и 343 подземных взрывов привели не только к непосредственному загрязнению радионуклидами более $18 \cdot 10^3$ км² территории полигона, но и распространилась на регионы Западной Сибири. В большей степени радиоактивному загрязнению подверглась смежная территория Алтайского края. Глобальное радиоактивное загрязнение в целинных почвах по Cs–137 составляет 50 мКи/км² с локальными уровнем и превышения в 2–3 раза. Повышенная концентрация более чем в 5 раз по отношению к фону обнаружена по Sr–90 в почвах Алтая и районах Новосибирской области. Низшие растения: мхи, лишайники, грибы активно аккумулируют цезий, и концентрация в хвойных подстилках выше чем в почвах. Аналогичное повышения концентрации радиоцезия наблюдается в данных отложениях озер Алтая. По мнению Л.П. Рихванова территория Западной Сибири подвергается достаточно интенсивному радиоактивному техногенному загрязнению (Рис. 1).

Следы радиоактивных загрязнений деятельности Семипалатинского полигона обнаруживаются в Горном Алтае, Новосибирской, Кемеровской областях, Туве и Хакасии.

Серьезную потенциальную и реальную опасность радиоактивного загрязнения представляет и демонтаж ядерных боезарядов. Так советских арсенал к 1990 г. насчитывал $25 \cdot 10^3$ ядерных боеголовок. Средний срок годности боеголовки – 15 лет, поэтому ежегодно около 1700 боеголовок заменяются и демонтируются. Демонтаж ядерных боеголовок в России осуществляется на предприятиях изготовителях. Высокообогащенный уран возвращается в Екатеринбург, тритий в Челябинск, плутоний на СХК в г. Северск Томской области. Демонтаж боеголовок – сложная и опасная технология состоящая из нескольких этапов. Разборка боеголовок на основные составные части, удаление боевого заряда и электромеханических деталей.

Разборка боевого заряда, удаление взрывчатых веществ, разделение металлических составляющих заряда: плутония, отражателя и уплотнителя. Проверка, упаковка делящихся материалов, утилизация радиоактивных отходов, хранение и переработка ядерных материалов. Высвобождающиеся в результате демонтажа и сокращения ядерных вооружений десятки тонн высокообогащенного урана и оружейного плутоний-235 с периодом полураспада $24 \cdot 10^3$ лет представляют серьезную опасность загрязнения окружающей среды. Если высокообогащенный уран можно использовать на АЭС, то химически активный и взрывоопасный металлический плутоний требует специальных способов хранения. Прежде всего, в результате химической переработки необходимо перевести его в более устойчивую форму – диоксида плутония. Наиболее совершенным способом хранения диоксида плутония является технология остеклования – смешивания плутония с расплавленным стеклом и изготовления стеклянных блоков, не позволяющих распространяться наиболее опасному виду радионуклидов. В России оружейный плутоний в основном складировается в Сибирском химическом комбинате г. Северска, где не имеется завода по остеклованию, тем самым представляя потенциальную угрозу загрязнения окружающей среды.

Необходимо отметить, что плутоний-235 является побочным продуктом работы атомных станций и утилизация его – одна из основных проблем ядерной энергетики. Таким образом, производство ядерного оружия, испытание его, применение и утилизация приводит к глобальному загрязнению биосферы долгоживущими радионуклидами. Опасность радиоактивного влияния на человеческую популяцию возрастает по логарифмической зависимости от времени. Естественно, что если в ближайшие 100 лет не будет найдено эффективного метода хранения и нейтрализации радиоактивных отходов и загрязнений, что человечество будет обречено на вымирание.

ГЛАВА IV. ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Вновь появляющиеся энергоемкие технологии человечества широко распространяются за относительно короткое время, изменяют производственные циклы, социальное поведение людей интенсивно разрушают и загрязняют среду обитания. В палеонтологической летописи Земли появляется новый слой антропогенных отходов – как результат нового типа индустриального прогресса. При этом человечество вынуждено расплачиваться за миг настоящего энергетического благоденствия существенным сокращением длительности своего существования.

4.1. Атомные электростанции

Атомные электростанции (АЭС) – промышленные предприятия, использующие тепловую энергию деления ядер в преобразованную электрическую. В качестве источников энергии используются делящиеся изотопы: уран-235, уран-233, плутоний-239. Первая опытная промышленная

атомная станция была пущена в 1954 г. в Обнинске мощность $5 \cdot 10^3$ кВт. В Великобритании в 1956 г., в США в 1957 г.

В современном мире существуют 10 основных типа энергетических реакторов АЭС.

Реакторы с водяным теплоносителем. В действующих энергетических реакторах используют три комбинации теплоносителя и замедлителя:

1) в качестве теплоносителя и замедлителя используется вода – (водо–водяные энергетические реакторы, ВВЭР; PWR)

2) теплоноситель – вода, замедлитель – графит (графито–водные реакторы, ГВР; BWR)

3) теплоноситель – вода или тяжелая вода, замедлитель – тяжелая вода (тяжеловодные реакторы, ТВР; CANDU PHWR)/

ВВЭР и ГВР именуют также легководными и уран–графитовыми реакторами соответственно.

Реакторы с водяным теплоносителем подразделяются на некипящие, работающие в водном режиме (вода находится под давлением), и кипящие. В нашей стране на АЭС применяются преимущественно некипящий ВВЭР и кипящий графито–водный каналный реактор РБМК (реактор большой мощности каналный).

Современные АЭС имеют блочное строение. Каждый блок АЭС автономен по отношению к другим блокам АЭС. Блок состоит из одного энергетического реактора и схемы преобразования тепловой энергии в электрическую. При обозначении реактора указывают тип реактора и электрическую мощность блока АЭС с этим реактором в мегаваттах. Так, ВВЭР–440 показывает, что в блоке АЭС установлен ВВЭР, а электрическая мощность блока – 440 МВт.

Графито–газовые реакторы (ГТР, MAGNOX, AGR). В реакторах этого типа замедлителем служит графит, теплоносителем – газ (гелий, углекислый газ и др.). По сравнению с ВВЭР и ГВР реакторы с газовым теплоносителем более безопасны в эксплуатации, имеют более высокий КПД.

Реакторы с жидкометаллическими теплоносителями. В таких реакторах отвод тепла осуществляется с помощью жидкого натрия, сплава натрия – калий и др. Обычно натрия используют для отвода тепла в реакторах на быстрых и промежуточных нейтронах, удельная мощность которых в 10–30 раз больше удельной мощности реакторов на тепловых нейтронах.

Реакторы с органическими теплоносителями по ряду причин пока еще редко используются в реакторостроении. Реакторы на быстрых нейтронах (БН), западный аналог FBR – отсутствует замедлитель, и основное число делений вызывается быстрыми нейтронами. Каждый акт деления приводит к появлению большего числа нейтронов, которые захватываются ядрами урана–238, превращают их в ядра плутония–239. Что позволяет использовать на АЭС уран–238, торий–232, плутоний. В качестве теплоносителя используется расплавленный натрий. АЭС на быстрых нейтронах типа БН–350 имеют двухцелевое назначение: производство электроэнергии и использование пара для получения пресной воды – АЭС в г. Шевченко.

К несомненным достоинствам АЭС относится высокая энергетическая эффективность, относительно невысокая цена топлива, экологическая безопасность в эксплуатации. Естественно, что европейские страны и не имеющие собственных энергоносителей переходят к ядерной энергетике. В 1994 г. в 29 странах мира работало 430 АЭС общей мощностью $350 \cdot 10^3$ МВт. Рост ядерной энергетике обеспечивается ведущими промышленными державами, но степень использования атомной энергии существенно зависит от наличия в странах альтернативных энергетических ресурсов (Табл. 10, 11).

Таблица 10

**Доля электроэнергии, вырабатываемой АЭС
в странах мира (%) (Гурин, 1996)**

Литва	87,2	Финляндия	32,4
Франция	77,7	Япония	30,9
Бельгия	58,9	Германия	29,7
Словацкая Республика	53,6	Чешская Республика	29,2
Венгрия	43,3	Великобритания	26,3
Словения	43,3	США	21,2
Швеция	42	Канада	17,3
Корея	40,3	Аргентина	14,2
Швейцария	37,9	Россия	12,5
Болгария	36,9	Нидерланды	5,1
Испания	36	ЮАР	4,5
Украина	32,9	Мексика	3
Тайвань	33,5	Индия	1,9

Таблица 11

Наиболее мощные АЭС в странах мира (январь 1993)

Название АЭС	Страна	Мощность МВт эл.	Число блоков	Тип реакторов
Фукусима	Япония	8815	10	BWR
Брюс	Канада	6818	8	CANDU
Гравелин	Франция	5460	6	PWR
Палюэль	Франция	5320	4	PWR
Катном	Франция	5200	4	PWR
Запорожская	Украина	4765	5	ВВЭР
Бюже	Франция	4140	5	PWR
Пикеринг	Канада	4116	8	CANDU
Пало-Верди	США	3810	3	PWR
Курская	Россия	3700	4	РБМК
Ленинградская	Россия	3700	4	РБМК
Трикастен	Франция	3660	4	PWR

Анализ данных, представленных в таблицах, позволяет считать, что практически вся Западная Европа использует ядерную энергетiku. Первое место занимает Франция, как по проценту потребляемой электроэнергии, по уровню развития ядерных технологий, так и по количеству мощных АЭС. В то

же время страны разработчики ядерных технологий: США, Россия и Великобритания в меньшей степени зависят от уровня атомной энергетики. В России к 1993 г. работали 9 АЭС с 29 промышленными энергоблоками типа ВВЭР, РБМК, ЭГП и один блок БН. В связи с тем, что средний срок эксплуатации АЭС составляет 30 лет, в 2005–2015 будет осуществляться вывод их из эксплуатации и ввод новых 14 АЭС в период с 1995 г. по 2007 г.

Несомненно, что явно просматриваемая тенденция перехода мировой энергетической системы на ядерные технологии несет в себе потенциальную угрозу выживаемости всего человечества.

Одновременно создание ядерного оружия осуществлялось модернизация ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для флота. Разработки велись в трех направлениях, создание ЯЭУ для подводных лодок, надводных военных кораблей и гражданского флота. Преимущество ядерной энергетики, используемые во флоте заключались в существенном увеличении мощности судов, автономности, лучшие условия существования экипажа. Что позволяло строить авианосцы, ракетные крейсера, подводные лодки, вооруженные баллистическими ракетами с атомными боеголовками и атомные ледоколы. В течение 40 лет в мире было построено более 480 военных кораблей и около десяти гражданских атомных судов только в России. В конструкциях ЯЭУ на судах предусмотрен процесс саморегуляции, т.е. при случайном повышении температуры в реакторе, мощность его снижается до полной остановки ядерной реакции. Реакторы защищены тремя защитными барьерами с автоматизированной системой радиационного контроля и системой реагирования за каждым из защитных барьеров, что значительно повышало надежность судовых ЯЭУ.

Энергозапас одного комплекта ядерного топлива для судовых реакторов хватает на 3–4 года, поэтому выгрузка ОЯТ и загрузка нового топлива наиболее опасные операции при эксплуатации судовых ЯЭУ. Так мощность дозы одной тепловыделяющей сборки (ТВС) во время разгрузки реактора составляет 500000 Р/ч. Количество ТВС в судовых реакторах может достигать 250 и хранить их после выгрузки необходимо не менее 3–х лет, затем ОЯТ можно перерабатывать.

Свойства и процессы переноса искусственных радионуклидов в ядерном топливном цикле.

В ядерном топливном цикле (ЯТЦ) искусственные радионуклиды (ИРН) нарабатываются в ядерных реакторах АЭС и выбрасываются в окружающую среду как АЭС (~ 4% в общем загрязнении от ЯТЦ), так и заводами по переработке ядерного топлива (~ 96% в общем загрязнении от ЯТЦ).

Выбросы и сбросы ЯТЦ, как правило, организованные и контролируемые. Так, газоаэрозольные выбросы АЭС после очистки выводятся через высотные (100 – 150 м) вентиляционные трубы, что обеспечивает лучшие условия для их рассеяния в атмосфере со снижением концентрации ИРН в приземном слое воздуха. При нормальной эксплуатации технические меры обеспечивают высокие коэффициенты удержания ИРН, образующихся в активной зоне и в теплоносителе. Технические и технологические меры удержания ИРН на АЭС непрерывно совершенствуются.

Типичный радионуклидный состав основных выбросов и сбросов ИРН реакторов типа ВВЭР в расчете 1 ГВт (эл.)/год таков:

Выбросы в атмосферу, ТБк		Сбросы в гидросферу, ТБк	
^3H	7,4	^3H	5,0
^{14}C	0,5	ГД ПА	$1,8 \cdot 10^{-2}$
РБГ	$110 \div 280$		
^{131}J	$7,4 \cdot 10^{-4} \div 9,2 \cdot 10^{-2}$		

Долгоживущие радионуклиды в составе аэрозолей выбрасываются в количестве $3,7 \cdot 10^{-4} \div 1,1 \cdot 10^{-3}$ ТБк.

Качественный состав выбросов и сбросов предприятий ЯТЦ очень близок к таковому при ядерных взрывах, но количественные соотношения активностей различных радионуклидов и химические формы существенно другие и различаются даже для предприятий ЯТЦ. Причины этих различий рассмотрены в предыдущей главе.

Типичный радионуклидный состав основных выбросов и сбросов регенерационного завода в расчете на 1 ГВт (эл.)/год таков.

Выбросы в атмосферу, ТБк		Сброс в гидросферу, ТБк	
^3H	$2,9 \cdot 10^4$	^3H	92
^{14}C	29,6		
^{85}Kr	$5,9 \cdot 10^5$		
^{131}J	$2,9 \cdot 10^{-2}$		
ТУЭ	$1,5 \cdot 10^{-4}$		

Накопление ИРН в активной зоне и теплоносителе ядерного реактора продолжается много месяцев. За это время активность короткоживущих радионуклидов продолжает расти и, соответственно, возрастает их доля в общей активности ИРН. Абсолютные величины выбросов и сбросов отдельных радионуклидов зависят от технологической схемы АЭС (типов реакторов), от состояния его активной зоны, герметичности основного оборудования, продолжительности работы от начала кампании, принятых схем очистки (задержки и фильтрации).

В газоаэрозольных выбросах АЭС значимыми принято считать ^3H , ^{14}C , РБГ, радионуклиды йода и долгоживущие радионуклиды, а в жидких сбросах - ^3H , продукты деления и продукты активации.

На предприятия по переработке выгоревшее топливо поступает через значительное время после выгрузки из активной зоны, выдержки на самой АЭС, транспортировки на предприятие и на самом предприятии (более чем 120 сут). Поэтому в выбросах и сбросах регенерационных заводов преобладают долгоживущие радионуклиды, имеющие глобальное значение: ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{129}J , $^{134,137}\text{Cs}$ и трансураниевые элементы; при этом, по этим радионуклидам выбросы регенерационных заводов составляют значительную долю общих выбросов предприятий ЯТЦ: 99% выбросов ^3H , ^{85}Kr , ^{129}J ; 70 – 80% выбросов ^{14}C .

Среди продуктов деления ПД, нарабатываемых в активной зоне реактора из топливной композиции (UO_2) основными являются $^{89,90}\text{Sr}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{103,106}\text{Rh}$, $^{134,137}\text{Cs}$, ^{140}Ba , ^{140}La , ^{144}Ce , а также радиоактивные благородные газы РБГ, в том числе ^{41}Ar , девять радионуклидов криптона, одиннадцать радионуклидов ксенона и шесть радионуклидов йода. Кроме того, в небольшом количестве выбрасывается ^{239}Np .

Эти радионуклиды накапливаются под оболочкой ТВЭЛов, могут химически взаимодействовать друг с другом и материалом оболочки, образуя различные соединения (например, йодиды CsJ , ZrJ и др.) как летучие, так и менее летучие. Газообразные и легколетучие радионуклиды через неплотности в оболочке ТВЭЛов переходят в теплоноситель и с паром или с водой попадают в окружающую среду. Химические процессы продолжаются в теплоносителе и при дальнейшем прохождении радионуклидов через технологические среды и защитные барьеры вплоть до выхода в окружающую среду.

Среди продуктов активации ПА различаются продукты активации ядер собственно теплоносителя и продукты активации неосажденных, взвешенных частиц, находящихся в теплоносителе (продуктов коррозии материалов технологического контура). Основными ПА являются: ^3H , ^{14}C , ^{24}Na , ^{42}Kr , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{56}Mn , ^{59}Fe , $^{58,60}\text{Co}$, ^{65}Zr .

В ядерных реакторах в результате нейтронных реакций на ядра топливной композиции нарабатываются трансурановые элементы: плутоний, нептуний, америций, кюрий.

Стартовой реакцией является реакция $^{238}\text{U}(n,\gamma)^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$.

На 1 т исходного ядерного топлива нарабатывается за кампанию около 10 кг ^{239}Pu .

Радиоактивные отходы на самих АЭС и на заводах по регенерации отработанного ядерного топлива подвергаются сложной переработке, в результате которой их химический состав изменяется качественно и количественно, но всегда бывает очень сложным.

В продуктах переработки наиболее часто встречаются катионы Fe^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , анионы SO_3^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- и Cl^- , а также некоторые органические соединения. Так, при переработке ядерного топлива в жидкие РАО используется азотная кислота (отсюда присутствие в растворах азотнокислых солей Fe, Cr, Ni, нитратов урана и продуктов деления и др.). Извлечение ПД из солевых растворов осуществляется главным образом осаждением их гидроксидами Fe и Al, карбонатом Ca, фосфатами Fe и Ca, сульфидом Fe, ферроцианиды тяжелых металлов. Отсюда сложность химического состава выбросов и сбросов предприятиями ЯТЦ.

Следует отметить, что сказанное выше относится к нормальной эксплуатации предприятий ЯТЦ. При авариях на АЭС, вероятность которых очень мала ($\sim 10^{-6}$) качественный и количественный состав выбросов ИРН существенно другой. Он зависит от характера разрушений активной зоны, мощности реактора, времени, прошедшего после последней перегрузки топлива. При серьезном разрушении активной зоны ядерного реактора в атмосферу может быть выброшено за 1 час до 30% суммарной активности (т.е. $\sim 1,5 \div 2,0 \times 10^9$ Ки). Это примерно в 250 раз меньше суммарной активности продуктов деления, образуемых при ЯВ мощностью в 1 Мт.

Так как большинство ИРН образуется в активной зоне задолго до ее разрушения, то в аварийном выбросе содержание короткоживущих ИРН будет значительно ниже, чем при ЯВ. Отсюда более медленный спад радиоактивного загрязнения от аварийного выброса, чем при ЯВ. Это иллюстрирует таблица, в которой дан спад активности продуктов деления (в Ки) в зависимости от времени после ядерного взрыва мощностью 1000 Мт (числитель) и после останова реактора РБМК-1000 (знаменатель).

	1 час	15 сут	3 мес	1 год	10 лет
^{131}I	$5 \cdot 10^7 / 9 \cdot 10^7$	$1,25 \cdot 10^7 / 2,25 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^4 / 3 \cdot 10^4$	—	—
^{90}Sr	$1,7 \cdot 10^5 / 1 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^5 / 1 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^5 / 1 \cdot 10^7$	$1,7 \cdot 10^5 / 1 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^5 / 8 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$1,8 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 10^5$	$1,8 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^5 / 1,5 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^5 / 1,2 \cdot 10^7$
СИРН	$5 \cdot 10^{11} / 5,6 \cdot 10^9$	$7 \cdot 10^8 / 1,6 \cdot 10^9$	$9 \cdot 10^7 / 7 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^6 / 2,8 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^5 / 4,4 \cdot 10^7$

Таким образом, радиоактивное заражение после аварии АЭС будет сохраняться дольше, чем при наземном ЯВ, но масштаб распространения (площадь зараженной поверхности) будет в десятки раз меньше (при небольшой высоте аварийного выброса). Правда, небольшая высота аварийного выброса считалась очевидной до аварии ЧАЭС. В этой аварии первоначальная высота выброса достигла 1000 – 1500 м, а сам выброс продолжался около 10 суток, причем динамика выброса оказалась сложной – менялись направление и скорость воздушных масс, переносивших радиоактивные частицы. Отсюда огромные площади радиоактивного заражения и сложное пространственное распределение этого заражения. Суммарный выброс ИРН при аварии ЧАЭС оценивался $\sim 5 \cdot 10^7$ Ки (около 3,5% ИРН, содержащихся в активной зоне к моменту аварии).

Необходимо отметить, что энергоблоки АЭС с водо-водяными реакторами снабжены дополнительным барьером безопасности – защитной оболочкой, которая удерживает внутри себя все радиоактивные продукты. Благодаря этому мощности аварий на таких энергоблоках будут существенно ниже. Так, при максимальной проектной аварии на реакторе ВВЭР-1000

выбросы в атмосферу увеличиваются всего в 4 раза по сравнению с выбросами при нормальной эксплуатации, а в случае запроектной аварии выбросы увеличиваются в 320 раз. Ниже будут описаны свойства основных ИРН, связанных с выбросами и сбросами предприятий ЯТЦ. Некоторые из них были описаны выше в §3. Для этих радионуклидов будут рассмотрены только свойства и процессы переноса, специфичные именно для ЯТЦ.

³H. В ядерном реакторе тритий образуется в результате тройного деления урана в топливной композиции; в результате (n,γ) реакции на дейтерии, содержащемся в воде теплоносителя и образуемого в реакции ¹H(n,γ)D; в результате различных реакций на ядрах бора и лития, содержащихся в теплоносителе (для борного регулирования и корректив водно-химического режима теплоносителя) или в стержнях регулирования:

1. ¹⁰B(n,2α)³H; 2. ⁶Li(n,α)³H; 3. ⁷Li(n,n'α)³H.

Основной вклад (85%) в наработку трития дает реакция 1.

Выбрасывается в виде НТ и НТО. ³H - один из основных радионуклидов, дающих вклад в дозу облучения от АЭС от выбросов его в атмосферу и в гидросферу. Типичный выброс ³H от ВВЭР-1000 в атмосферу 0,6 Ки/сут.

³H относится к числу глобальных радионуклидов, влияющих на состояние атмосферы и гидросферы в глобальном масштабе. За 10 лет работы предприятий ЯТЦ среднемировые индивидуальные дозы облучения за счет выбросов ³H возрастают в 4 раза, а за счет сбросов в гидросферу – в 7 раз.

¹⁴C.

Образуется в ядерных реакторах в результате тройного деления урана в топливной композиции (5 – 10%) и в результате реакции активации нейтронами ядер ¹³C, ¹⁴N и ¹⁷O (40 – 50%).

Из реакции активации 90% выхода ¹⁴C дает реакция ¹⁷O(n,α)¹⁴C и 10% - реакция ¹⁴N(n,p)¹⁴C. Удельная активность ¹⁴C в теплоносителе реакторов типа ВВЭР (1,5 ÷ 10)·10⁻² Бк/л, причем 60 – 70% его находится в виде углекислого газа и карбонатов, а 30 – 40% - в виде углерода, связанного с микрочастицами, взвешенными в воде теплоносителя.

В атмосферу ¹⁴C поступает в виде различных соединений, главным образом в виде CO₂, частично в виде CO и CH₄. Различные типы водо-водяных реакторов дают различный химический состав выбросов ¹⁴C. Выброс ¹⁴C от энергетических реакторов составляет 30 – 40% фоновой (глобальной) загрязненности района АЭС этим радионуклидом.

¹⁴C дает основной вклад в дозу облучения населения в районе АЭС (~ 70%). Относится к числу глобальных радионуклидов. За 10 лет работы предприятий ЯТЦ среднемировая индивидуальная доза облучения населения от выбросов ¹⁴C возросла в ~ 10 раз.

⁸⁵Kr.

Среди радиоактивных благородных газов (РБГ), выбрасываемых в атмосферу АЭС, ⁴¹Ar, 9 радионуклидов криптона и 11 радионуклидов ксенона. Основными являются следующие:

Радионуклид	T _½	Радионуклид	T _½
^{85m} Kr	4,4 час	¹³³ Xe	5,3 сут
⁸⁵ Kr	10,7 мин	^{135m} Xe	15 лет
⁸⁷ Kr	76 мин	¹³⁵ Xe	9,2 час
⁸⁸ Kr	2,8 час	¹³⁸ Xe	17 мин

Большинство этих радионуклидов короткоживущие. Наибольшие вклады при делении в реакторах типа ВВЭР имеют ¹³³Xe 72,0%; ¹³⁵Xe 13,2%; ⁸⁵Kr 6,0%; ^{85m}Kr 5,4%; ⁸⁷Kr 1,0%; ⁸⁸Kr 2,2% и ⁴¹Ar 0,2%.

Из этих радионуклидов глобальное значение имеет только ⁸⁵Kr. Этот радионуклид имеет как космогенное, так и техногенное происхождение. Содержание космогенного ⁸⁵Kr со временем практически не изменяется. Выбросы техногенного ⁸⁵Kr обусловлены главным образом предприятиями по переработке ядерного топлива. Из-за этого содержание ⁸⁵Kr в атмосфере медленно, но непрерывно растет по сравнению с ⁸⁵Kr космогенного происхождения.

За 20 лет с 1964 года среднее содержание ^{85}Kr в атмосферном воздухе Европы возросло от $0,24 \text{ Бк/м}^3$ до $0,85 \text{ Бк/м}^3$ (при вариации содержания от 7 до 15 Бк/м^3), а среднегодовой рост содержания ^{85}Kr составляет $\sim 0,01 \text{ Бк/м}^3$. Во временной зависимости отмечено совпадение максимумов содержания ^{85}Kr и ^3H .

Выбросы ^{85}Kr от ВВЭР-1000 составляют $\sim 3,75 \text{ Ки/сут}$. Выбросы этого радионуклида от предприятий по переработке ядерного топлива значительно больше.

За счет выбросов ^{85}Kr предприятиями ЯТЦ за 10 лет среднемировая индивидуальная доза облучения на человека возрастает в 10 раз.

^{129}J , $T_{1/2} = 1,57 \cdot 10^7$ лет.

Наибольшие выходы при делении урана имеют короткоживущие радионуклиды йода. Так, на ВВЭР-1000 в выбросах преобладают радионуклиды ^{131}J , ^{133}J и ^{135}J (соответственно, 60%; 32% и 8%). Выброс ^{129}J очень мал. Выход его при делении урана $\sim 0,9\%$. Однако из предприятий ЯТЦ наибольшие выбросы в окружающую среду ^{129}J дают заводы по переработке ядерного топлива. В целом ЯТЦ выбрасывают в окружающую среду около 2 т ^{129}J в год (к 2010 г. будет выброшено $\sim 60 \text{ т } ^{129}\text{J}$).

Этот радионуклид имеет такие же химические и миграционные свойства, как и другие радионуклиды йода (см. выше), но в отличие от них он имеет очень большой период полураспада и имеет глобальное значение. Он вступает в глобальный цикл природного йода, имеющий сложный характер с участием разнообразных химических форм. В выбросах ВВЭР, как и другие радионуклиды йода, ^{129}J проявляется в молекулярных, аэрозольных и органических формах в соотношении 1,5:1,0:1,1. В органической форме основным соединением является йодистый литий (73%).

В элементарном виде йод оседает на поверхности растений со скоростью $5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$. В органическом виде оседает с аэрозолями со скоростью $\sim 5 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

Радионуклиды йода имеют высокую миграционную способность из-за повышенной летучести, сложности химического поведения, многообразия водорастворимых форм, низких коэффициентов сорбции по отношению к наиболее распространенным минералам и почвам. Является одним из незаменимых биогенных элементов, играющих важную роль в процессе обмена веществ. Особо высокие коэффициенты накопления радионуклидов йода имеют морские водоросли ($K = 200 \div 500$), моллюски ($K = 10 \div 70$) и рыба ($K = 10$). Коэффициент задержки радионуклидов йода наземной растительностью 0,2 (остальные 0,8 оседают на земную поверхность). С земной поверхности удаляются ветром, осадками и в результате возгонки.

^{129}J настолько опасен для глобальной радиоэкологии, что признан одним из основных кандидатов на уничтожение путем трансмутации.

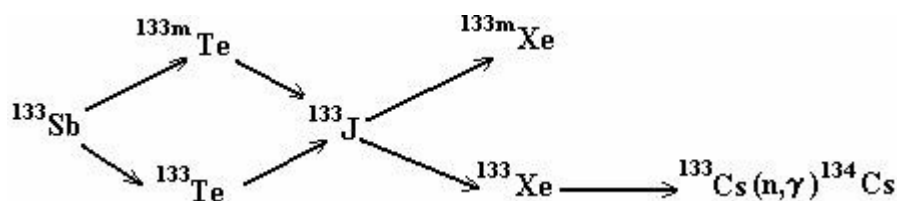
Может в очень небольших количествах ($\sim 10^{-14} \text{ г}$ на $1 \text{ г } ^{127}\text{J}$) образовываться в природных условиях (в литосфере и гидросфере) при спонтанном делении урана $U(3,f)$ и в результате реакций, вызванных нейтронами космического происхождения.

Среди других радионуклидов йода, выбрасываемых предприятиями ЯТЦ, к критическим относится ^{131}J (в воздухе и воде).

Продукты деления

^{137}Cs .

Среди радионуклидов – продуктов деления в выбросах и сбросах АЭС наиболее часто рассматривается ^{90}Sr , $^{134,137}\text{Cs}$, причем ^{134}Cs по существу не является прямым продуктом деления. В реакторах на тепловых нейтронах он образуется в результате нейтронной активации стабильного изотопа ^{133}Cs , который получается как конечный продукт цепочки распада продуктов деления с $A = 133$.



Так же, как ^{137}Cs , радионуклид ^{134}Cs относится к числу критических для сбросов и выбросов АЭС в воздух, водоемы и на почву. В глобальных выпадениях, в том числе чернобыльских, ^{134}Cs уже нет из-за его относительно малого периода полураспада. В выбросах и сбросах заводов по переработке ядерного топлива его содержание может быть заметно выше, чем от АЭС.

Химические и миграционные свойства аналогичны таковым для ^{137}Cs . Так же как и ^{137}Cs , ^{134}Cs распределяется практически во всех объектах экосферы. Так, в водоемах (например, в водоемах-охладителях АЭС) преимущественно накапливается в донных отложениях (~ 95%), значительно меньше остается в воде (~ 5%) и совсем немного в гидробионтах (~0,1%).

В речных экосистемах коэффициент распределения радионуклидов цезия между донными отложениями и водой может достигать до 2000.

Достаточно хорошо удерживается почвами, отдельными видами растений (особенно мхами и лишайниками). Соотношение активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs существенно зависит от времени, прошедшего от момента выброса – содержание ^{134}Cs спадает со временем с периодом полураспада $T_{1/2} \approx 2$ года.

Типичные загрязнения ^{40}Sr и ^{137}Cs объектов окружающей среды района расположения нормально действующей АЭС близки к таковым от глобальных выпадений и находятся на уровне: ~ 10^{-7} Бк/л - атмосферный воздух; 10 – 250 Бк/кг ^{137}Cs и 1 ÷ 10 Бк/кг ^{90}Sr - почва; 0,5 ÷ 15 Бк/кг - наземная растительность; от 0,01 ÷ 0,04 Бк/л до 20 Бк/л - вода; 10 ÷ 60 Бк/кг ^{137}Cs и 2 – 4 Бк/кг ^{90}Sr - донные отложения; от 0,001 ÷ 0,0002 Бк/кг до 10 Бк/кг ^{90}Sr и от 0,004 ÷ 0,08 Бк/кг до 75 Бк/кг ^{137}Cs - гидробионты. Выбросы и сбросы продуктов деления собственно от нормально действующей АЭС из-за их малости трудно выделять на фоне уже существующего глобального (фоновое) загрязнения.

Продукты активации.

Радионуклиды – продукты активации образуются на АЭС преимущественно в теплоносителе в результате нейтронных реакций на ядрах самого теплоносителя и на ядрах продуктов коррозии материалов технологического оборудования. Основными являются радионуклиды ^{51}Cr , ^{54}Mn , $^{58,60}\text{Co}$ и ^{65}Zn . Их ядерные и химические свойства, а также особенности миграции рассмотрены в §3. В районе АЭС они обнаруживаются в атмосфере на уровне $(2 \div 50) \cdot 10^{-9}$ Бк/л (^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co) и водных экосистемах: в воде на уровне (1 – 30) Бк/л ($^{58,60}\text{Co}$). В водных экосистемах накапливаются преимущественно в донных отложениях (~ 98,6%), значительно меньше их в гидробионтах (~ 1,1%) и еще меньше – в воде (0,25 ÷ 0,30%).

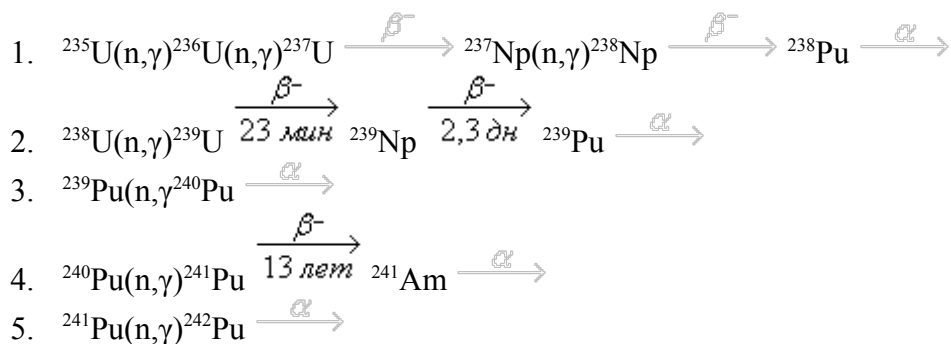
Коэффициент распределения продуктов активации между донными отложениями и водой может быть еще выше. Так, имеются данные, что ^{60}Co в речной экосистеме накапливается в донных отложениях относительно воды с коэффициентом 24000.

Трансурановые элементы (ТУЭ).

Радионуклид	$T_{1/2}$, годы
^{238}Pu	87,44
^{239}Pu	24110
^{240}Pu	6530
^{241}Pu	15
^{241}Am	432,2

все эти радионуклиды испытывают α -распад и все долгоживущие.

Трансурановые радионуклиды (элементы) образуются в результате последовательно повторяющихся актов захвата нейтронов (n,γ) и последующим β -распадом:



Здесь приведены только основные превращения, в результате которых образуются значимые для радиозкологии радионуклиды.

С увеличением Z и A синтезируемого ядра его выход резко уменьшается. В отличие от ядерного взрыва, при котором синтез ТУЭ происходит за время $10^{-6} \div 10^{-8}$ с при очень высоком интегральном нейтронном потоке (до $10^{23} \div 10^{23}$ нн/см²), в ядерном реакторе время синтеза может продолжаться в течение многих лет при меньшей интенсивности нейтронного потока. Наибольший выход имеет реакция 2. – выход ${}^{239}\text{Np}$ и ${}^{239}\text{Pu}$ при плотности потока нейтронов в реакторе 10^{13} нн/см² с составляет 0,1 Ки/1 г U.

Реакция ${}^{238}\text{U}(n,\gamma){}^{239}\text{U} \rightarrow {}^{239}\text{Np} \rightarrow {}^{239}\text{Pu}$ может происходить и в природных условиях под действием нейтронов спонтанного деления $\text{U}(s,f)$ и нейтронов из (α,n) реакции на уране, содержащемся в урановых рудах. Выход ядер ${}^{239}\text{Pu}$ в этом случае порядка $(0,4 \div 15) \cdot 10^{-12}$ относительно содержания ядер ${}^{238}\text{U}$ в рудах.

Трансурановые элементы наиболее интенсивно нарабатываются в ядерных реакторах (в том числе и энергетических) и являются одним из самых ценных продуктов переработки выгоревшего ядерного топлива. Кроме ЯТЦ и ЯВ источником выбросов ТУЭ явилась авария ЧАЭС.

Все трансурановые элементы химически очень активны. Характерная их особенность – способность образовывать соединения с водородом, азотом, кислородом, галогенами, а также комплексные соединения. Степени окисления их от 2^+ до 7^+ .

Валентность радионуклидов плутония от 2^+ до 7^+ (2^+ наименее характерна). В большинстве случаев радионуклиды плутония образуют нерастворимые соединения. Окислы плутония PuO , Pu_2O_3 , PuO_2 и фазы переменного состава от Pu_2O_3 до Pu_4O_7 . В водных растворах образует ионы (от 3^+ до 7^+), причем все ионы могут находиться в растворе одновременно (кроме 7^+). Они подвержены гидролизу (эта способность возрастает в ряду $\text{PuO} < \text{Pu}^{3+} < \text{PuO}_2^{2+} < \text{Pu}^{4+}$) и легко образуют комплексные соединения (эта способность увеличивается для различных ионов в ряду 5^+ , 6^+ , 3^+ , 4^+).

Валентность ${}^{241}\text{Am}$ от 2^+ до 7^+ , причем наименее характерны 2^+ и 7^+ , а устойчивые 3^+ , в твердом состоянии и в виде комплексов в растворе – 4^+ . Окислы AmO , Am_2O_3 , и AmO_2 . Образует нитрид AmN , сульфид Am_2S , а также металлоорганическое соединение $\text{Am}(\text{C}_5\text{H}_5)_3$. Америций образует растворимые соединения с галогенами (AmCl_2 , AmBr , AmJ_3). Образует комплексные соединения с минеральными и органическими кислотами. В отличие от плутония соединения америция обладают бóльшей растворимостью и, следовательно, бóльшей миграционной способностью.

В степени окисления 3^+ свойства ТУЭ подобны свойствам лантаноидов, но обладают более сильно выраженной способностью к комплексообразованию (она возрастает в ряду $\text{U} < \text{Np} < \text{Pu} \geq \text{Am}$). Соединения ТУЭ (гидроокиси, фториды, иодиды, двойные сульфиды, фосфаты) труднорастворимые.

В степени окисления 4^+ образуют оксиды, фториды, устойчивы в водных растворах (U, Np, Pu), в водных растворах образуют комплексы. Соединения (гидроокисиды, фториды, иодиды, фосфаты, карбонаты) труднорастворимые. Сильные комплексообразователи (склонность возрастает от U к Am).

В степени окисления 5^+ существуют в виде диоксидов MeO_2^+ . Эта ионная форма определяет химические свойства – малую склонность к гидролизу и комплексообразованию. В степени

окисления 6^+ находятся в форме ионов MeO_2^{2+} . Известно значительное число комплексных соединений.

В степени окисления 7^+ наиболее устойчив Pu. В твердом состоянии существует в виде ионов MeO_5^{5-} , MeO_5^{3-} , $[\text{Me}_2\text{O}_5(\text{OH})_2]^{4-}$ и MeO_4^- , а в растворах – в гидратированной форме аниона MeO_5^{3+} .

В общем, закономерности миграции плутония и америция подобны. Поэтому достаточно рассмотреть особенность миграции радионуклидов плутония.

Они определяются растворимостью соединений плутония в природных средах и, особенно, первоначальная химическая форма. При ядерных взрывах такой формой являются практически нерастворимые окислы и, в основном, отдельные атомы, которые с глобальными выпадениями поступают на земную поверхность и только здесь могут образовывать растворимые соединения.

В выбросах ЯТЦ преобладают растворимые соединения плутония, а также его комплексные соединения с органическими лигандами. Особо сложным составом отличались выбросы при аварии ЧАЭС. Их можно разделить на 4 группы:

А - механически выброшенные из активной зоны тонкодисперсные частицы топлива, близкие по радионуклидному составу к отработанному топливу; осели на земную поверхность в ближней зоне ($R \leq 60 - 70$ км).

Б – мелкодисперсное топливо и другие продукты, умеренно обогащенные летучими радионуклидами; содержание радионуклидов плутония в ~ 2 раза больше ожидаемого; осели на земную поверхность в зоне $R \leq 100$ км.

