

В.Г. Залесский

**РАДИАЦИОННАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

Конспект лекций
для студентов
нетехнических
специальностей

Новополоцк 2002

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
"Полоцкий государственный университет"

В.Г. Залесский

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
для студентов нетехнических специальностей

НБ УО "ПГУ"



1214010016192

Новополоцк 2002

УДК 621.039 (075)

Одобен и рекомендован к изданию
методическими комиссиями финансово-экономического, юридического,
историко-филологического факультетов

Кафедра физики

Автор

В. Г. ЗАЛЕСКИЙ, канд. физ.-мат. наук, доцент

Рецензенты:

В. И. КРОТ, канд. биол. наук, доцент (кафедра биофизики БГУ)

Г. М. МАКАРЕНКО, канд. техн. наук, профессор

ISBN 985-418-126-X

© УО "Полоцкий государственный университет", 2002

СОДЕРЖАНИЕ

Список основных терминов	5
Предисловие	9
1. Физическая природа и источники радиационной опасности для человека, объектов и природной среды	10
1.1. Основные понятия	10
1.2. Явление радиоактивности	11
1.3. Закон радиоактивного распада	13
1.4. Активность	15
1.5. Виды радиоактивных излучений	16
1.6. Длина пробега	18
2. Дозиметрия ядерных излучений	19
2.1. Основные понятия	19
2.2. Экспозиционная доза	20
2.3. Поглощенная доза	22
2.4. Относительная биологическая эффективность излучения	23
2.5. Коэффициент радиационного риска. Эквивалентная доза	24
2.6. Эффективная эквивалентная доза	25
2.7. Ожидаемая доза	28
2.8. Коллективная доза	29
2.9. Детектирование ионизирующих излучений	31
3. Источники ионизирующих излучений	33
3.1. Радиационный фон Земли	33
3.2. Космическое излучение	34
3.3. Земные источники естественного радиационного фона	36
3.4. Техногенно измененный естественный радиационный фон	43
3.5. Искусственный радиационный фон	44
4. Биологическое действие ионизирующих излучений	49
4.1. Физический этап	50
4.2. Физико-химический этап	52
4.3. Биохимический этап. Действие ионизирующих излучений на клетку	54
4.4. Мутации	58
4.5. Классификация радиационных эффектов	59
4.6. Действие больших доз радиации. Лучевые болезни	62
4.7. Опосредованное действие радиации	65
4.8. Действие малых доз радиации. Беспороговая концепция действия радиации	66
4.9. Отдаленные последствия действия радиации	68
4.10. Действие инкорпорированных радионуклидов	71
5. Принципы и критерии радиационной безопасности	76
5.1. Понятие приемлемого риска	76
5.2. Международные и республиканские организации, имеющие отношение к нормированию радиационного облучения	77

5.3. Принципы радиационной безопасности.....	78
5.4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000).....	80
5.5. Ограничение облучения населения в условиях радиационной аварии. Вмешательство и его уровни.....	87
5.6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСП-2002).....	91
5.7. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов в продуктах питания.....	92
6. Авария на Чернобыльской АЭС и ликвидация ее последствий	95
6.1. Принцип действия ядерного реактора.....	95
6.2. Критерии оценки аварий на АЭС.....	96
6.3. Причины аварии на Чернобыльской АЭС.....	98
6.4. Особенности радиоактивного загрязнения местности.....	99
6.5. Основные радионуклиды, определяющие радиоактивное загрязнение местности после Чернобыльской аварии.....	103
6.6. Особенности миграции радионуклидов.....	107
6.7. Последствия радиоактивного загрязнения местности и их ликвидация. Социально-экономические последствия.....	110
6.8. Ликвидация последствий радиоактивного загрязнения.....	116
6.8.1. Эвакуация и отселение.....	117
6.8.2. Дезактивация, утилизация и захоронение радионуклидов.....	117
6.8.3. Дезактивация продуктов питания.....	119
6.8.4. Организация агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения местности.....	120
7. Мероприятия по радиационной защите и обеспечению радиационной безопасности населения	122
7.1. Система радиационного мониторинга.....	122
7.2. Санитарно-гигиенические мероприятия.....	123
7.3. Законодательство Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности.....	126
Литература	131

СПИСОК ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ

Эффективная (эквивалентная) годовая доза – сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения человека, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

Эффективная коллективная доза – мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения; равна сумме индивидуальных эффективных доз.

Предотвращаемая доза – прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

Радиоактивное загрязнение – присутствие радиоактивных веществ на поверхности, внутри материала, в воздухе, в теле человека или в другом месте в количестве, превышающем уровень, принятые в установленном порядке.

Неснимаемое (фиксированное) загрязнение поверхности – радиоактивные вещества, которые не переносятся при контакте на другие предметы и не удаляются при дезактивации.

Снимаемое (нефиксированное) загрязнение поверхности – радиоактивные вещества, которые переносятся при контакте на другие предметы и удаляются при дезактивации.

Зона наблюдения – территория за пределами санитарно-защитной зоны, на которой проводится радиационный мониторинг.

Зона радиационной аварии – территория, на которой установлен факт радиационной аварии.

Источник ионизирующего излучения – устройство или радиоактивное вещество, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение (далее – источник излучения).

Природный источник излучения – источник ионизирующего излучения природного происхождения, на который распространяется действие настоящих норм.

Техногенный источник излучения – источник ионизирующего излучения, специально созданный для его полезного применения или являющийся побочным продуктом его деятельности.

Закрытый радионуклидный источник – источник излучения, устройство которого исключает поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Открытый радионуклидный источник – источник излучения, при использовании которого возможно поступление содержащихся в нем радионуклидов в окружающую среду.

Квота – часть предела дозы, установленная для ограничения облучения населения от конкретного техногенного источника излучения.

Радиационный контроль – получение информации о радиационной обстановке в организации, в окружающей среде и об уровнях облучения людей (включает в себя дозиметрический и радиометрический контроль).

Рабочее место – место постоянного или временного пребывания персонала для выполнения производственных функций в условиях воздействия ионизирующего излучения.

Мощность дозы – доза излучения за единицу времени.

Население – все лица, включая персонал вне работы с источниками ионизирующего излучения.

Облучение – воздействие на человека ионизирующего излучения.

Аварийное облучение – облучение в результате радиационной аварии.

Медицинское облучение – облучение граждан (пациентов) при медицинском обследовании и лечении.

Планируемое повышенное облучение – планируемое облучение персонала в дозах, превышающих установленные основные пределы доз, с целью предупреждения развития аварии или ограничения ее последствий.

Потенциальное облучение – облучение, которое может возникнуть в результате радиационной аварии.

Природное облучение – облучение, которое обусловлено природными источниками облучения.

Производственное облучение – облучение работников от всех техногенных и природных источников ионизирующего излучения в процессе производственной деятельности.

Профессиональное облучение – облучение персонала в процессе его работы с техногенными источниками ионизирующего излучения.

Техногенное облучение – облучение от техногенных источников как в нормальных, так и в аварийных условиях, за исключением медицинского облучения пациентов.

Радиационный объект – пользователь источников ионизирующего излучения либо структурное подразделение пользователя, где осуществляется обращение с техногенными источниками ионизирующего излучения.

Санитарный паспорт – документ, разрешающий в течение установленного времени проведение регламентированных работ с источниками ионизирующего излучения пользователю на радиационном объекте в конкретных помещениях, вне помещений или на транспортных средствах.

Персонал – физические лица, работающие с источниками излучения или находящиеся по условиям работы в зоне их воздействия.

Пользователи – предприятия, учреждения, организации, производящие, вырабатывающие, перерабатывающие, применяющие, хранящие, транспортирующие, обезвреживающие и захороняющие радиоактивные вещества и другие источники ионизирующего излучения.

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

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

Радиационная авария – потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью, повреждением оборудования, неправильными действиями работников (персонала), стихийными бедствиями или иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей или радиоактивному загрязнению окружающей среды сверх установленных норм.

Проектная радиационная авария – авария, для которой проектом определены исходные и конечные состояния радиационной обстановки и предусмотрены системы безопасности.

Радиационная безопасность населения – состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.

Работа с источником ионизирующего излучения – все виды обращения с источником излучения на рабочем месте, включая радиационный контроль.

Работа с радиоактивными веществами – все виды обращения с радиоактивными веществами на рабочем месте, включая радиационный контроль.

Радиационный риск – вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения.

Санитарно-защитная зона – территория вокруг источника ионизирующего излучения, на которой уровень облучения людей в условиях нормальной эксплуатации данного источника может превысить установленный предел дозы облучения для населения. В санитарно-защитной зоне запрещается постоянное и временное проживание людей, вводится режим ограничения хозяйственной деятельности и проводится радиационный контроль.

Санпропускник – комплекс помещений, предназначенных для смены одежды, обуви, санитарной обработки персонала, контроля радиоактивного загрязнения кожных покровов, средств индивидуальной защиты, специальной и личной одежды персонала.

Санплюс – помещение, предназначенное для предварительной дезактивации и смены дополнительных средств индивидуальной защиты.

Средство индивидуальной защиты (СИЗ) – средство защиты персонала от внешнего облучения, поступления радиоактивных веществ внутрь организма и радиоактивного загрязнения кожных покровов.

Уровень вмешательства (УВ) – уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия.