В – выбросы, сильно обогащенные летучими радионуклидами, в том числе плутонием; осели на земную поверхность в зоне $R \leq 150$ км и далее.

Г – выбросы, обогащенные радионуклидами плутония до 200 раз, в том числе частично растворимые соединения плутония; осели на земную поверхность в дальней зоне.

Различия в этих группах выбросов обусловлены главным образом различием температур в аварийном реакторе к моменту взрыва. Содержание кислорастворимых форм плутония возрастает от группы А и Б к группам В, Г в 4 – 15 раз и доходит до $55 \div 85\%$.

В настоящее время основным резервуаром радионуклидов плутония и ^{241}Am являются поверхность почв и донные отложения (более 99% поступивших и поступающих от глобальных и чернобыльских выпадений и от выбросов предприятий ЯТЦ). В биологических объектах этих трансурановых элементов не более 1% (в основном в растениях, а в животных еще в $5 \div 10^4$ раз меньше). Радионуклиды плутония находятся преимущественно в 4^+ нерастворимой форме. Коэффициент диффузии в почве $\sim 10^{-9}$ см/с.

Только около $\sim 10\%$ этих радионуклидов может быть в растворимой доступной для растений форме. Из растений наибольшую концентрацию радионуклидов плутония имеют низкорастущие растения (травы, мхи, лишайники). Это следствие того, что радионуклиды плутония перераспределяются на земной поверхности в основном за счет ветрового переноса и эрозии. Коэффициент накопления трансурановых элементов растениями очень низкий ($10^{-1} \div 10^{-3}$).

Изотопные отношения радионуклидов плутония, содержащихся в почве различных регионов, существенно различаются из-за различия источников их поступления (глобальный, от ЯТЦ, авария ЧАЭС). Так, отношение $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ от ядерных взрывов – ($0,05 \div 0,06$); от глобальных выпадений - около 0,176; от выбросов ЯТЦ вместе с глобальными выпадениями – ($0,049 \div 0,150$), а от чернобыльских выпадений – ($0,30 \div 0,35$).

Изотопные отношения для различных регионов варьируют в следующих пределах:

Радионуклиды	Отношения
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu}$	$0,027 \div 0,44$
$^{238}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$1,1 \cdot 10^{-4} \div 3,7 \cdot 10^{-3}$
$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$0,049 \div 0,35$
$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$0,003 \div 0,090$
$^{242}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$4,4 \cdot 10^{-3} \div 4,0 \cdot 10^{-2}$

Видно, что основным радионуклидом плутония в выбросах является ^{239}Pu . Очень малы выбросы ^{238}Pu и ^{242}Pu . Несмотря на относительно низкие выбросы ^{241}Pu , они играют особую роль, так как в результате распада этого радионуклида образуется долгоживущий ^{241}Am . Поэтому содержание ^{241}Am в окружающей среде непрерывно возрастает. Так, в период 1940 – 1990 гг. содержание ^{241}Am в атмосфере увеличилось в 2 раза.

Абсолютное содержание радионуклидов плутония в почвах и атмосферных аэрозолях очень сильно варьирует, особенно в зависимости от расстояния от ЧАЭС. Так в атмосферных аэрозолях содержание плутония уменьшается в 10^4 раз при переходе от ближней к дальней зоне (в которой содержание плутония находится на уровне 19 Бк/л), плотность выпадений уменьшается в ~ 170 раз (до уровня $1,25 \cdot 10^5$ Бк/м²), содержание на поверхности почвы уменьшается в ~ 370 раз (до уровня ~ 10 Бк/м²). В целом по мере удаления от ЧАЭС уровень загрязнения приближается к фону глобального загрязнения – для земной поверхности (10 ÷ 60) Бк/м². Средняя удельная активность радионуклидов плутония в почвах для европейской части России ~ 140

4.2. Подземные ядерные взрывы в мирных целях

В течение 1945–1995 г. в 90 районах Земли было произведено 2,057 ядерных взрывов, из которых 1547 подземных. США – 888 взрывов общей мощностью 266 Мт ТНТ, СССР – 500, суммарной мощностью 291 Мт ТНТ, Франция – 143, Великобритания – 21, КНР – 19, Индия – 1. Основная масса взрывов осуществлялась с целью проверки и совершенствования ядерного оружия и уничтожения запасов ядерного и химического оружия. Начиная с 1963 г. после подписания о запрещении испытаний ядерного оружия в США проведено 27 подземных взрывов для задач интенсификации разработок газовых месторождений и изучения характера разрушения разных геологических сред на глубине от 20 до 2000 м. В СССР за период 1968–1988 осуществлено 116 подземных взрывов: в России – 80, Казахстане – 31, Узбекистане – 2, Украине – 2, Туркмении – 1. Решались следующие задачи: глубинное сейсмическое зондирование земной коры – 39 взрывов, интенсификация добычи нефти – 20, газа – 1, создание подземных хранилищ, углеводородного сырья – 36, токсичных промстоков – 2, глушение аварийных фонтанов месторождений газа – 5, дробление рудных залежей – 3, гидротехнические сооружения – каналы – 3, плотины – 2, водохранилищ – 9, предотвращение газовых выбросов в угольной шахте – 1.

Подземные ядерные взрывы изменяют тектонические процессы в зависимости от вида элементов земной коры и глубины взрыва. Повышается сейсмичность в районах с повышенной подвижностью земной коры: Кавказ, Копет–Даг, Тянь–Шань, Памир. В Арало–Каспийском регионе после проведения подземных ядерных взрывов наблюдается распространение сейсмичности в северные районы в область малоподвижных платформ. Аналогичные процессы происходят на Новой Земле, Кольском полуострове и Пермской области.

Каждый подземный ядерный взрыв приводит к развитию термических, механических, химических и радиационных явлений существенно изменяющих естественную динамику процессов в земной коре и на поверхности. Образующиеся радиоактивные продукты деления: газообразные – ксеноны, криптон; летучие – йод, селен, рутений; тугоплавкие – цирконий, ниобий –

загрязняют литосферу. В большей степени опасными являются долгоживущие радионуклиды: криптон–87~10,7 лет; цезий–137~30 лет; стронций–90~28 лет; плутоний–239 и т.д. Второй тип радионуклидов появляется в результате наведенной радиации: наблюдается изменение изотопного состава горных пород, когда стабильные элементы под действием нейтронов превращаются в радионуклиды, в частности появление большого количества трития, углерода–14 с периодом полураспада 5730 лет. Широкому распространению радионуклидов способствует их миграция с подземными водами. Выделяют три типа техногенных радионуклидов: первый – легко перемешивающий с водой: тритий, технеций, стронций–90 и др. Второй – сорбируемые взвесью: церий–144, цезий–137, прометий–147, стронций–90, цирконий–95, рутений–106, плутоний и т.д. Третий – вовлекаемые активно в состав живых организмов: марганец–54, кобальт–60, железо–50, никель–63, цинк–65 и т.д.

Следовательно, каждый подземный ядерный взрыв запускает хроническую и долговременную цепь нарушений естественных процессов в лито–, гидро– и атмосфере с расширяющимся регионом радиоактивных загрязнений. Необходимо отметить, что "мирные ядерные подземные взрывы" не оказались экономически эффективными, так как уровень радиоактивной загрязненности нивелировал преимущество относительно небольших объемов ядерных зарядов.

4.3. Использование радионуклидов в науке и технике

Технологии с использованием искусственных радионуклидов широко применяются в медицине, биологии, химии и техники. Искусственные радионуклиды – изотопы получают при облучении стабильных нуклидов тепловыми нейтронами, которые попадая в ядра атомов образуют изотопы облученного химического элемента, например: фосфор–32, кобальт–60 и т.д. В биологических и медицинских исследованиях достаточно эффективно используется метод меченых атомов. Данный метод основан на добавлении небольшого количества радиоактивного изотопа элемента к стабильному элементу. Обладая аналогичными химическими свойствами, изотопы вступают в химические соединения, являясь при этом источниками альфа–, бета– и гамма–излучений, которые регистрируются приборами. По распределению радионуклидов об участие аналогичных стабильных элементов в различных органах и тканях живого организма. В диагностике сердечно–сосудистых заболеваний используется фосфор–32, состояние щитовидной железы оценивается с помощью йода–131, функционирование почек – с помощью золота – 192 и т.д. Рентгенография позволяет судить о состоянии внутренних органов. Лучевая терапия, основанная на искусственных радионуклидах: кобальта–60, цезия–137, иридия–192 позволяет лечить некоторые кожные и онкологические заболевания.

Разработанные гамма–дефектоскопы с использованием цезия–137, иридия–192, европия–155, тулия–170, селена–75, церия–144 дают возможность

осуществлять неразрушающийся контроль при строительстве газо- и нефтепроводов в автостроении, авиастроении, судостроении и металлургии. Только в России ежегодно выпускается порядка 100 тысяч радионуклидных приборов.

Радиационно-химические технологии, основанные на мощных радионуклидных источниках повышенной прочности, термостойкость резинотехнических изделий.

Системы автоматического управления, основанные на радиоактивных индикаторах используются в процессе плавки каустика, плавки металла, размеров стальной ленты, искусственной кожи и бумаги. Каждый год только в России выпускается порядка 100 тыс радионуклидных приборов технологического контроля. Интенсивное развитие радиационной химии позволяет синтезировать новые химические материалы. Таким образом, радиационные технологии достаточно широко распространяются в научных исследованиях медицине и промышленности.

4.4. Радиоактивные загрязнения

Активное применение ядерных технологий практически во всех сферах человеческой деятельности и прежде всего в энергетике значительно расширяет глобальное загрязнение окружающей среды. Основной проблемой остается нейтрализация и утилизация отработанных ядерных материалов и аварийные ситуации, связанные с нарушением технологических процессов и техники безопасности.

В результате работы АЭС образуются РАО, которые поступают в окружающую среду, т.к. системы очистки не дают 100 %-го эффекта.

К газообразным отходам относятся радиоактивные благородные газы (РБГ): около десяти радионуклидов Kr и Xe – продуктов деления, ^{41}Ar – продукт нейтронной активации ^{40}Ar , содержащегося в воздухе и в охлаждающей реактор воде или газе. РБГ играют основную роль в формировании дозы внешнего гамма-излучения от АЭС.

Среди аэрозольных радионуклидов, присутствующих в атмосферных выбросах АЭС различных типов, насчитывается более 50 биологически значимых.

К жидким отходам относятся пульпы ионообменных смол, фильтро-материалы, кубовые остатки выпарных аппаратов, в которые поступает загрязненная радионуклидами вода при эксплуатации или ремонте реактора. В окружающую среду сбрасываются очищенные, так называемые дебалансовые воды, активность которых создается в основном за счет трития в форме тритиевой воды НТО, т.к. система очистки не позволяет выделять тритиевую воду из воды.

К твердым отходам АЭС относятся: твердые отходы, возникающие после отвердения жидких концентрированных отходов; детали оборудования реактора, снятые с эксплуатации (топливные каналы, насосы, задвижки, фильтры и т.д.; использованный инструмент и приборы; израсходованные

материалы (ветошь, спецодежда, бумага и пр.) Твердые отходы до момента захоронения хранятся на площадке АЭС. Количество твердых отходов зависит от типа реактора и не превышает обычно 2000 м³.

Величина радиоактивных выбросов у различных реакторов колеблется в широких пределах: не только от одного типа реактора к другому и не только для разных конструкций реактора одного и того же типа, но также для двух разных реакторов одной конструкции. Выбросы могут существенно различаться даже для одного и того же реактора в разные годы, потому что различаются объемы текущих ремонтных работ, во время которых и происходит большая часть выбросов.

Индивидуальная доза облучения населения от ядерного реактора зависит от времени и расстояния (чем дальше человек живет от АЭС, тем меньшую дозу он получает), а также от типа реактора. Например, *расчетная* индивидуальная средняя эффективная эквивалентная доза облучения населения от газоаэрозольных выбросов составляет на расстояниях 10 и 100 км соответственно мкЗв/(ГВт/г): для РБМК – 1,35 и $1,4 \cdot 10^{-2}$; для ВВЭР – $7,9 \cdot 10^{-2}$ и $3,6 \cdot 10^{-3}$.

При эксплуатации ядерных энергетических установок военного и гражданского атомного флота накапливаются жидкие и твердые радиоактивные отходы. Технологический цикл повторного использования ЯЭУ включает: выгрузку РАО, обработку ионообменных материалов, дезактивацию оборудования. До последнего времени сброс жидких отходов осуществлялся непосредственно в воды океанов. Япония ежегодно сбрасывает в морскую акваторию жидкие РАО от своих АЭС суммарной активностью 10 Ки. Твердые РАО помещаются в контейнеры, заполняются отвердителями: бетон, битум и т.д. и затапливаются. Так в районе Новой Земли затоплено порядка $17 \cdot 10^3$ контейнеров. В 1993 г. участниками Лондонской конвенции принято соглашение о полном прекращении захоронений РАО в морях. Что не уменьшает потенциальной долговременной опасности долгоживущих радионуклидов, находящихся в океанах. Располагая 235 атомными судами Россия ежегодно накапливает $20 \cdot 10^3$ т жидких и $6 \cdot 10^3$ т твердых РАО. Только на Северном флоте хранятся более $21 \cdot 10^3$ отработанных тепловыделяющих сборов.

Подземные ядерные взрывы загрязняют не только недра, но и поверхностные слои литосферы. Так взрывы в Якутии (Кратон–4) приводили к радиоактивным выбросам. Концентрация цезия–137 в 10 раз превысила фоновый уровень плутония–239 в радиусе 100 м в несколько тысяч раз превышала фоновую. Повышенную опасность представляет амерций–241 с периодом полураспада 430 лет, образующийся при распаде плутония–241. По данным радиационных обследований в 1993 г. плутоний обнаружен в данных отложениях рек, почве, ягеле, коре деревьев и лосином помете. Приповерхностные взрывы, проведенные 1971 г. на водоразделе рек Печоры и Камы с образованием траншеи длиной 700 м, шириной 340 м и глубиной 15 м, которая затем заполнилась водой, привели к многолетнему источнику миграции радионуклидов. Уровень радиоактивности в искусственно созданном водоеме составлял в течении десятилетий 1100 мкР/ч. Если учесть, что каждые 15 лет

все действующие ядерные энергоблоки мира производят около $22 \cdot 10^9$ Ки ОЯТ и около 300 радиоизотопов, то нетрудно представить уровень глобального радиоэкологического загрязнения мирного использования ядерных технологий.

ГЛАВА V. АВАРИЯ НА АТОМНЫХ ОБЪЕКТАХ

Принято считать, что ядерные технологии, обладая несколькими уровнями защиты в высокой степени защищены от аварийных ситуаций. В действительности в процессе эксплуатации ядерных устройств и разработках новых технологий постоянно возникают нестандартные отклонения, приводящие к радиоактивным загрязнениям. Для оперативной оценки безопасности ситуаций, происходящих на ядерных объектах МАГАТЭ в 1988 г. предложена международная шкала ядерных событий (табл.)

По международной шкале ядерных ситуаций проводится оценка аварий на ядерных установках и принимаются соответствующие меры по устранению радиоактивных воздействий.

5.1. Радиационная авария

Под радиационной аварией понимается нарушение предела безопасной эксплуатации источника ИИ, в результате чего произошел выход РВ и/или ИИ за предусмотренные проектом для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих значения, которые установлены проектом для нормальной эксплуатации.

Радиационно опасный объект народного хозяйства (РОО) – объект, при аварии или разрушении которого могут произойти массовые поражения людей, животных и растений РВ и ИИ (Табл. 12)

Таблица 12

Международная шкала ядерных событий

Уровень	Критерии
О – Отклонения ниже уровня шкалы	Не существенно для безопасности
1 – Аномалии	Отклонения от разрешенного режима эксплуатации, вызванные отказом оборудования, ошибкой человека или процедурными несоответствиями
2 – Инцидент	Событие со значительными нарушениями мер безопасности, но при сохранении глубокоэшелонированной защиты, позволяющей справиться с последующими отказами
3 – Серьезный инцидент	Внешний выброс радиоактивности, превышающий нормы и приводящий к облучению отдельных лиц за пределами площадки с максимальной дозой в десятые доли миллизиверта. События на площадке,

	приводящие к облучению персонала с последствиями для здоровья. События, приводящие к утечке радиоактивности за вторичную защитную оболочку, когда материал радиоактивный может быть возвращен в зону безопасного хранения.
4 – Авария без значительного риска за пределами площадки	Внешний выброс радиоактивности, сопровождающийся облучением в несколько миллизиверт. Необходим контроль пищевых продуктов. Значительные повреждения ядерной установки с необходимостью проведения восстановительных работ на площадке
5 – Авария	Внешний выброс радиоактивного материала эквивалентного сотням тысяч терабеккерелей. Проводятся аварийные мероприятия по снижению последствий для здоровья людей. Серьезное повреждение ядерной установки с превышением критичности и взрыв с выбросом большого количества радионуклидов в пределах установки
6 – Серьезная авария	Внешний выброс радиоактивного материала эквивалентного миллионам терабеккерелей. Необходимо проведение аварийных мероприятий для уменьшения вредных последствий для здоровья людей
7 – Крупная авария	Внешний выброс значительной части радиоактивного материала на крупной установке, содержащей смесь коротки и долгоживущих радионуклидов. Воздействия радиации: острые и отдаленные для здоровья людей на обширной территории, загрязнение радионуклидами окружающей среды

Аварии на РОО могут сопровождаться выбросом газоаэрозольного радиоактивного облака, которое перемещается по направлению ветра. РВ из облака, оседая на местность, загрязняют ее, и, таким образом, образуется след радиоактивного облака. Люди, попавшие в зону распространения облака, подвергаются при этом внешнему и внутреннему облучению ИИ. В большинстве случаев при авариях на АЭС с выбросом РВ на долю внешнего облучения приходится 15 %, а на долю внутреннего облучения – 85 % суммарной дозы, полученной человеком.

Районо радиоактивного заражения – территория, на которую РВ выпали из радиоактивного облака или попали любым иным путем в результате радиационной аварии.

При радиационных авариях на объектах ядерной энергетики радиоактивное заражение (РЗ) местности имеет ряд особенностей по сравнению с заражением при ядерном взрыве (ЯВ), а именно:

– радиоактивные выбросы поднимаются на небольшую высоту (1,2–1,5 км; при ЯВ – до нескольких десятков километров и формируются в границах дождевой облачности, что способствует увеличению загрязнения местности в результате вымывания РВ осадками из зараженной атмосферы;

– при большой продолжительности радиоактивных выбросов в связи с малой высотой подъема выбросов и частым изменением направления ветра в приземном слое атмосферы происходит заражение обширных территорий на больших расстояниях от места аварии;

– отсутствуют четко выраженные границы зон заражения на местности, т.к. радиоактивные выпадения из облака проявляются в виде отдельных пятен (очагов) на значительной территории;

– формирование основной части следа радиоактивного облака в ближней зоне заканчивается в основном в первые 4–5 суток после аварии (при ядерном взрыве формирование следа облака заканчивается в основном в течение 10–20 часов после взрыва);

– окончательно очаги радиоактивного загрязнения могут сформироваться через несколько недель и даже месяцев – это следует из опыта аварии на Чернобыльской АЭС;

– при авариях наблюдается большее разнообразие долгоживущих радиоактивных продуктов, чем при ЯВ, что приводит к заражению окружающей среды на длительные сроки;

– высокая дисперсность радиоактивных продуктов выброса позволяет им легко проникать внутрь помещений.

Различают следующие **фазы радиационной аварии**:

1–я фаза (ранняя) – от момента выброса РВ до окончания формирования радиоактивного следа на местности (продолжительность фазы – от нескольких часов до нескольких суток);

2–я фаза (средняя) – с момента окончания формирования радиоактивного следа до момента принятия всех мер по защите населения (продолжительность фазы – до 1 года);

3–я фаза (поздняя) – с момента принятия всех мер по защите населения до момента снятия ограничений (продолжительность фазы – до нескольких лет и десятилетий).

Пути облучения людей в разных фазах аварии:

в 1–й фазе:

- непосредственно от РОО (внешнее облучение);
- вдыхание зараженного воздуха (внутреннее облучение);
- от формирующегося шлейфа (внешнее облучение);

во 2–й фазе:

- от зараженной поверхности земли (внешнее облучение);
- вдыхание взвешенных частиц (внутреннее облучение);
- контакт с зараженными поверхностями различных объектов (внешнее облучение);

в 3–й фазе:

- употребление в пищу зараженных продуктов и воды (внутреннее облучение).

При радиационной аварии район РЗ делят на **зоны мероприятий** в зависимости от величины дозовой нагрузки:

1-я – *зона экстренных мероприятий* по защите населения (годовая поглощенная доза гамма-излучения более 0,75 Гр);

2-я – *зона профилактических мероприятий* (годовая поглощенная доза гамма-излучения от 0,25 до 0,75 Гр);

3-я – *зона ограничений* (годовая поглощенная доза гамма-излучения от 0,1 до 0,25 Гр).

Мероприятия, проводимые в этих зонах:

1. Оповещение населения об опасности.
2. Постоянный радиационный контроль.
3. Йодная профилактика.
4. Герметизация помещений.
5. Защита источников воды.
6. Блокирование 3-й зоны от въезда-выезда.
7. Ограничение времени пребывания людей на открытой местности во 2-й и 3-й зонах.
8. Эвакуация людей из 1- зоны.

5.2. Аварии на военных ядерных объектах

В течении 1956–1994 г. на атомных подводных лодках СССР произошло около 140 аварий, 31 из которых были обусловлены нарушениями в работе ядерных реакторов, включая расплавление и взрывы. В результате аварий погибло 641 человек. Внештатные ситуации на военных атомных кораблях приводят, как правило, к радиоактивному загрязнению, к сливу в акваторию океанов радиоактивных жидких отходов, дезактивирующих жидкостей и твердых радиоактивных отходов.

На подводных лодках США известно несколько случаев серьезных инцидентов. Атомная подводная лодка затонула в 1963 г. у побережья штата Массачусетс, в 1968 г. в Атлантическом океане в результате аварии затонула подводная лодка с двумя ядерными торпедами. Зафиксировано 13 случаев утечки радиоактивной жидкости из систем охлаждения реакторов, во время стоянки лодок в портах и доках. С атомного авианосца 1965 г сорвался и затонул у берегов Японии бомбардировщик с атомной бомбой. В ВМФ Великобритании с 1952–1978 г. возникли 712 инцидентов с ядерными реакторами.

В результате происшедших аварийных ситуаций на военных атомных кораблях 23 ядерных реактора с ядерным топливом затоплены в Мировом океане, 20 из которых принадлежали СССР. Что создает долговременную потенциальную угрозу радиоактивного загрязнения океанических биоценозов.

5.3. Аварии на ядерных объектах

Первые ядерные реакторы, построенные для получения оружейного плутония при делении урана, выбрасывали большое количество радиоактивных веществ в окружающую среду. Несовершенство технологии недостаток знаний

о последствиях радиоактивных загрязнений и стремлении к первенству в создании нового оружия приводило к масштабным повышением уровня радиоактивности.

Хэнфордский ядерный комплекс, построенный в 1943 г. на берегу реки Колумбия. Производства плутония сопровождалось выбросами радиоактивных веществ в атмосферу, порядка $530 \cdot 10^3$ Ки в течении 1944–1956 г и сбросом жидких радиоактивных отходов в реку от $8 \cdot 10^3$ до $50 \cdot 10^3$ Ки/сут в 1957 г. Повышенная концентрация техногенных радионуклидов обнаруживалось в радиусе 112 км. Более $20 \cdot 10^3$ детей получали вместе с молоком, пасшихся на пастбищах коров повышенные дозы радионуклидов. В 1979 г на АЭС в Три–Майл–Айленде в результате расплавления активной зоны реактора произошел выброс радиоактивных газов в атмосферу и жидких радиоактивных отходов в реку Саскугана. В 1971 г. штат Миннесота из переполненного хранилища ОЯТ в реку Миссисипи попало около $200 \cdot 10^3$ л радиоактивных отходов. В 1979 г. на заводе по производстве ядерного топлива – аварийный выброс высокообогащенного урана, облучение тысячи человек дозой в 6 раз превышающей норму. В 1994 г. на АЭС в штате Мичиган произошел серьезный инцидент и было сброшено $6 \cdot 10^3$ радиоактивной жидкости в оз. Эри. За период с 1951–1994 гг. в США произошло около 30 аварий разной степени сложности на ядерных объектах.

В Великобритании, Уиндскейле 1957 г. в следствии ошибки при эксплуатации в одном из реакторов повысилась температура, возник пожар, разгерметизировались 150 технологических каналов и произошел выброс радионуклидов: йода–131 $\sim 2 \cdot 10^4$ Ки, теллура–132 ~ 1200 Ки, цезия–137 ~ 600 Ки, стронция–89 ~ 80 Ки; стронция–90 ~ 2 Ки. Радиоактивное облако прошло над Южной Англией, Бельгией, Франкфурта–на–Майне, Южной Норвегией. Максимальное накопление йода–131 фиксировалось в молоке – 1,4 мКи/л в 16 км от реактора, 0,06 мКи/л – на расстоянии 80 км.

В России на производственном предприятии "Маяк" – Южный Урал – первом ядерном предприятии СССР – в течении 1946–1956 гг сбросы высокоактивных и среднеактивных жидких радиоактивных отходов осуществлялись в речную систему Теча–Исеть–Тобол. За 11 лет отработки ядерных технологий сброшено порядка $76 \cdot 10^6$ м³ жидких отходов с общей бета–излучательной активностью более $2,8 \cdot 10^6$ Ки. Радионуклиды: цезий–137 100–400 мКи/км, рутений–106, стронций–90, цирконий–95 и др. накапливаясь в данных отложениях и попадая в пищевые цепи оказали радиационное воздействие на $120 \cdot 10^3$ человек в диапазоне доз от 3 до 170 сЗв. В 1957 г на ПО "Маяк" вблизи г. Кыштым по технической неисправностям взорвалась емкость–80 т с высокоактивными радиоактивными отходами с общей активностью $20 \cdot 10^6$ Ки. Радиоактивное облако жидких и твердых аэрозолей поднялось на высоту 1–2 км и под действием ветра распространилось на территорию Челябинской, Свердловской и Тюменской областей. Основными компонентами радиоактивного загрязнения более $22 \cdot 10^3$ км² территории с численностью $270 \cdot 10^3$ человек составляли: церий–144 ~ 66 %, цирконий–95 и ниобий–95 ~ 25 %; стронций–9 и иттрий–90 ~ 5 %; цезий–137 $\sim 0,036$ %. Плотность загрязнения

территории варьировала в зависимости от эпицентра взрыва: 117 км² с плотностью загрязнения более 100 Ки/км²; 400 км² – более 10 Ки/км²; 23·10³ км² – 0,1 Ки/км². Диапазон доз внутреннего и внешнего облучения для населения составил от 3 до 57 с Зв.

Весной 1967 г с обсохших берегов открытого хранилища радиоактивных отходов оз. Карачай ПО "Маяк" пылевое облако, содержащее цезий–137 и стронций–90 с активностью порядка 600 Ки рассеялось по территории 2700 км², охватив 63 населенных пункта. Поглощенная доза внешнего облучения для населения составила 0,7–1,3 с Зв. Дозу внутреннего облучения оценить сложнее, т.к. пищевые продукты с инкорпорированными радионуклидами поступают в питание и в настоящее время.

В 1993 г. на Сибирском химическом комбинате Томск–7 произошел взрыв стального бака, содержащего 25³ раствора с 8773 кг урана, 310 г плутония, 248 г нептуния общей активностью 559 Ки. Через 150 метровую трубу смесь радиоактивных назов распространилась за пределы завода. Максимальное радиоактивное загрязнение порядка 10³ мкР/ч распространилось в пределах 6 км². Отмечено поверхностное загрязнение почв плутонием и стронцием–90. За время работы комбината официально признано 36 инцидентов, серьезных, соответствующих третьему уровню по международной шкале–5.

За период эксплуатации АЭС в СССР с 1966 г. по 1994 г. на 13 АЭС произошло 18 аварийных ситуаций, сопровождавшихся облучением персонала или радиоактивным загрязнением окружающей среды.

5.4. Чернобыльская катастрофа

Серьезным предостережением человечеству явилась авария в Чернобыле в апреле 1986 г. Ядерный реактор 4–го энергоблока выбросил в атмосферу 50 т ядерного топлива, которое испарилось и образовало громаднейший атмосферный резервуар долгоживущих радионуклидов, среди которых уран, плутоний, иод, стронций, цезий и многие др.

Кроме того, на загрязненных территориях были обнаружены "горячие" частицы, несущие большую активность (расчеты показывают, что локальная мощность дозы в биоткани на расстоянии 10–3 см от "горячей" частицы может достигать 1000 рад/ч). Еще около 70 т топлива было выкинуто в атмосферу с периферийных участков активной зоны боковыми лучами взрыва. Кроме топлива было выброшено около 700 тонн радиоактивного реакторного графита. Примерно 50 т ядерного топлива и 800 т реакторного графита остались в реакторе. В последующие дни этот графит выгорел и увеличил количество радиоактивных осадков. Для сравнения можно отметить, что масса радиоактивных веществ, образовавшихся в результате взрыва атомной бомбы, сброшенной на Хиросиму, составила 4,5 т. Чернобыльская катастрофа поставила в атмосферу долгоживущих радионуклидов в 600 раз больше, чем взрыв бомбы в Хиросиме.

К особенностям Чернобыльской аварии АЭС можно отнести двух недельный выброс радионуклидов. Вначале, в результате взрыва произошел выброс диспергированного топлива на высоту 1,5–2 км с составом радионуклидов аналогичным изотопом отработанного топлива. Во второй стадии (26 апреля–2 мая) продолжался вынос диспергированного топлива потоками горячего воздуха вместе с графитовой пылью. На третьей стадии в связи с повторным нагреванием остаточного тепловыделения увеличивается интенсивность выброса радионуклидов. Последняя стадия (5–6 мая 1986 г.) характеризовалась снижением в сто раз радиоактивных выбросов.

Авария в Чернобыле по глобальным последствиям представляет собой крупнейшую в истории человечества экологическую катастрофу: загрязнена радионуклидами территория суммарной площадью в сотни тысяч км², на которой проживают миллионы человек. В связи с небольшой высотой радиоактивных выбросов радиоактивное загрязнение произошло главным образом дождевыми и локальными радиоактивными осадками. Это обусловило пятнистый характер загрязнения в той или иной степени территории радиусом более 2000 км. Сотни тысяч гектаров сельскохозяйственных и лесных угодий, обширная сеть водных источников практически навсегда выведены из строя. Только в России на территории 14 областей и Республики Мордовия образовались зоны загрязнения местности цезием–137 с уровнем выше 1 Ки/км² общей площадью почти 55,1 тыс. км², среди которых 310 км² с уровнем загрязнения свыше 40 Ки/км². За время, прошедшее после катастрофы, увеличилось количество детей с врожденными пороками развития, особенно в зонах с высокой плотностью радиоактивного загрязнения (генетические последствия), возросла патология пищеварительной, мочевыделительной и эндокринной систем. Заболеваемость раком щитовидной железы у детей в Гомельской области Беларуси увеличилась с 0,25 на 100 тыс человек в 1986 г. до 12,0 в 1992 г. По прогнозу Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) к 2000 г. каждый 4–й житель Беларуси будет иметь злокачественную опухоль.

Радионуклидному загрязнению, оцениваемому по выпадению йода–131 подверглись обширные территории: Киев, Курск, Калуга, Смоленск, Ленинград., Ялта, Таллин, Запорожье, Новгород, Минск, Салехард, Ханты–Мансийск, Бийск, Барнаул, Благовещенск, Тбилиси, Батуми. Радиоактивные осадки зарегистрированы также в Швейцарии, Германии, Италии, Турции, Греции, Югославии, Великобритании, Канаде, США, Китае, Японии.

По оценке научных экспертов ООН коллективная эквивалентная доза радиоактивного загрязнения для населения планеты в результате Чернобыльской аварии составляет $600 \cdot 10^3$ человек–Зв, из них 40 % приходится на страны СНГ. Несмотря на отсутствие официальных данных, число умерших в результате катастрофы по различным оценкам составляет от $5 \cdot 10^3$ до $20 \cdot 10^3$ человек. Число облученных в различных дозах составляет $600 \cdot 10^3$ человек. Следовательно, Чернобыльская катастрофа привела к глобальным радиационным загрязнениям биосферы и последующим непрогнозируемым последствиям.

Атомные электростанции - это, на сегодняшний день, единственная разумная альтернатива углеводородной энергетике и, кроме того, один из самых надежных видов установок для получения энергии. Современные АЭС сконструированы таким образом, что могут выдержать землетрясение, цунами, падение самолета и многие другие катастрофы. При строительстве АЭС инженеры ориентируются на возможные источники опасности в данной конкретной местности и соответствующим образом рассчитывают надежность станций. Однако предсказать почти 9-балльное землетрясение вкупе с разрушительным цунами строители не смогли - и в итоге на АЭС "Фукусима" произошло сразу несколько аварий.

На момент землетрясения на "Фукусиме" работали только три энергоблока - с первого по третий. Реакторы в четвертом, пятом и шестом энергоблоках были заглушены для проведения плановой проверки. Сразу после возникновения подземных толчков работающие реакторы были автоматически заглушены - благодаря этому удалось избежать повторения Чернобыльской трагедии. АЭС находится недалеко от берега моря, и от возможных цунами ее защищала специальная стена, способная сдержать волну высотой до 5,7 метра. Высота водяной стены, обрушившейся на "Фукусиму-1" 11 марта, составила 14 метров.

Морская вода серьезно повредила электросети, снабжающие станцию энергией (плюс они были частично выведены из строя в результате землетрясения), и в итоге на "Фукусиме-1" отключилось электроснабжение. Некоторое время станция продержалась на дизельном генераторе, но потом отказал и он. Электричество необходимо АЭС, в частности, для того, чтобы поддерживать в рабочем состоянии систему охлаждения. Чтобы понять, зачем нужно охлаждение и чем грозит его отказ, необходимо разобраться в устройстве реактора "Фукусимы".

Теория

На японской АЭС работают водо-водяные реакторы - один из самых распространенных типов реакторов в мире. Источником энергии на таких АЭС (как, впрочем, и на всех остальных) являются реакции ядерного распада - на "Фукусиме-1" распадался уран, находившийся в форме диоксида урана. Таблетки диоксида урана уложены стопками друг на друга внутри так называемых топливных стержней толщиной примерно с карандаш. Помимо таблеток диоксида урана топливные стержни включают различные вспомогательные детали, в том числе защитную циркониевую оболочку, предохраняющую топливо от повреждений (эта оболочка понадобится для дальнейших объяснений). Вся эта конструкция целиком носит название тепловыделяющего элемента, или ТВЭЛа, так как ядерный распад сопровождается выделением очень большого количества тепла. ТВЭЛы, объединенные вместе называют тепловыделяющими сборками (ТВС), и именно в таком виде они находятся в реакторах.

При распаде нестабильные тяжелые ядра урана "разваливаются" на ядра более легких элементов, часть из которых также неустойчивы и впоследствии делятся на еще более мелкие ядерные "обломки". Помимо ядер более легких элементов в процессе распада выделяются нейтроны - элементарные частицы, входящие вместе с протонами в состав ядер всех элементов (исключением является только изотоп водорода протий).

Нейтроны вылетают из ядер с огромной скоростью и несут в себе много энергии. Если такой нейтрон столкнется с пока еще целым ядром урана, он может спровоцировать его спонтанное деление, которое, в свою очередь, также приведет к выбросу нейтронов. Последовательное выделение все большего и большего числа нейтронов и, соответственно, распад все новых ядер урана называют цепной реакцией.

Для того чтобы началась цепная реакция, недостаточно только наличия радиоактивных изотопов урана - если топлива мало или концентрация собственно нестабильных ядер в нем низка, то вероятность встречи вылетающих нейтронов с новыми ядрами оказывается низкой и большая их часть просто рассеивается в среде. Для того чтобы повысить шансы на столкновения нейтронов с ядрами, пространство между ТВСами в водо-водяных реакторах заполняют водой – образовавшиеся в результате распада ядер урана нейтроны сталкиваются с входящими в состав воды ядрами кислорода и водорода и при каждом столкновении чуть-чуть замедляются. Таким образом, H_2O не дает нейтронам улететь за пределы реактора, не выполнив свою работу.

Среда, в которой происходит цепная реакция ядерного распада, очень быстро нагревается, и это тепло служит для нагрева большого количества воды, превращающейся в пар. Пар подается на турбину, связанную с генератором электроэнергии. В большинстве современных АЭС с водно-водяными реакторами вращающий лопасти турбины пар образуется не из той же воды, которая замедляет нейтроны - такая схема опасна, так как вода-замедлитель неизбежно накапливает радиоактивные изотопы. "Грязная" вода передает тепло от реакций распада воде, циркулирующей в смежном контуре и прямо не контактирующей с реакционной средой (на реакторах "Фукусимы", созданных в конце 1960-х годов, турбину вращает та же вода, которая замедляет нейтроны). Отводить тепло от ТВСов необходимо не только для получения энергии - если их оставить оголенными и не охлаждать, то в реакторе начинает протекать пароциркониевая реакция, в которой участвует та самая защитная оболочка ТВСов.

Цирконий довольно легко взаимодействует с водяным паром при высокой температуре и давлении, а продуктами такого взаимодействия являются оксид циркония и водород. Если в реакторе накопится достаточно много водорода, то рано или поздно он прореагирует с кислородом воздуха и произойдет взрыв.

Практика

Именно такой сценарий реализовался на энергоблоках "Фукусимы-1". Из-за сбоя в подаче электроэнергии на систему отвода тепла от активной зоны температура в реакторах начала расти, и находящаяся между ТВСами вода стала постепенно испаряться. Когда ТВСы оголились, на них начала протекать пароциркониевая реакция, окончившаяся взрывом. Источником тепла в остановленных реакторах являются спонтанно распадающиеся ядра урана и нестабильные изотопы более легких элементов, образующиеся в ходе распада. Так как период полураспада многих из этих изотопов измеряется месяцами и даже годами, отработавшее топливо может "тлеть" очень долго.

Помимо накопления водорода и взрывов из-за подъема температуры в энергоблоках "Фукусимы" начали плавиться сами топливные стержни, и сейчас уран находится там не в форме компактных таблеток, а более или менее равномерно распределен по реакционной смеси. Казалось бы, какая разница, как именно распределен уран, если его количество не изменилось? Однако это неверное представление.

Когда радиоактивное топливо уложено в небольшие стержни, операторы могут легко управлять ходом ядерной реакции - в случае каких-либо сбоев в активную зону в непосредственной близости от ТВСов погружаются регулирующие стержни из материала, хорошо поглощающего нейтроны (в водо-водяных реакторах такой способ контроля используется обычно в случае аварий - при нормальной работе станции существуют другие механизмы управления интенсивностью реакций распада). Чаще всего регулирующие стержни расположены над активной зоной - они удерживаются на высоте за счет поля,

создаваемого электромагнитами, и в случае отключения питания просто падают вниз. На "Фукусиме-1" стержни находились под активной зоной, однако, по всей видимости, аварийные системы сработали штатно и успели заглушить реакцию в энергоблоках.

Стержни позволяют моментально прекратить цепную реакцию, но только в том случае, если топливо находится рядом с ними. После частичного расплавления таблеток диоксида урана управлять ходом распадов при помощи стержней стало невозможно. Именно по этой причине взорвавшиеся реакторы в качестве крайней меры заливали водой с борной кислотой - бор очень эффективно задерживает нейтроны. Но распадаться различные нестабильные изотопы будут еще очень долго.

Накопившийся в реакторах водород был стравлен в помещения энергоблоков, где он и взорвался. Однако при взрывах, по-видимому, были повреждены защитные оболочки реакторов (контейнменты), что создает угрозу выхода радиоактивных веществ за пределы энергоблоков.

Как сообщили автору источники, близко знакомые с ситуацией на "Фукусиме", на сегодня эксперты не могут дать точных прогнозов развития ситуации. Страшного взрыва с выбросом в окружающую среду огромного количества радиоактивных изотопов, как в Чернобыле, уже не будет, однако несколько дней назад появились сообщения, что в энергоблоках станции зарегистрированы нейтронные пучки - признак того, что где-то в реакционной смеси идет цепная реакция.

Еще одна опасность - это хранилища ядерного топлива, в том числе отработанного. Топливо хранится в форме ТВСов, погруженных в бассейны с водой. На "Фукусиме" такие бассейны располагаются в энергоблоках и из-за взрывов и повышения температуры топливные стержни в них тоже расплавились. Недавно появились сообщения, что в почве рядом с АЭС обнаружен плутоний - не исключено, что он вытек из хранилища топлива в третьем энергоблоке - как уточнил источник, именно в третьем блоке - единственном из шести - используется уран-плутониевое топливо.

Последствия

Из-за того, что на данный момент неясно, как дальше будет развиваться ситуация на станции, последствия для людей предсказать тоже непросто. Но на данный момент "Фукусима-1" не представляет большой опасности для жителей Японии. Как рассказал "Ленте.Ру" руководитель Национального радиационно-эпидемиологического регистра, заместитель директора МРНЦ РАМН, член-корреспондент РАМН, доктор технических наук, профессор, содиректор Сотрудничающего центра ВОЗ по радиационной эпидемиологии и подготовке кадров, член Научного комитета ООН по действию атомной радиации, заместитель председателя Российской научной комиссии по радиационной защите Виктор Иванов, точной оценки доз облучения, полученных японцами, которые жили в границах теперешней зоны отчуждения, пока нет. Однако даже среди спасателей, которые работали совсем рядом с реакторами, только 10-15 человек "схватили" дозу больше ста миллизиверт.

Иванов добавил, что на сегодня не существует данных, которые бы подтверждали, что при получении такой дозы у человека повышается риск развития раковых заболеваний. Опасность начинается при дозах от 150 миллизиверт, а смертельной считается доза в 4-6 зиверт (то есть в 4000-6000 миллизиверт).

образуется в реакторе как один из продуктов распада. Специалисты предполагают, что радиоактивный иод скапливается в воде, которой заливают реакторы, испаряется и вместе с осадками выпадает над океаном.

Иванов рассказал, что он и его сотрудники в Сотрудничающем центре ВОЗ моделируют различные варианты развития событий в Японии и имитируют те или иные дозы радиоактивного излучения, полученные населением, и пока все модели указывают, что действия властей Японии вполне компетентны и позволяют населению не "схватить" дозу более сотни миллизиверт. Однако Иванов отметил, что все эти оценки очень грубые и предварительные - у специалистов пока нет фактических данных о том, сколько времени люди находились поблизости от станции, что они ели, пили и так далее.

Радиация, утечку которой с АЭС «Фукусима-1» не смогли предотвратить японские специалисты, продолжает расползаться по миру.

Так, во вторник Агентство по защите окружающей среды США сообщило, что обнаружило радиацию в дождевой воде на северо-востоке страны. Между тем, министерство по защите окружающей среды Китая зафиксировало содержание радиоактивного йода-131 в прибрежных районах, в том числе в Цзянсу, Шанхае и Гуандуне, сообщает «Интерфакс».

Вьетнамские экологи также обнаружили небольшое количество радиации в воздухе. Институт ядерной безопасности Южной Кореи сообщил об обнаружении йода-131 в Сеуле и семи других районах страны.

Правительство Японии тем временем повысило уровень тревоги в стране до максимального. Об этом заявил во вторник премьер-министр Наото Кан. Выступая в парламенте, Н. Кан сказал, что ситуация на АЭС «Фукусима» остается непредсказуемой.

«Ситуация очень тяжелая, — заявил в свою очередь генеральный секретарь кабинета министров Юкио Эдано — Мы предпринимаем все меры, чтобы остановить полонку. Мы должны не допустить перегрева урановых стержней».

В почве в районе АЭС обнаружено некоторое количество плутония. Кроме того, за пределами помещения, где находятся реакторы, была обнаружена радиоактивная вода. По некоторым данным, утечка произошла из второго реактора.

На японских АЭС «Фукусима-1» и «Фукусима-2» после разрушительного землетрясения 11 марта текущего года был введен режим ЧС из-за выхода из строя систем охлаждения. На «Фукусиме-1» произошли взрывы на первом, втором и третьем реакторах, пожар на четвертом энергоблоке. В результате инцидентов на АЭС произошло несколько утечек радиации, что заставило власти эвакуировать людей из 20-километровой зоны вокруг станции, а также ввести запрет на полеты в радиусе 30 километров.

Из фундамента АЭС «Фукусима-1» вытекает радиоактивная вода с примесями йода-131 и цезия, а также, вероятно, с еще более опасными плутонием и даже полонием. Зараженная вода в Тихом океане будет испаряться и облучать легкие людей в радиусе 300 км.

Оператор «Фукусимы», компания ТЕРСО, по-прежнему утаивает информацию об обстановке на АЭС. Известно лишь, что фундамент второго реактора дал течь и в воды Тихого океана стекает радиоактивная вода. Сначала ее поток пытались

отследить с помощью красителей, тщетно пробовали забивать брешь полимером с опилками и бумагой, а теперь собираются просто сбросить в море 11,5 тысячи тонн радиоактивной воды, чтобы освободить место для еще более радиоактивной жидкости. Никто так и не может разъяснить обществу, какие вещества и в каких количествах поступают в Тихий океан.

Попадание радиации в океан в первую очередь обернется «эффектом аэрозоля», говорит профессор кафедры биофизики, радиационной физики и экологии МИФИ Евгений Крамер-Агеев.

«Зараженная вода, хоть не ясна степень ее радиоактивности, будет испаряться в воздух и вместе с ним проникать в легкие людей, что поспособствует развитию онкологических заболеваний и ожогу легких», — разъясняет профессор. По его словам, вдыхать насыщенный радиацией кислород будут все живые существа в радиусе около 300 километров от места заражения воды. Крамер-Агеев ссылается на результаты советских экспериментов, показавших, что соль Черного моря преодолевает именно такое расстояние от побережья. Судя по карте, радиоактивная соль с пока не известной дозой радиации может угрожать соседним с Фукусимой префектурам — Тиба, Мариока, Ниигата. То есть потенциально заражение распространится почти на половину крупнейшего японского острова Хонсю. Радионуклиды могут добраться до человека через мясо тихоокеанской рыбы и прочей живности. «Эти вещества, в особенности йод, будут поглощаться планктоном, вместе с ним оседать на дно, где уже планктон будет съеден рыбой. Так отравится рыба», — добавляет Крамер-Агеев.

Любопытно, что последствия одной и той же дозы облучения для человека и мелких обитателей моря и суши различны. Например, животным габаритами с мышь для опасной дозы облучения нужно не менее 6–8 зивертов, а человеческому организму будет причинен непоправимый вред радиацией в 4,5–5 зивертов. В 50% случаев для человека такая доза — верная смерть.

Из-за отсутствия точной информации с «Фукусимы» эксперты полагаются лишь на личный опыт, а он подсказывает, что в воде присутствуют йод, цезий и плутоний, говорит бывший инженер Росатома Леонид Бочаров, ранее проектировавший атомные реакторы. «На „Фукусиме“ используется смешанное топливо, в его состав входит не меньше 3% плутония», — рассказывает эксперт «Труду».

Реакторы японской АЭС еще долгие годы будут оставаться пороховой бочкой для окружающего мира. Леонид Бочаров объясняет, что японцы, предотвращая атомные взрывы, заливали реакторы водой, и это привело к образованию солевой накипи в реакторе. Теперь эти отложения работают как теплопроводники, за счет которых температура реакторов повышается до 1200 градусов.

«Выход один — ждать постепенного остывания несколько лет, а чтобы радионуклиды не распространялись, придется накрыть станцию бетонным саркофагом, как это было сделано после аварии на Чернобыльской АЭС», — утверждает инженер.

Тем временем эксперты опасаются, что третий реактор АЭС «Фукусима» тоже может дать течь. «Там содержится очень опасное вещество — полоний. Даже самая малая его доза способна отравить тысячи человек», — добавляет Бочаров.

Не менее опасны для организма человека и другие вещества, которые вместе с радиоактивной водой попадают в мировой океан. В частности, йод влияет на щитовидную железу, но в атмосфере распадается за восемь дней.

Хуже обстоят дела с цезием и стронцием: им для полураспада требуется около 30 лет. Но если цезий в организме оседает в мышцах, откуда быстро выводится, то стронций откладывается в костях, где остается уже навсегда.

Еще более разрушительное действие оказывает плутоний. Попадая в легкие человека, он приводит к появлению раковой опухоли. Для полураспада плутония потребуется 26 тысяч лет. Полонию для самоликвидации нужно 138 дней, однако за это время он успевает либо убить клетки, либо заставить их мутировать.

5.5. Экологические последствия аварий на ядерных установках

Все инциденты на ядерных установках приводят к выбросам радионуклидов в окружающую среду. В зависимости от интенсивности выбросов проводятся мероприятия по частичной нейтрализации. Наиболее загрязненный почвенный слой снимается, свозится в отстойники. Радионуклиды, попавшие в атмосферу и водоемы, распространяются в соответствии с розой ветров течением, выпадают с осадками, накапливаются в донных отложениях и включаются в пищевые цепи естественных и сельскохозяйственных биоценозов. Аварии на атомных судах, затопленные контейнеры с твердыми радиоактивными отходами, атомные реакторы, жидкие радиоактивные отходы, сливаемые в моря приводят к широкомасштабному загрязнению флоры и фауны долгоживущими радионуклидами, концентрации их в морских пищевых продуктах.

Большую опасность для выживаемости животных и здоровья людей представляют "горячие частицы", присутствующие в различных концентрациях при аварийных выбросах. Горячая частица – образование любого радионуклидного и химического состава размером до 50 мкм с удельной активностью 5 Бк (Хитров, 1990). В связи с высокой активностью – на 1 Г сотни и тысячи Ки, излучая α -, β -, γ -излучения при попадании в организм горячие частицы локально воздействуя на биологические ткани вызывают омертвление, микроязвы, фиброзы и онкологические заболевания. В Чернобыле активность частиц составляла от 10^3 – 10^4 Бк, при наличии в 1 м³ воздуха от 3 до 1400 горячих частиц. В составе частиц содержится как комплекс изотопов: Се–141, 144, Zr–95, Nb–95, Cs–134, 137, Ru–103, так и отдельные: уран–235, плутоний–239, америций–241 и т.д. Горячие частицы были обнаружены в окружающей среде после аварии 1993 г. в Северске, в данных отложениях р. Енисей, аэрозолях в окрестностях завода химконцентратов г. Новосибирска.

Попадание горячих частиц в водные экосистемы приводит к их деградации и увеличению концентрации радионуклидов на уровне консументов – рыбе, водоплавающей птице и т.д.

Радиоактивные загрязнения, после аварии на Чернобыльской АЭС сконцентрировались в почве и дерновине 60–80 %, в травостое 20–40 %. На площади в 4 км², где поглощенная доза составила более 50 Гр погибли наиболее чувствительные хвойные леса. Лиственные деревья – береза, ольха, дуб пострадали только в непосредственной близости от реактора. Сообщества травянистых растений в диапазоне поглощенных доз в пределах 100 Гр практически не пострадали. В первые месяцы после аварии наблюдалось обеднение и значительное снижение почвенной фауны в непосредственной близости от аварийного блока, которая восстановилась через 2–3 года. Аналогичное снижение численности популяций наблюдалось и у мышевидных грызунов, которое восстановилось и даже превысило первоначальную

численность в последующие годы, несмотря на достаточно высокую эмбриональную и постэмбриональную смертность ~ 67 %.

Эвакуация населения в 30 км зоне станции, снижение фактора беспокойства для животных, необрушенные урожаи сельскохозяйственной продукции создали своеобразные заповедные условия. В результате численность птиц всех охотничьих видов зверей возросла. Следовательно, устойчивость природных экосистем к радиоактивным загрязнениям значительно превышает устойчивость организма человека. Накопление радионуклидов в пищевых цепях экосистем, распространение их вместе с продуктами питания в большей степени опасно для здоровья и выживаемости человека.

ГЛАВА VI. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРОВАННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Каждое живое существо на Земле постоянно подвергается воздействию ионизирующей радиации: она поступает к нему из космоса, из глубин Земли и даже от других живых организмов, а в 20-м веке еще и от рукотворных источников излучения. Радиацию нельзя только восхвалять или только проклинать. Она, как и многие другие природные явления, двулика—добрый слуга и злой хозяин. Не будь естественного фона на Земле, не было бы и многих генетических мутаций. А если бы не было достаточного количества генетических мутаций, природа во многом утратила бы свое разнообразие. И без этого разнообразия естественный отбор не мог бы сотворить такое богатство (в том числе и генетическое) органического мира, которое мы наблюдаем. Существует даже гипотеза, в которой утверждается, что ионизирующее излучение было одним из факторов, способствовавших зарождению жизни на нашей планете.

6.1. Первичные нарушения под влиянием ионизирующего излучения

Облучение водных растворов биосистем приводит к радиационно-химическим изменениям веществ.

Прямое действие излучения заключается в непосредственном влиянии кванта или ионизирующей частицы на молекулы. Непрямое действие излучения проявляется в изменении состояния молекул под действием активных продуктов радиолитической воды. Опосредственное влияние излучения реализуется в активации органических молекул и их влиянии в виде радикалов, перекисей и т.д. на другие молекулы. Растворы органических веществ при облучении образуют возбужденные молекулы, ионы, свободные радикалы. Вступают в реакции окисления, восстановления. Происходят разрывы ковалентных, водородных связей, полимеризация, изменения вторичных структур и конформации макромолекул.

С позиций современной науки механизм биологического действия ИИ условно можно подразделить на:

- первичные физико-химические процессы, возникающие в молекулах живых клеток и окружающего их субстрата;
- нарушения функций целого организма как следствие первичных процессов.

В результате облучения в живой ткани, как и в любой среде, поглощается энергия и возникают возбуждения и ионизация атомов облучаемого вещества. Поскольку у человека (и млекопитающих) основную часть массы тела составляет вода (около 75%), первичные процессы во многом определяются поглощением излучения водой клеток, ионизацией молекул воды с образованием высокоактивных в химическом отношении свободных радикалов водорода H^* , гидроксила OH^* , гидратированного электрона $e_{фг}$ и последующими цепными каталитическими реакциями (в основном окисление этими радикалами молекул белка). Это есть косвенное (непрямое) действие излучения через продукты радиолиза воды. Прямое действие ИИ может вызвать расщепление молекул белка, разрыв наименее прочных связей, отрыв радикалов и другие денатурационные изменения.

Необходимо заметить, что прямая ионизация и непосредственная передача энергии тканям тела не объясняют повреждающего действия излучения. Так, при абсолютно смертельной дозе, раной для человека 6 Гр на все тело, в 1 см³ ткани образуется 10¹⁵ ионов, что составляет одну ионизованную молекулу воды из 10 млн. молекул. (Если бы такое количество поглощенной энергии (6 Дж/кг) поступило в организм в виде обыкновенного тепла, то при этом тело человека нагрелось бы примерно на 0,001⁰ С–и только.)

В дальнейшем под действием первичных процессов в клетках возникают функциональные изменения, подчиняющиеся уже биологическим законам жизни и гибели клеток.

Наиболее деструктивные изменения в биосистемах происходят при взаимодействии радикалов, образовавшихся при облучении, с нуклеиновыми кислотами. Радикалы OH^* реагируют с основаниями. Поэтому при синтезе нуклеиновых кислот нарушается комплиментарность оснований, потеря оснований, разрыв мостиков в структуре ДНК и нарушению целых сегментов в молекуле ДНК, что приводит к разрушению хромосом. Присутствие кислорода в 2-3 раза. Пострадиационные изменения при сублетальных дозах облучения проявляются в активизации репарирующих ферментов, находящихся в клеточном ядре. ДНК–полимеразы восстанавливают разрушенные сегменты в ДНК, ДНК–лигазы ликвидируют одиночные разрывы, поврежденные основания выщепляются инцизионными ферментами и последующим восстановлением с помощью ДНК–полимераз.

В случае недостаточной эффективности репарирующих ферментов при больших дозах облучения ДНК деградирует и клетка гибнет. В выживающих клетках происходят серьезные изменения:

- повреждение механизма *мейоза* – процесса деления созревающих половых клеток (гамет), в результате которого происходит

уменьшение (редукция) числа хромосом и переход клеток из диплоидного в гаплоидное состояние [греч. мейозис – уменьшение, убывание];

- повреждение механизма *митоза* – непрямого деления ядра клетки и ее тела, обеспечивающего равномерное распределение генетического материала между двумя дочерними клетками [греч. митос – нить] и хромосомного аппарата облученной клетки. Причем самые ранние эффекты в клетках вызываются не митотической гибелью, а обычно связаны с повреждением мембран;
- блокирование процессов обновления и дифференцировки клеток;
- блокирование процессов *пролиферации* (разрастания тканей организма путем митотического новообразования клеток [лат. – пролес – отпрыск, потомство; ферре – нести]) и последующей физиологической регенерации тканей.

Наиболее радиочувствительными являются клетки постоянно обновляющихся (дифференцирующихся) тканей некоторых органов (костный мозг, половые железы, селезенка и т.п.). причем стволовые и пролиферативные клетки, претерпевающие множество делений, обладают самой высокой чувствительностью. Изменения на клеточном уровне и гибель клеток приводят к таким нарушениям в тканях, в функциях отдельных органов и в межорганных взаимосвязанных процессах организма, которые вызывают самые различные последствия для организма вплоть до его гибели.

В биологических системах наблюдается множество разнообразных радиационных эффектов. Возможные последствия облучения для людей можно классифицировать следующим образом:

- соматические эффекты;
- соматико-стохастические эффекты;
- генетические эффекты.

Соматические (телесные) эффекты – это последствия воздействия облучения на самого облученного, а не на его потомство. Соматические эффекты облучения делят на стохастические (вероятностные) и нестохастические.

К нестохастическим соматическим эффектам относят поражения, вероятность возникновения и степень тяжести которых растут по мере увеличения дозы облучения и для возникновения которых существует дозовый порог. К соматическим эффектам относятся хроническая и острая лучевая болезнь человека и локальные лучевые повреждения, например, локальное незлокачественное повреждение кожи (лучевой ожог), катаракта глаз (потемнение хрусталика), повреждение половых клеток (кратковременная или постоянная стерилизация) и др. Время появления максимального эффекта также зависит от дозы: после высоких доз он наступает раньше.

Нестохастические эффекты проявляются при достаточно высоком или аварийном облучении всего тела или отдельных органов. Порог эффекта зависит от органа или ткани.

К соматико-стохастическим эффектам относят сокращение продолжительности жизни, злокачественные новообразования и опухоли, индуцированные ионизирующим излучением. Вероятность их появления зависит от дозы облучения и не исключается при малых дозах, т.к. условно полагают, что соматико-стохастические эффекты не имеют дозового порога.

Стохастическими эффектами считаются такие, для которых от дозы зависит только вероятность возникновения, а не их тяжесть, и отсутствует дозовый порог. Основными стохастическими эффектами являются генетические – хромосомные aberrации, а также доминантные и рецессивные мутации генов. (Хромосомные aberrации заключаются в изменении числа или структуры генов. К доминантным мутациям генов относятся такие, которые проявляются сразу в первом поколении потомков. Рецессивные мутации генов могут проявляться лишь в случае, когда у обоих родителей мутантным является один и тот же ген; такие мутации могут не проявиться на протяжении многих поколений или не обнаружиться вообще). Оба типа аномалий могут привести к наследственным заболеваниям в последующих поколениях, а могут и не проявиться вообще. Типичным проявлением радиационного стохастического эффекта являются врожденные уродства, возникающие в результате мутаций и других нарушений в половых клеточных структурах, отвечающих за наследственность. Многие из эмбрионов и плодов с тяжелыми наследственными нарушениями не доживают до рождения; согласно статистике, около половины всех случаев спонтанного аборта связаны с аномалиями в генетическом материале. Но даже если дети с наследственными дефектами рождаются живыми, вероятность для них дожить до своего первого дня рождения в пять раз меньше, чем для нормальных детей.

Генетические эффекты так же, как и соматико-стохастические, не исключаются при малых дозах облучения и так же условно не имеют порога. В частности, у людей, получающих малые дозы облучения, наблюдается повышенное содержание клеток крови с хромосомными нарушениями. Этот феномен при чрезвычайно низком уровне облучения был отмечен, например, у жителей курортного местечка Бадгастайн в Австрии и там же среди медицинского персонала, обслуживающего радоновые источники с целебными, как полагают, свойствами. Во всех странах среди персонала АЭС, который получает дозы, согласно международным стандартам, уровня, также обнаружены хромосомные аномалии.

Поскольку соматико стохастические и генетические эффекты облучения имеют вероятную природу и длительный латентный период, измеряемый десятками лет после облучения, они трудно обнаруживаемы. Выход обоих эффектов определяется суммарной накопленной дозой независимо от того, получена она за 1 сутки или за 50 лет. Однако у исследователей есть веские основания считать, что число не очень существенных дефектов значительно превышает число серьезных аномалий, так что наносимый ими ущерб в сумме может быть даже больше, чем от серьезных дефектов. Последние эпидемиологические данные говорят о том, что нижний предел воздействия ИИ отсутствует, поэтому в связи с радиационным загрязнением биосферы важно

ответить на ряд вопросов, окончательно не разрешенных до сегодняшнего дня, а именно:

1. Каков характер зависимости «доза – биологический эффект» для малых доз излучения при хроническом облучении?
2. Каким образом суммируются для биосистем различного уровня организации малые дозы излучения?
3. Какова вероятность раковых заболеваний, врожденных недостатков, стерильности и импотенции при уровне радиации, принятом в качестве допустимого, т.е. какова степень риска при малых дозах облучения?

Гораздо лучше изучены последствия облучения сублетальными дозами ионизирующей радиации, т.е. не приводящими к смертельному исходу в течение определенного срока наблюдения [лат. суб – под], при этом установлены следующие основные эффекты:

1. Снижение общей и специфической резистентности организма.
2. Снижение демоэкологических показателей популяции – уменьшение средней продолжительности жизни, уменьшение прироста популяции в результате стерилизации.
3. Повышение частоты сублетальных мутаций, проявляющихся во 2-м или 3-м поколениях.
4. Дробное облучение обладает кумулятивным эффектом и в результате также вызывает необратимые изменения в организме.
5. Разные виды организмов, а также органы и ткани особей обладают неодинаковой радиорезистентностью.

Диапазон устойчивости живых организмов простирается от грея до десятков килогрей. Так, значение $СД_{50}$ для бактерий может достигать 10 кГр, растений – 1 кГр, членистоногих – 500 Гр. Для млекопитающих характерны гораздо меньшие значения $СД_{50}$ – от 0,5 до 4 Гр.

Наименьшая доза, при которой наблюдают гибель 100% облученных за определенный срок (обычно в течение 30 суток после облучения), т.е. минимальная абсолютно смертельная доза (МАСД), составляет для человека 6 Гр (600 рад) при относительно равномерном облучении всего тела. При этом различные органы и ткани человеческого организма обладают неодинаковой радиочувствительностью. Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы теряют способность нормально функционировать уже при дозах облучения от 0,5 до 1,0 Гр (50 – 100 рад). Облучение семенников дозой в 0,1 Гр приводит к временной стерильности мужчин, а дозы свыше 2 Гр могут привести к постоянной стерильности, к тому же установлен и такой эффект: суммарная доза облучения, полученная семенниками в несколько приемов, для них более, а не менее опасна, чем та же доза, полученная за один прием. Яичники гораздо менее чувствительны к действию радиации, по крайней мере у взрослых женщин, но однократная доза больше 3 Гр все же приводит их к стерильности, хотя еще большие дозы при дробном облучении никак не сказываются на способности к деторождению. В

то же время многие органы и ткани взрослого человека относительно мало чувствительны к действию радиации.

Например, почки выдерживают без особого вреда для себя суммарную дозу около 23 Гр, полученную дробно в течение 5 недель, печень – по меньшей мере 40 Гр за месяц, мочевого пузыря – 55 Гр за четыре недели, а зрелая хрящевая ткань – до 70 Гр.

Крайне чувствительны к действию радиации дети. Относительно небольшие дозы при облучении хрящевой ткани могут замедлить или вовсе остановить рост костей, что приводит к аномалиям развития скелета, и, по-видимому, для такого действия радиации не существует никакого порога. Оказалось также, что облучение мозга при лучевой терапии может вызвать изменения в его характере, привести к потере памяти, а у очень маленьких детей – к слабоумию и идиотии. Весьма чувствителен к действию радиации и мозг плода, особенно если мать подвергается облучению между восьмой и пятнадцатой неделями беременности. В этот период у плода формируется кора головного мозга, и существует большой риск того, что в результате облучения матери (например, при лучевой терапии) родится умственно отсталый ребенок. И это не единственный эффект облучения. После облучения плодов и эмбрионов животных в период их внутриутробного развития было обнаружено немало других серьезных последствий, включая пороки развития, недоразвитость и летальный исход.

Следует также отметить, что облучение в терапевтических дозах, как и всякое другое облучение, может вызвать заболевание раком в будущем или привести к неблагоприятным генетическим последствиям.

Таким образом, *между величиной поглощенной дозы в организме и средней продолжительностью жизни существует строгая зависимость*, определяемая различиями в радиочувствительности отдельных жизненно важных (критических) систем.

Еще в 40-х годах исследованиями Б. Раевского и Г. Квастлера было обнаружено, что в определенных диапазонах, несмотря на увеличение дозы, средние сроки гибели мышей не меняются. Соответствующая кривая, описывающая зависимость средней продолжительности жизни мышей от дозы облучения, состоит из трех участков (рис. III.38). Начальный участок охватывает период от нескольких недель до нескольких дней и соответствует дозам до 10 Гр. Далее следует плато, где средняя продолжительность жизни не изменяется, несмотря на увеличение дозы от 10 до 100 Гр. На третьем участке показано, что при последующем увеличении дозы средняя продолжительность жизни снова резко укорачивается от нескольких дней до нескольких часов. Рассмотренные участки кривой отражают *основные клинические синдромы* - костномозговой (кроветворный), желудочно-кишечный и церебральный, развивающиеся вследствие необратимого поражения соответствующих критических систем организма — кроветворной, кишечника и ЦНС.

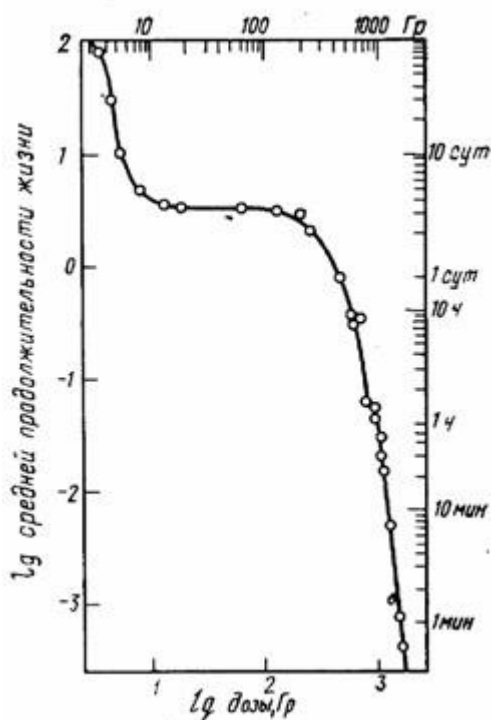


Рис. III.38. Зависимость средней продолжительности жизни мышей после однократного рентгеновского облучения от дозы (двойная логарифмическая шкала) (по Б. Раевскому, 1954)

Ступенчатый характер отмирания, связанный с выходом из строя критических систем, к настоящему времени обнаружен для самых разнообразных живых объектов (рис. III.39).

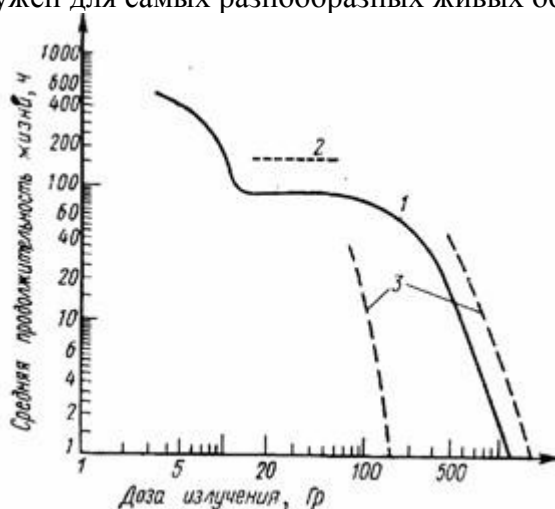


Рис. III.39. Зависимость средней продолжительности жизни млекопитающих от дозы облучения (1) и ее отклонения (2, 3), полученные разными авторами на мышах, крысах, хомячках, морских свинках и обезьянах (по В. Бонду и др., 1971)

Показано (И. Б. Бычковская, 1970) наличие такой закономерности для земноводных (лягушки), насекомых (амбарные долгоносики, бокоплавцы, дрозофилы), червей и даже растений.

Таким образом, ступенчатая зависимость времени наступления гибели самых разнообразных объектов от дозы, отражающая многосистемность в реакции на облучение, — общебиологическая закономерность. Разрыв между дозами, начинающими вызывать определенные формы гибели, указывает на разницу в радиочувствительности ответственных систем (по критерию поражения, несовместимого с жизнью).

Наличие плато на кривой (рис. III.39) свидетельствует о пороговости регистрируемого эффекта, поэтому несовместимое с жизнью повреждение той или иной системы наступает по

достижении определенного уровня поражения, т. е. имеет пороговый характер. Области перегиба кривой соответствуют дозам, при которых возможны те или другие формы гибели вследствие индивидуальных вариаций радиочувствительности смежных систем.

Аналогичное изменение средней продолжительности жизни, определяемое дозой облучения, показано и для человека. На рис. III.40 хорошо видны три области насыщения эффекта. Основываясь на клинической картине поражения, их связывают с теми же тремя патогенетическими механизмами поражения, приводящими организм к гибели. При дозах облучения, когда средняя продолжительность жизни не превышает 40 сут, на первый план выступает нарушение гемопоэза; при больших дозах (продолжительность жизни около 8 сут) ведущими становятся проявления поражения кишечника, а при еще больших (> 30 Гр; продолжительность жизни ~ 2 сут и менее) развиваются церебральные симптомы.

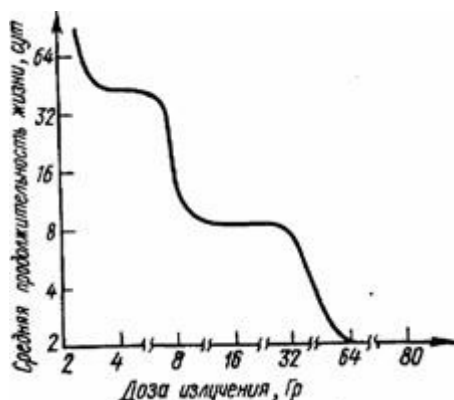


Рис. III.40. Зависимость средней продолжительности жизни человека и обезьян от дозы облучения (полулогарифмическая шкала) (по Р. Аллену и др., 1960)

Состояние устойчивого динамического равновесия любой клеточной популяции в живом организме, необходимое для нормальной жизнедеятельности, поддерживается системами обновления клеток; любая потеря клеток (вследствие их гибели или миграции) в системе количественно восполняется возникновением новых клеток, что обеспечивает неизменность функции. Клетки каждого типа имеют свою характерную для них продолжительность жизненного цикла и соответственно различаются темпом обновления.

Таким образом, *взрослый организм постоянно находится в состоянии строго сбалансированного клеточного самообновления*, происходящего непрерывно в ряде его жизненно важных систем.

Ежеминутно в каждой из них отмирают десятки и сотни тысяч «отслуживших» клеточных элементов, заменяясь новыми, заведомо готовыми «пожертвовать» собой через строго определенный срок - и так до конца жизни организма. Такое устойчивое равновесие в системах клеточного самообновления, являющееся необходимым условием надежности поддержания жизнеспособности организма, получило название *клеточного гомеостаза*.

Применительно к рассмотренным выше основным радиационным синдромам две из таких самообновляющихся систем (в основном определяющие выживание или гибель облучаемого организма) — кроветворная и желудочно-кишечная — характеризуются большой скоростью клеточного обновления. В третьей — ЦНС — у половозрелых животных и у взрослого человека клеточного обновления практически не происходит.

Костный мозг обладает крайне высокой радиочувствительностью, в связи с чем поражение системы кроветворения всегда наблюдается в той или иной степени при общем облучении как его типичное проявление. Поэтому на примере костного мозга будут рассмотрены общие принципы функционирования самообновляющейся системы, которые в полной мере сохраняют свое значение для любой другой системы клеточного обновления.

Основное назначение костного мозга — продукция зрелых высокодифференцированных клеток крови. В нормальных условиях гибель или исчезновение каждого клеточного элемента в периферической крови или в другом участке организма компенсируется образованием в среднем одной клетки в костном мозге.

По меткому выражению В. Бонда, костный мозг представляет собой «фабрику», производящую клетки, а периферическая кровь - «службу сбыта» организмом уже зрелых элементов.

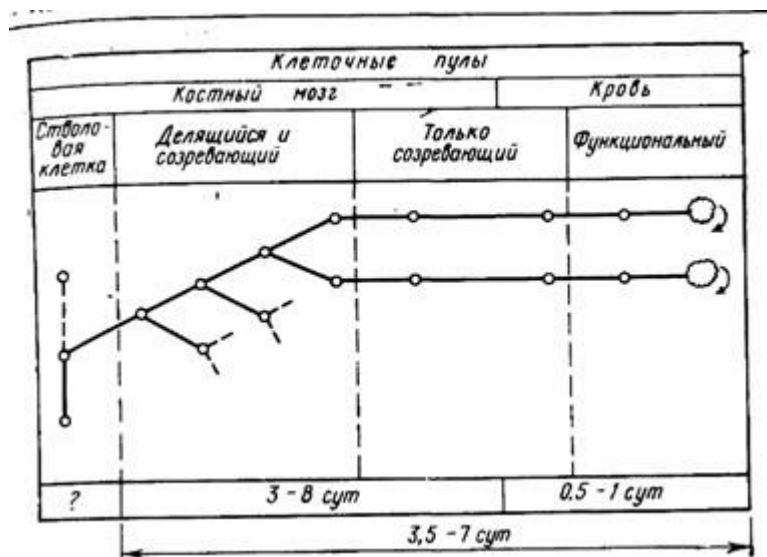


Рис. III.41. Модель системы клеточного обновления (по В. Бонду и др., 1971)

Время, указанное в нижней части рисунка, отражает порядок величин, характерных для гранулоцитопоза млекопитающих, в том числе и человека

На рис. III.41 изображена упрощенная модель системы клеточного обновления применительно к млекопитающему, состоящая, как и любая система клеточного обновления, из нескольких пулов. Прежде всего, это самоподдерживающийся фонд недифференцированных предшественников — *стволовых (клоногонных) клеток*, способных обеспечить постоянную скорость клеточного обновления в системе. При делении стволовых клеток часть их потомства предназначается для последующей дифференциации в специфические клеточные линии, а оставшиеся служат новыми стволовыми клетками.

Пройдя одно или несколько делений, клетка постепенно дифференцируется, затем, утратив способность делиться, входит в *непродливающий пул*, где окончательно созревает и становится функционально полноценной. Ясно, что цитокинетика той или иной системы обновления предопределяется уровнем митотической активности и продолжительностью отдельных фаз клеточного цикла.

Общий принцип, обеспечивающий устойчивую работу любой системы клеточного обновления (имеется в виду поддержание ее в состоянии количественного и качественного динамического равновесия), состоит в том, что по мере отмирания и удаления зрелых клеток из функционального пула вместо каждой из них поступает новая, находящаяся в этот момент на стадии максимальной подготовленности.

Таким образом, функционирующая система самоподдерживается из-за необходимости восполнения постоянно происходящих утрат, являющихся своеобразным стимулом к активации всех предшествующих пулов, в результате чего и осуществляется *перманентное клеточное обновление*.

Под действием излучения в любой клеточной системе обновления происходят резкие нарушения динамического равновесия между отдельными пулами, приводящие к тяжелым функциональным расстройствам в самой системе, а в зависимости от ее значения для жизнедеятельности и к соответствующим последствиям в организме.

Качественное представление о механизме этих нарушений следует из анализа реакций облученных клеток, закономерности которых в целом сохраняются и для тканевых систем в живом организме. Это основные радиобиологические реакции клеток, определяющие типичные нарушения в любой системе обновления.

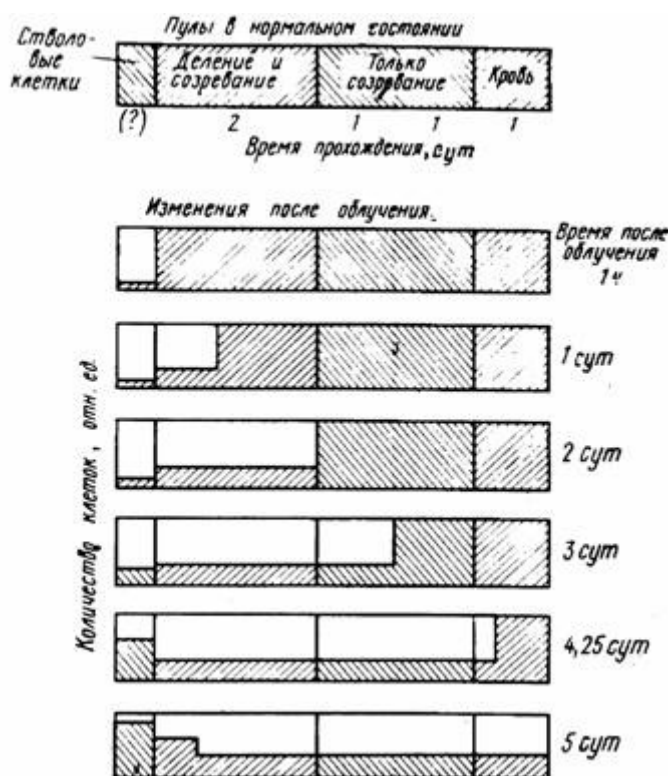


Рис. III.42. Эффекты, возникающие в системе клеточного обновления вследствие внезапного опустошения самых ранних пролиферирующих компонентов в результате облучения (по В. Бонду и др., 1971)

1. Временное прекращение деления всех клеток независимо от того, какая из них выживет в последующем.
2. Гибель молодых, малодифференцированных и делящихся клеток.
3. Минимальные изменения продолжительности процесса клеточного созревания, а также времени жизни большинства зрелых клеток и скорости притока их в функциональный пул.

В результате три первых пула начинают опустошаться сразу и в ближайшие дни после облучения, а число соответствующих зрелых функционирующих клеток уменьшается значительно позднее, когда их естественная убыль перестает восполняться из-за опустошения предшествующих пулов (рис. III.42). Эта задержка определяется временем, необходимым клетке для прохождения пути от самых ранних стадий до выхода в функциональный пул. Количественные характеристики указанных нарушений определяются конкретными цитокинетическими параметрами той или иной системы обновления и дозой облучения.

Радиационные нарушения мнелопоза мыши, качественно аналогичные изменениям, происходящим в последовательно связанных пулах у любой системы клеточного обновления (для случая, если опустошены более ранние компартменты), схематически показаны на рис. III.42.