Контрольный уровень – значение контролируемой величины дозы радиоактивного загрязнения и т.д., устанавливаемое для оперативного радиационного контроля с целью закрепления достигнутого уровня радиационной безопасности, обеспечения дальнейшего снижения облучения персонала и населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Устройство (источник), генерирующее ионизирующее излучение – электрофизическое устройство (рентгеновский аппарат, ускоритель, генератор и т.д.), в котором ионизирующее излучение возникает за счет изменения скорости заряженных частиц, их аннигиляции или ядерных реакций.

Детерминированные эффекты излучения – клинически выявляемые вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, в отношении которых предполагается существование порога, ниже которого эффект отсутствует, а выше – тяжесть эффекта зависит от дозы.

Стохастические эффекты излучения – вредные биологические эффекты, вызванные ионизирующим излучением, не имеющие дозового порога возникновения, вероятность их возникновения пропорциональна дозе и тяжесть проявления не зависит от дозы.

Ионизирующее излучение – излучение, которое создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможения заряженных частиц в веществе и образует при взаимодействии со средой ионы разных знаков.

Естественный радиационный фон – доза излучения, создаваемая космическим излучением и излучением природных радионуклидов, естественно распределенных в земле, воде, воздухе, других элементах биосферы, пищевых продуктах и организме человека.

Техногенно измененный радиационный фон – естественный радиационный фон, измененный в результате деятельности человека.

Эффективная доза – величина воздействия ионизирующего излучения, используемая как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения организма человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности.

Практическая деятельность – виды деятельности, увеличивающие общее облучение граждан.

Вмешательство – мероприятие (действие), направленное на предотвращение либо снижение неблагоприятных последствий облучения или комплекса неблагоприятных последствий радиационной аварии.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Курс радиационной безопасности является обязательным для студентов всех специальностей государственных высших учебных заведений Республики Беларусь.

Цель этого курса – приобретение студентами знаний о причинах возникновения ионизирующих излучений, механизмах биологического действия радиации, о государственном регулировании вопросов, связанных с нормированием радиационного воздействия, радиационной безопасности населения, а также о государственных программах, направленных на ликвидацию последствий Чернобыльской аварии в Республике Беларусь.

Из всех стран, пострадавших от Чернобыльской аварии, наиболее значительные последствия пришлось на Беларусь. Это обусловлено тем фактом, что около 22 % территории республики, где проживает более 1 миллиона человек, загрязнено радионуклидами цезия и стронция. В значительной степени пострадала и экономика республики, к тому же реализация программ по ликвидации последствий аварии требует существенных ежегодных затрат.

Радиационная безопасность является комплексным предметом, включающим широкий спектр различных областей научных знаний. Это в значительной степени затрудняет восприятие данного предмета студентами в условиях ограниченности числа аудиторных занятий, особенно студентами со слабыми знаниями естественнонаучного направления.

Конспект лекций предназначен для студентов нетехнических специальностей, которые, как правило, обладают слабыми знаниями естественнонаучных дисциплин. Поэтому предлагаемый конспект содержит сложные для восприятия данной категории студентов разделы в минимальном объеме. Основной акцент делается на комплексное представление о дисциплине – от физики до радиационной гигиены. Поскольку конспект лекций предназначен и для студентов экономического и юридического профиля, то соответствующие разделы курса, связанные с экономическими последствиями аварии на ЧАЭС для Республики Беларусь, а также международное и республиканское законодательство по вопросам радиационной безопасности представлены в расширенном формате.

Конспект лекций составлен на основе утвержденной Министерством образования Республики Беларусь программы по курсу "Защита населения и объектов окружающей среды от чрезвычайных ситуаций. Радиационная безопасность".

Несмотря на то, что конспект лекций предназначен для студентов нетехнических специальностей, в его основу положены лекции по основам радиационной безопасности, читаемые студентам физического факультета Белорусского государственного университета канд. биол. наук, доцентом кафедры биофизики В.И. Кротом

1. ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА И ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА, ОБЪЕКТОВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

1.1. Основные понятия

Все вещества состоят из атомов и молекул. В состав атома входит ядро и один (атом водорода) или несколько электронов. Ядро расположено в центре атома и занимает очень незначительную часть его объема. Установлено, что размеры атома составляют приблизительно 10^{-10} м, а ядра – 10^{-15} м. Плотность ядерного вещества чрезвычайно высока, поскольку почти вся масса (99,9 %) атома концентрируется в ядре (плотность ядерного вещества порядка 116 миллионов тонн в одном кубическом сантиметре). Если бы Земля имела плотность, равную плотности ядерного вещества, то ее радиус составлял бы всего лишь 200 м.

Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов. Протоны – это положительно заряженные частицы. Число протонов в ядре определяет вид атома и обозначается буквой Z . Самый легкий атом водорода имеет один протон ($Z = 1$), атом железа имеет 26 протонов ($Z = 26$), атом урана – 92 протона ($Z = 92$), т.е. число протонов определяет заряд атомного ядра, порядковый номер элемента в таблице Д.И. Менделеева и носит название **зарядовое число**. Число электронов на электронных оболочках в электрически нейтральном атоме равно числу протонов в ядре атома. Атомное ядро, кроме протонов, содержит нейтральные частицы – нейтроны. Число нейтронов в ядре атома не является строго определенным. Например, атом водорода содержит один протон и либо не имеет нейтрона, либо может содержать один или два нейтрона. Этот элемент существует в виде трех изотопов: ${}^1\text{H}$ (обычный), ${}^2\text{H}$ (дейтерий), ${}^3\text{H}$ (тритий).

Протоны и нейтроны объединяются общим названием – **нуклоны** (ядерные частицы). В современной физике принимается, что протон и нейтрон – это два зарядовых состояния одной и той же частицы – нуклона. Общее число протонов и нейтронов в ядре получило название **массового числа** (A). Число нейтронов в ядре можно определить как разность массового и зарядового чисел $N = A - Z$. Использование массового и зарядового чисел позволяет представить любой химический элемент в символическом виде ${}^A_Z\text{X}$. **Изотопы** – это химические элементы с одинаковым количеством протонов Z и различным количеством нейтронов N . В веществе Земли и других планет встречается около 300 изотопов, а вместе с полученными искусственно общее число известных изотопов достигает 1500. В природе практически все химические элементы имеют изотопы. Например, молекулы кислорода, которым мы дышим, могут включать изотопы трех типов, которые присутствуют в природе в соответствующих долях: ${}^{16}_8\text{O}$ – 99,76 %, ${}^{17}_8\text{O}$ – 0,04 %, ${}^{18}_8\text{O}$ – 0,2 %.

Массу ядер и элементарных частиц обычно измеряют в атомных единицах массы. По определению **1 а.е.м. (атомная единица массы)** соответствует $1/12$ массы изотопа атома углерода ^{12}C ($1 \text{ а.е.м.} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$). Масса протона – 1.00758 а.е.м. , масса нейтрона – 1.00897 а.е.м.

Протоны и нейтроны удерживаются в ядре специфическими силами – ядерными силами притяжения. Наряду с ядерными силами в ядре действуют силы электростатического отталкивания положительно заряженных протонов. У большинства изотопов химических элементов, встречающихся в природе, ядерные силы превышают силы электростатического отталкивания. Такие изотопы являются **устойчивыми**. Однако у тяжелых элементов, ядра которых состоят из большого количества частиц, силы электростатического отталкивания сравнимы, а при определенных условиях могут превышать силы ядерного притяжения. В этом случае возможны процессы самопроизвольного превращения изотопов одних химических элементов в изотопы других химических элементов. Изотопы, способные на такие превращения, называют **неустойчивыми**.

Нуклид – это ядро атома с данным количеством протонов Z и нейтронов N . Иначе говоря, ядра всех изотопов химических элементов называются нуклидами. **Радионуклид** – это ядро неустойчивого изотопа. Химические элементы могут иметь как устойчивые, так и неустойчивые изотопы. Например, водород и дейтерий являются устойчивыми (стабильными), тогда как тритий – неустойчив. Изотоп йода ^{130}I устойчив и играет значительную роль в живой природе, тогда как изотоп ^{131}I в природе не встречается, образуется в процессе деления тяжелых ядер при ядерном взрыве и в атомном реакторе и относится к наиболее опасным неустойчивым изотопам.

1.2. Явление радиоактивности

Радиоактивностью называется самопроизвольное превращение ядер изотопов одного химического элемента в другие. При этом происходит испускание определенных частиц или электромагнитного излучения. Иначе говоря, радиоактивность – это процесс самопроизвольного превращения одних радионуклидов в другие нуклиды, который сопровождается излучением. Это излучение, а также переносимая им энергия и есть **радиация**.

Радиоактивность ядер, существующих в природных условиях, называется **естественной радиоактивностью**. Различают также **искусственную радиоактивность**, которая возникает в результате ядерных реакций.

Принципиальных различий между искусственной и естественной радиоактивностью нет. Закон радиоактивного распада в обоих случаях одинаков.

Радиоактивные ядра являются, как правило, тяжелыми ядрами, располагающимися в конце периодической таблицы Менделеева, например, уран ${}_{92}^{235}\text{U}$, радий ${}_{88}^{226}\text{Ra}$, радон ${}_{86}^{222}\text{Rn}$. Однако имеются и легкие естественно радиоактивные ядра. Это изотопы калия ${}_{19}^{40}\text{K}$, углерода ${}_{6}^{14}\text{C}$, тритий ${}_{1}^3\text{H}$ и т.д.

Исследования показали, что излучение, испускаемое при радиоактивном распаде, имеет сложный состав. Исторически по поведению этих излучений в магнитном поле были выделены три вида излучений: положительно заряженные частицы, которые отклоняются в сторону северного полюса магнита, называются α -частицами; отрицательно заряженные частицы, которые отклоняются в сторону южного полюса, – β -частицами; а излучение, которое не взаимодействует с магнитным полем, называется γ -излучением. В процессе распада данного радионуклида происходит излучение только одного вида заряженных частиц: α или β . Излучение этих частиц обычно сопровождается испусканием γ -квантов. Опытным путем установлены некоторые общие свойства излучений, возникающих в процессе радиоактивного распада:

1. Излучения вызывают ионизацию атомов и молекул. В связи с этим излучения называются **ионизирующими**. В результате взаимодействия нейтрального атома с излучением образуется положительно заряженный ион и свободный электрон. Это свойство излучения является основной причиной поражения организма человека излучением, возникающим в процессе радиоактивного превращения.

2. Излучения обнаруживают химическое действие. Это означает, что в результате их воздействия могут происходить некоторые химические реакции. Это явление имеет место как для веществ неживой природы (например, образование дефектов металлических конструкций при длительном облучении), так и, что особенно важно, для живых объектов. Данное свойство на практике применяется для обнаружения и регистрации излучений. Необходимо отметить, что химическое действие может быть обусловлено ионизацией атомов и молекул вещества.

3. Излучения обладают проникающей способностью. Поскольку испускаемые частицы и электромагнитное излучение обладают энергией и импульсом, то они способны взаимодействовать с веществом и проникать внутрь любого объекта на определенную глубину. Это свойство также определяет степень опасности того или иного вида излучения.

4. Излучение вызывает свечение (флуоресценцию) некоторых твердых и жидких веществ. Это свойство широко используется для регистрации ионизирующих излучений.

5. Излучение изменяет физико-химические свойства веществ. Вообще говоря, это свойство является следствием совокупного химического и ионизирующего действия радиоактивных излучений. Однако ввиду особой значимости можно выделить его в отдельное свойство. Например, растворимость белков в воде в значительной степени предопределяет пространственную конфигурацию данного белка, а значит и его биологические функции (например, способность гемоглобина связывать молекулу кислорода). Нарушение пространственной конфигурации белка вследствие воздействия радиации может приводить к утрате данной биологической функции, что может проявляться в виде различных заболеваний (кислородная недостаточность – анемия и т.д.).

1.3. Закон радиоактивного распада

Радиоактивный распад – это статистический процесс. Это означает, что если мы имеем дело с одним единственным ядром, совершенно невозможно предсказать, когда произойдет распад – сию минуту, через сутки или через тысячу лет. Другое дело, если радионуклидов много. Опыт показал, что при радиоактивном распаде выполняются следующие правила:

- за больший промежуток времени распадается большее число ядер;
- за данный промежуток времени распадается тем больше ядер, чем больше их было вначале.

Эти правила выражают закон радиоактивного распада, который отражает связь количества нераспавшихся ядер данного радионуклида и времени.

Этот закон справедлив для всех радионуклидов, независимо от природы радиоактивности. Математическая запись закона радиоактивного распада имеет вид

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N_0 – число не распавшихся ядер в начальный момент времени; $N(t)$ – число не распавшихся к данному моменту времени t ядер; λ – постоянная распада.

Коэффициент пропорциональности λ , входящий в закон, называется **постоянной распада** или радиоактивной постоянной для данного вида ядер. Так как распад относится к статистическим процессам, то λ – **вероятность распада**. Постоянная распада λ характеризует скорость распада. Постоянная распада позволяет сравнить степень радиоактивности ядер различных типов. Чем больше вероятность распада, тем быстрее распадается данный изотоп и тем выше интенсивность ионизирующих излучений. Поэтому при одинаковом начальном количестве N_0 не распавшихся ядер к некоторому моменту времени t_0 больше останется ядер того радионуклида, для которого вероятность распада ниже (рис. 1). Постоянная распада имеет размерность с^{-1} .

Скорость уменьшения числа нераспавшихся ядер данного вида можно охарактеризовать также **периодом полураспада** $T_{1/2}$. Это время, за которое распадается половина первоначального количества ядер данного вида (рис. 2). Как следует из закона радиоактивного распада, постоянная распада и период полураспада соотносятся как

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

Периоды полураспада радиоактивных элементов изменяются в широких пределах – от миллионов долей секунды до миллиардов лет:

$T_{1/2}({}^{238}_{92}\text{U}) = 4,49$ млрд. лет; $T_{1/2}({}^{226}_{88}\text{Ra}) = 1600$ лет; $T_{1/2}({}^{222}_{86}\text{Rn}) = 3,825$ сут; $T_{1/2}({}^{216}_{84}\text{Po}) = 3,05$ мин; $T_{1/2}({}^{49}_{15}\text{P}) = 4,5$ с. Периоды полураспада радионуклидов, вызвавших основное загрязнение местности после аварии на Чернобыльской АЭС, равны: $T_{1/2}({}^{131}_{53}\text{I}) = 8,05$ сут; $T_{1/2}({}^{137}_{55}\text{Cs}) = 28$ лет; $T_{1/2}({}^{90}_{38}\text{Sr}) = 29$ лет.