С этих позиций следует несколько подробнее проанализировать радиационные изменения в системе кроветворения, так как именно с ними наиболее часто приходится встречаться на практике: при облучении в дозах до 10 Гр в организме развивается типичный *костномозговой синдром*.

Основная причина катастрофического опустошения костного мозга, происходящего в самые ранние сроки после облучения, состоит в резком торможении процессов клеточного деления при продолжающемся с неизменной скоростью поступлении зрелых элементов на периферию. Внешне парадоксален, но несомненен тот факт, что на кинетике этого процесса не сказывается доля летально поврежденных клеток, увеличивающаяся с дозой облучения. Определяется это тем, что скорость клеточного опустошения костного мозга в первые сутки при всех дозах изучения одинакова, вследствие чего она описывается одной экспонентой (рис. III.43).

Очевидно, вследствие сохранения скорости выхода клеток на периферию в общем «потоке» с жизнеспособными клетками выходят в кровь и летально поврежденные.

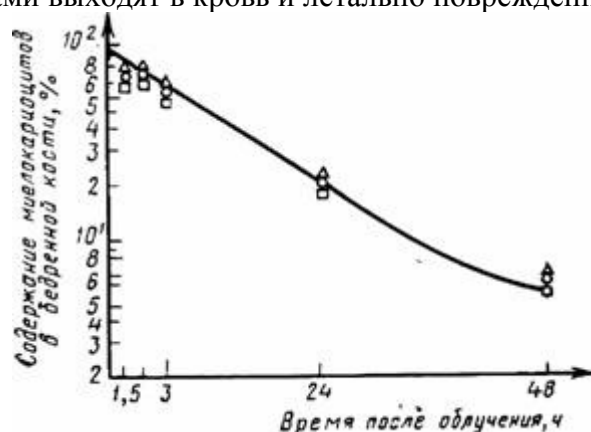


Рис. III.43. Изменение общего числа клеток костного мозга крысы после облучения в дозах 3—10 Гр

Опустошение «фабрики», отражающее, по существу, нормальную скорость выхода зрелой «продукции», сохраняет экспоненциальный характер лишь до начала регенерации. Наблюдающееся затем восстановление происходит с различной скоростью, обратной величине дозы (см. рис. III.43). Здесь-то и сказывается разная степень клеточной деструкции, определяющая глубину лейкопении, а, следовательно, течение и исход лучевого поражения организма.

Рассмотренная схема дает лишь общее представление о цитокинетике изменений в обоих компартментах кроветворения на основе принципиальных механизмов саморегуляции, типичных для систем клеточного обновления. В зависимости от объекта и дозы облучения параметры кривых имеют свои количественные характеристики и некоторые качественные особенности.

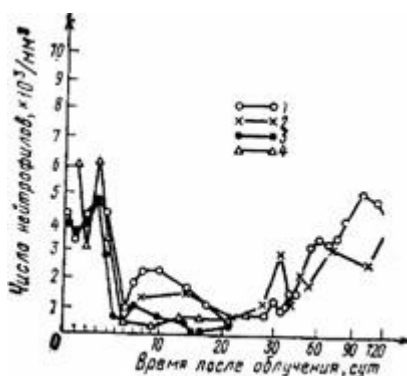


Рис. III.44. Число нейтрофилов периферической крови свиной в разное время после облучения (по В. Бонду, 1974):

цифрами обозначены дозы облучения:

1 - 2 Гр, 2 - 3 Гр, 3 - 4 Гр, 4 — 6 Гр;

следует обратить внимание на начальное «плечо», быстрый спад, временный abortивный подъем и затем постепенное окончательное восстановление

Для примера на рис. III.44 приведены изменения в наиболее ответственном звене — гранулоцитах — у подвергнутых тотальному облучению свиней. Кривую, отражающую наблюдения в течение 120 сут, можно разделить на три участка: 1) фазу дегенерации, характеризующуюся небольшим порогом и быстрым спадом; 2) фазу abortивного подъема с последующим еще большим спадом; 3) фазу восстановления до исходного уровня.

Особенности фазы дегенерации связаны с рассмотренными выше радиобиологическими закономерностями. Протяженность «плеча» определяется временем от последнего деления в пуле делящихся (созревающих) клеток костного мозга (см. рис. III.42) до выхода зрелых элементов в периферическую кровь. Отсюда следует, что созревание клеток, оставшихся жизнеспособными (по крайней мере, при среднелетальных дозах), происходит с нормальной

скоростью. Наклон экспоненциального участка кривой определяется временем исчезновения нормальных клеток из периферической крови, что совпадает с быстрым и почти полным прекращением поступления нормальных клеток из костного мозга вследствие его глубокого опустошения.

Клетки, остающиеся в периферической крови, элиминируются с нормальной скоростью. С увеличением дозы облучения наклон этого участка кривой все более приближается к характеристикам исчезновения из крови нормальных клеток; при меньших дозах небольшое количество клеток продолжает выходить на периферию, имея различные повреждения, так как они — потомки не летально поврежденных делящихся и созревающих элементов. Следовательно, в фазе дегенерации в крови находятся только поврежденные клетки.

Фаза abortивного подъема позволяет организму жить в течение более длительного времени, чем можно было бы ожидать. Механизм abortивного подъема еще неясен. Наиболее вероятно, что он связан с размножением в разной степени поврежденных радиацией клеток пролиферативного (усиливающего) пула, обладающих ограниченной способностью к самоподдержанию, и отчасти полипотентных стволовых клеток. По степени повреждения клетки этих пулов могут полностью сохранить пролиферативную способность, иметь сниженные пролиферативные потенции или оказаться необратимо поврежденными.

Abortивный подъем вероятнее всего обеспечивается клетками со сниженной пролиферативной способностью, продолжающими деление еще некоторое время. Лишь, после того как ограниченный потенциал пролиферации этих клеток будет исчерпан (они сами и все их потомки погибнут), число зрелых элементов вновь снизится до минимального уровня. Окончательная регенерация в основном осуществляется клетками, сохранившими неизменной пролиферативную способность.

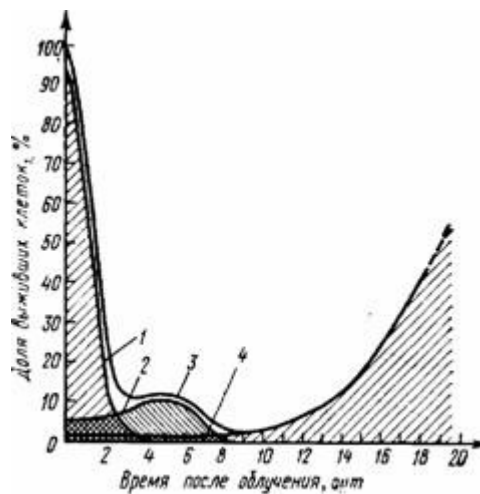


Рис. III.45. Объяснение abortивного подъема числа клеток (по В. Бонду. 1971):

1 — отмирающие (сильно поврежденные) клетки, быстро исчезающие из системы; 2 — «поврежденные» клетки (некоторое время пролиферируют, но через несколько делений вымирают и они и их потомство); 3 — общее количество клеток; 4 — выжившие клетки, способные пролиферировать неограниченно долго

На рис. III.45 схематически представлено изображение abortивного подъема, соответствующее возможному объяснению этого явления. Правильное понимание его механизмов весьма важно, ибо аналогичные явления встречаются и при облучении других клеточных популяций.

В частности, такую природу имеет временно продолжающийся рост опухолей после облучения в дозах, вызывающих гибель практически всей клеточной массы.

Фаза восстановления обеспечивается лишь небольшим количеством стволовых клеток, сохранившихся в костном мозге после глубокого начального опустошения и обладающих способностью к неограниченному размножению. Они должны не только продуцировать увеличенное количество подобных себе элементов, необходимых для репопулирования пула костномозговых стволовых клеток, но и производить дифференцирующиеся клетки,

предназначенные для последующего созревания и поступления в кровь. Эти требования к небольшому числу оставшихся неповрежденными стволовых клеток объясняют причину задержки поступления зрелых элементов на периферию, несмотря на то, что в период резкой нейтропении в кровь поступает очень небольшое количество нейтрофилов. Только когда пул стволовых клеток существенно разовьется, ощутимая его часть может быть направлена на созревание. В результате в начале фазы восстановления число клеток крови увеличивается медленно, затем скорость выхода зрелых клеток в кровь нарастает, достигая нормальной величины в разгар восстановления.

Выше были рассмотрены основные радиационные синдромы и проанализирована цитокинетика поражений в критических системах клеточного обновления, из которых кроветворная система и кишечник - типичные примеры радиочувствительных тканей со свойственной им активностью физиологической пролиферации, а ЦНС — яркий пример непролиферирующих высокодифференцированных клеточных систем, являющихся, поэтому радиорезистентными.

Проведенный анализ позволяет следующим образом связать изменения, происходящие на уровне клеточных популяций, с исходом острого лучевого поражения после тотального облучения. Общая реакция млекопитающих как функция дозы и времени после облучения определяется четырьмя кардинальными параметрами клеточных популяций: величиной пула стволовых клеток, радиочувствительностью клеток и способностью их к восстановлению (определяющими характер дозовых кривых), клеточной пролиферацией и длительностью функционирования зрелых элементов.

С этих позиций достаточно надежно могут быть предсказаны события, которые произойдут при облучении различных областей тела, если известны клеточно-кинетические параметры облучаемых тканей, что весьма важно для оценки эффектов локального облучения, а также при планировании курса лучевой терапии опухолей и прогнозировании ее последствий.

Эндокринные железы. Железы внутренней секреции относят к радиорезистентным, хотя реакции эндокринной системы на общее облучение общеизвестны. Так же как в отношении нервной системы, очень трудно отдифференцировать, являются ли эти реакции результатом непосредственного повреждения эндокринных желез или отражением воздействия излучения на другие системы и весь организм. Можно предположить, что наблюдаемые после общего облучения нарушения баланса гормонов, особенно щитовидной железы, надпочечников и гонад, могут быть следствием реакции гипоталамо-гипофизарной системы, учитывая тесную взаимосвязь между тирео-, адрено- и гонадотропными факторами гипофиза.

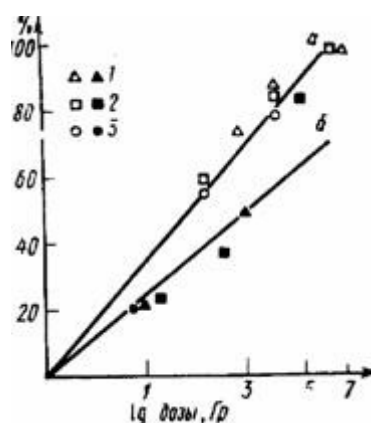


Рис. III.46. Зависимость числа клеток с хромосомными aberrациями (%) от дозы облучения:

а - в костном мозге мышей, б - в печени крыс; 1 - рентгеновское излучение 180 кВ, 2 - γ -излучение ^{60}Co , 3 - протоны 600 МэВ

Следствием таких скрытых повреждений, возникающих в клетках любых малообновляющихся тканей (в отличие, например, от костного мозга), не элиминируемых в процессе деления, являются, в частности, и различные осложнения лучевой терапии. К их числу относятся миелиты, циститы, ректиты, пульмониты, перихондриты, поражения почек, сердца, печени, а возможно и злокачественные опухоли.

Сравнивая радиочувствительность отдельных тканей, следует применять только адекватные критерии. Например, для таких, казалось бы, разных по радиочувствительности органов, как костный мозг и печень, индукция хромосомных aberrаций, возникающих под действием эквивалентных доз облучения, почти одинакова (рис. III.46). Если же в качестве показателя лучевого поражения использовать не непосредственные, а отдаленные последствия, то для этих органов они будут сильно различаться. Следовательно, понятие радиочувствительности применительно к той или иной ткани, органу или системе весьма относительно.

Сравнение радиочувствительности различных тканей свидетельствует о том, что радиочувствительность организма млекопитающих можно связать с радиочувствительностью костного мозга, ибо именно его аплазии, возникающей при тотальном облучении, вполне достаточно для гибели организма.

Под радиочувствительностью организма обычно понимают диапазон доз, вызывающих гибель животного при явлениях костномозгового синдрома.

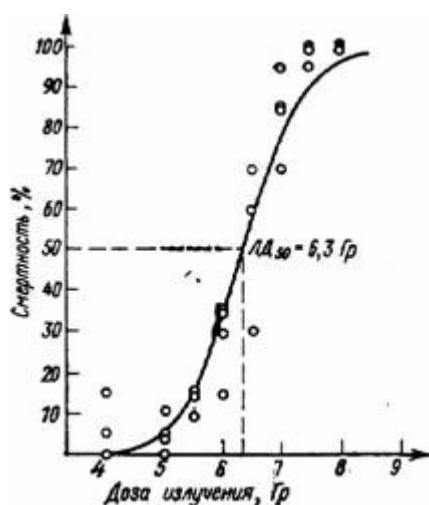


Рис. III.47. Кривая смертности мышей, подвергнутых общему рентгеновскому облучению (каждая точка получена для 20 животных) (по И. Томсону, 1964)

Для количественного изучения радиочувствительности организма используют кривые выживания или смертности, при построении которых на оси абсцисс откладывают дозы облучения, а на оси ординат — процент гибели в определенном сроке наблюдения (чаще всего за 30 сут).

(Сравнение критериев радиочувствительности клеточной популяции и животных показало, что параметры, обычно используемые для характеристики клеток (D_0 и n), можно формально применить и для целого организма. Однако в этом случае они теряют первоначальное смысловое значение. К этому заключению пришел В. Бонд в результате анализа кривой выживания, построенной по данным опытов с облучением 4300 мышей в дозах 2—34 Гр.)

Для всех видов млекопитающих такая кривая всегда имеет S-образную форму. Это объясняется тем, что при облучении в начальном диапазоне доз гибели не наблюдается (вплоть до так называемой «минимально летальной дозы» — на рис. III.47 это 4 Гр), а, начиная с некоторой дозы («минимальной абсолютно летальной дозы» — на рис. III.47 это 9 Гр) погибают все животные. Так как вся смертность регистрируется в интервале между этими дозами, на этом отрезке кривая круто поднимается вверх, приближаясь к 100%. В качестве примера на рис. III.47 приведена кривая смертности, характеризующая радиочувствительность мышей линии CF₁.

По кривой выживания можно оценить дозы, вызывающие гибель любой доли животных. Неправомерно лишь согласно теории использовать термин ЛД₁₀₀, ибо гибель конкретного животного зависит от вероятности многих событий, а потому в принципе выживание отдельных особей возможно и при «абсолютно летальных» дозах.

Наиболее пригодным и чаще всего употребляемым показателем радиочувствительности организма является LD_{50} , которую легко определить по графику; видно (рис. III.47), что в этой области данные наиболее точны из-за большой крутизны кривой.

Из данных рис. III.47 видно, что, несмотря на большую статистическую нагруженность эксперимента (более 500 животных) наблюдается достаточно большой разброс значений выживаемости при одинаковых дозах облучения. Это определяется *высокой вариабельностью индивидуальной радиочувствительности* (даже для животных одной линии) и влиянием неконтролируемых условий эксперимента. Приведенный пример показывает, насколько весомым должен быть экспериментальный материал для того, чтобы сделать уверенное заключение о таком интегральном показателе, как радиочувствительность организма.

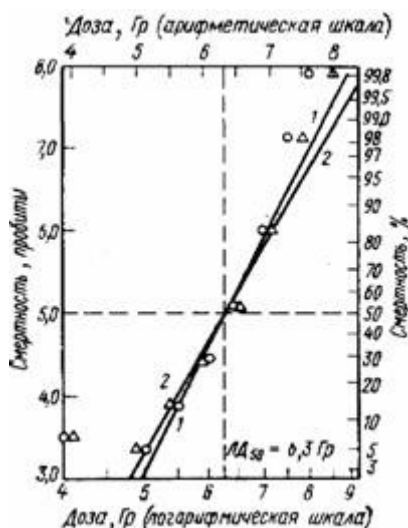


Рис. III.48. Обработка данных, приведенных на рис. III.47, в координатах пробит - логарифм дозы (кривая 1, кружки) и пробит - доза в арифметической шкале (кривая 2, треугольники):

как и на рис. III.47, данные по дозам, вызывающим гибель 50% животных, более точны, чем по дозам, вызывающим большую или меньшую смертность

Рис. III.48 иллюстрирует результат сравнительной обработки данных, приведенных на рис. III.47, в двух системах координат. Видно, что между установленными значениями LD_{50} , разница весьма незначительна.

Из рассмотренных представлений о костном мозге как системе клеточного обновления, состояние которой определяет исход поражения в диапазоне среднетлетальных доз, следовало ожидать, что общая радиочувствительность организма коррелирует с радиочувствительностью пула стволовых клеток и их способностью к репопуляции, ответственной за репопуляцию всей кроветворной системы.

В многочисленных исследованиях, проведенных разными авторами, это предположение не подтвердилось. В частности, получена достоверная количественная корреляция между характером восстановления пула стволовых клеток мышей и восстановлением организма, определяемым по критерию выживания (см. рис. ?).

Подобная корреляция является не единственным доводом в пользу представлений о том, что *выжившие после общего облучения стволовые клетки критических систем являются своеобразными детерминантами выживаемости организма*. Так, показано, что лечебный эффект костного мозга или клеток других гемопоэтических органов при трансплантации их летально облученным животным полностью определяется содержанием в нем стволовых клеток. Например, для достижения одинакового с костным мозгом лечебного эффекта надо брать в 10 раз больше клеток селезенки, которые содержат в своей популяции в 10 раз меньше стволовых кроветворных клеток. Клетки лимфоузлов или тимуса, среди которых практически нет стволовых кроветворных клеток, неэффективны при лечении острого лучевого поражения.

Как показали Д. Тилл и Е. МакКуллох (1961), радиочувствительность элементов костного мозга, определяющих его терапевтическое действие, и радиочувствительность так называемых *кветворных колониеобразующих единиц* (КОЕ), обладающих всеми свойствами стволовых кветворных клеток, одинакова. Радиозащитное действие многих препаратов по тесту числа КОЕ и по 30-дневной выживаемости животных также довольно близко. Одинаковые изменения в выживаемости стволовых клеток и организма отмечены и при модификациях воздействия, например при изменении мощности дозы, фракционировании (см. рис. ?), использовании излучений, различных по ЛПЭ.

Таким образом, клеточным субстратом, ответственным за выживание организма, является пул стволовых клеток системы клеточного обновления, критической в данном интервале доз.

Рассматривая с этих позиций наиболее вероятные причины вариабельности индивидуальной радиочувствительности животных, можно предположить, что они связаны либо со статистической вероятностью поражения, а, следовательно, и выживания большего или меньшего числа стволовых клеток, либо с различиями в их числе, либо, наконец, определяются различиями в собственной радиочувствительности стволовых клеток.

Кроме индивидуальных, существуют половые (самки, как правило, менее чувствительны к облучению) и возрастные различия в радиочувствительности организма.

На рис. III.49 приведены данные о ЛД₅₀ у мышей в течение жизни; радиочувствительность в первые 2-3 недели после рождения наиболее высока, затем снижается, выходя на плато в половозрелом состоянии, и вновь повышается в последний период жизни.

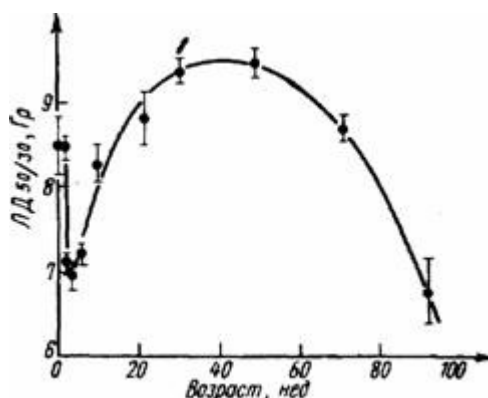


Рис. III.49. Зависимость величины ЛД_{50/50} от возраста мышей линии SAS/4 (по М. Кроссфилу и др., 1959)

Таблица 7. Величины среднелетальных доз при средней продолжительности жизни 30, 8, 5 и 2 дня для животных различных видов и человека (по В. Бонду и др., 1971)

Объект исследования	Вид излучения и энергия, кэВ	Среднелетальные дозы облучения			
		ЛД _{50/20}	ЛД _{50/8}	ЛД _{50/5}	ЛД _{50/2}
Мышь	X ¹³⁷ , 200	6,4	-	12,5	180-400
Мышь (стерильная)	X, 250	7,0	20	—	—
Крыса	X, 250	7,1	-	8,0	200-300
Морская свинка	X, 200	4,5	15	—	60
Хомяк	X, 200	6,1	10	—	200
	X, 250	8,6	—	—	—
Кролик	X, 250	7,5	-	—	—
Козел	X, 200	2,4	-	—	—
	γ-Нейтронный источник	—	-	20	250
Свинья	X, 10 ³	2,5	-	-	220

Осел	X, 10 ³	2,5	—	—	—
	γ-Нейтронный источник	3,7	—	—	—
Собака	X, 250	2,5	-	13	-
Macaco mulatu	γ, 10 ³	-	15	-	100
Macaco rhesus	γ, 10 ³	-	10	-	50
Человек	γ-Излучение	3,0	-	-	-

Таким образом, в основе различий в выраженности двух основных радиационных синдромов, вызванных редко- и плотно ионизирующим излучениями, в конечном счете, лежат свойственные стволовым клеткам критических систем различия в способности репарировать радиационные повреждения.

Функционирование соответствующих детерминантных клеточных элементов показано и в других системах клеточного обновления — коже, сперматогенном эпителии и в некоторых опухолях. Лучевая реакция этих систем, особенно на этапе восстановления популяции, во многом определяется фондом жизнеспособных стволовых клеток. Все это дает основание свести межвидовые и индивидуальные различия в радиочувствительности организма млекопитающих к особенностям кинетики клеточных популяций критических систем, детерминантами, поражения которых в основном являются соответствующие стволовые клетки.

На одном из недавних международных симпозиумов, специально посвященных сравнительной клеточной и видовой радиочувствительности было подчеркнуто, что пока еще не удается установить ясные и определенные причины различий в радиочувствительности, которая даже среди млекопитающих различается в 10 раз. (Последнее десятилетие не внесло ничего принципиально нового в этот вопрос). В заключительном слове крупнейшего специалиста в этой области В. Бонда были подчеркнуты три обстоятельства.

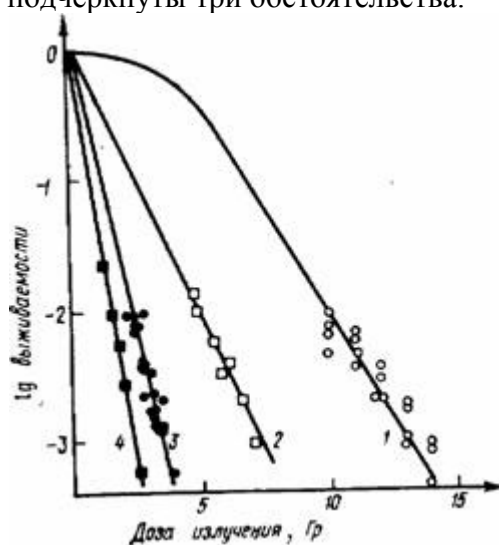


Рис. III.50. Кривые выживания стволовых клеток кишечника (1) и стволовых кроветворных клеток (2) мышей при γ -облучении; 3 и 4 — то же, при облучении нейтронами (по А. Г. Коноплянникову. 1982)

1. Необходимость тщательного изучения различий в размерах пулов клеток, кинетики и механизмов регуляции клеточной пролиферации у организмов различных видов, а также определения физиологических параметров, особенно длительности жизни зрелых функциональных клеток у облученных животных по сравнению с нормальными.

2. Важность изучения возможной роли изменения кровеносных сосудов, стромы пролиферирующих органов, а также других соматических тканей, повреждения которых также могут приводить организм к гибели или способствовать ее наступлению.

3. Важность учета пространственного распределения доз в тканях. Видимые различия в радиочувствительности могут быть просто результатом различий дозиметрических параметров облучения (т.е. ситуации, приведенной в табл. 6).

Нельзя потушить пламя, если лить воду только в середину огня.

Г. Ришар

§7 Биологическое действие инкорпорированных радионуклидов

В атомную эру человек может подвергаться не только дополнительному внешнему облучению, но и воздействию *инкорпорированных радиоактивных веществ*. Этот последний вид воздействия в профессиональных условиях приобретает преимущественное значение. Здесь будут рассмотрены лишь наиболее общие аспекты этой актуальной проблемы для того, чтобы показать, что ее решение целиком основано на радиобиологических принципах, учитывающих, прежде всего связь эффекта с дозой облучения, временем воздействия и клеточно-кинетическими параметрами облучаемых органов и систем. С детальным рассмотрением этих вопросов можно ознакомиться в монографии Д. П. Осанова и И. А. Лихтарева (1977), которая, с любезного разрешения послужила основой данной главы.

Радиоактивные вещества могут поступать в организм тремя путями: с пищей и водой в *желудочно-кишечный тракт*, через *легкие* и *кожу*. Наиболее важным и потенциально опасным является *ингаляционное поступление радионуклидов*. Этому способствует огромная дыхательная поверхность альвеол, площадь которой $\sim 100 \text{ м}^2$ (в 50 раз больше, чем поверхность кожи).

Радиоактивность воздуха может быть обусловлена содержанием в нем радиоактивных газов или аэрозолей в виде пыли, тумана или дыма. Доля радионуклида, задержанная в дыхательной системе, зависит от размера частиц, минутного объема и частоты дыхания.

Дальнейшая судьба отложившихся в дыхательных путях радионуклидов также связана с размерами радиоактивных частиц, их физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Хорошо растворимые вещества в основном быстро (в несколько десятков минут) резорбируются в кровеносное русло, а затем, в процессе обмена веществ, откладываются в определенных органах и системах организма или выводятся. Нерастворимые или слаборастворимые вещества, осевшие в верхних дыхательных путях, удаляются из них вместе со слизистой, после чего с большой вероятностью поступают в желудочно-кишечный тракт, где резорбируются кишечной стенкой. Частицы, осевшие в альвеолярной части легочной ткани, либо захватываются фагоцитами и удаляются, либо мигрируют в лимфатические узлы, освобождаясь из них в течение нескольких месяцев или лет.

При вдыхании нетранспортабельных и короткоживущих радионуклидов органы дыхания по лучевой нагрузке становятся *критическими*. Транспортабельные радиоактивные вещества с большим периодом полураспада в основном резорбируются в самой легочной ткани, а также частично заглатываются и попадают в кровеносное русло при всасывании из кишечника.

Второй по значимости путь — *поступление радионуклидов с пищей и водой*. Питательные вещества наряду с фоновыми концентрациями естественных радиоактивных веществ могут быть загрязнены искусственными радионуклидами, которые из внешней среды по биологическим пищевым цепочкам попадают в сельскохозяйственные растения, организмы животных и, в конце концов, — в продукты питания. Дальнейшая судьба радиоактивных веществ зависит от их растворимости в жидкой среде желудочно-кишечного тракта, характеризующейся в различных его участках разными показателями pH. Так, например, многие растворимые соединения нуклидов, редкоземельных и трансурановых элементов, в частности плутония, при щелочном pH кишечника превращаются в нерастворимые гидроксиды. Возможно и обратное, когда относительно плохо растворимые в воде вещества в жидкой среде желудочно-кишечного тракта превращаются в растворимые компоненты, хорошо всасывающиеся в кровь через эпителий кишечника. Именно поэтому Международная комиссия по радиационной защите рекомендует отказаться от термина «растворимость», заменив его термином «транспортабельность». В организм поступает лишь некоторая часть

попавших в кишечник радионуклидов, большая часть их проходит «транзитом» и удаляется из кишечника. Во время нахождения радиоактивных веществ в пищеварительном тракте происходит облучение кишечника, причем короткопробежные α - или β -частицы облучают только его стенку, а γ -кванты достигают и других внутренних органов, расположенных в брюшной полости и грудной клетке.

Таким образом, в случае поступления радиоактивных веществ в организм с продуктами питания и водой, когда отдельные участки кишечника поглощают значительную часть энергии испускаемых частиц, желудочно-кишечный тракт становится *критическим органом*. Здесь уместно дать расширенное толкование критического органа по сравнению с определением, данным при описании радиационных синдромов, возникающих в условиях внешнего облучения.

Орган тела человека является критическим, если он: а) получает наибольшую дозу или усваивает наибольшее количество радионуклидов; б) играет наиболее важную роль (или необходим) для нормального функционирования всего организма; в) обладает наибольшей радиочувствительностью, т. е. повреждается самой низкой дозой облучения по сравнению с другими органами.

С учетом различий в радиочувствительности, наблюдающихся в пределах одного органа, а также неоднородности распределения доз в его отдельных участках, особенно сказывающемся на действии инкорпорированных радионуклидов, критическими могут оказаться отдельные участки органа или его клеточные популяции, например базальный слой эпидермиса в коже, эпителий крипт кишечника, бронхиальный эпителий и активные остеобласты скелета.

Наименее изучен путь поступления радиоактивных веществ через кожу, которая до недавнего времени считалась для них эффективным барьером, в связи с чем проникновением радионуклидов через неповрежденные покровы пренебрегали. Однако в последующем было установлено, что радионуклиды, как и другие вещества, в составе жидких и газообразных соединений проникают через кожу животных и человека достаточно быстро в измеримых, а иногда и в значительных количествах. Так, скорость проникновения в организм человека паров оксида трития и газообразного йода через неповрежденную кожу сравнима со скоростью проникновения этих веществ через дыхательные пути, а количество плутония, проникающее в организм вследствие загрязнения кожи его водорастворимыми соединениями, не меньше, чем при поступлении в желудок. При приеме радоновой ванны в течение 20 мин в организм проникает через кожу до 4 % Rn.

Проницаемость кожи резко увеличивается при воздействии многих химически активных веществ, например обезжиривающих растворителей, особенно при повреждении рогового слоя эпидермиса, играющего главную роль в барьерной функции кожи. В производственных условиях из-за наличия трещин, царапин, ссадин реальная опасность поступления радионуклидов в организм через кожу возрастает.

Значительное влияние на интенсивность подкожного поглощения радионуклидов оказывают *температура и влажность окружающей среды*.

Радионуклиды, проникающие через кожные покровы, создают опасность облучения самой кожи и тех внутренних органов, куда они доставляются кровотоком. При оценке облучения кожи обычно ограничиваются определением дозы, получаемой базальным слоем эпидермиса, расположенным у человека на глубине 50—150 мкм, где сосредоточены стволовые и пролиферирующие клетки. Однако в последнее время становится очевидной важность учета облучений и более глубоких слоев кожи, в зоне гемо- и лимфомикроциркуляции, обеспечивающей нормальный обмен веществ в клетках эпидермиса.

Радиационные повреждения внутренних органов радионуклидов, проникшими через кожу, не отличаются по характеру от наблюдаемых при поступлении радиоактивных веществ через желудочно-кишечный тракт и через легкие и связаны, прежде всего, с дозой облучения и ее пространственным распределением.

«Судьба» поступивших в организм радионуклидов зависит от их свойств и химической природы. Одни из них в виде растворов удаляются с мочой, другие могут быть задержаны в организме на различные сроки.

Существует три основных типа распределения радионуклидов в организме — скелетный, ретикулоэндотелиальный и диффузный. *Скелетный тип* характерен для нуклидов щелочноземельной группы элементов — Ca, Sr, Ba, Ra, накапливающихся минеральной части скелета, а также некоторых соединений плутония и тория, задерживающихся в костной ткани. *Ретикулоэндотелиальное распределение* присуще нуклидам редкоземельных элементов — Ce, Pr, Pm, а также Zn, Th, Am и трансураниевым элементам. По диффузному типу распределяются щелочные элементы — K, Na, Cs, Rb, а также нуклиды H, N, C, Po и некоторых других элементов.

Известны отдельные случаи высокой избирательности распределения. Так, изотопы I накапливаются исключительно в щитовидной железе.

Очевидно, что «органотропные» радионуклиды опаснее диффузных, так как их концентрации в тканях, а, следовательно, и тканевые дозы при прочих равных условиях всегда имеют большую величину. (Здесь речь идет о поступлении в организм относительно небольших количеств радионуклидов, возможном в производственных условиях. В случае острой интоксикации, вызванной большими количествами радиоактивных веществ, диффузный тип распределения приводит к острой лучевой болезни со всеми вытекающими последствиями.)

В процессе транспорта радионуклиды задерживаются в тех тканях, в составе которых имеются стабильные элементы, аналогичные им по химическим свойствам. Так как химический состав важнейших органов и тканей человека в настоящее время изучен достаточно хорошо, с определенной вероятностью можно предсказать, в какие ткани или органы попадет тот или иной радионуклид.

Процесс перехода радионуклидов из межклеточной жидкости в газы завершается в течение определенного отрезка времени, истинное значение которого пока неизвестно, но, тем не менее, экспериментальные данные свидетельствуют о том, что оно невелико. Так, плазма крови очищается от переходящих в скелет стронция и кальция за 4-10 ч. Йод обнаруживается в щитовидной железе уже через несколько минут после внутривенного введения, а полный переход его из крови в щитовидную железу заканчивается в течение 10—15 ч. Уран выводится из тока крови за 12 ч.

Кроме описанного макрораспределения радионуклидов в организме необходимо учитывать их микрораспределение в различных органах и тканях человека и животных. Методом автордиографии было показано, что остеотропные элементы, такие, как Sr и Ra, накапливаются преимущественно в растущих участках трубчатых костей — метафизах и эпифизах, распределяясь там неравномерно и образуя так называемые горячие пятна. Локальные аналогичные неоднородности расселения отмечаются и для других радионуклидов, например для Pu и Th — в легких, скелете, печени; I — в щитовидной железе.

Неоднородность распределения излучателя в ткани влияет на характер распределения, величину и мощность тканевой дозы, что особенно существенно, если тканевые микроструктуры с повышенной концентрацией излучателя имеют высокую радиочувствительность, а пробеги испускаемых им частиц сравнимы с линейными размерами этих микроструктур.

Значительные неоднородности распределения тканевых доз наблюдаются вокруг радиоактивных частиц в органах дыхания, в этом случае отношение D_{max}/D_{min} оказывается порядка нескольких сотен.

Следствием больших неоднородностей микрораспределения радионуклидов в ткани являются специфически формирующиеся патологические процессы, например цирроз печени, очаги склероза в легких и изменения в костной ткани, в том числе образование остеосарком.

В радиобиологических исследованиях для количественной оценки уровня внутреннего облучения, как и в случаях внешнего воздействия, используют *поглощенную дозу*, выраженную в греях, учитывая коэффициенты ОБЭ. Однако следует помнить все *ограничения применимости концепции ОБЭ*, описанные выше. Применительно к воздействию

инкорпорированных изотопов это особенно важно, ибо специфика внутреннего облучения, связанная с резко выраженной неравномерностью распределения инкорпорированных в излучателе энергии и интенсивности, затрудняет использование ОБЭ. Исключение составляют случаи равномерного распределения радионуклидов во всех тканях организма или их накопления в органах, доступных для изолированного внешнего облучения.

При оценке малых уровней облучения, ограниченных областью радиационной защиты, используют *эквивалентную дозу*, рассчитываемую с помощью модифицирующих коэффициентов, учитывающих, прежде всего характерные для инкорпорированных изотопов специфические концентрационные и временные условия формирования тканевых доз.

Например, при инкорпорации радиоактивных изотопов Р или Na, отличающихся относительно коротким периодом полураспада, равномерным распределением и достаточно жестким излучением, возникает типичная острая лучевая болезнь, не отличающаяся от развивающейся при внешнем общем облучении. При попадании органотропных радионуклидов в организм разыгрываются различные варианты лучевого поражения с преимущественными проявлениями в тканях (где дозовая нагрузка максимальна), которые в этом случае становятся критическими.

Существенная особенность поражений при внутреннем облучении состоит в том, что особую опасность в таких случаях приобретают *радионуклиды тяжелых элементов*, испускающие не только β -, но и α -частицы. Обладая высокой ОБЭ, эти излучения, несмотря на малую проникающую способность, вызывают тяжелые повреждения эндотелия и эпителия, воздухоносных путей и кишечника, в которых они теряют весь запас своей энергии.

Другая особенность биологического действия инкорпорированных излучений определяется тем, что в отличие от внешнего облучения, при котором роль организма пассивна, при внутреннем облучении организм играет *активную роль* в формировании тканевых доз из-за наличия транспортных и метаболических процессов, обуславливающих накопление и выведение радионуклидов из определенных органов и тканей. Существуют трудности, связанные с дозиметрией излучения инкорпорированных изотопов, главной задачей которой является исследование пространственного и временного распределения поглощенной дозы на основе количественного описания кинетики распределения концентрации радионуклидов по всем тканям и органам и с учетом ЛПЭ. Решение этой задачи, как справедливо указывают Д. П. Осанов и А. Лихтарев (1977), возможно только при условии теоретического и экспериментального определения количества радионуклидов в организме и кинетики их поведения в зависимости от анатомических и физиологических особенностей организма в целом и его отдельных тканей, органов и систем с учетом их цитокинетических характеристик.

Наибольшее практическое значение имеет изучение различных аспектов биологического действия различных инкорпорированных радионуклидов, попадающих в организм человека в профессиональных условиях. Наряду с этим, однако, в чрезвычайных обстоятельствах военного времени, а также в аварийных случаях в результате взрыва ядерного устройства может возникнуть поражение попавшими в организм продуктами *ядерного деления* (ПЯД). Согласно обзору И. Я. Василенко (1981) клиника и патогенез таких поражений имеют свои особенности.

Продукты ядерного деления представляют собой смесь более чем 200 радиоактивных изотопов 36 элементов средней части (от Zn до Gd) периодической системы Менделеева. Поступая в организм, они в процессе обмена заменяют стабильные элементы и при распаде образуют нуклиды соседних групп периодической системы. Такие трансмутационные эффекты, а также возможность химических перестроек в результате радиоактивной отдачи, происходящей при эмиссии β -частиц и нейтронов, определяют некоторое своеобразие биологического действия ПЯД, которое в основном зависит от дозы, поглощенной органами преимущественного распределения радионуклидов, а также времени их полураспада и скорости выведения.

Внимание к изменениям сердечно-сосудистой системы, как и других высокодифференцированных органов и систем, особенно ЦНС и эндокринной системы, впервые было привлечено советскими исследователями. Это самые ранние работы И. Ф. Тарханова и последующие широко известные экспериментальные исследования Л. А. Орбели, А. В. Лебединского, П. Д. Горизонтова, М. Н. Ливанова, Н. Н. Лифшиц, Ю. Г. Григорьева, Е. И. Воробьева, С. Н. Александрова, а также клинические наблюдения М. И. Неменова, М. П. Домшлага, А. К. Гуськовой и другие работы, посвященные проблеме нарушения в регулирующих системах и соматическим эффектам облучения.

Изменениям, которые происходят в иммунной системе, занимающей промежуточное место между критическими и некритическими системами организма, принадлежит особая роль в патогенезе лучевой болезни. Частично они рассматривались, например, при анализе причин инфекционных осложнений, а такие, как временная толерантность (вследствие массовой гибели лимфоцитов, являющихся иммунокомпетентными клетками), будут рассмотрены при описании основ трансплантационной терапии лучевого синдрома.

Наиболее демонстративным проявлением радиационного повреждения иммунитета признаны *иммунодефицит* и *повышение чувствительности к возбудителям инфекционных заболеваний*, сопровождающиеся количественными и качественными изменениями нормальной микрофлоры организма, в частности кишечника.