Чем меньше период полураспада, тем больше радиоактивность этого изотопа, тем более он опасен, поскольку в единицу времени распадается большее число ядер. Если мы будем последовательно рассматривать ситуацию через промежуток времени, равный периоду полураспада ($T_{1/2}$, $2T_{1/2}$, $3T_{1/2}$, $4T_{1/2}$ и т.д.), то число нераспавшихся ядер будет изменяться как $N_0/2$, $N_0/4$, $N_0/8$, $N_0/16$ и т.д. (см. рис. 2).

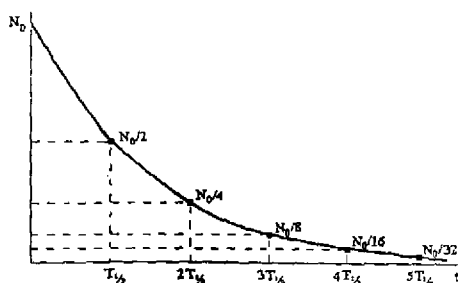


Рис. 2. К определению периода полураспада

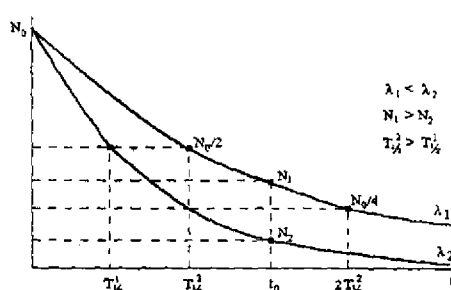


Рис. 1. К понятию вероятности распада

В соответствии с этим при оценке радиационной обстановки считают, что через десять периодов полураспада ($10T_{1/2}$) число ядер данного радионуклида уменьшается настолько (в 1024 раза), что радиоактивностью изотопа данного типа можно пренебречь. По этой причине весь период после аварии на ЧАЭС

условно разделяют на два этапа: период "йодной" опасности продолжительностью 2 – 3 месяца (80 суток) и период "цезиево-стронциевой" опасности продолжительностью около 300 лет.

1.4. Активность

Каждое радиоактивное вещество распадается со своей определенной скоростью, которая определяется вероятностью распада λ . Однако закон радиоактивного распада описывает только изменение числа нераспавшихся ядер со временем. Поэтому для количественной характеристики радиоактивного распада вводится понятие активности. Под **активностью** понимают количество ядер, которые распадаются в единицу времени

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

т.е. активность препарата равна произведению постоянной распада на число нераспавшихся ядер данного радионуклида, содержащихся в этом препарате.

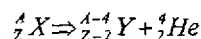
В качестве единицы активности выбрано число распадов в единицу времени. В системе СИ за единицу активности принят 1 **Бк** (беккерель). Такую активность имеет вещество, у которого за каждую секунду распадается 1 ядро: 1 **Бк** = 1 распад/с. Внесистемной единицей является 1 **Ки** (кюри). Такую активность имеет 1г $^{226}_{88}\text{Ra}$: 1 **Ки** = $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов/с = $3,7 \cdot 10^{10}$ **Бк**. Однако определение активности препарата не дает возможности сравнивать исследуемые объекты по степени загрязненности радионуклидами и делать вывод о степени их опасности, поскольку, например, объекты одинаковой массы или объема могут обладать различной активностью как вследствие содержания различных радионуклидов, так и изменения их концентрации. Так, одинаковую активность в 1 **Ки** имеют: 3 тонны $^{238}_{92}\text{U}$ ($T_{1/2} = 4,5$ млрд. лет), 1г $^{226}_{88}\text{Ra}$ ($T_{1/2} = 1600$ лет) и 0,08 мг $^{131}_{53}\text{I}$ ($T_{1/2} = 8$ сут). Поэтому применяют производные от активности величины (в скобках указаны внесистемные единицы измерения):

- удельная массовая активность, характеризующая активность единицы массы радиоактивного препарата: $A_m = \frac{A}{\Delta m}$, **Бк/кг** (**Ки/кг**);
- объемная активность, определяющая активность единицы объема радиоактивного препарата: $A_v = \frac{A}{\Delta V}$, **Бк/м³** (**Бк/л**, **Ки/л**);
- поверхностная активность, характеризующая активность единицы поверхности: $A_s = \frac{A}{\Delta S}$, **Бк/м²** (**Ки/см²**).

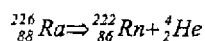
Объемная активность применяется при оценках степени загрязнения радионуклидами жидких веществ, в частности, воды, молока и т.д. Поверхностная активность позволяет определить степень загрязнения местности. Так, согласно действующему законодательству территория с уровнем загрязнения более 40 Ки/км^2 – зона вынужденного переселения (эвакуации); $15 - 40 \text{ Ки/км}^2$ – зона последующего отселения; $5 - 15 \text{ Ки/км}^2$ – зона с правом на отселение.

1.5. Виды радиоактивных излучений

α -излучение возникает в результате α -распада, при котором от атомного ядра радионуклида (материнское ядро – ${}^A_Z X$) отщепляется частица ядерного вещества, которая состоит из 2-х протонов и 2-х нейтронов, т.е. ядра атома гелия ${}^4_2 \text{He}$. При α -распаде выполняются правила смещения – следствие законов сохранения массы вещества и электрического заряда



Дочернее ядро ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ вследствие α -распада имеет зарядовое число на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у материнского ядра. Источником α -частицы являются ядра тяжелых радиоактивных элементов, которые имеют порядковый номер более 80 и расположены в конце таблицы Менделеева. Примером возникновения α -частицы может быть превращение радия ${}^{226}_{88} \text{Ra}$ в изотоп радона ${}^{222}_{86} \text{Rn}$



Особое значение изотопа ${}^{222}_{86} \text{Rn}$ рассмотрим в следующих разделах.

α -излучение обладает рядом отличительных свойств:

- скорость вылетающих из ядра α -частиц достигает $10000 - 25000 \text{ км/с}$;
- данный радионуклид испускает α -частицы с одной и той же энергией, т.е. энергетический спектр α -частиц дискретный;
- α -частицы обладают высокой ионизирующей способностью; в воздухе на длине пробега в 1 см образуется от 100 000 до 300 000 пар ионов;
- α -распад всегда сопровождается γ -излучением.

β -излучение представляет собой поток электронов или позитронов (частица, обладающая массой, равной массе электрона, но имеющая положительный заряд). В первом случае говорят об электронном β -распаде, в

другом – β^+ -распаде. Электронов и позитронов нет в ядре, они образуются в поле распадающегося ядра в момент распада. Схематично эти процессы представляют следующим образом:

β^- -распад:

${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$ – превращение нейтрона в протон, которое сопровождается испусканием антинейтрино $\bar{\nu}$;

${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$ – правила смещения для β^- -распада;

${}_{83}^{209}Bi \rightarrow {}_{84}^{209}Po + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$ – пример β^- -превращения висмута в полоний.

β^+ -распад:

${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + {}_{+1}^0e + \nu$ – превращение протона в нейтрон, которое сопровождается испусканием нейтрино ν ;

${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + {}_{+1}^0e + \nu$ – правила смещения для β^+ распада;

${}_{15}^{30}P \rightarrow {}_{14}^{30}Si + {}_{+1}^0e + \nu$ – пример β^+ превращения фосфора в кремний.

β -излучение характеризуется рядом особенностей:

- энергия β -частиц может быть любой в интервале от 0 до E_{\max} (E_{\max} – верхняя граница β -спектра, которая является характеристикой ядра). Причиной непрерывности энергетического спектра β -излучения является наличие дополнительной частицы ν или $\bar{\nu}$ (нейтрино или антинейтрино). В результате избыточная энергия, которая выделяется при β -распаде, произвольным образом распределяется между электроном (позитроном) и антинейтрино (нейтрино);
- средняя энергия образующихся β -частиц соответствует скорости 10000 – 25000 км/с;
- β -распад обычно сопровождается γ -излучением.

γ -излучение представляет собой поток электромагнитных волн (квантов), которые испускаются в процессе радиоактивного распада при изменении энергетического состояния образующихся в результате радиоактивного распада атомных ядер:

- γ -излучение распространяется со скоростью света $3 \cdot 10^8$ м/с;
- γ -излучение может вызывать ионизацию атомов непосредственно или передавая энергию электронам, которые затем уже вызывают ионизацию атомов;
- энергетический спектр γ -излучения дискретен. Это означает, что при распаде радионуклида данного типа всегда излучается γ -квант с конкретным значением энергии.