Причинами иммунодепрессии и иммунодефицита, развивающихся вскоре после облучения, являются гибель, повреждение функции и миграционных свойств лимфоцитов, а также нарушение количественного соотношения субпопуляций лимфоцитов и их функциональных взаимодействий. Как показали результаты работ А. А. Ярилина (1981), изучавшего клеточные механизмы действия радиации на иммунитет, нарушение нормальных количественных соотношений субпопуляций лимфоцитов обусловлено их различной радиочувствительностью: В-клетки более радиочувствительны, чем Т-клетки; Т₂-лимфоциты и кортизончувствительные формы поражаются ионизирующей радиацией сильнее, чем, соответственно, Т₁-лимфоциты и кортизонустойчивые. Однако численность В-клеток восстанавливается быстрее, чем численность Т-клеток. В результате создающийся сразу после облучения относительный избыток Т-клеток сменяется периодом, когда иммунный ответ лимитирует их численность. Это определяет различную эффективность введения Т- и В-клеток в разные сроки после облучения.

Основное проявление индуцируемого облучения миграционного дефекта лимфоцитов, разумеется, кроме резкого уменьшения их численности, состоит в нарушении способности выживших циркулирующих клеток проникать в лимфатические узлы. *Нарушение миграции Т-лимфоцитов в лимфатические узлы* — очень устойчивый радиационный эффект, вследствие которого замедляется темп восстановления численности Т-клеток и уровня тимусзависимого ответа, что составляет *причину позднего иммунодефицита*.

Нормализация функции лейкоцитов осуществляется параллельно с восстановлением их численности и связана, вероятно, с замещением клеток, переживших облучение, вновь образованными. Параллельно с восстановлением функции Т- и В-клеток нормализуется их способность к кооперации.

Значительно менее выражены клеточные нарушения иммунитета при местном облучении, в частности при лучевой терапии. В этом случае активно циркулирующие Т-клетки поражаются в большей степени, чем слабо рециркулирующие В-клетки, что легко объяснить, ибо наблюдающаяся лимфопения при локальных облучениях является следствием интерфазной гибели лимфоцитов, проходящих через зону облучения.

Таковы основные причины и механизмы клеточных аспектов иммунологической депрессии, возникающей после облучения.

Нарушение антимикробного иммунитета и связанные с ним инфекционные осложнения, кроме того, можно рассматривать как следствие повышения проницаемости тканевых барьеров, нарушения фагоцитарной способности клеток ретикулоэндотелиальной системы и угнетения неспецифических бактерицидных систем организма — пропердина, лизоцима, бактерицидных субстанций ряда тканей, а также бактерицидности кожи. Кроме того,

облучение угнетает образование новых антител, хотя почти не влияет на их продукцию, если проведено после иммунизации.

Большое значение имеют также развивающиеся в облученном организме аутоиммунные процессы, составляющие самостоятельную проблему неинфекционной иммунологии.

Аутоантигенами в принципе могут быть как нормальные ткани при их попадании в русло крови, где они обычно не встречаются, так и патологически измененные белки и связанные с ними вещества. После облучения создается реальная возможность столкновения организма с аутоантигенами обоих видов вследствие быстро развивающейся тканевой деструкции, резкого повышения проницаемости биологических барьеров и изменения антигенных свойств тканей.

На рис. III.52 представлена схема, иллюстрирующая возможные патологические сдвиги в облученном организме, связанные с изменением и циркуляцией тканевых антигенов. После облучения происходит утрата части нормальных антигенов и появление новых антигенных качеств. Кроме того, летальные повреждения клеток могут обусловить появление новых антигенных свойств белков вследствие постлетальных изменений. Потеря части нормальных антигенов, означающая утрату определенных структур, может быть причиной нарушения определенных функций клеток и органов. Это, а также клеточная деструкция и циркуляция в крови тканевых антигенов способствуют развитию *токсемии*. Кроме того, циркуляция в крови тканевых антигенов приводит к *иммунологической перестройке организма* — сенсibilизации и образованию антител двух родов — против денатурированных белков и против аутоклеток. Уже в момент появления антигенной чужеродности измененные белки могут быть причиной патологической афферентной импульсации, которая в дальнейшем, воздействуя на хеморецепторы, обеспечивает патологическое влияние через нервную систему.

Таким образом, в настоящее время твердо установлены факты, характеризующие все этапы аутоиммунологических изменений в облученном организме: образование аутоантигенов, их циркуляцию, появление аутоантител и аутосенсibilизацию.

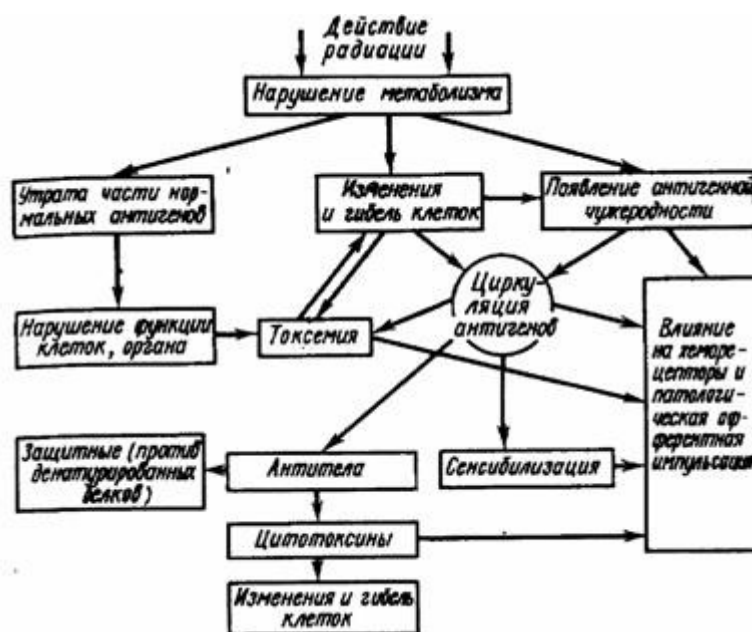


Рис. III.52. Последовательность процессов, связанных с изменением антигенных свойств тканей и циркуляцией тканевых антигенов после облучения (по Р. В. Петрову, 1962)

Н. Н. Клемпарская, наиболее известный исследователь в этой области, отводит аутоаллергии ведущую роль в развитии лучевой болезни, которую она рассматривает как своеобразное аутоиммунное заболевание, характеризующееся выраженной направленностью реакций против распада собственных тканей в сторону сенсibilизации, что придает болезни

особенно тяжелый характер и может, в частности, быть причиной развития некротических процессов и геморрагии. В подтверждение этой точки зрения приводится обширный экспериментальный материал, в том числе данные о профилактической и терапевтической эффективности при лучевой болезни вакцинации и различных десенсибилизирующих средств.

Признавая несомненную роль аутоиммунных процессов в патогенезе непосредственных и отдаленных последствий облучения организма, нельзя забывать о первопричинах острого лучевого синдрома, обусловленных клеточными утратами в критических системах клеточного обновления.

Радиационные изменения, происходящие под влиянием облучения по существу во всех тканях, не могут не сказаться на обмене веществ. Как и другие разделы радиобиологии, и, пожалуй, в большей степени, радиационная биохимия (а именно она занимается этими вопросами) является самостоятельной областью знаний, здесь лишь будут намечены основные аспекты этой проблемы.

Обсуждая биохимические процессы в подвергнутом облучению организме, следует всегда иметь в виду их деление на две категории: биохимический этап в механизме первичного действия ионизирующих излучений и биохимические изменения, происходящие в организме при развитии лучевой болезни и ее отдаленных последствий.

О *биохимическом этапе первичного действия ионизирующих излучений* частично речь шла выше. Необходимо добавить, что следствием этих процессов, очевидно, следует признать такие важные цитологические события, как мутации, в частности разрывы хромосом, а также повреждения, приводящие к интерфазной гибели клеток.

О том, что разрыв хромосомы — значительно более сложное событие, чем механическое следствие прохождения ионизирующей частицы (нескольких частиц), свидетельствует хотя бы существование химического мутагенеза, биохимическая природа которого едва ли подлежит сомнению.

Свидетельством механического компонента хромосомного разрыва можно считать зависимость выхода хромосомных aberrаций от ЛПЭ, хотя разрыв не обязательно происходит в месте прохождения частицы. Эти противоречия частично устраняются принятием *гипотезы высвобождения ферментов вследствие радиационного нарушения внутриклеточных структур* с последующей активацией ферментов и нарушением их пространственной координации.

Повреждение ядерных и других внутриклеточных мембран облегчает возможность ферментативной атаки ДНК. О важности и реальности феномена раннего повреждения мембран свидетельствуют оригинальные эксперименты Р. Бринкмана, показавшие, что нарушение проницаемости синовиальной оболочки и тонких слоев эпидермиса происходят при дозе 2 Гр уже в течение первой секунды после воздействия.

Однако этих примеров явно недостаточно для принятия какой-либо гипотезы, точно соответствующей последовательности биохимических процессов, вызывающих важнейшие для судьбы клетки события на молекулярном уровне.

Начиная с работ 40-х годов, и по сей день, известны данные о *высокой радиочувствительности процесса биосинтеза ДНК*. Существуют данные о нарушении самых ранних этапов синтеза предшественников ДНК — мононуклеотидов, фосфорилирования тимидинмонофосфата до тимидинтрифосфата, а также конечных этапов синтеза — полимеризации трифосфатов дезоксирибонуклеотидов на матрице.

Биосинтез РНК более резистентен, чем биосинтез макромолекул ДНК. По-видимому, радиационное угнетение биосинтеза РНК определяется не недостатком предшественников или снижением активности РНК-полимеразы, а опять же повреждением ДНК-матрицы вплоть до того, что она сама вызывает ингибирование активности этого фермента. Наиболее радиорезистентен процесс синтеза белка. Причем экспериментальный материал в этом направлении получен в основном при работе с мечеными аминокислотами, включение которых в суммарные тканевые белки изучали спустя длительное время.

Одной из самых лабильных и рано ингибируемых биохимических систем является *окислительное фосфорилирование*, особенно в клетках радиочувствительных органов. Его разобщение в митохондриях селезенки отмечается в ближайший пострadiационный период при дозе 1 Гр. В ядрах клеток костного мозга, слизистой кишечника и лимфатических узлах крыс через 1 ч после облучения фосфорилирование ингибируется или даже прекращается при дозах 0,25—0,5 Гр, а при дозе 1 Гр восстановление этого процесса происходит только через 5 сут. В радиорезистентных органах обратимое разобщение окислительного фосфорилирования наступает только при минимально летальных дозах.

Приведенных данных, однако, вовсе недостаточно, чтобы приписать и этому биохимическому процессу ведущую роль в определении радиочувствительности, если учесть, что применение типичных разобщителей окислительного фосфорилирования, например динитрофенола, не оказывает радиосенсибилизирующего действия, а протекторы, например аминотиолы, угнетают этот процесс.

Перечисленные ранние нарушения основных биохимических процессов могут усиливаться в результате развития в ядре и цитоплазме вторичных процессов в ранние сроки после облучения. Например, накопление некоторых метаболитов ДНК при активации процессов катаболизма может привести к угнетению отдельных ферментативных реакций ее синтеза. Изменение проницаемости мембран, происходящее после облучения, может повлечь за собой обеднение ядра ионами металлов или некоторыми важными метаболитами. Этот же процесс может привести к выходу в цитоплазму самых разнообразных, в том числе катаболических, ферментов.

Таким образом, *регуляция обменных процессов после облучения нарушается не только на молекулярном, но и на структурном уровне*. Развиваясь, суммируясь и взаимно влияя друг на друга, эти процессы вызывают в разных тканях различные поражения. Это в свою очередь обуславливает возникновение межтканевых и межсистемных нарушений в организме, выражением которых и являются разнообразные нарушения обмена веществ, наиболее общие, типичные из которых особенно ярко проявляются в периоды разгара лучевой болезни и непосредственного восстановления.

Значительные нарушения белкового обмена определяются, прежде всего, процессами массовой клеточной деструкции радиочувствительных систем, сопровождающейся уже на ранних этапах повышенным содержанием азотсодержащих веществ в крови, а также выделением таурина (рис. III.53) и других аминокислот с мочой. Эти показатели наряду с анализом метаболитов нуклеинового обмена (например, дезоксицитидина) используют как *раннюю диагностическую реакцию*. О нарушении обмена белков свидетельствуют описанные выше угнетение выработки антител и других специфических иммунных белков, нарушение их антигенной структуры и т.п. Существуют данные об активации облучением многих ферментов — протеиназ, триптофаноксидазы, карбоксипепсидазы, щелочной и кислой фосфатаз, описано резкое усиление синтеза гемина и ослабление синтеза глобина (после кратковременной активности) в ретикулоцитах. Активация протеолитических ферментов, с которой в значительной степени связывают распад тканевых белков, в свою очередь, по-видимому, является не только следствием повышения проницаемости мембран клеточных органелл, но и результатом нарушения регуляции со стороны гипофизадреналовой системы.

Значительно более устойчив обмен углеводов, синтез которых если и нарушается, то только в поздние стадии лучевого поражения как результат глубокого патологического изменения органа, в котором он осуществляется. Наблюдаемые сдвиги в содержании гликогена в крови и печени в значительной степени связаны с нарушениями регуляции со стороны надпочечников и частично с повреждением самих печеночных клеток (Б. М. Граевская, 1976). Относительно большой радиочувствительностью обладают высокополимерные полисахариды, выполняющие специальные функции во многих тканях и жидкостях организма. В частности, деполимеризация гиалуроновой кислоты, регулирующей проницаемость соединительной ткани, наступает рано и при сравнительно небольших дозах облучения (5—10 Гр). С деполимеризацией мукополисахаридов связывают резкое усиление диффузии введения в кожу различных красителей под влиянием облучения в дозах 1 Гр и выше.

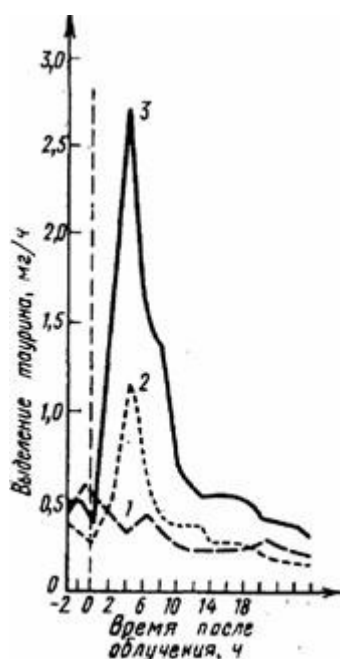


Рис. III.53. Экскреция таурина (по Г. Каю, Дж. Энтерману, 1959):

1 — контрольные крысы, 2 — после облучения в дозе 1 Гр, 3 — после облучения в дозе 6 Гр; вертикальной пунктирной линией отмечен момент облучения

Большой интерес представляет изучение *радиационных нарушений обмена липидов*. Благодаря их легкой окисляемости, усиливающейся под действием облучения, образующиеся пероксиды участвуют в первичных пострадиационных процессах в форме органических радикалов. Это послужило основанием для детальных исследований роли нарушений липидного обмена в радиационной патологии (Б. Н. Тарусов, Н. М. Эмануэль, Ю. Б. Кудряшов, Е. Б. Бурлакова и др.).

Н. М. Эмануэлем, в частности, постулировались представления о значении свободнорадикальных процессов и их ингибировании природными антиоксидантами. Развивая эту концепцию, Е. Б. Бурлакова с соавторами (1975) показала, что в органах облученных мышей антиокислительная активность резко снижается; например, в селезенке через 24 ч после облучения в среднетлетальных дозах она падает до нуля. При меньших дозах и в радиорезистентных органах падение антиокислительной активности выражено в меньшей степени.

Интересна интерпретация данных о радиационных изменениях липидов с учетом роли клеточных мембран. В последние годы наряду с известными механизмами регуляции клеточного метаболизма (репрессия — депрессия гена, аллостерическая регуляция ферментативной активности и система АМФ) большое внимание уделяется изучению регуляторной роли мембран. Структура и функция мембран, являющихся кооперативными системами, тесно связаны с составом и свойствами их основных компонентов: липидов и белков. Ряд авторов придает большое значение окислительным превращениям в липидах мембран как источнику изменения их функциональной активности, саморазборки и деградации. Е. Б. Бурлаковой с сотрудниками установлено, что в норме существует определенная взаимосвязь между изменениями состава липидов и скоростью окислительных реакций. При усилении окислительных реакций липиды мембран обогащаются наиболее устойчивыми к окислению фракциями: сфингомиелином и фосфатидилхолином, а при торможении окислительных реакций — наиболее лабильными: фосфатидилсерин, фосфатидилинозитом и фосфатадилэтанололамином. Такого рода связь может рассматриваться как система, поддерживающая уровень окислительных реакций в стационарном состоянии.

При действии излучения наблюдаются уменьшение антиокислительной активности липидов, интенсификация окислительных реакций и связанное с ними изменение состава липидов

мембран. В ранние сроки после облучения связь между скоростью окислительных реакций и составом липидов не отличается от нормы, однако, в последующем (например, через 3—5 сут после облучения мышей в дозах 5—6 Гр) эта взаимосвязь нарушается. Кроме того, изменение состава липидов мембран вызывает изменение ригидности мембраны, затрудняющее ее структурные перестройки и меняющее скорость ферментативных реакций, для которых эти липиды являются эффекторами. Установлено, что изменение скорости ряда ферментативных реакций после облучения может быть объяснено характером изменения относительной концентрации фосфолипидов — эффекторов для соответствующих ферментов. Изменение состава липидов мембран может изменять условия образования ДНК-мембранного комплекса, играющего важную роль в радиочувствительности и процессах восстановления после облучения. С этих молекулярно-биологических позиций находит свое объяснение связь антиокислительной активности липидов с радиочувствительностью, а также наличие корреляции между степенью изменения антиокислительной активности с помощью радиопротекторов и их защитным действием (Е. Б. Бурлакова, 1975).

Заканчивая раздел, нельзя не отметить, что облучение организма в летальных дозах вызывает очень *незначительные изменения в общем обмене*, развивающиеся в основном незадолго до гибели животного. Несмотря на структурные повреждения кишечника, всасывание продолжается без особых нарушений, а наблюдающиеся изменения во многом объясняются диспептическими расстройствами и потерей электролитов. Важно, однако, что наиболее твердо установленные факты, например серьезные нарушения нуклеинового обмена и антиокислительной активности, выражены более отчетливо в критических тканях.

В этой связи интересны обобщения, сделанные И. Н. Кендышем (1974) на основании анализа мировой литературы о биохимических механизмах радиобиологического эффекта на уровне организма. Автор справедливо критикует существующую в современной радиобиологии тенденцию рассматривать происхождение биохимических изменений с точки зрения универсальности действия радиации на процессы обмена веществ в различных системах организма и у разных объектов. И. Н. Кендыш рассматривает три категории изменений обменных процессов в облученном организме, происходящих в радиочувствительных и радиорезистентных тканях.

В радиорезистентных тканях (мышцы, головной мозг и др.) метаболические сдвиги невелики или отсутствуют, а в радиочувствительных тканях, клетки которых претерпевают интерфазную гибель уже через несколько минут после облучения, происходят существенные биохимические изменения, выражающиеся в ингибировании синтеза ДНК и активации аэробного гликолиза. Позднее нарушаются и другие метаболические процессы, которые являются следствием более грубых деструктивных изменений клеточной организации, сопутствующих предсмертному состоянию клеток; для этого периода характерны угнетение всех биосинтетических процессов и резкое усиление катаболизма с выделением различных клеточных компонентов.

В отличие от этого в печени облученных животных преобладает анаболический тип обменных сдвигов, выражающийся в усилении синтеза углеводов, липидов, белков и РНК. Анализируя результаты собственных исследований, автор считает, что активация биосинтеза основных метаболических субстратов в печени есть следствие регуляторных эффектов, вызываемых метаболитами радиочувствительных тканей, прежде всего аминокислотами.

Обобщая большой экспериментальный материал и литературные данные, И.Н. Кендыш (1974) приходит к заключению о том, что «... продукты распада радиочувствительных тканей, вступая во взаимодействие с различными структурами организма и, прежде всего с печенью, определяют ряд биохимических процессов, связанных единым происхождением или последовательностью метаболических реакций».

Согласно развиваемой концепции «между изменениями различных видов обмена в печени облученных животных существует взаимообусловленность, последовательность которой можно представить следующим образом. Аминокислоты, освобожденные в радиочувствительных тканях вследствие их деструкции, подвергаются в печени

дезаминированию и переаминированию и превращаются путем глюконеогенеза в глюкозу и гликоген. Избыточное количество новообразованной глюкозы поступает в кровь и с помощью инсулина вторично мобилизуется в печени и других тканях, где вовлекается в синтез гликогена путем глюконеогенеза. Эти процессы лежат в основе гипергликемии и увеличения содержания гликогена в печени после облучения. Сопряженное с активизацией глюконеогенеза торможение гликолиза приводит к угнетению синтеза липидов из глюкозы и компенсаторному усилению липогенеза из ацетата и жирных кислот с последующим выделением синтезированных липидов в плазму крови. Временная интенсификация синтеза липидов в жировой ткани из глюкозы обусловлена усилением глюконеогенеза в печени и ассимиляцией избытка периферической глюкозы. По такому же механизму, очевидно, усиливается липогенез в жировой ткани из ацетата и жирных кислот, которые в повышенном количестве образуются в печени, а затем утилизируются в жировой ткани. Накапливаясь в печени, свободные аминокислоты индуцируют синтез белков плазмы крови и, возможно, синтез ключевых ферментов глюконеогенеза — аминотрансфераз и некоторых других ферментов, контролирующих обмен аминокислот в печени. Развитие отрицательного азотистого баланса после облучения является следствием усиленной экскреции аминокислот, продуктов распада нуклеиновых кислот и других азотистых веществ, большое количество которых освобождается в радиочувствительных тканях, но не ассимилируется организмом». Разумеется, приведенная концепция нуждается в экспериментальной проверке. Привлекательность изложенных положений в том, что в их рамки «... укладывается весь основной комплекс пострадиационных изменений углеводов, липидов, белков и нуклеиновых кислот. С этой точки зрения становится объяснимой фазность этих процессов, отражающая кинетику деструкции радиочувствительных тканей, трансформацию продуктов их распада в активные метаболиты и переход их в общую циркуляцию. Таким образом, распад радиочувствительных тканей можно рассматривать в качестве первичного звена патогенетической цепи нарушений промежуточного обмена веществ при острой лучевой болезни». Тем самым сложную и запутанную картину нарушений биохимических процессов удается свести в стройную единую систему, отведя каждому из них свое место на разных этапах лучевого поражения.

Весьма вероятно, что остальные, в большинстве своем маловыраженные биохимические нарушения играют определенную роль в механизме опосредованного и дистанционного действия облучения, составляя основу его токсического компонента.

Понятие *токсины* или *радиотоксины* впервые было предложено П. Д. Горизонтовым (1958) для обозначения не каких-то определенных веществ, а самых различных не идентифицированных гуморальных агентов, возникающих в тканях под действием облучения. Будучи экстрагированы из тканей или оттекающих от облученных участков крови и лимфы, такие агенты при введении интактным животным вызывали у них разнообразные опосредованные и дистанционные проявления лучевых реакций. Радиотоксинами могут быть как аномальные метаболиты, так и вещества, свойственные нормальному состоянию, но образующиеся в облученном организме в избыточном количестве, например гормоны, продукты обмена веществ и распада тканей, медиаторы и др. Речь не идет, таким образом, о каких-то специфических идентифицированных отдельных соединениях или о «*первичных радиотоксинах*», которым в рамках структурно-метаболической гипотезы приписывается роль инициаторов первичных процессов лучевого поражения.

Наиболее наглядно токсическая природа дистанционных эффектов в организме представлена при местном облучении. В этом случае выраженность их зависит как от объема, так и от локализации облученного участка, определяющих, с одной стороны, уровень и «качество» образующихся токсических метаболитов, а с другой—возможность их «разведения» в необлученных зонах организма. Кроме того, возникающие токсины воздействуют и на нейроэндокринный аппарат, что служит причиной ряда опосредованных эффектов, типичным примером которых можно считать упомянутое состояние рентгеновского «похмелья».

Часто можно встретить утверждения о том, что при общем облучении токсический компонент отсутствует или не играет никакой роли. Однако если признать роль радиотоксических факторов в развитии дистанционных и опосредованных эффектов при местном облучении (а для этого есть все основания), то нельзя отрицать, что те же факторы оказывают аналогичное влияние на организм и при общем облучении. Само собой разумеется, что относительное прогностическое значение их по сравнению с непосредственным действием излучения значительно меньше, но и его нельзя не учитывать. В частности, при лечении лучевой болезни следует помнить о необходимости мер, направленных на детоксикацию облученного организма — ранних кровопусканий с введением кровезаменителей, а также применения детоксикаторов, антигистаминных средств и др.

Что понимают под дистанционными и опосредованными эффектами облучения?

Как выявляется опосредованное действие облучения на систему кроветворения, и какова его роль в общем эффекте поражения этой системы?

В чем выражается радиационное нарушение иммунитета?

К чему сводятся основные нарушения обмена веществ в организме, возникающие под влиянием облучения?

Какова возможная роль токсинов (не смешивать с «первичными токсинами») в дистанционных и опосредованных эффектах облучения?

6.2. Лучевая болезнь человека

При нарушении правил обращения с РВ и другими источниками ИИ нередко возникают аварийные ситуации, которые приводят к облучению человека в повышенной дозе и к лучевому поражению организма. В результате развивается лучевая болезнь. В зависимости от условий облучения могут наблюдаться острая и хроническая формы лучевой болезни.

Хроническая лучевая болезнь формируется постепенно при длительном облучении дозами, которые значительно превышают ПДД для профессионального облучения. Эта форма болезни может возникнуть как при общем облучении всего тела, так и при преимущественном поражении отдельных органов или систем организма. Хроническая лучевая болезнь от общего облучения подразделяется на три степени в зависимости от выраженности клинических проявлений:

I степень (легкая) — характеризуется неврегуляторными нарушениями сердечно-сосудистой системы и нестойкой умеренной лейкоцитопенией и реже тромбоцитопенией (лейкоциты и тромбоциты — клетки крови [греч. леукос — белый; цитос — клетка; пения — недостаток; бедность; тромбос — кровяной сгусток]);

II степень (средняя) — наблюдается углубление неврегуляторных нарушений с появлением функциональной недостаточности пищеварительных желез. Сердечно-сосудистой и нервной систем, нарушение некоторых обменных процессов, стойкая умеренная лейко- и тромбоцитопения;

III степень (тяжелая) — появляется резкая лейко-, тромбоцитопения, развивается анемия (малокровие [греч. хайма — кровь]), возникают атрофические процессы в слизистой ЖКТ.

Острая лучевая болезнь (ОЛБ) в типичной форме наблюдается при общем сравнительно кратковременном облучении в дозах 1 Гр и более. Выделяют четыре основные фазы формирования ОЛБ (после однородного кратковременного облучения всего тела внешним излучением или при поступлении внутрь организма радионуклидов с равномерным распределением внутри тела, создающих равную дозу):

- первичная общая реакция (ПР);
- латентный (скрытый) период, когда отмечается видимое клиническое благополучие;
- период разгара ОЛБ, или период выраженных клинических проявлений;
- фаза восстановления.

По тяжести поражения различают четыре степени ОЛБ:

I степень (легкая) – развивается при дозе излучения от 1 до 2 Гр; первичная реакция наблюдается через 2 – 3 часа после облучения у 30 – 50% пострадавших; характер ПР – несильная тошнота с одно-, двукратной рвотой, стихает в день воздействия; длительность латентного периода 4 – 5 недель; период разгара ОЛБ (на 5 – 7-й неделе) характеризуется умеренной лейко- и тромбоцитопенией, могут выявляться астенические явления [греч. астения – физическая и нервнопсихическая слабость]; прогноз: как правило, 100% выздоровление и при отсутствии лечения;

II степень (средняя) – возникает при дозе 2 – 4 Гр; ПР наступает через 1 – 2 часа у 70 – 80% пострадавших, длится до 1 суток; характер ПР – рвота 2 – 3 раза, слабость, недомогание, порой субфебрильная температура; длительность латентного периода составляет 3 – 4 недели; период разгара (на 4 – 5-й неделе) характеризуется сильной лейко- и тромбоцитопенией, кровоточивостью, астеническим синдромом, возможны инфекционные осложнения, а при дозе от 3 Гр и выше – эпиляция (удаление волос [лат. э – из, пилус – волос]); прогноз: выздоровление наступает у 100% при условии лечения;

III степень (тяжелая) – наблюдается при дозе 4 – 6 Гр; ПР наступает через 20 – 40 минут и длится до 2 суток; характер ПР – многократная рвота, значительное недомогание, температура тела до 38⁰ С; длительность латентного периода до 10 – 20 суток, однако уже с первой недели возможно поражение слизистой рта и зева, гиперимия (избыточное наполнение сосудов кровью [греч. гипер – над, сверх, хайма – кровь]), эритема кожи [греч. эритема – краснота]; ПР (на 2 – 5-й неделе) характеризуется резким падением количества гранулоцитов (одна из форм лейкоцитов) и тромбоцитов, лихорадкой, тяжелыми инфекционными и геморрагическими [гр. хайморагия – истечение крови из сосудов] осложнениями; прогноз: выздоровление возможно у 50 – 80% больных при условии специализированного лечения;

IV степень (крайне тяжелая) – развивается при дозе от 6 до 10 Гр; ПР выражена уже через 20 – 30 минут, длится до 3 – 4 суток; характер ПР – эритема кожи и слизистых, жидкий стул, температура тела 38⁰ С и выше; латентный период выражен нечетко, к 3 – 4-м суткам сохраняет слабость, быстрая утомляемость, присутствуют признаки поражения слизистой рта и

глотки; в период разгара (с 8 – 12-х суток) развивается картина тяжелого поражения органов кроветворения с исчезновением из крови нейтрофилов (одна из форм лейкоцитов) и тромбоцитов, могут выявляться кишечные нарушения, жидкий стул, другие диспепсические расстройства [греч. пепсис – пищеварение]; прогноз: выздоровление возможно у 30 – 50 % пострадавших и только при условии раннего лечения в специализированной клинике.

При любой степени лучевой болезни имеет место поражение кроветворной ткани. При III и IV степени лучевой болезни человек погибает в течение 1 – 2 месяцев с момента облучения главным образом из-за разрушения клеток красного костного мозга – главного компонента кроветворной системы организма.

При редко встречающихся случаях кратковременного общего облучения в дозе от 10 до 15 Гр смертельный исход наблюдается у 90 – 100% пострадавших даже при условии лечения в специализированной клинике. Характерные симптомы – диарея, лихорадка, нарушение электролитического баланса. Смерть наступает через две недели после облучения от кровоизлияний в ЖКТ и шока.

При дозах излучения до 50 Гр происходит массивное поражение ЖКТ (кишечный синдром). Характерные симптомы – судороги, тремор, летаргия, диарея. Человек погибает спустя 6 – 9 суток с момента облучения от кровоизлияний ЖКТ, обезвоживания организма и инфекции.

При облучении дозой 100 Гр и выше поражаются центральная нервная система, сосуды головного мозга. Характерные симптомы – судороги, тремор, беспорядочное непроизвольное сокращение мышц (атаксия), летаргия, кома. Срок наступления смерти – от нескольких часов до 2-х суток. Причины – нарушение дыхания, отек мозга, кома.

6.3. Онкологические заболевания

В связи с тем, что результатом первичного облучения организма человека являются онкологические заболевания, острый лучевой синдром и генетические изменения у потомства рассмотрим физиологические особенности развития онкологических заболеваний. Канцерогенез происходит от сочетания латинского cancer – рак, греческого – genesis – происхождение, onkos с греческого переводится как вздутие или бластопагенез.

В основе онкологических заболеваний по мнению немецкого биолога Т.Бовари лежит нарушение генетической информации ДНК, в результате которой делящиеся клетки ткани утрачивают специализацию, т.е. не трансформируются в соответствующие их месту рождения ткани: мышечные, кроветворные, легочные, эпителиальные и т.д., но продолжают активно делиться.

Многочисленными исследованиями установлено, что ионизирующее излучение независимо от типа воздействия и способствует развитию рака во всех тканях млекопитающих. Как правило при облучении повышается частота различных видов онкологических заболеваний: лейкозов, опухолей молочных

желез, яичников, легких, кожи и костей. Локальное воздействие радиации вызывают в основном кожные и костные раковые заболевания, тотальные – другие разновидности. При попадании радионуклидов в организм в процессе дыхания и питания развиваются соответствующие опухоли в органах их концентрации: легких, щитовидной железе, почках, желудке и т.д. характерной особенностью индукции слабого ионизирующего излучения: при хроническом воздействии является развитие злокачественных заболеваний через 2 – 5 – 10 лет, после непосредственного воздействия. Аналогичные зависимости выявлены для людей, работавших на урановых приисках, обогатительных фабриках и производстве гексофторида урана, утилизации ОЯТ и других работах ядерно-энергетического комплекса.

В связи с тем, радиационно-индуцированные опухоли у человека появляются при дозах не превышающих один трек (след, оставленный заряженной частицей в веществе) на ядро клетки, не существует реально и минимальной дозы, при которой возможно возникновение раковых заболеваний.

В то же время вероятность заболеваний можно оценивать, используя соотношение: (Фелленберг, 1997)

$$K_{зоб} = K_0 \left(1 + \frac{B}{D} \right), \text{ где}$$

$K_{зоб}$ – вероятность раковых заболеваний;

K_0 – вероятность раковых заболеваний при естественном уровне B ;

D – доза удвоения, существенно зависящая от вида раковых заболеваний.

Медицинское многолетнее обследование, проведенное НК ДАР ООН, усредненные результаты которого представлены в таблице 13 позволяют рассматривать радиационную дозу в 1 Гр и ниже в качестве пороговой активирующей процессы онкогенеза.

Таблица № 13 (НКДАР ООН)
Риск возникновения раковых новообразований

Вид злокачественных заболеваний	Число случаев на $1 \cdot 10^6$ человек на	Расчетная доза Гр	Интервал между облучение м и	Источники данных

	0,01 Гр		смертью	
Лейкемия	35 С	3	10	Пострадавшие Хиросимы
Лейкемия	18 С	1	10	Нагосаки
Лейкемия	25 С	8	10	
Лейкемия	17 С	1,3	10	Радиотерапия
Рак щитовидной железы	5 – 15 С 50 – 150 Д	>1	20	Ядерные испытания на Маршаловых островах
Рак легких	10 – 25 С	>1	15	Рабочие урановых рудников США
Рак молочной железы	30 Д	>1	20 – 25	Медицинское обследование жителей на территории ядерных объектов
Костные опухоли	2 – 5 Д	>7	25	
Опухоли желудка	10 – 15 Д	>1	25	
Рак пищевода, тонк. к.	2 – 5 Д	<1	20	
Другие виды злокачественных заболеваний	200 С	1 – 3		

Примечание: С – смертельный исход;
Д – диагностирование опухоли.

В связи с тем, что вероятность канцерогенного риска естественных причин составляет $20 \cdot 10^{-6}$ случаев в год, безопасной можно считать дозу ионизирующего излучения, вызывающие опухоли с частотой встречаемости 10^{-6} . Длительный латентный период возникновения онкологических заболеваний при малых дозах облучения, затрудняет однозначную интерпретацию причин, лежащих в основе конкретных случаев канцерогенеза.

В то же время статистически достоверное увеличение онкологических заболеваний районах действия ядерных объектов прежде всего для детей и подростков подтверждает реальное негативное влияние для здоровья хронического облучения в малых дозах.

6.4. Нарушение физиологических функций при облучении

Одной из особенностей влияния ионизирующего излучения является невосприимчивость рецепторов нервной системы к потоку излучения. Следовательно, живые системы не способны ощущать радиацию и запускать адаптационные системы реагированные на сигнальные дозы радиации. В результате, адаптированные реакции организма развиваются на поражение,

нарушение нормального хода физиологических процессов при облучении. В соответствии со схемой общего адаптационного синдрома в организме развивается неспецифические реакции стресса, мобилизирующие физиологические системы организма на компенсацию радиационных поражений. При лучевом стрессе проявляется «синдром липопероксидации», состоящий из свободнорадикального перекисного окисления липидов, приводящего к патологическим изменениям и противоположному – мобилизации антиоксидантов: фосфолипидов, тиолов, биогенных аминов и т.д.

Хроническая активность перекисного окисления липидов приводит к срыву адаптивных систем, что выражается в снижении сопротивляемости к инфекциям, сердечно – сосудистым, желудочно – кишечным заболеваниям, вялостью, уменьшением массы тела и т.д.

Так после пяти лет работы в цехе по производству гексафторида урана в Усть-Каменогорске у 18%, а после 10 лет у 52% рабочих наблюдается острый хронический стресс (Воробьева, 2001). Необходимо отметить, что профессиональный отбор и длительность адаптационного периода ~10 лет не приводят к адаптации на урановых предприятиях. Прежде всего страдает сердечно-сосудистая система, растет число онкологических заболеваний, снижает умственная работоспособность до 40%, возрастает личностная тревожность нарушается транспортная и гомеостатическая функция системы крови. Изменения в системе крови характерны воспалительных, аллергических процессов и угнетении костномозгового кроветворения. Цитогенетическая нестабильность, выражающаяся в 7-ми кратном увеличении количества эритроцитов и микроядрами после 5-ти лет работы в цехе по производству твэлов отражает повышение уровня мутагенности соматических клеток.

Высокая радиочувствительность иммуноцитов клеток крови, ответственных за иммунитет и хронический стресс при облучении приводят к развитию вторичного иммунодефицита, т.е. снижению сопротивляемости организма к инфекциям. Радиационное воздействие приводит к дисбалансу в системе иммунитета, снижению барьерной функции лимфатических узлов и повышению инфекционной уязвимости организма. Обследование жителей районов Чернобыльской АЭС, подвергшихся хроническому облучению в малых дозах (0,001 – 0,236) выявило снижение зрелых Т – лимфоцитов, В – лимфоцитов и нарушение синтеза иммуноглобулинов. В результате развившегося иммунодефицита выражалось число инфекций дыхательных путей, туберкулеза легких, гнойных заболеваний кожи и слизистых оболочек. Возросло число аллергических онкологических заболеваний в детском возрасте. Характерно, что развитие иммунодефицита протекает на фоне хронического стресса, приводящего к нарушению работоспособности и быстрой утомляемости.

Аналогичное снижение иммунной резистентности наблюдается в Томской регионе – зоне загрязнения радионуклидами ядерными предприятиями г.Северска, что выражается в повышении аллергических патологий, аутоиммунным заболеваниям, вирусным инфекциям и онкопатологиям. Следовательно ионизирующее излучение приводит к развитию системных

нарушений физиологических процессов организма. С повышением дозы радиации соответственно ускоряются процессы дисбаланса физиологических функций с преобладанием патологических процессов хронического типа. Малые дозы излучения, действующие хронически, приводят к аналогичным патологическим изменениям физиологических процессов. В то же время индивидуальная радиорезистентность варьирует в относительно широких пределах, что является основой профессионального отбора на предприятиях ядерного энергетического комплекса.

Длительный латентный период (5 – 20 лет) проявления патологических изменений после облучения существенно затрудняет выявление причиной взаимосвязи в развитии заболеваний, но приводит к сокращению средней продолжительности жизни.

6.5. Отдаленные последствия облучения

Влияние ионизирующей радиации на биосистемы может осуществляться при внешнем облучении и при попадании радионуклидов с воздухом, водой и продуктами питания внутрь организма. Изотопы радия накапливаются в легких, иода – в щитовидной железе, изотопы цезия – во всех органах, стронция и бария – в костной ткани, теллура, молибдена – в печеночной ткани. Оценить количество поглощенных радионуклидов не всегда представляется возможным, но биологическая активность инкорпорированных радионуклидов по данным ВОЗ возрастает в 1000 раз по отношению к уровню радиоактивности радионуклидов внешней среды.

В основе отдаленных последствий действия ионизирующего излучения, как внешнего так и внутреннего, на уровне клеток выделяют три типа первичных нарушений. Гибель клеток, приводящая к частичной или полной утрате функций – стерильность; длительное сохранение ненаследственных нарушений в облученных клетках, с медленно выраженной сменой клеточных структур: нервная, эндокринная система, соединительные ткани, кровеносные сосуды и т.д. третий тип – нелетальные наследственные изменения – мутации в соматических и половых клетках, микроядерные соотношения и изменения одного из гомологичных локусов парных хромосом. нарушения такого типа приводят к накоплению патологических изменений в большей степени в тканях с быстро обновляющимся клеточным составом, в которых появившись в стволовых клетках воспроизводятся длительное время. В то же время в тканях с медленно обновляющимися клетками – печень, последствия облучения в отдаленные сроки приобретают более выраженный патологический характер.

Как правило первичные нарушения приводят к эмбриональным терратогенезам, стерильности, снижению иммунорезистивности, сердечно – сосудистым и онкологическим заболеваниям, нефросклерозам, нарушением нервной и эндокринной системы, заболеваниям системы крови и снижению продолжительности жизни. наименее устойчивым периодом индивидуальной жизни организма является эмбриональный. Радиоактивное воздействие в эмбриональной стадии развития живого организма, т.е. в период беременности

в малых дозах порядка 0,01 Гр приводит к различного типа уродствам, хроническим заболеваниям, задержкам физического и умственного развития, микроцефалии, аномалии развития скелета и сердца.

При непосредственном влиянии ионизирующего излучения на эмбрионы в стадии органогенеза с дозой 0,1 – 0,5 Гр наблюдаются существенные отклонения в развитии, в то время как в организме матери не отмечается существенных нарушений. Наиболее радиочувствительным являются критические периоды развития: для животных – 6,5 – 12 суток, для человека в течение первых 38 суток. Наибольшую опасность для нормального развития эмбрионов представляют хроническое и фракционное облучение несмотря на низкую интенсивность. В связи с тем, что плацента не ограничивает проникновение радионуклидов в организм плода, радионуклидное загрязнение продуктов питания в особенности цезием-137 представляет серьезную опасность для нормального развития ребенка, плутоний-239 накапливается в плаценте. Разрушение которой приводит к гибели плода. К отдаленным последствиям облучения в эмбриогенезе относятся также хромосомные и генные мутации, снижение иммунорезистентности, более чем 2 раза увеличение частоты появления лейкозов и предрасположенность к онкологическим заболеваниям.

Половые железы гонады мужские и женские ответственные за воспроизводство популяции также характеризуются повышенной радиочувствительностью. Влияние ионизирующего излучения на половую систему приводит к комплексу нарушений как соматического так и генетического типа. Наиболее радиопоражаемой стадией сперматогенеза является период развития сперматогоний. Так облучение в дозе 0,1 Гр семенников существенно снижает количество сперматозоидов в течение 2 – 3-х лет, а дозы от 4 Гр и выше приводят к полной стерильности. При этом суммарная доза 1 Гр, накопленная при фракционном облучении низкой интенсивности особями мужского пола приводя 1 – 2 тыс. мутаций и от 30 до 1000 хромосомных aberrаций на каждый миллион живых новорожденных. Хроническое облучение 1 Гр в течение поколения ~30 лет для человека приводит к развитию порядка 2000 генетических заболеваний на 10^6 живых новорожденных детей. В том случае, если радиоактивному влиянию подвергся один из родителей, то скрытая или рецессивная мутация не проявляется в течении нескольких поколений.

Женская половая система, представленная у млекопитающих двумя яичниками с находящимся в них яйцеклетками характеризуется большей устойчивостью к радиоактивному воздействию, чем семенники. В связи с тем начальные стадии будущих яйцеклеток – оциты закладываются в женском организме на эмбриональной стадии лучевое поражение яичников приводит к бесплодию и нарушению эндокринных функций. Облучение в дозе 1 – 2 Гр при однократном воздействии на яичники приводит к временному бесплодию, а дозы порядка 4 Гр к полному бесплодию.

Таким образом, половая система и эмбриональная стадия развития организма – наиболее радиочувствительны и возникающие нарушения

приводят к хроническим заболеваниям, наследственным не прогнозируемым патологиям и отклонениям индивидуального развития. В отдаленные сроки после облучения в пределах от 0,05 до 0,5 Зв у ликвидаторов Чернобыльской аварии наблюдалось проявление неврологических и психоневрологических расстройств, связанных с органическими изменениями в центральной и периферической нервной системах. (Ильинский 1996).

6.6.ж Генетические последствия облучения

Одной из основных особенностей антропогенного изменения окружающей среды является увеличение взаимодействий с ионизирующими источниками. Впервые генетические изменения под действием ионизирующего излучения были открыты российскими учеными Г.А. Надсоном и Г.С. Филипповым в 1925 г. Г. Меллер, Н.В. Тимофеев-Ресовский, Н.П. Дубинин и другие выяснили радиобиологические закономерности образования мутаций.

Мутации живых организмов подразделяются на спонтанные – естественные и индуцированные – появляющиеся при действии мутагенных факторов. По своему проявлению мутации могут быть прямыми, т.е. приводящие к отклонениям от естественного генотипа и обратными, – приводящими к восстановлению дикого типа. В зависимости от местоположения в организме рассматривают: соматические мутации – распространяющиеся в клетках организма, но не передающиеся по наследству; генеративные – возникающие в половых клетках и передающиеся в ряду поколений. Соответственно в зависимости от локализации мутаций выделяют: ядерные, цитоплазматические, митохондриальные и т.д. По характеру нарушений генетическом материале дифференцируют точечные, геномные, системные мутации и хромосомные aberrации.

Точечные мутации возникают в результате измерения последовательности нуклеотидов в молекуле ДНК: дубликации, вставки, делеции – выпадания, инверсии – перестановки оснований. Геномные – обусловленные увеличением количества отдельных хромосом – анеуплодия или кратным одинарному набору хромосом – полиплодия, гаплодия. Хромосомные aberrации – крупные изменения структуры хромосом: делеции – потеря хромосомой какой-либо части, инверсии – поворот на 180° участка хромосом, транслокация – обмен участками между негомологичными хромосомами, транспозиции – перемещение участка хромосомы.

Как правило доминантные мутации половых клеток приводят к наследственным заболеваниям: синдром Дауна, Патау, Эдварса, гемофилии, фенилкетонурии, сахарному диабету и т.д. в то время как мутации соматических клеток приводят к их гибели, снижению иммунорезистентности и онкологическим заболеваниям.

В процессе облучения, т.е. при попадании кванта энергии или частицы в молекулу ДНК происходит потеря нуклеотидов, химические изменения азонистых оснований, повреждение сахарофосфатных нитей. Первичные

повреждения ДНК в зависимости от дозы излучения репарируются, т.е. восстанавливаются, либо приводят к развитию мутационного процесса.

Исследования генетических эффектов радиации проводятся на биосистемах различного уровня организации от микроорганизмов до человека. Длительное периодическое или хроническое облучение является высокомуtagenным фактором среды, осуществляющим отбор. Популяции, для которых характерна высокая плодовитость и быстрая смена поколений способны значительному повышению радиорезистентности: микроорганизмы, растения, паукообразные, насекомые, грызуны. В этом отношении человеческая популяция обладает относительно минимальными пределами адаптивной устойчивости и вынуждена расплачиваться повышенной стерильностью, постэмбриональной смертностью, хроническими заболеваниями.

Широкое обследование жителей Хиросимы и Нагасаки порядка 70000 потомков облученных родителей не выявили статически достоверных генетических эффектов. Аналогичные результаты получены и при анализе врачей-радиологов, подвергавшихся облучению в суммарной дозе 25 р, при статически достоверном увеличении у их потомков врожденных уродств. Выкидышей и мертворожденных. В связи с тем, что накопление генетических изменений при действии ионизирующего излучения в человеческой популяции происходит в течение длительного периода времени, экстраполяция экспериментальных результатов на животных позволяют оценить генетический риск. В соответствии с современными представлениями используется понятие удваивающей дозы, увеличивающей на 100% уровень спонтанных мутаций, которая соответствует для острого облучения – 2 Зв, для хронического 4 Зв. При этом фракционное облучение суммарной дозы 1 Гр мужчин приводит к образованию $(1 - 2) \cdot 10^3$ мутаций и 30 – 1000 хромосомных aberrаций на 10^6 новорожденных. Естественно, что серьезные генетические дефекты генома половых клеток приводят мертворождению и уродствам значительно сокращающим продолжительность жизни, т.е. эффектам, препятствующим распространению аномальным генетическим отклонениям.

В отличие от половых нарушение генетического аппарата соматических клеток не передается в поколениях но приводит к существенным биохимическим, физиологическим, иммунологическим и онкологическим изменениям в организме человека и животных. Количество хромосомных aberrаций в зависимости от дозы облучения характеризуется линейной квадратичной зависимостью. В качестве теста как правило используется частота индуцированных aberrаций в клетках периферической крови микроядерный тест и др. Цитогенетическое обследование участников ликвидации Чернобыльской аварии выявило статически достоверное увеличение aberrаций хромосомного типа в лимфоцитах у всех обследованных при средней дозе равной 0,17 Гр. Обследование детей, проживающих в прилегающих к Чернобыльской АЭС районам, выявило увеличение хромосомных aberrаций типа дицентриков, парных фрагментов в соответствии с периодом проживания на загрязненных радионуклидами территориях.

Аналогичные данные нестабильности генома соматических клеток, выявляемые по микроядерному тесту в эритроцитах были получены при обследовании жителей Алтая, подвергшихся радионуклидному загрязнению в результате испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне. Нестабильность генома обследуемого населения коррелирует с повышенной частотой онкологических заболеваний. (Ильинских, 1996). Цитогенетические обследования жителей Усть-Каменогорска, в возрасте от 17 до 23 лет. Проживающих вблизи предприятия по изготовлению ТВЭЛов выявило у 60% повышенную частоту хромосомных aberrаций в лимфоцитах периферической крови. Средний показатель смертности в данном районе в 3,5 раза выше среднего значения по Казахстану: 51% всех летальных исходов составляют заболевания сердечно-сосудистой системы, 36% – онкологические заболевания. По мнению известного радиобиолога Д. Гофмана: радиационные воздействия – безпороговые, нестохастические – чем выше доза, тем значительнее повреждения генетического аппарата; внутриутробное повреждение хромосом способствует развитию многочисленных заболеваний, включая онкологические, проявляющиеся в отдаленные сроки. Наименее устойчивой при облучении является период предначального развития организма. Опасность пороков развития снижается по мере развития беременности.

Естественно, что в течении жизни при эффективной деятельности восстановительных систем организма и элиминации поврежденных клеток, происходит нормализация физиологического состояния и выздоровление и снижение интенсивности патологического процесса.

К такому системных реакций относится и явление гормезиса или генетической адаптации к ионизирующему излучению. Если предварительно в течении некоторого времени часа – сутки воздействовать ионизирующим излучением с дозой нагрузкой в пределах 0,01 – 0,1 Гр на организм, то последующее облучение в более высоких дозах не вызывает значительного увеличения хромосомных перестроек. Вероятно, в основе повышения радиорезистентности лежит активация экспрессии генов, стимуляция репарационных процессов. Синтез защитных белков и т.д. В тоже время хроническое в течение нескольких лет облучение в аналогичных малых дозах не вызывает адаптивной реакции или она выражена незначительно.

Необходимо отметить, что непосредственным влиянием ионизирующего излучения на ДНК не ограничиваются биологические эффекты хронического действия радиации. В 1972 г. канадский ученый А. Петко установил, что длительное облучение фосфатпидных клеток в малых дозах – и поглощенной дозы 0,7 рад приводит к разрушению мембран. Аналогичный эффект достигается и кратковременным воздействием в дозе 26 рад/мин. Следовательно, чем больше период облучения в малых дозах, тем большие опасные последствия развиваются в живом организме. В отличие от непосредственного влияния радиации на клеточные компоненты разрушение мембран происходит косвенным образом в результате воздействия свободных радикалов. При этом большое количество радикалов, появляющиеся в результате влияния больших доз радиации нейтрализует друг друга, т.к. они

соединяются с образованием нетоксичных молекул кислорода. Слабые дозы излучений образуют меньшее количество радикалов в конкретном объеме в единицу времени и поэтому свободные радикалы с большей долей вероятности повреждают клеточные мембраны. Следовательно, малые дозы радиации сопоставимы с выбросами АЭС, добычи и обогащения ядерного топлива, работах по обслуживанию ядерных технологий и радиоактивном загрязнении местности при длительном хроническом действии оказывают отрицательное влияние на организм человек а и животных. К такого рода последствиям относится снижение общей и специфической иммунной резистентности, инфекционные заболевания. Сердечно-сосудистые, диабет, онкологические, патологии щитовидной железы, внутриутробное поражение мозга зародыша и болезни старения.

Представленные в таблице 14 основные дозозависимые нарушения организма человека не оставляют сомнений в том, что непродуманное внедрение ядерных технологий во все сферы жизни представляет серьезную угрозу для выживаемости человечества.

Таблица 14

Основные дозозависимые поражения организма человека при олучении

Эффект Петко	Хроническое действие в дозах 10-100 мрад/год или 0,001-0,002 Гр поглощенной дозы	Разрушение клеточных мембран и различные заболевания
1	2	3
Адаптивный эффект – гормезис	Предварительно облучение в дозах (0,01-0,1 Гр)	Повышается радиорезистентность к последующему облучению в больших дозах
Хромосомные нарушения в соматических клетках	Хроническое действие в дозах : 0,12 – 0,30 Гр/год	Онкологические, сердечно-сосудистые заболевания, снижение иммунорезистентности
Генетические нарушения в половых клетках	Хроническое облучение в дозах: 0,5 – 3 Гр/год	Наследуются генетические нарушения в основном в яйцеклетках, т.к. у самцов развивается стерильность
Лучевая болезнь	Одноклетное и фракционное облучение в дозах от 1 Гр – 6 Гр и	Комплекс радиационных заболеваний, приводящих к

6.7. Нормирование радиационных факторов

Нормирование радиационных факторов основывается на совокупности научных данных и представлений о влиянии радиации на организм человека.

В настоящее время, начиная с 1977 г., Международной комиссией радиационной защиты (МКРЗ) принята концепция беспороговой линейной зависимости развития онкологических и генетических повреждений при облучении. В соответствии с концепцией установлены и основные принципы радиационной защиты.

Принцип обоснования. Деятельность с использованием источников ионизирующего излучения осуществляется только в том случае, если польза для общества превышает риск, вызванный дополнительным облучением.

Принцип оптимизации. Использование источников радиации необходимо снизить при облучении людей на минимально низком возможном уровне.

Принцип нормирования. Индивидуальные дозы облучения обслуживающего персонала и населения от всех радиоактивных источников при эксплуатации не может превышать существующих пределов.

Нормирование степени радиационного поражения зависит от характера облучения критических органов.

Критический орган – ткань, орган или часть тела, облучение которого в данных условиях неравномерного облучения организма может причинить наибольший ущерб здоровью данного лица или его потомству. В порядке убывания радиочувствительности критические органы относят к I, II, III группам:

I группа – все тело, гонады и красный мозг;

II группа – мышцы, щитовидная железа, жировая ткань, селезенка, печень, почки, легкие, ЖКТ, хрусталики глаз и другие органы. Кроме тех, что относятся к I и III группам;

III группа – кожный покров, костная ткань, кисти, предплечья, голени и стопы.

При относительно равномерном облучении организма ущерб здоровью рассматривают по уровню облучения всего тела, что соответствует I группе критических органов.

Категория А облучаемых лиц (ограниченная часть населения) – лица, которые не работают непосредственно с источниками ИИ, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников ИИ, применяемых в учреждении и/или удаляемых во внешнюю среду.

Категория В облучаемых лиц (населения) – население страны, республики, края или области.

Санитарно-защитная зона – территория вокруг учреждения или источника радиоактивного выброса или сброса, на которой уровень облучения

людей в условиях нормальной эксплуатации учреждения (источника ИИ) может превысить установленный предел дозы (ПД). В санитарно-защитной зоне устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

Радиационный контроль – контроль за соблюдением норм радиационной безопасности и основных санитарных правил, а также получение информации об уровнях облучения людей и о радиационной обстановке в учреждении и в окружающей среде.

Дозиметр (дозиметрический прибор) – прибор, в основном предназначенный для измерения дозы или мощности дозы ИИ.

Радиометр (радиометрический прибор) – прибор, в основном предназначенный для измерения активности радионуклида в источнике или плотности потока частиц.

Индикатор (индикаторный прибор) – прибор для ориентировочной оценки некоторой величины либо измерения по изменению сигнала, например светового или звукового.

Основной документ, который регламентирует **уровни воздействия** ионизирующих излучений, называется «Нормы радиационной безопасности – 96». Никакие ведомственные или отраслевые правила или инструкции не должны противоречить НБР – 96.

НБР – 96 основаны на следующих **основных принципах** радиационной безопасности:

- не превышение установленного основного дозового предела;
- исключение всякого необоснованного облучения;
- снижение дозы излучения до возможного низкого уровня.

При этом дозовые пределы, устанавливаемые НРБ – 96, не включают в себя:

- а) дозу, обусловленную естественным радиационным фоном;
- б) дозу, получаемую пациентом при медицинском обследовании и лечении.

Для категории А и Б облучаемых лиц установлены два класса нормативов:

- **основные дозовые пределы**;
- **допустимые уровни**, которые соответствуют основным дозовым пределам.

В качестве основного дозового предел для лиц категории А установлена **предельно допустимая доза за календарный год (ПДД)**, а для лиц категории Б – **предел дозы за календарный год (ПД)**.

Основные дозовые пределы устанавливаются для индивидуальной максимальной эквивалентной дозы в критическом органе (см. табл.15):

Таблица 15

Основные дозовые пределы

Группа критических	Категория А:	Категория б:
--------------------	--------------	--------------

органов	ПДД, бэр/н	ПД, бэр/н
I	5	0,5
II	15	1,5
III	30	3,0

Для лиц категории А распределение дозы излучения в течение года не регламентируются, однако для женщин репродуктивного возраста (до 40 лет) есть следующее ограничение: доза на область таза не должна превышать 1 бэр за любые 2 месяца.

В соответствии с величиной ПДД для лиц категории А и ПД для категории Б установлены численные значения допустимых уровней отдельно для каждой из этих категорий. К допустимым уровням относится целый ряд характеристик, и в частности:

- допустимая мощность дозы излучения (ДМД);
- допустимая плотность потока частиц (ДПП);
- допустимая объемная активность (концентрация) радионуклидов в воздухе, в воде (ДК);
- допустимое загрязнение кожных покровов, одежды и поверхностей (ДЗ).

Для лиц категории В (населения в целом) уровень воздействия ионизирующего излучения регламентируется Нормами радиационной безопасности следующим образом: «Во всех случаях необходимо принимать меры по ограничению облучения населения путем ограничения числа лиц, подвергающихся облучению, в том числе необходимо ограничивать облучение при медицинских рентгено-радиологических исследованиях населения, особенно беременных женщин, детей и подростков». Однако, для лиц категории В приняты и некоторые контрольные уровни. Например, установлен контрольный уровень, ограничивающий дозы населения за счет АЭС: этот уровень не должен превышать 25 миллибэр в год (250 мкзв/н). Кроме того, Национальной комиссией по радиационной защите (НКРЗ) установлены допустимые уровни мощности дозы внешнего излучения внутри зданий. Мощность дозы внешнего (по отношению к человеку) излучения внутри построенных и эксплуатируемых зданий не должна превышать мощности дозы на открытой местности более чем на 30 мкбэр/н. При превышении мощности дозы в жилых помещениях над фоном открытой местности более чем на 30 мкбэр/н должны проводиться мероприятия по снижению уровня гамма-фона до указанной разницы. Если невозможно уменьшить мощность дозы внешнего излучения до уровня менее 60 мкбэр/н над гамма-фоном открытой местности, то необходимо решить вопрос о переселении жильцов и перепрофилировании зданий.

Порядок и правила работы с источниками излучения регламентирует основной документ под названием «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП – 72/87».

В этих правилах говорится, в частности, что к непосредственной работ с источниками ионизирующих излучений допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний, и что женщины должны освобождаться от работы и источниками ИИ с момента установления беременности и на период грудного вскармливания ребенка.

Необходимо отметить, что признание концепции беспорогового воздействия ионизирующего излучения в практическом использовании нивелируется установлением приемлемого риска, оцениваемому по риску других видов профессиональной деятельности. Во всех отраслях промышленности средний риск смерти составляет $6 \cdot 10^{-4}$ на человека в год. Средний риск летального исхода от злокачественных новообразований составляет 10^{-2} на человека в год, естественной средой обитания – землетрясения. Наводнения и т.д. – 10^{-5} на человека в год. Поэтому установление 5 бэр в год для профессиональных работников соответствует уровню безопасности. В качестве безопасной дозы для населения проживающего на загрязненных радионуклидами территориях МКРЗ рекомендует среднегодовую дозу равную 0,1 бэр. Характерно, что уровень риска на предприятиях ядерного цикла, оценивается без учета отдаленных последствий облучения, которые приводят к заболеваниям через 10 – 20 лет, после того как человек прекратил работу. Немаловажное значение имеет также профессиональный отбор и естественный отсев.

Таким образом, современная нормативная ишемическая база предприятий ядерного цикла далека от совершенства, в то время как научные основы экологического нормирования все еще находятся в стадии разработки.

6.8. Профилактика лучевого поражения

Профилактика ионизирующего излучения осуществляется физическим, химическим и биологическими методами, и направлена на снижение дозы радиации или активацию восстановительных процессов организма.

В прцессе физической защиты от облучения происходит уменьшение дозы в период времени и в пространстве, которая пропорциональна периоду воздействия и обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника излучения. В связи с тем, что биосистемы способны к репарации, т.е. восстановлению после повреждений после облучения, увеличение периодов при повторном облучении приводит к лучшей эффективности восстановительных процессов. Экранирование основано на способности веществ поглощать ионизирующее излучение. Эффективность экранирования пропорциональна плотности используемого материала и толщине. С целью экранирования от нейтронов, вызывающих наведенную радиоактивность используются материалы способные их поглощать: вода, парафин, графит. В качестве индивидуальных средств защиты от попадания радионуклидов в организм применяется защитная одежда, очки, респираторы, средства дезактивации и укрытия. Так деревянные дома уменьшают дозу облучения до 7 раз, а каменные в 40 – 70 раз.

Разработка методов химической и биологической защиты ведется по следующим основным направлениям. Химические радиопротекторы, снижающие биологический эффект внешнего облучения. Использование средств, повышающих устойчивость организма к радиации во время лучевой терапии. Биологически активные вещества и пищевые добавки повышающие устойчивость организма при остром и хроническом воздействии. Радиопротекторами называются химические вещества и биологические препараты, которые вводятся в организм за 10 – 30 мин., во время или после облучения снижают отрицательное развитие лучевой болезни. В основе физиологического механизма действия радиопротекторов лежит подавление первичных радиационных и активация восстановительных процессов. К наиболее распространенным химическим протекторам относятся: серотонин, мексалин, цистеамин, цистафос и др. Как правило химические препараты, которые необходимо вводить в больших концентрациях токсичны, что ограничивает их широкое использование.

В качестве показателя, оценивающего эффективность радиопротектора, используется ФУД – фактор уменьшения дозы, составляющий для наиболее эффективных препаратов 1,8 – 2.

К биологическому типу радиопротекторов относятся фито– и зоопрепараты, состоящие из комплекса биологически активных веществ: зоотоксины, треоны – стимуляторы кроветворения, эстрогены, иммуномодуляторы и богатые витаминами соединения – облепиховая паста и другие. Природные препараты стимулируют защитные системы организма, повышают радиорезистентность, характеризуются мягким действием, нетоксичны и применяются при хроническом облучении в загрязненных радионуклидами районах.

Попавшие в организм радионуклиды накапливаются в органах и являются источниками внутреннего облучения. К процедурам по активному выведению радионуклидов относятся: стимуляция потоотделения, бани, промывание желудочно-кишечного тракта, мочегонные средства. В этих условиях достаточно эффективно использование препаратов стабильных изотопов, замещающих радиоактивные, адсорбентов-поглотителей, комплексообразователей, связующие и ускоряющие выведение радионуклидов. Так ферроцин поглощает изотопы цезия, полисурьмин – стронций. Хорошей эффективностью обладают также альгинаты – полисахариды водорослей, целлюлоза, активированный уголь, цеолиты и другие адсорбенты.

В практических целях достаточно широко применяются йодный метод, заключающийся в предварительном насыщении щитовидной железы йодом, предотвращающим поглощение радиоактивного. Таким образом, несмотря на проводимые научные исследования и поиски новых радиопротекторов, эффективность существующих препаратов не соответствует интенсивности радиоактивного загрязнения окружающей среды и не гарантируют сохранение здоровья людей, контактирующих с источниками ионизирующих излучений.

VII. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Природа знать не знает
Ей чужды наши призрачные годы
И перед ней мы смутно сознаем
Себя самих – лишь грезой природы
Ф. Тютчев

Экологическое влияние использования человеком ядерных технологий осуществляется по трем основным направлениям. Прежде всего это введение в биосферу большого количества изотопов, многие из которых несколько сотен несвойственны для геосферы, т.е. созданные искусственно. Как правило, большинство из них характеризуются длительным периодом полураспада и способностью включаться в биохимические реакции. Второе – накопление в пищевых цепях радионуклидов, представляющих опасность для высших животных и человека. И, наконец, ядерные испытания, аварии на атомных объектах и возможные вооруженные конфликты с использованием ядерного оружия, приводящие к массовому уничтожению живой природы.

7.1. Радиоактивное загрязнение атмосферы

Радиоактивность атмосферы формируется радионуклидами естественного происхождения, образовавшихся в результате ядерных испытаний, выбросами АЭС, технологическими процессами добычи, обогащения и переработки ядерных отходов атомной промышленности. Естественный радиоактивный фон приземной атмосферы формируют изотопы радона-222 и радона-220, составляющие в среднем 2–10 Бк/м³ и 0,2–10 Бк/м³. Доза радиоизотопов радона составляет 50 % естественных источников радиоактивности и равняется 1 мЗв/г, 0,3 мЗв/г приходится на суммарное космическое излучение, которое возрастает с высотой, и 0,2 мЗв/г приходится на все остальные естественные источники радиоактивности.

Испытания ядерного оружия оказали существенное влияние на повышение радиоактивности атмосферы. В течение 1945–1980 гг. в атмосферу было выброшено порядка 12,5 т делящихся элементов с общей активностью для долгоживущих изотопов: тритий – $2,4 \cdot 10^{20}$ Бк, углерод-14 – $2,2 \cdot 10^{17}$ Бк, цезий-137 – $9,6 \cdot 10^{17}$ Бк, стронций-90 – $6 \cdot 10^{17}$ Бк. В результате полного распада радионуклидов будет увеличиваться ожидаемая коллективная доза, составляющая 400 мбэр, и реализуемая к 3000 году. В настоящее время человечество получило не более 12 % ожидаемой коллективной дозы. К особенностям радиоактивного загрязнения атмосферы относится глобальность распространения в биосфере радионуклидов. Так С-14 вступает в биохимические реакции, может встраиваться в ДНК, замещая С-12 и в настоящее время отмечается его накопление в годичных слоях деревьев. Основное количество трития, участвуя в глобальном круговороте воды остается

в океане и включаются пищевые цепи. Долгоживущие радионуклиды углерода, трития и других элементов, включаясь в биогенную миграцию создают условия для глобального повышения уровня мутаций и непрогнозируемого изменения эволюционного процесса.

В качестве относительно локальных источников атмосферного радиационного загрязнения следует рассматривать ТЭЦ, предприятия ядерного цикла, аварии на атомных объектах и АЭС. В связи с тем, что радиохимические заводы атомной промышленности, на которых происходит обогащение урана и плутония, являются локальными источниками загрязнения атмосферы рассмотрим область распространения радиоактивных выбросов на примере Сибирского химического комбината г. Томска, таблица 16.

Таблица 16

Объемная концентрация радионуклидов в зависимости от расстояния от источника в Бк/м³ (Воскресенский В.В., Семенов С.Ю., 1996)

Расстояние от источника в км	H-3	C-14	Kr-85	I-129
2	$6,13 \cdot 10^3$	6,13	$1,26 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{-3}$
4	$8,80 \cdot 10^3$	9	$1,83 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^{-3}$
6	$7,67 \cdot 10^3$	7,84	$1,6 \cdot 10^5$	$7 \cdot 10^{-3}$
8	$6,49 \cdot 10^3$	6,63	$1,36 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^{-3}$
10	$5,38 \cdot 10^3$	5,5	$1,14 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^{-3}$
12	$4,5 \cdot 10^3$	4,6	$9,54 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^{-3}$
14	$3,75 \cdot 10^3$	3,84	$7,97 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^{-3}$
16	$3,15 \cdot 10^3$	3,21	$6,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
18	$2,65 \cdot 10^3$	2,71	$5,8 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
20	$2,28 \cdot 10^3$	2,33	$4,9 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-3}$
30	$1,15 \cdot 10^3$	1,18	$2,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^{-3}$
40	$6,65 \cdot 10^2$	0,7	$1,5 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^{-4}$
50	$4,36 \cdot 10^2$	0,5	10^3	$3,8 \cdot 10^{-4}$

Анализ результатов, представленных в таблице позволяет считать, что радиационное загрязнение приземного слоя атмосферы распространяться в радиусе 50 км, при отсутствии ветра и соответственное перераспределение объемной концентрации происходит в зависимости от направления ветра.

О поступлении радиоактивных веществ с продуктами питания в организм человека достаточно наглядно представлено на рис. 1. Выбросы АЭС представлены в основном инертными газами: изотопами ксенона, криптона и аргона и другие: углерод-14, стронций-90, тритий, йод-131, цезий-137 и т.д. В следовых количествах присутствуют: хром-51, марганец-54, кобальт-58, цирконий-95, ниобий-95 и другие.

Поступление в атмосферу криптона-85 с периодом полураспада ~ 10,7 лет может приводить к изменению электропроводности воздуха с непрогнозируемыми глобальными геофизическими последствиями. К 1992 г. концентрация криптона-85 в Северном полушарии повысилась в 10 раз.

Следовательно, поступление радионуклидов в атмосферу приводит к локальным и глобальным радиоактивным загрязнениям биосферы, что и происходило в период Чернобыльской аварии. Снижение радионуклидов в атмосфере, сопровождается их накоплением в почве, гидросфере и экосистемах.

7.2. Радиоактивное загрязнение гидросферы

В водной среде накапливается большее количество радионуклидов, чем во всех остальных средах. Прежде всего это радионуклиды естественного происхождения, делящиеся элементы ядерных испытаний, ядерные захоронения, сбросы ядерной промышленности и энергетики, атмосферные осадки и стоки с поверхности суши.

Анализ средних концентраций естественных изотопов в водной среде табл. 17.

Таблица 17.

Средние концентрации естественных радионуклидов в водной среде (Крошев, 1996)

Радионуклиды	Концентрация, Бк/ л	
	Морская вода	Пресная вода
Калий-40	12	0,004–0,24
Тритий	0,02–0,11	0,2–0,6
Бериллий-7	0,6	–
С-14	0,007	–
Радон-222	–	0,007–6,7
Радий-226	–	$4 \cdot 10^{-4}$ – $11 \cdot 10^{-2}$
Рубидий-87	0,11	–
Уран-234	0,05	$4 \cdot 10^{-4}$ – $11 \cdot 10^{-2}$
Уран-238	0,04	$2 \cdot 10^{-4}$ – $6 \cdot 10^{-2}$

позволяет заметить, что уровень радиоактивности морской воды связан с К-40 – период полураспада $1,3 \cdot 10^9$ лет, тритий, бериллий-7 и С-14, в то время как в пресной воде обусловлен радоном-222, радием-226, ураном-234 и К-40.

Испытания ядерного оружия, аварии атомных судов и сброс радиоактивных отходов в моря и океаны привели к существенному загрязнению коротко и долгоживущими радионуклидами акватории мирового океана. Часть изотопов осела и сконцентрировалась в данных отложениях, являясь источником хронического поступления радионуклидов в трофические цепи. Другие сразу включились в биологические процессы. Большая масса делящихся элементов находится в контейнерах, атомных реакторах и твэлах, которые разрушаясь представляют потенциальную радиоактивную угрозу в будущем. По оценкам МАГАТЭ суммарная активность радиоактивных отходов захороненных в 47 местах мирового океана без учета России составляет $1,24 \cdot 10^6$ Ки. Суммарная активность жидких и твердых отходов, сброшенных Россией в северные моря: Баренцево, Карское, Белое и Балтийское составила $39,8 \cdot 10^3$ Ки

за период с 1959–1994 гг. В морях Дальнего Востока суммарная активность отходов порядка $12,3 \cdot 10^3$ Ки. В настоящее время трудно оценить последствия радиоактивного загрязнения Мирового океана, однако нарастающее со временем включение в пищевые морские цепи долгоживущих изотопов несомненно приведет к отрицательным последствиям для здоровья человеческой популяции.

Радиоактивное загрязнение континентальных вод: озер, рек и болот имеет две особенности. Во-первых, ограниченность определенной территорией, т.е. локальность, во-вторых, вынос части радионуклидов с током воды в океан. В то же время при хроническом радиоактивном загрязнении появляются постепенно расширяющиеся районы биоаккумуляции и битранспортиации радионуклидов, заключение которых в пищевые цепи представлено на рис. 2. К наиболее распространенным изотопам гидросферы относятся тритий, содержание которого в жидких нормальных сбросах АЭС в несколько раз превосходит значение всех остальных нуклеотидов. Инкорпорированный тритий включается в биохимические реакции, приводя к мутациям, как при β -излучении, средней энергией 5,8 кЭв, так и при нарушении молекулярных связей, обусловленных заменой изотопа водорода нейтральным гелием после распада трития. тритий поступает в среду, не задерживаясь в очистительных системах. Достаточно продолжительный период полураспада $\sim 12,6$ лет, позволяет рассматривать тритий в качестве глобальных радиоактивных загрязнений гидросферы и биосферы. Так вблизи Калининской АЭС в воде озер Удомельского района содержание трития превышает фоновые значения в 20–50 раз. Гораздо более значительное количество трития выбрасывают радиохимические заводы. Один завод с мощностью переработки 1500 т урана в год сбрасывает порядка $7 \cdot 10^4$ Ки/г.

Одним из наиболее информативных показателей радиоактивного загрязнения экосистем континентальных водоемов являются данные отложения – главные депо радионуклидов. А результате многолетних сбросов НПО "МАЯК" на Урале в данных отложениях р. Течи сформировалось следующее распределение долгоживущих изотопов таблица 18 (Трапезникова и др 1996)

Таблица 18

**Вертикальное распределение радионуклидов в грунтах р. Течи
в 49 и 237 км от места сброса отходов**

Слой, см	^{90}Sr кВк/кг	^{137}Cs кВк/кг	^{90}Sr кВк/кг	^{137}Cs
	49 км от места сброса		237 км от места сброса	
0–2	2,4	200	0,37	0,14
2–4	2,7	210	0,47	0,15
4–6	2,4	150	0,54	0,21
6–8	3,7	170	1,11	0,25
8–10	5,6	340	1,07	0,18
10–12	6,8	360	1,16	0,14
12–14	8,6	470	1,80	0,17
14–16	7,5	640	0,88	0,15

16–18	9,5	590	0,78	0,17
18–20	11,2	450	0,05	0,16
20–22	7,6	390	0,65	0,16
22–24	7,5	390	0,50	0,13
24–26	6,8	210	0,69	0,10
26–28	6,0	63	0,66	0,08
28–30	7,7	47	0,69	0,05
30–32	6,3	44	0,60	0,04
32–34	4,8	7,6	1,12	0,03
34–36	5,0	4,9	0,43	0,03

Аналогичное радиоактивное загрязнение наблюдается и на Енисее в процессе эксплуатации Горнохимического комбината на протяженности 2000 км, Томи и Оби – деятельность Сибирского химического комбината. Характерно, что наиболее высокие дозы поглощенной радиации выявлены для водных растений, моллюсков и рыб таблица 19

Таблица 19

**Мощность дозы облучения в ближней зоне воздействия ГХМ,
Краснояпск (Крышев, 1996)**

Организмы	Мощность поглощенной дозы, мГр/сут	Естественный фон мГр/сут
Фитопланктон	0,01–0,1	0,0005–0,002
Зоопланктон	0,03–0,4	0,001–0,002
Макрофиты	1–4,6	0,001–0,01
Моллюски	1–2,5	0,002–0,01
Рыбы	0,3–1,6	0,002–0,01

Значение радиационной дозы, полученной населением составило порядка 0,5–1 мЗв/г при потреблении 20 кг рыбы. В исследованиях, проведенных томским профессором П.П. Ильинским установлена зависимость между уровнем радиостронция в моллюсках р. Томи и числом клеток с хромосомными нарушениями у паразитов этих моллюсков–описторхов. К наиболее интересным мутагенным изменениям можно отнести появление особей с 12 хромосомным кариотипом, составляющим в норме 14 хромосом. Таким образом, развитие атомной промышленности приводит к расширенному радиоактивному загрязнению гидросферы, включению радионуклидов в региональный и глобальный биологический круговорот. Увеличение концентрации радионуклидов на верхних уровнях трофических цепей становится опасным для здоровья человека, в то время как активация мутационных процессов приводит к непрогнозируемым эволюционным изменениям.

7.3. Радиоактивное загрязнение литосферы

Радиоактивное загрязнение литосферы происходит в результате подземных и надземных ядерных испытаний, глобальных выпадений радионуклидов из атмосферы, локальных выбросов предприятий ЯТЦ, твердых и жидких отходов. Большая часть делящихся элементов с водными стоками смывается в водоемы, остальные накапливаются в почве и включаются в пищевые цепи экосистем. Почва представляет собой сложную систему, состоящую из грубодисперсной мелкодисперсной глинистой фракции, живых организмов, почвенных растворов, газов и разветвленную систему постоянно идущих биохимических реакций. Обладая большой емкостью поглощения почвенный слой сорбирует радионуклиды и перемещает их в горизонтальном и вертикальном направлениях.

В зависимости от типа почвы варьирует и степень поглощения изотопов. Так песчаные почвы в меньшей степени по сравнению с глинистыми способны накапливать радионуклиды. Для осколочных радионуклидов интенсивность поглощения увеличивается: рутений–106, стронций–90, церий–144, цезий–137, в то время как прочность связей возрастает от: стронция–90, рутения–106, циркония–95, церия–144 и цезия–137.

Необходимо отметить, что глобальное выпадение нуклеотидов приводит к незначительному увеличению их содержания в почве. Для стронция–90 глобальное выпадение оценивается в 10 мКи/км². С увеличением плотности загрязнения до 1 Ки/км² массовая концентрация радионуклидов составляет 2,4·10⁻¹² %, цезий–137 – 3,9·10⁻¹² %, цирконий–95 – 1,6·10⁻¹⁴ %. Стронций–90 достаточно хорошо фиксируется различными типами почв (80–90 %), но под действием нейтральных солей легко десорбируется. Цезий–137 взаимодействуя с твердой фазой почв, плохо десорбируется и задерживаются на 95 % в ней. Следовательно, поглощенные почвой радионуклиды не мигрируют вниз, а накапливаются в верхнем плодородном слое, участвуя в биохимических процессах.

Характерной особенностью изотопов трансуранового ряда: плутония, амерция, кюрий, нептуния, имеющих периоды полураспада тысячи и десятки тысяч лет, является невысокая подвижность в почвенном слое. Что позволяет их рассматривать в качестве источника постоянного радиоактивного загрязнения. По современным оценкам до 99 % поступившего в биосферу плутония находится в почве и донных отложениях.

Повышение уровней радиоактивного загрязнения пойменных почв, наблюдается при высоких паводках, приводящих к выносу донных отложений вблизи объектов ядерной промышленности. В 300 километровой зоне загрязнения горнохимического комбината г. Красноярска отмечается плотность загрязнения пойменных почв от 20 Ки/км² до 200 Ки/км². Аналогичное радиоактивное загрязнение характерно и для припойменных почв р. Исеть на Урале (таб. 20).

Таблица 20

**Содержание радионуклидов в почвах прирусловой поймы р. Исеть
(Позолотина и др., 1996 г.)**

Место отбора	Глубина, см	Str ⁹⁰ Бк/кг	Cs ¹³⁷ Бк/кг
Верхний Яр	0–10	16+1	30+15
	10–20	8+1	22+12
	20–30	4+1	10+4
Красноисетское	0–10	123+29	60+16
	10–20	13+27	29+15
	20–30	150+18	31+8
Кондино	0–10	184+19	12+3
	10–20	293+30	15+3
	20–30	136+16	9+2
Мехонское	0–10	27+13	47+12
	10–20	43+7	13+3
	20–30	32+7	9+3

Долговременное радиоактивное загрязнение почвенного слоя происходит в результате аварии на объектах ядерной промышленности. В результате Чернобыльской катастрофы основная часть радионуклидов 60–80 % содержалась в почве и дерновине и тысячи гектар сельскохозяйственных угодий в течение десятилетий оказались непригодными для сельскохозяйственной деятельности.

Таким образом, почва является своеобразным аккумулятором радионуклидов, непосредственным источником и своеобразным проводником делящихся элементов через растения в экосистемы. Инкорпорирование, т.е. включение радионуклидов на суше осуществляется в большей степени в процессе роста и развития растений. В настоящее время на поверхности литосферы имеются локальные участки повышенной радиоактивной загрязненности, концентрирующие в районах деятельности ядерной промышленности, которые характеризуются явно выраженной тенденцией к расширению.

7.4. Радиоактивное загрязнение биосферы

Эволюция жизни на протяжении 4,5 млрд лет и формирование биосферы проходило в условиях повышенного относительно современного уровня радиационного фона. Изотопы различных элементов, включаясь в трофические цепи экосистем откладывались в данных отложениях углях, горячих сланцах и нефтяных пластах. Высокая радиорезистентность микроорганизмов, растений, беспозвоночных и позвоночных животных приводила к медленному, но неуклонному снижению радионуклидов в биосфере. Таким образом, эволюция высших животных и человека происходила в относительно стабилизированных радиационных условиях при дозовых воздействиях, сравнимых с современным естественным уровнем радиоактивности.

Антропогенное изменение радиоэкологической ситуации в течение относительно короткого периода времени ~ 50 лет, введение в биосферу большого количества естественных и искусственных делящихся элементов как в глобальном, так и в региональном масштабах приводит к концентрации их в пищевых цепях, непосредственно используемых человеком. Радиоактивные вещества естественного и искусственного происхождения, попадая в воздух, почву и воду, включаются в биосферный круговорот и представляют опасность как источники внешнего и особенно внутреннего облучения.

Радионуклиды, тем или иным путем попавшие внутрь живого организма, называются **инкорпорированными радионуклидами**. Будучи инкорпорированными в течение некоторого времени в органах и тканях, радионуклиды создают внутреннее облучение живого организма. Поглощенная доза при внутреннем облучении может быть сопоставима с биологическими последствиями, и в этом смысле она выступает в качестве меры радиационной опасности тех радиоактивных веществ, которые, находясь во внешней среде, могут попасть внутрь организма. Вполне понятно, что на величину дозы влияют вид и энергия ионизирующего излучения, испускаемого радионуклидами.

Для представителей животного мира существуют три главных пути попадания радионуклидов из внешней среды: пероральный путь (через органы пищеварения), ингаляционный путь (через органы дыхания) и резорбция через кожу. Загрязнение растений радионуклидами происходит в основном через корневую систему.

Органы пищеварения, дыхания и кожа выступают не просто в качестве "ворот" и "путепровода" для радионуклидов. В течение некоторого времени они содержат в себе поступившие радионуклиды, и в этом смысле их можно назвать входными депо. Из входных депо часть радионуклидов попадает в кровь, лимфу и затем разносится по внутренним органам и тканям, не связанным непосредственно с внешней средой. В результате часть радионуклидов оказывается осажденной во внутренних органах и тканях. Их дальнейшая судьба определяется как свойствами самих радионуклидов, так и организменными процессами. В конечном итоге инкорпорированные радионуклиды частично распадаются, частично выводятся из организма в результате биологических обменных процессов, частично надолго фиксируются в нем.

В каждом из перечисленных первичных (входных) депо механизм попадания радионуклидов в кровь имеет свои особенности; важными факторами при этом являются химическая форма радионуклида, его растворимость в жидкой среде входного депо, время нахождения в депо, состояния организма, в частности избыток или недостаток жизненно важного элемента, аналогом которого может служить рассматриваемое радиоактивное вещество, а также функциональное назначение данного депо.

Наиболее интенсивно в биологический круговорот включаются такие радионуклиды, как тритий, C-14, P-32, S-35, K-40, Ca-45, Fe-55, Sr-90, Cs-137, радиоизотопы иода. Активно внедряются в живые организмы и

радионуклиды семейств урана и тория. Накапливаясь в растениях, они по пищевым цепям поступают в ткани и органы животных и человека, вызывая внутреннее облучение. Особенно опасны инкорпорированные радионуклиды для растущих и молодых организмов.

В живых организмах представлены все известные химические элементы, при этом соотношения одних химических элементов такие же, как и в земной коре, других – как и в морской воде; целый ряд химических элементов в организме находится в соотношениях, характерных для состава вдыхаемого воздуха. Особенностью поведения в организме химических веществ является достаточно постоянное и строгое распределение по системам, органам и тканям. Поэтому неудивительно, что многие радионуклиды обладают свойством избирательного накопления в различных органах и тканях в силу совпадения или близости их химических свойств свойствами тех элементов, которые естественным образом входят в живые организмы. Например, Sr-90, который сходен по своим химическим свойствам с кальцием, переходит из растений в организм коровы, затем с молоком или молочными продуктами поступает в организм человека и накапливается в костной ткани и костном мозге, вызывая опухоли костей и лейкозы; перенос стронция из почвы в костную систему человека осуществляется с коэффициентом "полезного" действия, равным 7,6 %. Скелетными радионуклидами являются также уран, радий, свинец. Вместе с растительной пищей в организм человека поступает близкий по химическим свойствам к калию Cs-137, который с КПД, равным примерно 3 %, накапливается в печени и в половых железах, что приводит к возникновению наследственных изменений в потомстве. В щитовидной железе (особенно при дефиците в ней иода) интенсивно накапливаются радиоизотопы иода, вызывая ее разрушение или рак; щитовидным радионуклидом является и технеций. Тритий, радиоуглерод, калий и многие другие радионуклиды равномерно распределяются в организме (распределение считается равномерным, если более половины обнаруженного в организме радионуклида распределено в нем равномерно).

Большое количество радионуклидов поступает в организм человека и животных вместе с пищей не только из наземных, но и водных экосистем, которые загрязняются как глобальными выпадениями радиоактивных изотопов, так и сбросными водами предприятий ЯТЦ. Кроме того, некоторые радионуклиды, в их числе Sr-90 и Cs-137, сравнительно легко выщелачиваются из почв, загрязняя при этом подземные воды, которые могут использоваться для питьевого водоснабжения. В водных системах преимущественную роль играет не простой перенос радиоактивных веществ по пищевым цепям, а процесс биоаккумуляции, который может быть весьма интенсивным. Так, исследование рыбы реки Колумбия показало, что концентрация радиоактивного фосфора-32 ($T_{1/2}=14,3$ суток) в тканях рыб в 5000 раз выше, чем в самой реке. Установлено также, что морской фитопланктон аккумулирует радиоактивные вещества с коэффициентом накопления, равным 10^4 .

Таким образом, результаты прохождения радиоактивных веществ по пищевым цепям водных экосистем говорят о том, что необходимо вводить

коэффициент безопасности, равный примерно 10^4 по отношению к допустимым нормам, установленным на основе представлений о пассивном разбавлении сбросов.

Для оценки вредного влияния радионуклидов после попадания в организм человека используется биологический период полувыведения, в течение которого половина массы изотопа выделится из организма (таблица 21).

Таблица 21

Значения физического периода полураспада $T_{\text{физ}}$ и биологического периода полувыведения $T_{\text{биол}}$ для некоторых радионуклидов (Фелленберг, 1997)

Радионуклиды	$T_{\text{физ}}$	$T_{\text{биологическое}}$	$T_{\text{эффективное}}$	Вид излучения
H-3	12,26 лет	19 дней	19 дней	β^-
C-14	5730 лет	35 дней	35 дней	β^-
P-32	14,3 дня	10 лет	14,1 дня	β^-
K-40	$1,28 \cdot 10^9$ лет	17 дней	37 дней	β^-, β^+
Ca-45	165 дней	50 лет	163,5 лет	β^-
Sr-90	28,1 года	11 лет	7,9 лет	β^-, γ
I-131	8,07 дня	138 дней	7,6 дней	β^-, γ
Cs-137	30,32 года	70 дней	69,6 дней	β^-, γ
Ba-137	12,8 дней	200 дней	12 дней	β^-, γ
Rn-222	3,8 дней	–	–	α
Ra-226	1600 лет	55 лет	53,2 года	α, γ
U-233	$1,62 \cdot 10^5$ лет	300 дней	300 дней	α, γ
Pu-239	$2,44 \cdot 10^4$ лет	120 лет	120 лет	α, γ

$$T_{\text{эфф}} = \frac{T_{\text{биол}} \cdot T_{\text{физ}}}{T_{\text{биол}} + T_{\text{физ}}} \text{ – характеризует период, в течение которого ткани}$$

организма человека подвергаются облучению радионуклидами.

Определение $T_{\text{эфф}}$ для различных видов организмов и экосистем представляется одной из приоритетных задач современной радиоэкологии.

Необходимо отметить, что при попадании радионуклидов в экосистемы происходит значительное снижение их удельной радиоактивности. После радиационной аварии на уральском комбинате "Маяк" в 1957 г. произошло загрязнение озер, расположенных в Восточно уральском заповеднике. осенью 1957 г. уровень радиоактивности в одном озере превышал фоновые значения в 2600 раз в другом в 1400. Летом 1958 г. превышение составляло 370 и 1000 раз соответственно. Снижение радиоактивности воды происходило в следствии распада короткоживущих изотопов, химической трансформации и сорбции в донные отложения и илы более 90 % радионуклидов. В течении последующих 3–5 лет наблюдалось уменьшение удельной радиоактивности в связи с дезактивацией короткоживущих радионуклидов. Интенсивный смыв с

водосборных территорий в водоемы, закрепление изотопов в донных отложениях, почвах и инкорпорация в биосистемах. В течение последующих 40 лет и более радиоактивность водоемов определяется в основном долгоживущими элементами: ^{90}Sr и ^{137}Cs . Устанавливается динамическое распределение радионуклидов в компонентах водного биоценоза. Наблюдается медленное снижение активности и более глубокое проникновение делящихся элементов в данные отложения (Смагин, Стукалов, 2000 г.) (таблица 22).

Таблица 22

Распределение β -активности в компонентах гидроценозов и кратность накопления (во сколько раз превышает фон) (Смагин, Стукалов, 2000) в озерах Восточно-уральского заповедника

Озера	Средняя плотность загрязнения $\text{кБк}^{90}\text{Sr}/\text{м}^2$	Концентрация в воде Бк/л	КК- кратность накопления					
			Донные отложения	Водоросли	Тростник	Прибрежная растительность	Рыбы мышцы	Рыбы кость
Кожа-Куль	40	14	250	1500	530	4500	16	110
Бердники	33000	2400	250	1500	–	690	–	–
Уруск-уль	26000	3700	1900	1500	–	230	–	–

Анализ результатов позволяет заметить, что максимальное накопление радионуклидов осуществляется многолетними водорослями и донными отложениями. Накопление загрязнений прибрежной растительностью, обусловлено прежде всего стоками с водосборных бассейнов. В связи с тем, что основным накопителем делящихся элементов являются донные отложения, рассмотрим первичное – в течение первых 2 лет распределение радионуклидов в озерах (табл. 23)

Таблица 23

Распределение радионуклидов в озерных экосистемах в процентах от запаса в водоеме (Смагин, Стукалов, 2000 г.)

Радионуклиды	Вода %	Донные отложения %	Биомасса %	Период полуочистки (сутки) воды	Период максим. концентрации в донных отложениях (сутки)
^{90}Sr	10	89	1	120–190	780–1100
^{137}Cs	2	98	–	4–27	780–1100
^{106}Ru	8	92	–	18–110	80–230
^{144}Ce	0,5	99	0,3	1–24	8–90

После достижения максимальной концентрации радионуклидов в донных отложениях ÷ 10–15 см, происходит вертикальное перераспределение элементов в течении последующих 40 лет до глубины 70 см со средним снижением активности и накоплением в трофических цепях водных экосистем (табл. 24)

Таблица 24

Коэффициенты концентрирования КК–отношение концентрации радионуклидов в трофическом уровне относительно концентрации в предыдущем на озерах Восточно–уральского заповедника (Смагин, Стукалов, 2000 г.)

Трофические уровни	КК	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cr
1 уровень – отношению к воде Растения	150	370
По отношению к водным растениям		
Растительные рыбы	1,5–5	0,2–0,5
Рыбы со смешанным питанием	1,5–5	0,2–0,5
Растительная и птицы	1,5–7,5	
Относительно растительной рыбы		
Хищная рыба	0,65	4
Птица, питающаяся рыбой	0,03–0,4	0,8
Интегральные КК по отношению к концентрации в воде		
Растительная рыба	450	130
Рыба смешанного питания	450	130
Рыба хищная 1–го уровня	350	540
Рыба хищная 2–го уровня	70	1200
Растительная и птица	3700	–
Рыбоядная птица	150	100

Таким образом, значительное увеличение концентрации радионуклидов в пищевых цепях способствует очищению воды стоячих водоемов и распределению изотопов в экосистеме. Биопродуктивность таких водоемов в том числе и открытых отстойников жидких ядерных отходов несколько снижается несколько-

ко в период непосредственного загрязнения, восстанавливается через некоторое время и во многих случаях превышает первоначальную. Как правило для всех гидробионтов в зоне повышенного радиоактивного загрязнения, отмечается повышенная эмбриональная смертность, аномалии развития, цитогенетические нарушения, снижение средней продолжительности жизни и т.д. В то же время численность популяций существующих видов достаточно высокая. На таких озерах, как правило, успешно заселяются и размножаются перелетные водоплавающие птицы, остающиеся зимовать, если аналогичные озера–отстойники не замерзают в связи с регулярным сбросом в них теплых

разбавленных радиоактивных отходов. Относительно высокая численность популяций животных в таких своеобразных радиоактивных резервациях объясняется, во-первых, адаптивными способностями быстро размножающихся видов с относительно высокой скоростью смены поколений.

Во-вторых, с отсутствием антропогенного влияния, т.к. водоемы с радиоактивной загрязненностью и прилегающие к ним территории как правило являются запретными зонами или районами с ограниченным доступом для людей. Естественно, что в эти области осуществляется активная миграция животных и популяционно-видовой отбор на радиорезистентность.

Большую опасность в качестве разносчиков радионуклидов представляет собой мигрирующие птичье население, которое гнездится на загрязненных водоемах, питается в течение летнего сезона биопродуктами с повышенной концентрацией изотопов и соответственно в осенний период разносит изотопы далеко за пределы этих водоемов. С целью снижения численности потенциальных носителей радионуклидов с озер-отстойников предприятий ядерной промышленности специальными службами осуществляются регулярные отстрелы водоплавающей дичи. Вынос радиоактивных загрязнений из стоячих водоемов происходит также во время весенних паводков, когда превышение уровня воды приводит к радиоактивному загрязнению прибрежной зоны и речных долин.

Следовательно, озера и пруды, загрязненные радионуклидами являются долговременными локальными источниками поступления их в экосистемы.

Распределение радионуклидов в биогеоценозах несколько отличается по характеру миграции от водных экосистем. В качестве депо делящихся элементов выступает почва, высокая концентрация характерна для растительности. В бедных биогенными элементами почвах – тундрах, полустепных ландшафтах в трофических цепях экосистем накопление радиоизотопов происходит интенсивнее, чем в насыщенных

Общий характер миграции радионуклидов в биоценозе, достаточно наглядно представлен на рис. 1

В зависимости от типа почв и количества атмосферных осадков меняется и накопление радионуклидов при локальных и глобальных выпадениях (таблица 25).

Таблица 25

Запасы стронция-90 и цезия-137 в почвах различных природно-климатических зон (слой почвы 0–10 см) (Соколов, Криволицкий, Усачев, 1989)

Тип почвы, биогеоценоза	Место	Количество осадков, мм/год	Запас радионуклида ГБк/км ²		¹³⁷ Cs ⁹⁰ Sr
			⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	

Бурая лесная, широколиственные леса	Рицинский заповедник, Абхазская АССР	1500–2000	15,4±1,3	19,8±4,0	1,3
Перегонно-карбонатная, широколиственные леса	Псху-Гумистинский заповедник, Абхазская АССР	1500–2100	12,7±4,9	17,2±4,6	1,4
Бурая лесная, широколиственные леса	Краснодарский край, Новороссийский р-н, РСФСР	500–800	7,6±3,1	8,6±2,9	1,1
Дерново-подзолистая супесчаная, смешанные леса	Березинский заповедник, БССР	650–780	7,2±1,5	10,4±1,2	1,5
Буро-таежная, хвойно-широколиственные леса	Хабаровский край, РСФСР	600–700	2,5±1,8	5,5±2,3	2,2
Типичный чернозем снытневая дубрава лесостепи	Центрально-Черноземный заповедник, РСФСР	500–600	6,7±1,5	8,4±2,0	1,2
Горно-луговая, высокогорный луг	Дагестанская АССР	400–500	2,9±0,9	4,6±1,3	1,6
Торфяно-глебовая тайга	Беломорская биостанция МГУ, РСФСР	300–450	2,0±0,3	9,0±1,8	4,4
Чернозем карбонатный, лесостепь	Ростовская обл., РСФСР	350–450	5,3±1,1	12,5±2,6	2,4
Бурая полупустынная, Чернопынная полупустыня	п. Черноземельск, Калмыцкая АССР	100–150	6,2±1,2	7,6±1,5	1,2
Светло-серая песчаная, белосаксаульная пустыня	Пески Чильмамедкум, ТССР	100–150	5,6±2,1	6,4±2,2	1,1
Серо-бурая пустынная, щебнистая пустыня	Заалтайская Гоби, МНР	20–100	5,4±0,6	10,7±0,6	2,0

Максимальное количество загрязнений выпадает в зоне с большим количеством среднегодовых осадков и концентрируется в корнеобитаемых слоях: 0–15 см. Относительная недостаточность поверхностных слоев северной тайги минеральными солями и высокая миграция стронция-90 и цезия-137 в

болотно–подзолистых почвах способствуют накоплению этих элементов в растительности и в организме животных (таблица 26, 27).

Таблица 26

Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в естественной растительности северной тайги (Беломорская биостанция МГУ) (Соколов, Криволицкий, Усачев, 1989 г.)

Вид растения	Активность радионуклида (Бк/кг воздушно–сухой массы)		Коэффициент накопления (K_n)*	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Береза (древесина)	5	14	0,3	0,2
Злаковое разнотравье**	7	16	0,5	0,3
Можжевельник (<i>Juniperus communis</i>)	18	86	1,2	1,2
Вереск (<i>Calluna vulgaris</i>)	11	51	0,7	0,7
Багульник (<i>Ledum palustre</i>)	39	22	2,6	0,3
Черника (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	–	34	–	0,5
Брусника (<i>Vaccinium vitis–idaea</i>)	–	51	–	0,7
Мох (<i>Sphagnum</i> sp., <i>Polytrichum</i> sp)	51	160	3,4	2,3
Лишайник (<i>Cladonia rangiferina</i> , <i>Cetraria islandica</i>)	–	230	–	3,3
Грибы	0,8	44	0,05	0,6
Почва (0–10 см)	15	70	–	–

* Рассчитывается по формуле $K_n = \text{удельная активность радионуклида в растении} / \text{удельная активность радионуклида в почве}$

** В составе злакового разнотравья: коостер ржаной (*Bromis secalis*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), канареечник (*Diglyphis orundinaceae*), овсяница красная (*Festuca rubra*) и др.

Таблица 27

Накопление ^{90}Sr и ^{137}Cs естественной растительностью южной тайги (Березинский заповедник)

Вид растения	Активность радионуклида (Бк/кг воздушно–сухой массы)		Коэффициент накопления (K_n)*	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
Сосна (древесина) (<i>Pinus silvestris</i>)	13	7	0,1	0,02
Сосна (хвоя)	42	30	0,2	0,07
Береза (древесина) (<i>Betula verrucosa</i>)	19	20	0,1	0,08
Ель (древесина) (<i>Picea excelsa</i>)	14	17	0,1	0,04

Ива (древесина) (<i>Salix sp.</i>)	8	33	0,1	0,07
Осина (древесина) (<i>Populus tremula</i>)	36	6	0,3	0,04
Ольха серая (древесина) (<i>Alnus incasta</i>)	25	11	0,1	0,04
Дуб (древесина) (<i>Quercus robur</i>)	28	5	0,2	0,04
Можжевельник (побеги и хвоя) (<i>Juniperus communis</i>)	25	28	0,1	0,06
Вереск (побеги и листья) (<i>Calluna vulgaris</i>)	26	93	0,2	0,2
Черника (стебли и листья) (<i>Vaccinium myrtillus</i>)	120	560	0,7	1,2
Брусника (стебли и листья) (<i>Vaccinium vitis-idee</i>)	39	58	0,2	0,1
Кислица (<i>Oxalis acetosella</i>)	62	47	0,5	0,1
Мох (<i>Pleuroseum schreberi</i>)	37	210	0,2	0,5
Лишайник (<i>Cladonia sp.</i>)	21	200	0,1	0,4

Интенсивное накопление стронция-90 наблюдается для мхов, багульника, черники, кислицы, сосны, осины, в то время как максимальная аккумуляция цезия характерна для мхов и лишайников. Известно, что хвойные породы деревьев содержат повышенное количество радиоактивных элементов, поступающих при атмосферных осадках, поэтому хвойные используются в качестве биоиндикаторов радиоактивного загрязнения.

накопление радионуклидов животными зависит как от их местообитания, так и от характера питания, представленные результаты исследований в таблицах 28, 29, 30, 31, 32) позволяют оценить интенсивность аккумуляции элементов различными видами.

Таблица 28

Накопление ^{90}Sr , ^{137}Cs , Са и К животными северной тайги (Печоро-Илычский заповедник) (Соколов, Криволуцкий)

Вид животного	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs
		Бк/кг воздушно-сухой массы		г/кг воздушно-сухой массы

Белка (<i>Sciurus vulgaris</i>) (мышцы)	3	70	70	3,8
(кости)	54	6	63	3,1
Колонок (мышцы)	9	20	125	4,4
(<i>Mustela sibirica</i>) (кости)	36	2	97	2,2
Горноста́й (кости)	40	30	89	3,4
(<i>Mustela erminca</i>) (мышцы)	6	40	76	5,0
Куница (<i>Martes martes</i>) (тушка)	14	140	51	4,6
Ондатра (<i>Ondatra zibetica</i>)	60	52	17	1,6
(тушка)	30	20	20,8	1,9
Медведь бурый (мышцы)	28	8	111	0,3
(<i>Ursus arctos</i>) (кости)	1	120	6,9	1,8
Лось (<i>Alces alces</i>)	80	15	–	–
(мышцы)	8	430	0,4	2,6
(кости)				
Северный олень (мышцы)	–	36	78,8	–
(<i>Rangifer tarandus</i>)	23	70	21,6	–
Белая куропатка (кости)	38	–	136	4,0
(<i>Lagopus lagopus</i>) (мышцы)	18	60	16,4	1,2
Глухарь (<i>Tetrao urogalus</i>)				
(мышцы)				
Рябчик (<i>Tetrastis bonasia</i>) (тушка)				

Таблица 29

Накопление животными ^{90}Sr и ^{137}Cs из глобальных выпадений на Дальнем Востоке

Образец	Активность радионуклида (Бк/кг)		$K_{пр}$	
	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs

Почва (кедрово–широколиственный лес)		76		
Моллюски	37		–	–
Наземные катушки		42		
Амфибии	34		0,9	0,6
Чернопятнистая лягушка		5		
Сибирская лягушка	18	37	0,5	0,07
Млекопитающие	–		–	0,5
Домовые мыши		11		
Азиатская лесная мышь	8	15	0,2	0,1
Красно–серая полевка	29	30	0,8	0,2
Полевка–экономка	37	–	1,0	0,4
Бурундук	25	28	0,7	–
Заяц беляк	18	28	0,5	0,4
Ондатра	40	12	1,1	0,4
Колонок	13	14	0,4	0,2
Птицы	23		0,6	0,2
Овсянки		6		
Белоспинный дятел	15	6	0,4	0,08
	8		0,2	0,08

Таблица 30

**Накопление стронция–90 и цезия–137 животными смешанного леса
(Березинский биосферный заповедник, 1982 г.)**

Вид животного	Активность радионуклида Бк/кг воздушно–сухой массы)		K _и /K _{пр}	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs

Дождевые черви	20			
<i>Lumbricus terrestris</i>	18	33	0,3/0,15	0,4/0,24
<i>Lumbricus rubelus</i>	17	25	0,3/0,14	0,3/0,18
<i>Nicodrilus caliginosus</i>		40	0,2/0,13	0,5/0,29
Моллюски	25			
<i>Arion subfuscus</i>	162	40	0,4/0,19	0,5/0,29
<i>Bradybaena fruticum, Trichia sp.</i>		14	2,3/1,25	0,2/0,10
Насекомые	32			
<i>Pterostichus oblongopunctatum</i>	40	40	1,8/0,25	1,2/0,29
<i>Geotrupes stercorusus</i>		75	0,5/0,31	2,0/0,54
Амфибии	90			
<i>Rana temporaria, Rana sp</i>		30	2,5/0,69	1,0/0,21
Рептилии	37			
<i>Natrix natrix</i>	200	175	1,0/0,29	5,8/1,3
<i>Anguis fragilis</i>		50	5,0/1,54	1,6/0,36
Млекопитающие	17			
<i>Sorex araneus</i>	30	90	1,0/0,13	2,1/0,64
<i>Nicrotus arvalis</i>	32	56	0,5/0,23	1,3/0,40
<i>Cletrionomis glareolus</i>	97	74	0,5/0,25	1,6/0,53
<i>Apodemus flavicolus</i>	20	198	1,6/0,75	4,2/1,4
<i>Vulpes vulgaris</i>		–	0,6/0,15	–
Птицы	28			
<i>Parus major</i>		40	0,4/0,22	0,9/0,29
Дождевые черви	20			
<i>Lumbricus terrestris</i>	18	33	0,3/0,15	0,4/0,24
<i>Lumbricus rubelus</i>	17	25	0,3/0,14	0,3/0,18
<i>Nicodrilus caliginosus</i>		40	0,2/0,13	0,5/0,29
Моллюски	25			
<i>Arion subfuscus</i>	162	40	0,4/0,19	0,5/0,29
<i>Bradybaena fruticum, Trichia sp.</i>		14	2,3/1,25	0,2/0,10
Насекомые	32			
<i>Pterostichus oblongopunctatum</i>	40	40	1,8/0,25	1,2/0,29
<i>Geotrupes stercorusus</i>		75	0,5/0,31	2,0/0,54
Амфибии	90			
<i>Rana temporaria, Rana sp</i>		30	2,5/0,69	1,0/0,21
Рептилии	37			
<i>Natrix natrix</i>	200	175	1,0/0,29	5,8/1,3
<i>Anguis fragilis</i>		50	5,0/1,54	1,6/0,36
Млекопитающие	17			
<i>Sorex araneus</i>	30	90	1,0/0,13	2,1/0,64
<i>Nicrotus arvalis</i>	32	56	0,5/0,23	1,3/0,40
<i>Cletrionomis glareolus</i>	97	74	0,5/0,25	1,6/0,53
<i>Apodemus flavicolus</i>	20	198	1,6/0,75	4,2/1,4
<i>Vulpes vulgaris</i>		–	0,6/0,15	–
Птицы	28			
<i>Parus major</i>		40	0,4/0,22	0,9/0,29

Таблица 31

Накопление стронция–90 и цезия–137 животными широколиственных лесов (Рицинский и Псху–Гуминистинский заповедники, Абхазская АССР)

Вид животного	Активность радионуклида Бк/кг (воздушно-сухой массы)		K _n /K _{np}	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
Псху-Гумистинский заповедник				
Дождевые черви				
<i>Dendrobaena mariupolienis</i>	51	19	0,7/0,25	0,3/0,08
<i>Eisenia foetidae</i>				
<i>Octolasion lacteum</i>				
Раковинные моллюски				
<i>Helix albescens</i>	190	30	2,5/0,91	0,5/0,13
Мокрицы				
<i>Armadillidium</i> sp	200	40	2,7/0,96	0,7/0,17
Диплоподы				
<i>Pachyiulus foetidissimus</i>	500	65	6,7/2,40	1,1/0,27
Насекомые				
<i>Geotrupes inermis</i>	35	70	-/0,17	-/0,29
<i>Nicrophorus investigator</i> ,	36	-	-/0,17	-
<i>Oecseptoma thoracica</i>				
<i>Sarabus</i> sp	46	-	-/0,22	-
Амфибии				
<i>Bufo viridis</i>	171	105	4,4/0,82	1,5/0,44
Рептилии				
<i>Lacerta dezugini</i>	103	87	2,6/0,50	1,2/0,37
<i>Lacerta pravicola</i>				
<i>Ophisaurus apodus</i>	176	90	4,5/0,85	1,3/0,38
Рицинский заповедник				
Дождевые черви				
<i>Dendrobaena mariupolienis</i>	90	-	0,7/0,41	-
<i>Octolasion lacteum</i>				
Моллюски				
<i>Helix albescens</i>	720	-	6,0/3,3	-
Диплоподы				
<i>Pachyiulus foetidissimus</i>	450	96	3,7/2,0	2,1/0,25
Амфибии				
<i>Rana temporaria</i>	53	-	-/0,24	-

Таблица 32

Накопление радионуклидов глобальных выпадений в некоторых объектах биогеоценоза широколиственного леса в районе г. Новороссийска (Краснодарский край, РФСР)

Объекты биогеоценоза	Активность радионуклида Бк/кг (воздушно-сухой массы)		K _n /K _{np}	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs

Почва	76	100	–	–
Подстилка	29	14	–/0,4	–/0,14
Свежий опад (дуб, бук, вяз)	56	12	–/0,7	–/0,12
Моллюски				
<i>Arion subfuscus</i>	40	–	1,4/0,5	–
<i>Helix albescens</i>	74	13	2,6/0,9	1,0/0,13
<i>Bradybaena fruticum</i>	50	57	1,7/0,7	4,1/0,57
<i>Trichia</i> sp.	34	16	1,2/0,4	1,1/0,16
<i>Columella</i> sp.	19	16	–/0,3	–/0,16
<i>Colchodina laminata</i>	15	14	–/0,2	–/0,14
Амфибии				
<i>Rana ridibunda</i>	75	35	–/1,0	–/0,35
Млекопитающие				
<i>Sus scrofa</i>				
♂, 1 год	71	–	–/0,93	–
♂, 3 года	35	53	–/0,46	–/0,53
♂, 4 года	50	–	–/0,66	–
♀, 2 года	18	26	–/0,23	–/0,26
<i>Capreolus capreolus</i> , ♀	105	–	–/1,38	–
Олень пятнистый	45	–	–/0,59	–

Как правило стронций–90 аккумулируется животными активно потребляющими кальций, цезий–137 преимущественно накапливается позвоночными животными. Необходимо отметить, что ускоренной миграции радионуклидов в почвенном слое экосистем способствуют роющие животные, дождевые черви и вспашка сельскохозяйственных угодий. В среднем накопление стронция–90 в трофических цепях почвенных сапрофагов и растительноядных насекомых происходит практически одинаково в различных климатических зонах, в то время как цезий–137 более интенсивно аккумулируется в смешанных лесах на дерново–подзолистой почве. По оценкам специалистов животные в среднем накапливают в гумидных зонах 0,006 – 0,016 % в аридных: 0,00003 – 0,0006 %, радиостронция, 75–87 %, которого от всей зоомассы приходится на беспозвоночных животных: кивсяков, мокрицы, дождевые черви, сухопутные моллюски. Позвоночные животные накапливают ⁹⁰Sr около 16 % в смешанных лесах, 11 – в широколиственных.

Цезий–137 составляет от 0,003 % до 0,005 % в гумидных и 0,00002–0,0004 % в аридных зонах в общей зоомассы. Прежде всего это позвоночные дождевые черви и насекомые на долю которых приходится от 56 % до 92 % радиоцезия.

Плутоний–239 с атмосферными осадками выпадает в северных широтах в 3–6 раз больше, чем в южных плотность загрязнения при этом варьирует в пределах: 0,002–1,2 и 0,07–0,08 Бк/кг. Распределение плутония в биогеоценозе представленное в таблице 33, позволяет рассматривать трансурановые элементы как мало подвижные элементы, сконцентрированные в почвенном слое, доля которого в биологических компонентах экосистем составляет 0,1 % от общего количества.

Таблица 33

Распределение Pu в биогеоценозах. (Павлоцкая, Поликарпов, 1983)

Компонент	Смешанный лес	Лесная пойма	Заливной луг	Разные биогеоценозы
	через 30 лет после загрязнения			
Почва	99,9 (0–20 см)	82,4 (0–7 см)	99,7 (0–20 см)	98,6–99,8
Подстилка	$1,5 \cdot 10^{-2}$	8,2	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-2}$
Лишайники	–	0,1	–	–
Травянистые растения	–	0,2	–	$(3–2) \cdot 10^{-5}$
Подземные части растений	$1,1 \cdot 10^{-4}$	–	$3,4 \cdot 10^{-4}$	–
Деревья:				
листья	$1,1 \cdot 10^{-5}$	–	$1,4 \cdot 10^{-6}$	–
корни	$8 \cdot 10^{-2}$	–	$6,7 \cdot 10^{-2}$	–
Беспозвоночные и мелкие позвоночные животные	$1,3 \cdot 10^{-4}$	8,9	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-2}–6 \cdot 10^{-9}$

Загрязнение плутонием–239 экспериментальных площадок с плотностью 660 кБк/м² приводит к снижению общей численности мезофауны в 2,3 раза, микроартропод в 7 раз, ногохвосток – в 7,5 раз, мелких клещей в 18 раз и значительное снижение видового разнообразия.

В зависимости от степени радиорезистентности, которая существенно зависит от вида животных наблюдается уменьшение или выпадение из биогеоценоза представителей с низким уровнем устойчивости при повышении радиоактивной загрязненности (Таблица 34)

Таблица 34

Радиочувствительность животных сухопутных биогеоценозов

Тип и класс животных	ЛД _{50/30} , Гр.	Источник информации
Бактерии	52–2500	Тимофеев–Ресовский, 1964; Witkamp, 1961
Амебы	1000–6000	Криволицкий, 1983
Энхитреиды	500	Niassaut, 1968
Дождевые черви	600–1600	Криволицкий, 1983; Edwards, 1969, Reichle et al., 1972
Нематоды	100–1000	Криволицкий, 1983
Клещи	80–300	Криволицкий, 1983
Скорпионы	500–1000	Рамад, 1981
Многоножки	100–1100	Криволицкий, Филиппова, 1979; Филиппова, 1978; Auerbach, 1958; Edwards, 1969
Мокрицы	20–1000	Граевская, 1977; Криволицкий, 1983; Poinsot, 1975; Edwards, 1969
Насекомые (Imago)	200–5000	Калмыков, 1970; Передельский, 1957; O'Brien, Wolfe, 1964
Моллюски		
Амфибии	120–200	Граевская, 1977; Кузин, 1980
Рептилии	7–14	Ильенко, Рябцев, 1980; Ильенко, 1974
Млекопитающие	10–200	Кузин, 1980
	2–13	Граевская, 1972, 1977; Ильенко, 1974;

Наиболее устойчивой к действию радиации в биогеоценозе является почвенная микрофлора, стерилизация которой наблюдается при дозах больше 1000 кР, грибы поражаются при уровне выше 8 кР. В то же время нарушения половой системы и развитие молодых организмов наблюдается при более низких дозовых нагрузках: 10–20 % от ЛД₅₀, что и приводит к снижению численности популяций.

Необходимо отметить, что травянистые растения в среднем в 10 раз более устойчивы к радиации, чем деревья, для которых ЛД₅₀ составляет 380–1200 Р_у сосны, лиственные породы порядка 2000–10000 Р. К наиболее радиорезистентным относятся мхи, водоросли и лишайники. Следовательно, повышение уровня радиоактивных загрязнений приводит к деградации биоценозов, выпаданию эволюционно более молодых видов растений и животных.

Естественно, что радиоактивное загрязнение биогеоценозов приводит к поступлению радиоизотопов в организм сельскохозяйственных животных и продукты животноводства табл. 35.

Таблица 35

**Коэффициенты всасывания радиоизотопов в желудочно–кишечном тракте взрослых сельскохозяйственных животных.
% поступившего в организм (по: [Сироткин и др., 1978])**

Радионуклид	Крупный рогатый скот	Овцы	Козы	Свиньи	Куры
Тритий	–	–	–	–	95
Кальций–45	11	35,2	20	–	50–60
Марганец–54	0,5	–	–	7–20	20–44
Железо–59	4,2	–	–	16,5–21,4	71,5
Кобальт–60	–	–	4,7	2,8	35,2
Цинк–65	11	–	–	51,4	64
Стронций–89,90	6,4–15,5 0,05	6,6–10 0,05	3,4–13,8 –	13,5 –	50–80 –
Иттрий–90	0,08	–	–	–	–
Цирконий–95	2,3	0,15	0,14	1,1	–
Рутений–106	100	100	–	–	75–80
Иод–131	50–75	56,5	68,3	100	67
Цезий–137	5	–	–	–	–
Барий–140	0,06	0,03–0,05	–	–	–
Церий–144	–	–	–	0,0013–	–
Плутоний–239, нитрат	–	–	–	0,0022	–
Плутоний–239, цитрат	–	–	–	0,19	–

Распределение поступивших в организм элементов зависит от типа радиоизотопов и скорости их поступления. Щелочно–земельная группа концентрируется в костной ткани, редкоземельные – в печени и

ретикулоэндотемии, щелочные, водорода и углерода более менее равномерно распределяются по всему организму.

Следовательно, дозовые нагрузки инкорпорированных радионуклидов определяются интенсивностью всасывания их желудочно–кишечным трактом, периодом полувыведения, массой критических органов и средней эффективной энергией излучения. В этом отношении наиболее опасными при попадании в организм являются излучающие радионуклиды: ^{210}Po , ^{210}Pb , ^{239}Pu , ^{227}Ac , Th, Ra; в меньшей степени: ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{144}Ce , и затем: ^{22}Na , ^{89}Sr , ^{137}Cs , ^{65}Zn и др. В качестве предельной дозовой нагрузки для сельскохозяйственных животных принимают величину поступления с кормом равную дозе $7,4 \cdot 10^2$ Бк/кг при содержании радиоизотопов типа ^{90}Sr в среде: $1,9 \cdot 10^6 - 3,7 \cdot 10^6$ Бк/м².

В природных биоценозах наибольшему воздействию облучения из млекопитающих подвергаются мышевидные грызуны. При плотности дозы загрязнения: 70–125 МБк/м² и мощности дозы инкорпорированного излучения $10^{-3} - 10^{-2}$ Гр/сут наблюдалась повышенная смертность у полевок, увеличивалась эмбриональная гибель, сокращалась продолжительность жизни, увеличивалась изменчивость морфофизиологических признаков. Анализ динамики численности грызунов в зоне Чернобыльской аварии, подвергшихся длительному хроническому облучению, выявили изменения темпа мутационного процесса, показателей структуры популяций, что привело к радиоадаптации и элиминации радиочувствительных популяций и видов. В связи с тем, что средняя продолжительность мышевидных грызунов составляет около 1 года, морфо–физиологические нарушения не оказывают существенного влияния на численность популяций. Наряду с этим лучевое повреждение крон деревьев и в связи с этим интенсивное развитие травяного покрова приводит к повышению пищевых ресурсов и повышению их численности.

Таким образом, можно выделить основные качественные изменения живых организмов при радиоактивном загрязнении экосистем.

Снижение численности радиочувствительных видов, видового разнообразия наземных и водных сообществ. Формирование относительно упрощенных и устойчивых к радиозагрязнению биоценозов. Постепенное в зависимости от снижения активности развитие восстановительных сукцессионных процессов.

Снижение численности и нарушение структуры радиочувствительных популяций происходит в результате изменений в системе воспроизводства. Эмбриональная смертность, тератогенез, нарушение в системе оогенеза, сперматогенеза и стерильность, которая компенсируется смещением периодов половой зрелости к ювенильным стадиям. Повышение гентичности и морфофизиологической изменчивости особей в качестве адаптивной реакции. Наблюдаются многочисленные морфологические отклонения соматического и генетического типа: онкологические заболевания, врожденные недоразвития конечностей, ершение чешуи, пучеглазие, недондоразвитие и аномалии соцветий, листьев и стеблей. Достаточно распространенным является аномальная пигментация, альбинизм, карликовость и гигантизм у растений. У млекопитающих наблюдаются нарушения в системе крови, репродуктивной,

дыхательной, эндокринной: надпочечных, щитовидной и половых желез, печени и почках.

Последующее восстановление численности радиорезистентных популяций происходит при относительно небольшом снижении морфофизиологических отклонений, т.е. радиоадаптация популяций различных видов растений и животных осуществляется при относительно высоком проценте отбора.

7.5. Сельское хозяйство в условиях радиоактивного загрязнения и защиты населения

Сильное превышение норм содержания радиоактивных веществ зафиксировано в 11 видах овощей, выращенных в японской префектуре Фукусима, где расположена аварийная АЭС

По данным министерства здравоохранения страны, в ряде продуктов, в число которых входят брокколи, капуста, шпинат, а также листья некоторых корнеплодов, обнаружены радиоактивные изотопы цезия и йода, содержание которых в 164 и семь раз больше нормы соответственно.

По мнению экспертов Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), зараженные продукты представляют больший риск для здоровья, чем зараженные частицы в воздухе, которые рассеиваются в течение нескольких дней. Министерство здравоохранения Японии также предупредило, что если человек будет в течение десяти дней съедать по 100 граммов продуктов с максимально выявленным количеством радиоактивных веществ, то он получит количество радиации, равное половине годовой нормы.

Как отмечается в сообщении, поставки всех зараженных продуктов прекращены с понедельника.

В зависимости от интенсивности радиационного загрязнения цезием-137 сельскохозяйственные угодья подразделяются на четыре зоны. Первая – с плотностью загрязнения до 5 Ки/км² все сельскохозяйственные культуры возделываются по общепринятым технологиям. В пределах 5–15 Ки/км² по цезию-137 на пахотных угодьях растениеводство можно вести без ограничений. Органическое удобрение – навоз используются после предварительного радиационного контроля. Фосфорные и калийные удобрения с подсевом многолетних трав необходимы для пойменных лугов и суходолов с

глинистыми и суглинистыми почвами. Пастбищные и сенокосные угодья на торфяниках и легких почвах, накапливающих повышенное количество радионуклидов необходимо известковать с внесением повышенных в 1,5 раза фосфорных и калийных удобрений. В районах с плотностью загрязнения 15–40 Ки/км² необходимо известковать и вносить повышенные дозы фосфорных и калийных удобрений. Выпас коров рекомендуется проводить на участках, где плотность загрязнений не превышает 5 Ки/км². При плотности загрязнений выше 40 Ки/км² сельскохозяйственные поля выводятся из севооборота, возможно выращивать культуры семенного и технического назначения, рекомендуется проводить залеснение территории.

В связи с тем, что интенсивное загрязнение сельскохозяйственных угодий происходит при испытаниях ядерного оружия или после аварий на ядерном объекте с выбросом радиоактивных веществ, характер последствий существенно зависит от времени воздействия. Выделяют: период йодной опасности – несколько месяцев, аэральные загрязнения: первый вегетационный период и корневой путь поступления радионуклидов длится десятки лет. В первый период выбросов короткоживущих изотопов типа ¹³¹I наиболее опасная ситуация характерна для первых недель, когда радиоизотопы активно включаются в пищевые цепи. Основным защитным мероприятием является исключение из рациона питания сельскохозяйственных животных пастбищного травостоя, т.е. переход на стойловое питание.

В период аэрального или воздушного загрязнения, продолжающего в течении всего вегетационного периода, происходит выпадение радионуклидов и поверхностное загрязнение надземной части растений и почвы. Вся растениеводческая продукция должна тщательно промываться и только после дозиметрического контроля употребляться в питание. Кормовые травы лучше заготавливать не в сушеном, а в виде силоса и сенажа. Почву для озимых необходимо известковать ~ 5 Т/га и проводить более углубленную до 5 см, чем обычно, что позволяет в дальнейшем не затрагивать загрязненный поверхностный слой. Перед посевом вносятся повышенные дозы калийных и фосфорных удобрений. Пастбища и луга также необходимо известковать поверхностно, провести глубинную вспашку и перемещением оборотного пласта на глубину, внести минеральные удобрения и засеять злаковыми травами.

Для третьего периода загрязнений характерно поступление долгоживущих радионуклидов: стронций–90, цезий–137, плутоний–239 из почвы через корневую систему в растения. Известкование, минеральные и органические удобрения значительно снижают поступление делящихся элементов в продукты питания. Калийные удобрения, препятствующие переходу в растения ¹³⁷Cs вносятся в почву вместе с азотными и фосфатными в соотношении: азот:фосфор:калий как 1:1,2:1,4.

Для уменьшения и предотвращения поступления радионуклидов в организм человека на загрязненных территориях необходимо знать и использовать основные способы защиты. В связи с тем, что радиоизотопы накапливаются как правило в верхнем слое почвы, плоды фруктовых деревьев,

корни которых находятся глубже оказываются малозагрязненными. В черноземах накопление в растениях радиоизотопов происходит меньше, чем в торфоболотистых песчаных и подзолистых почвах. Интенсивно накапливают радиоактивные элементы: лишайники, мхи, грибы, бобовые, злаки, укроп, петрушка, шпинат, виноград и т.д.

В процессе технологической переработки продуктов происходит снижение радиоактивности. При переработке зерна в муку радиоактивные вещества удаляются вместе с оболочкой, поэтому в крупе и муке ^{90}Sr в 3 раза меньше, чем в зерне. Чистка картофеля и свеклы снижает содержание радиоизотопов на 40 %. Во время варки грибов и овощей в раствор переходит от 50 % до 85 % цезия-137. Соки также практически не содержат загрязнений. Среди мясных продуктов наибольшее накопление радионуклидов характерно для говядины, курятины, гусятины, утятин, баранины, телятины, свинины. Варка мяса на 40–60 % процентов снижает содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые переходят в бульон. Аналогичная ситуация характерна и для рыбных продуктов, поэтому не рекомендуется использовать в пищу придонную рыбу: налим, бычок, сом, карась и т.д. При переработки молока в сливки переходит стронция-90 – 5 %, в творог – 27 %, в сыр – 45 %, цезия-137 – в сливки 9 %, в масло – 15 %, творог – 21 % в сыр – 40 %.

С целью предотвращения накопления в клетках радиоактивных элементов необходимо повысить в организме содержание стабильных элементов, которые являются химическими аналогами радиоизотопов. Так для йода-131 аналогом является йод, цезия-137 – калий, натрий, литий, стронция-90 – кальций, магний, свинца-210 – кремний, полония-210 – сера. Известно, что йод содержится во всех ягодах темного цвета: черноплодная рябина, смородина, черника, ежевика; в свекле, помидорах, луке-порее, грибах, редиске, репе, зеленом горошке, морской капусте. калий содержится в моркови, сельдереи, петрушке, шпинате, кураге, черносливе, изюме, картофеле, капусте, огурцах, ржаном хлебе, бобовых и т.д. Кальцием богата капуста, фасоль, миндаль, сыр, мед. Для хорошего усвоения кальция необходим витамин Д, содержащийся в печени, яйцах, салате-латуке. Снижение отрицательных последствий ионизирующего излучения способствуют и антиоксиданты: витамины Е, А и С. Витамин Е содержится в зерне, растительном масле, яйцах, салате, печени. Витамин А – в моркови, капусте, печени, почках, яичном желтке, сливочном масле. Витамин С находится в плодах шиповника, клюквы, красном перце, смородине, капусте, цитрусовых, облепиховом соке и т.д.

Для эффективного выведения попавших в организм радионуклидов необходима правильная организация пищевого режима и использование энтерсорбентов. В рационе желательна свекла, сок редьки, компоты, арбузы, чай с лимонником, мятой, брусникой. В качестве энтерсорбентов – накапливающих и выводящих соли тяжелых металлов и радиоизотопов как правило используются пищевые волокна богатые клетчаткой, способные сорбировать радионуклиды, тяжелые металлы, активизируют перистальтику кишечника и бактерии, синтезирующие пищевые ферменты и витамины группы В. Современные энтерсорбенты представлены целлюлозой, лигнином,

пектином, камедями и гелями, получаемых из овощей, отрубей, бобовых и фруктов. Пищевые волокна содержатся в кукурузе, яблоках, чечевице, овсе, брокколи, цветной капусте, ячмене, фасоли, тыкке, выращенных в экологически чистых районах, в противном случае наблюдается концентрация радионуклидов в пищевых волокнах. Среднесуточная потребность составляет для человека 30–40 г.

Пектины или полисахариды растительного происхождения связывают радиоизотопы стронция, цезия, свинца, ртути и способствуют их выведению из организма. Содержатся в клюкве, цитрусовых, красноплодной рябине, смородине, вишне, сливе, яблоке, бананах, капусте и т.д. Альгинат натрия – органическое соединение, получаемое из морских водорослей, ирландского мха, комбу и хидзики блокирует всасывание стронция-90 и способствует выведению ранее поглощенного. К энтерсорбентам также относятся чай, богатый витаминами группы В и каротином, кофе и какао.

Таким образом проживание в районах радиоактивного загрязнения с необходимостью приводит к изменению в системе сельского хозяйства и питания человека.

7.6. Основы радиоэкологического мониторинга

В связи с тем, что все этапы технологий ядерной промышленности представляют потенциальную опасность для живых организмов комплексный радиоэкологический мониторинг является необходимой компонентой ядерной промышленности. В радиоэкологическом мониторинге можно выделить 4 основных составляющих:

1. Приборный дозиметрический контроль радиационного уровня.
2. Эколого–биологический контроль за состоянием окружающей среды.
3. Гигиеническая и валиологическая оценка состояния здоровья обслуживающего персонала и населения.
4. Общественный контроль экологической безопасности деятельности предприятий ядерной промышленности.

Целью радиационного контроля является оценка и предупреждения вредного влияния радиации на организм человека, животных и объекты природной среды: воздух, воду, растения и т.д. Правила и нормы определяются санитарно–гигиеническими нормативами при: размещении объектов, являющихся потенциальными источниками загрязнения природной среды радиоактивными веществами; использовании ядерных взрывов в научных и производственных целях: удалении и обезвреживании радиоактивных отходов; определении допустимых уровней содержания радиоактивных веществ в объектах природной среды и организме человека, и пределов доз излучения для отдельных лиц и всего населения (Рихванов, 1997).

Экологический мониторинг состоит: из информационной части, включающей сбор и хранение текущей информации; блока оценки, основанного на сравнительном анализе и управляющей части, направленной на нормализацию ситуации. Текущий контроль за уровнем радиоактивности на

предприятиях ядерной промышленности осуществляется по следующим основным направлениям: производственными отходами предприятий, производящих и использующих радиоактивные материалы; оценки радиоизотопов в компонентах природной среды и выяснение путей их влияния на человека и сельскохозяйственную продукцию; контроль за дозами внешнего и внутреннего облучения населения; оценка радиационной обстановки региона, области и страны.

В качестве основной компоненты радиоэкологического мониторинга осуществляется регулярный контроль глобальных и региональных радиоактивных загрязнений природной среды. Дозиметрические измерения проводятся дистанционными аэро–космометодами в виде гамма или гамма–спектрометрической съемки, позволяющей регистрировать мощности экспозиционных доз радионуклидов: урана, тория, калия, цезия–137, натрия–24, кобальта–60 и др.

В местах расположения АЭС и предприятий ядерной промышленности радиационный контроль проводится систематическое измерение уровня радиоактивности всех типов радиоактивных отходов, гамма–излучений местности, исследование проб во всех объектах природной среды. Текущий контроль радиационной обстановки происходит в трех основных зонах: санитарно–защитной в радиусе 3–5 км относительно объекта; зоне наблюдений с радиусом 5–35 км и зоне контроля 35–50 км. На сельскохозяйственных угодьях в зоне наблюдений проводится гамма–съемка каждую неделю с определением цезия–137, стронция–90 и церия–144 в пробах сельхозпродуктов.

Оперативный контроль радиационной обстановки осуществляется автоматизированными системами типа АСКРО. АСКРО осуществляет текущий автоматический контроль мощности экспозиционной дозы гамма–излучения по периметру контрольных точек вокруг ядерного объекта. Система регистрирует радиоактивный фон в режиме реального времени, передает данные от всех пунктов наблюдения в центр в виде цифровых файлов, таблиц, графиков, карт с оценкой предаварийных и аварийных уровней, осуществляет расчет дозовых нагрузок для обслуживающего персонала и населения.

Данные о состоянии радиационной обстановки представляются контролирующим службам и администрации области ежедневно. Системы типа АСКРО значительно улучшают объективный контроль радиационной ситуации в районе расположения объектов атомной промышленности.

Необходимость экологического контроля за состоянием биологических компонентов среды на территориях ядерной промышленности обусловлена непосредственным комплексным влиянием радиоактивных воздействий на биосистемы. Биоиндикаторы, уступая физико–химическим методам в точности обладают рядом преимуществ. Во–первых, биосистемы реагируют на относительно слабые радиационные воздействия, в связи с эффектами кумуляции радиоизотопов. Способны давать интегрированный эффект по совокупности антропогенных факторов. Оценивают интенсивность изменений окружающей среды. Определяют тенденции в развитии природной среды.

Связывают радиоизотопы, указывают места их накопления и возможные пути их попадания в пищу человека.

Биомониторинг как и радиационный контроль необходимо проводить по периметру ядерного объекта в трех основных зонах с периодичностью не реже одного раза в месяц. Биологические тест-объекты выбираются в зависимости от конкретных биоценозов, формирующихся в районе наблюдения. Прежде всего – это растения, хвойные – как наиболее чувствительная к радиационному поражению группа растений, многолетние и однолетние травянистые растения. Млекопитающие: мышевидные грызуны и насекомоядные. Птицы – гнездовая экология мигрирующих и оседлых птиц с наблюдениями за отклонениями в развитии птенцов. Амфибии и рептилии – в качестве индикаторов уровня прибрежной загрязненности водоемов. Беспозвоночные почвенной мезофауны – обитатели подстилки поверхности почвы, наиболее интенсивно аккумулирующей радиоизотопы: дождевые черви, муравьи и остальные герпетобионты. Паукообразные: свободные охотники и тенетники, паутина которых способна накапливать радиоактивные аэрозоли, а пауки, являясь хищниками аккумулировать инкорпорированные радионуклиды. В качестве биоиндикаторов хорошо зарекомендовали себя ловчие сети пауков-крестовиков, изменение структуры которых связано с нарушением интенсивного поведения пауков пропорционально дозе облучения.

Физиологические отклонения и изменения в структуре популяций, наблюдаются на мышевидных грызунах, большинство физиологических показателей, которых аналогичны и в организме человека. В связи с тем, что основным накопителем радионуклидов является гидросфера, биомониторинг водоемов представляется одной из важнейших компонент экологического контроля. Радионуклиды, накапливаясь в донных отложениях, распространяясь по пищевым цепям. Создают долговременную опасность радиоактивного загрязнения водных систем. Естественно, что первоочередной задачей гидромониторинга является оценка вида и количества радионуклидов в компонентах экосистемы: донные беспозвоночные, водоросли, прибрежная растительность, рыба и т.д. По степени деградации донных сообществ можно судить о величине суммарной радиоактивной дозе аккумулированных радиоизотопов. Комплексный анализ данных мониторинга территорий позволяет оценивать текущую радиоэкологическую ситуацию и прогнозировать отдаленные последствия.

Оценка состояния здоровья персонала ядерных промышленных объектах и населения, проживающего на радиоактивно опасных территориях входит в компетенцию министерства здравоохранения и рассматривается в качестве важнейших составляющих допустимого уровня радиоактивности загрязнения. Систематический анализ состояния здоровья населения должен охватывать более 50 % проживающих по всем основным типам заболеваний: онкологические, сердечно-сосудистые, эндокринные, психологические, врожденные аномалии развития, цитогенетический анализ иммунорезистентность и т.д. Сопоставление полученных данных с результатами инструментального и биоиндикационного контроля позволяет

переходить к комплексной оценке радиоэкологической обстановки района, что и является основной задачей мониторинга.

Общественный контроль за радиоэкологическим состоянием среды является правом каждого гражданина основан на получении объективной информации и возможности оказывать общественное влияние в направлении снижения радиационного риска. В мире действует около 1500 различных неправительственных антиядерных групп. Как правило, это местные, региональные, национальные и международные организации. Основные задачи общественных организаций соответствуют интересам основного населения и заключаются в информационном обеспечивании населения в сфере ядерных технологий, просветительской деятельности, консультативно–пропагандистской работе, лоббировании местных и национальных законодателей, подготовки и проведения антиядерных акций, принимают участие в радиоэкологическом мониторинге ядерных объектов и территорий; проводят профилактические мероприятия по защите здоровья людей и осуществляют издательскую деятельность.

Таким образом, деятельность предприятий ядерной промышленности относится к наиболее опасным технологиям и возможна только в условиях комплексного радиоэкологического мониторинга.

Терминологический словарь

BWR – обозначение для зарубежных водо-водяных кипящих корпусных реакторов, в которых и теплоносителем, и замедлителем является обычная («легкая») вода, которая кипит в активной зоне.

in vitro – неживое.

in vivo – живое.

PWR – обозначение для зарубежных водо-водяных корпусных реакторов, в которых и теплоносителем, и замедлителем является обычная вода, находящаяся под давлением.

Vasa vasorum – сосуды, питающие стенки самих сосудов.

Абразия – разрушение морского берега.

Абсорбция – поглощение вещества всем объемом поглотителя.

Автолиз – саморастворение, распад тканей животного или растительного организма под влиянием ферментов, содержащихся в этих живых тканях.

Аддитивный – полученный путем сложения; величины, связанные с геометрическими или функциональными объектами таким образом, что их значения на сумме объектов равно сумме их значений для каждого из объектов.

Активация – возбуждение радиоактивности в стабильном изотопе элемента путем облучения, обычно нейтронами.

Активная зона – пространство ядерного реактора, в котором осуществляется цепная реакция деления ядер тяжелых элементов.

Активность – интенсивность излучения радиоактивного источника; количество атомов, распадающихся в единицу времени. Единица СИ называется *Беккерель* (обозначение Бк), соответствует одному акту распада в секунду. Ранее в качестве единицы применялся *Кюри* (обозначение – Ки), который соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

Алевритовый (крупно-, мелко-) – рыхлые мелкозернистые осадочные породы.

Аллостерический – регулирующий производство ферментов в клетках.

Альфа-частица – частица с зарядом, равным двум положительным элементарным единицам; ядро атома гелия, содержащее два протона и два нейтрона; испускается при распаде некоторых радионуклидов.

Анафаза – третья фаза непрямого деления клетки (митоза).

Анион – ион с отрицательным зарядом.

Антигистаминное средство – средство, действующее против биологически активных веществ – гистаминов.

Антропогенный – вызванный человеческой деятельностью.

Аплазия – врожденное отсутствие части тела или органа.

Аппроксимация – приближенное выражение каких-либо величин (или геометрических объектов) через другие более известные или более простые величины.

Аридный – континентальный, сухой.

Артефакт – образования или процессы, возникающие иногда при исследовании организма вследствие какого-либо воздействия или обработки и в норме не свойственные организму.

Асцитная жидкость – жидкость, находящаяся внутри какой-либо полости.

Атом – мельчайшая частица химического элемента, состоит из ядра, обладающего положительным электрическим зарядом, и окружающих его электронов.

Атомный номер – число протонов в ядре атома. Обозначение – *Z*.

Афферентные нервные волокна – нервные волокна, по которым возбуждение передается от иннервируемых тканей к центральной нервной системе.

Аэрозоль – частицы твердого тела или капли жидкости, взвешенные в газообразной среде.

Беккерель – единица СИ активности радиоактивных изотопов. Обозначение – Бк, соответствует одному акту распада в секунду.

Бета-частица – элементарная частица, испускаемая при распаде некоторых радионуклидов. Обычно это электрон, элементарная частица с отрицательным электрическим зарядом. Реже – позитрон, элементарная частица с положительным электрическим зарядом.

Биогенный – биологического происхождения.

Биота – совокупность видов растений и животных, объединенных общей областью распространения.

Бэр – внесистемная единица эквивалентной дозы. Представляет собой поглощенную дозу, умноженную на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать ткани организма. $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$.

Вымывание – вынос аэрозолей дождем из атмосферы.

Выпот – жидкость, выходящая из кровеносного русла в полости (плевральную, брюшную).

Высокоактивные отходы – сильнорадиоактивные продукты, получаемые при переработке выгоревшего ядерного топлива после реакций ядерного деления и активации, производящих тепло в ядерном реакторе.

Выщелачивание – вынос растворимого компонента из пористого твердого вещества просачивающейся водой.

Гамма-излучение – фотон с высокой энергией (коротковолновый, $< 10^{-8}$ см); электромагнитное излучение, возникающее при некоторых процессах радиоактивного распада.

Гемолитический – разрушение красных кровяных телец (эритроцитов) с выделением из них гемоглобина в окружающую среду в результате непрямого воздействия (облучение и т.п.).

Гемопоз – процесс кроветворения у человека и животных.

Гетерогенность – неоднородность, разнообразие.

Гидролиз – химическое взаимодействие вещества с водой.

Гидротермальный – месторождения металлических руд (образование связано с горячими водными ...).

Гидрофобный – боящийся растворения.

Гистамин – биологически активное вещество, относящееся к так называемым биогенным аминам.

Гликолиз – распад углеводов в животном организме без участия кислорода с образованием молочной кислоты.

Гомеостаз – совокупность сложных приспособительных реакций организма, направленных против действия внешней или внутренней среды, нарушающих постоянство внутренней среды организма.

Гомогенный – однородный, обладающий одинаковыми свойствами.

Горячие частицы – частицы радиоактивных выпадений размером в несколько микрометров или меньше, активность которых на несколько порядков превышает активность основной части выпавших радиоактивных осадков.

Грей – единица СИ поглощенной дозы, обозначение – Гр, соответствует 1 Дж/кг.

Гумидный – гнилостный.

Гуморальный (фактор) – связанный с жидкостями организма (кровью, лимфой).

Гумус – органическое вещество, образующееся в результате разложения растительных и животных останков.

Деактивация – удаление радиоактивных веществ или очистка от них.

Деаминирование – удаление аминокислот.

Деление ядер – экзоэнергетический (с выделением энергии) распад атомного ядра на два или большее число осколков. Может происходить спонтанно (самопроизвольно) или в результате захвата энергичной частицы, обычно нейтрона, в реакторе ядерного деления, например $^{235}\text{U} + {}^1_0\text{n} = {}^{95}\text{Mo} + {}^{139}\text{La} + 2{}^1_0\text{n} + 200 \text{ МэВ}$.

Детерминирование – определение, обусловливание.

Дочерний продукт (нуклид) – стабильный или радиоактивный нуклид, возникающий при распаде исходного материнского радионуклида. Иногда образуется цепочка последовательных радиоактивных дочерних продуктов.

Естественная радиация – радиация окружающей среды, обусловленная излучением природных радиоактивных элементов и космическими лучами.

Замедлитель – материал, используемый в активной зоне ядерного реактора для уменьшения энергии (скорости) нейтронов, образующихся в результате деления атомных ядер.

Зиверт – единица СИ эквивалентной дозы облучения. Представляет собой поглощенную дозу (в греях), умноженную на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать органы или ткани организма. Обозначение – Зв.

Зоопланктон – совокупность микроскопических населяющих толщу воды животных, пассивно переносимых течением.

Изотопы – нуклиды данного химического элемента, которые при одном и том же числе протонов в ядре отличаются разным числом нейтронов и, следовательно, разными атомными массами.

Ингибирование – подавление, замедление.

Ингибитор – вещество, замедляющее протекание химических реакций, замедляющее или прекращающее обмен веществ.

Инкорпорация – включение в свой состав, присоединение.

Интерфаза – состояние животной или растительной клетки между двумя последовательными клеточными делениями. В этот период в клетке протекают интенсивные процессы обмена.

Ион – атом или группа атомов с электрическим зарядом.

Ионизация – приобретение или потеря одного или нескольких электронов нейтральным атомом или молекулой с образованием иона.

Катаболизм – реакции обмена веществ в организме, соответствующие диссимиляции и заключающиеся в распаде сложных органических веществ.

Катион – ион с положительным зарядом.

Коагуляция – укрупнение частиц в дисперсных системах.

Коллективная доза – термин, часто используемый для обозначения коллективной эффективной дозы.

Коллективная эффективная доза – произведение от умножения средней эквивалентной дозы, полученной группой подвергнутых облучению людей, на число людей в этой группе.

Коллоид – высокодисперсное состояние вещества с частицами размером от отдельных молекул до 1 мкм (10^{-6} м).

Компартмент – сравнение.

Комплементарная спираль – средство накопления; белковое вещество, содержащееся в сыворотке крови каждого животного.

Концентрирования коэффициент – отношение содержания элемента или нуклида в поглощающем теле (или специфической ткани, органе и т.п.) к его содержанию в том, из чего он поглощается, или к его содержанию в окружающей среде.

Кумуляция – совокупное воздействие, суммирование.

Кюри – внесистемная единица радиоактивности, обозначение – Ки, соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ актам распада в секунду.

Лабильность – неустойчивость, нестойкость; функциональная подвижность, скорость протекания возбуждения в нервной или мышечной тканях.

Лантаноиды – семейство из 15 элементов с атомными номерами от 57 (лантан) до 71 (лютеций), известные также под названием «редкоземельные элементы».

Латентный – скрытый, внешне не проявляющийся.

Легководный реактор – ядерный реактор, в котором используется обычная («легкая») вода в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя.

Лейкопения – уменьшение числа лейкоцитов в крови (белых кровяных телец).

Лиганды – молекулы или ионы, непосредственно связанные с центральным атомом в комплексных соединениях.

Линогенез – процесс, связанный с образованием фермента – линазы.

Массовое число – общее число протонов и нейтронов в ядре данного атома; обозначение – A .

Материнский радионуклид – радионуклид, производящий дочерний радионуклид при радиоактивном распаде.

Мезенхима – соединительная ткань зародышей организмов многоклеточных животных на ранней стадии их развития.

Метаболизм – обмен веществ в организме.

Метаболиты – вещества, возникающие в организме в процессе обмена веществ.

Метаморфизм – процесс изменения структуры под влиянием температуры.

Метафаза – вторая фаза непрямого деления клетки (митоза).

Микрозообентос – совокупность микроскопических животных, обитающих на дне и в донном грунте морских водоемов.

Митоз – не прямое деление клетки, при котором происходит сложное преобразование клеточного ядра (хромосом).

Митохондрия – один из видов органоидов клетки (хондриосома).

Миелиноцит – процесс кроветворения в костном мозге.

Молекула – наименьшая частица химического соединения, которая может независимо существовать, сохраняя его химические свойства.

Монацит – минерал, представляющий собой фосфат редкоземельных элементов; первоначально использовался для извлечения тория, в настоящее время служит также важным источником лантаноидов.

Морфологический – относящийся к внешнему виду и строению.

Мощность дозы – поглощенная доза в единицу времени.

Мутагенез – процесс возникновения мутаций (радиационный, химический и др.).

Мутация – внезапное и резкое наследственное изменение какого-либо признака организма.

Нейтрон – нейтральная элементарная частица, масса которой почти равна массе протона.

Нейтропения – уменьшение нейтральных компонент крови.

Нейтрофилы – одна из форм лейкоцитов, цитоплазма которых содержит зерна, окрашивающиеся кислыми и основными красителями.

Низкоактивные отходы – радиоактивные отходы атомной электростанции и других предприятий с довольно низкой активностью (менее $4 \cdot 10^9$ Бк на тонну по альфа-частицам или $1,2 \cdot 10^{10}$ Бк по бета-гамма-излучению), что позволяет производить прямой сброс или простое захоронение.

Нуклид – изотоп какого-либо элемента, характеризующийся определенным суммарным количеством и соотношением протонов и нейтронов (иногда также определенным энергетическим состоянием ядра).

Облучение – воздействие ионизирующего излучения на какой-либо материал.

Обогащение – процесс, приводящий к увеличению доли определенного изотопа какого-либо элемента.

Оболочка тепловыделяющего элемента – внешний слой тепловыделяющего элемента, изготовленный из специального материала, обычно металла, устойчивого к химическому и физическому воздействию, который предотвращает коррозию ядерного топлива и выделение продуктов радиоактивного распада.

Органеллы – функционально важные образования у одноклеточных организмов.

Органотропный – оказывающий специфическое воздействие на орган.

Отработанное топливо – ядерное топливо, в котором накопились продукты распада, поглощающие нейтроны, в таком количестве, что они препятствуют протеканию цепной реакции.

Отходы средней активности – радиоактивные отходы атомной электростанции и др. предприятий, имеющие слишком высокий уровень радиоактивности для прямого сброса или простого захоронения, т.е. превышающий $4 \cdot 10^9$ Бк на тонну по альфа-частицам или $1,2 \cdot 10^{10}$ Бк по бета-гамма-излучению, но не дающие достаточно тепла, чтобы считаться высокоактивными отходами.

Переаминирование – биохимическая реакция, сопровождающая обмен веществ.

Период полураспада – время, за которое распадается половина ядер какого-либо радиоизотопа.

Перманентный – постоянный, непрерывный.

Перфузируемый препарат – препарат, пропускаемый, проталкиваемый через орган.

Пикноз ядра клетки – уплотнение.

Пиримидиновые (димеры) – частный случай полимеров.

Планктонное цветение – скопление (обычно сезонное) очень большого количества планктонных водорослей.

Плутоний – трансурановый химический элемент семейства актиноидов, атомный номер 94.

Пневмококк – бактерии семейства кокков (диплококки), вызывающие у человека ряд заболеваний, чаще всего легочных.

Поглощенная доза – количество энергии, полученное при облучении единицы массы поглотителя. Единица в системе СИ – «грей», обозначение – Гр, $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Потенцирование – нахождение числа по его логарифму.

Продукт активации – радионуклид, образовавшийся в результате облучения стабильного нуклида.

Продукт распада – нуклид, образовавшийся при распаде радионуклида.

Продукт ядерного деления – нуклид (радиоактивный или стабильный), образующийся непосредственно в результате реакции ядерного деления или последующего распада первичных осколков деления.

Пролиферация – разрастание ткани животного или растительного организма путем новообразования клеток.

Протектор – защитник, покровитель.

Протон – положительно заряженная элементарная частица атомной массой, равной примерно единице.

Пул – общий фонд.

Рад – внесистемная единица поглощенной дозы; $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг/г} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}$.

Радиоактивность – испускание ядрами неустойчивых атомов элементарных частиц, других ядер или электромагнитного излучения.

Радиоактивные выпадения – выпавшие на поверхность (Земли) радиоактивные частицы, возникшие в самой атмосфере или поднятые с суши, радиоактивность которых обусловлена ядерными взрывами или авариями.

Радиоактивный распад – превращение радионуклида в более устойчивый нуклид, сопровождающееся радиоактивным излучением (такое превращение может осуществляться с образованием промежуточных менее устойчивых дочерних продуктов).

Радиобиология – наука об использовании, применении и воздействии радиоактивности на биологические системы.

Радиогенный – радиационного происхождения.

РБМК (реактор большой мощности, кипящий) – отечественный водо-графитовый каналный реактор, охлаждаемый кипящей водой с графитовым замедлителем.

Реверсия – проявление у организмов свойств и признаков, характерных для их далеких предков.

Регенерация – восстановление организмом утраченных или поврежденных органов и тканей.

Регулирующие стержни – стержни, поглощающие нейтроны, для регулирования мощности реактора.

Редупликация – удвоение.

Резистентность – сопротивляемость.

Резорбция – повторное поглощение, всасывание.

Репарация – восстановление.

Репликация – воспроизведение.

Репопуляция – воспроизведение, обновление популяции.

Ресинтез – возобновление процесса синтеза.

Ретикулоэндотелиальная система – система клеток, которые переваривают и уничтожают другие клетки и инородные частицы.

Ригидность – негибкость, оцепенелость, вызванная напряжением мышц.

Сброс – выпуск отходов (газообразных, аэрозольных или жидких) промышленными предприятиями.

Седиментация (ДНК) – оседание твердых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под влиянием силы тяжести.

Семиаридный – полусухой.

Сенсибилизаторы – средства, повышающие чувствительность к внешнему воздействию.

Сенсибилизация – повышение чувствительности организмов, их клеток или тканей к действию какого-либо вещества.

СИ единицы (Международная система единиц) – общепринятая система единиц физических величин, основанная на следующих единицах: килограмм, метр, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела.

Синергизм – способность к совместному действию.

Синовиальная оболочка – оболочка, выстилающая суставные поверхности.

Скорость осаждения – отношение активности продуктов, осаждающихся на единицу поверхности в секунду, к активности продуктов, находящихся в единице объема соприкасающегося с ним воздуха.

Соматический – телесный.

Сорбция – общий термин для процессов адсорбции, абсорбции и персорбции.

Стохастический – вероятностный.

Стохастический – относящийся к случайным переменным.

Субстрат – основа (предмет или вещество), к которой прикреплены животные или растительные организмы.

Суперпозиция – наложение.

Тепловыделяющий элемент (ТВЭЛ) – металлический стержень или трубка, содержащая ядерное топливо, или комплект таких стержней в сборке.

Теплоноситель – жидкость или газ, выносящие тепло из активной зоны атомного реактора.

Терригенный – земного происхождения.

Толерантность – терпимость.

Топливный цикл – циклический процесс изготовления тепловыделяющих элементов и использования их в реакторе повторной обработки с целью извлечения неиспользованной части ядерного топлива (а также образовавшегося плутония) для перезаправки и повторного использования тепловыделяющих элементов.

Трансурановые элементы – химические элементы с атомным номером, большим, чем у урана-92.

Тритиевая единица –

Тритий – изотоп водорода ^3H , ядро которого состоит из одного протона и двух нейтронов. Радиоактивен, период полураспада составляет 12,4 лет.

Тропопауза – переходный слой, отделяющий тропосферу от стратосферы.

Турбулентность – вихревое течение жидкости.

Унитарный – единый, объединенный, составляющий одно целое.

Фаг – вирус, поражающий бактерии.

Фитопланктон – совокупность растительных организмов, населяющих толщу воды морей и пресных водоемов и пассивно переносимых течением.

Фосфорилирование – биохимическая реакция.

Хемогенный – химического происхождения.

Хроматин – хорошо окрашивающееся при гистологической обработке вещество ядра животных или растительных клеток.

Цитоплазма – не входящая в ядро часть протоплазмы животных и растительных клеток.

Человеко-зиверт – единица коллективной эффективной эквивалентной дозы, полученной путем умножения средней эффективной эквивалентной дозы на число людей, подвергшихся облучению.

Эквивалентная доза – поглощенная доза, умноженная на коэффициент, отражающий способность данного вида излучения повреждать органы или ткани организма. Единица СИ – зиверт, обозначение – Зв.

Экосистема – единый природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания с соответствующими физическими условиями жизнедеятельности.

Эксталяция – выделение, испарение.

Экскреция – выделение, удаление из организма конечных продуктов обмена веществ.

Экстраполяция – продолжение, обобщение.

Эксцизия – вырезание.

Электрон – стабильная элементарная частица, материальный носитель наименьшей массы и электрического отрицательного заряда в природе.

Элемент – вещество, состоящее только из атомов с одним и тем же атомным номером.

Элиминация – удаление, уничтожение, исключение.

Элонгация – удлинение.

Эффективная доза – эквивалентная доза, умноженная на коэффициент, учитывающий разную чувствительность различных тканей и органов к облучению; отражает суммарный эффект облучения для организма.

Ядерное топливо – радиоактивный материал, например ^{235}U , претерпевающий реакцию ядерного деления, в соответствующем виде, пригодном для использования в ядерном реакторе.

Ядерный синтез – образование одного атомного ядра из двух легких ядер с выделением энергии, например: $^2\text{H} + ^3\text{H} = ^4\text{He} + ^1_0\text{n} + 17,6 \text{ МэВ}$.

Ядро – положительно заряженное ядро атома, состоящее из протонов и нейтронов.

Список литературы

1. Алешин Ю.А., Торгаев И.А., Лосев И.А., Лосев В.А. Радиационная экология. Майлуу–Суу. Из-во. «Геоприбор2, Бишкек, 2000, 96 с.
2. Бойко В.И., Кошелев Ф.П. Аргументы и проблемы атомной энергетики. Учебное пособие. Из-во ООО «Компания Янсон», Томск 2001, 80 с.
3. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере. М.: Энергоиздат, 1986 г.
4. Ильенко А.И., Концентрирование животными радиоизотопов и их влияние на популяции. М.: Наука, 1974, 168 с.

5. Ильинских Н.Н., Ильинских Е.Н., Новицкий В.В. и др. Экогенетика описторхоза и персистенция вируса Эпштейна–Барр. Из-во. «Крокус». Новосибирск, 2000 г. 268 с.
6. Ильинских Н.Н. медико-биологические последствия радиационного воздействия. Томск 1996. Из-во СГУ, 242 с.
7. Карташев А.Г. биоиндикация экологического состояния окружающей среды. Водолей.–Томск 1999.–192 с.
8. Криволицкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А., Покаржевский А.Д., Таскаев А.И.–действие ионизирующей радиации на биогеоценоз.–М.: Наука, 1988. 240 с.
9. Кузин А.М., Каушанский Д.А. Прикладная радиобиология. М.: Энергоиздат, 1981. 230 с.
10. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их изменения. М., Энергоатом издат. 1989, 304 с.
11. Проблемы отдаленных экологогенетических последствий радиационных инцидентов. Материалы межрегиональной научной конференции. Екатеринбург. 2000.
12. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы международной конференции. Томск. 1996.
13. Радиационное поражение и восстановление структур и функций макромолекул. Под ред. А.В.Савича. М.: 1977, 280 с.
14. Рихванов Л. П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Из-во ТПУ. Томск. 1997. 384 с.
15. Соколов В.Е., Криволицкий Д.А., Усачев В.Л. «Дикие животные в глобальном радиоэкологическом мониторинге. М.: Наука. 1989. 150 с.
16. Ядерная энциклопедия. Благотворительный фонд Ярошевской. М.:1996. 656 с. 17. М. Г.Давыдов. Радиоэкология.