СІБІРЯТОВА ПДУ

1.6. Длина пробега

Длина пробега – это толщина слоя вещества, которую может пройти частица до полной остановки. Длина пробега или глубина проникновения характеризует проникающую способность данного излучения. Она зависит от рода частицы, энергии и плотности вещества, сквозь которое проходит излучение. Длина пробега α -частиц в воздухе в зависимости от энергии не превышает 8 см, тогда как для β -частиц в воздухе она может достигать 20 м. В сравнении с α - и β -частицами проникающая способность γ -излучения огромна. В более плотных средах длина пробега ионизирующих излучений существенно меньше, однако соотношение между длиной пробега α - и β -частиц и γ -излучения сохраняется. α -частицы задерживаются листом бумаги, β -частицы – одеждой и верхним слоем кожи. В сравнении с ними γ -излучение обладает огромной проникающей способностью и существенно ослабляется, например, многометровым слоем бетона, толщина которого зависит от энергии γ -излучения или пластиной из свинца толщиной в несколько сантиметров. В табл.1 и 2 приведены некоторые значения длины пробега различных частиц в зависимости от их энергии и плотности облучаемого материала.

Таблица 1

Длина пробега электронов в различных средах

Энергия электрона, МэВ	Длина пробега		
	в воздухе, м	в Al, мм	в биол. ткани, мм
0,01	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$2,47 \cdot 10^{-3}$
0,1	0,13	$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,143
0,5	1,601	0,837	1,77
1,0	3,936	2,054	4,38
5,0	22,28	11,889	25,8

Таблица 2

Длина пробега различных частиц в разных средах

Энергия частиц	Вид излучения	Длина пробега		
		в воздухе	в Al	в биол. ткани
4 МэВ	α -частицы	2,5 см	0,016 мм	0,031 мм
	протоны	24,1 см	–	241 см
	β -частицы	17,858 м	9,841 мм	20,16 мм
8 МэВ	α -частицы	7,4 см	0,048 мм	0,091 мм
	протоны	81,3 см	–	813 см
	β -частицы	34,377 м	–	41,30 мм

2. ДОЗИМЕТРИЯ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Основные понятия

В результате эволюции каждый организм приспособился к сложившимся на Земле условиям обитания. Природа предусмотрела органы чувств, предупреждающие об опасности. В этом их главное назначение. Однако из бесчисленного разнообразия излучений, пронизывающих окружающий мир, органы чувств человека воспринимают немногие. Свет, радиоволны так же, как и тепло Солнца, представляют собой разновидность радиации.

Радиобиологическим эффектом называется связанная с действием ионизирующих излучений совокупность физико-химических, физико-механических изменений и биологических нарушений в живых объектах.

Проведенные исследования показали, что результат радиационного воздействия зависит от множества разнообразных факторов, однако объективным показателем воздействия этих факторов является количество поглощаемой энергии излучения в рассматриваемой массе вещества. Эта величина получила название дозы.

Доза – общий термин, означающий количество поглощенного излучения или энергии веществом. По мнению радиобиологов, понятие радиационных доз и их действия на живой организм имеет много общего с медицинским понятием дозы лекарств.

Вот простой пример. Маловероятно, что одна таблетка аспирина может кому-либо повредить, однако употребление 100 таблеток аспирина может привести к летальному исходу. Аналогично облучение в малых дозах – это практически незаметное воздействие на организм (которое может проявиться в будущем), в то же время большие дозы могут вызвать серьезные нарушения в организме. Необходимо учитывать и временной фактор: одноразовое употребление 100 таблеток аспирина может убить человека, тогда как употребление этих же 100 таблеток в течение года вряд ли повредит организму. Аналогичные закономерности применимы и в отношении доз облучения.

В настоящее время существует несколько понятий доз. Некоторое затруднение вызывает то, что в дозиметрии все еще применяются старые единицы. В связи с этим мы рассмотрим как старые, так и рекомендуемые к использованию в настоящее время дозиметрические величины, а также соотношение между ними.

2.2. Экспозиционная доза

До недавнего времени экспозиционная доза и ее мощность являлись основными характеристиками фотонного излучения, которые измерялись экспериментально. Экспозиционная доза представляет собой количественную меру ионизационного воздействия фотонного излучения на сухой атмосферный воздух.

Фотонными называются электромагнитные ионизирующие излучения. К ним относятся γ -кванты, рентгеновское и частично ультрафиолетовое излучения.

Представим себе, что находимся на местности, загрязненной разными радионуклидами. Будем пренебрегать попаданием радионуклидов в организм при дыхании. При этом α -частицы, обладающие малой длиной пробега, поглощаются нижними слоями воздуха и верхней одеждой, никак не затронув жизненно важных органов. Сильно изменяется по высоте и интенсивность β -излучения, причем большая его часть поглощается одеждой и кожей. Достаточно равномерно лишь внешнее облучение проникающими γ -квантами. Именно для этих излучений и вводится понятие экспозиционная доза.

Экспозиционная доза определяется как отношение суммарного заряда всех ионов одного знака ΔQ , которые образуются рентгеновским или γ -излучением в некотором объеме, к массе воздуха, заключенного в этом объеме

$$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m}$$

При определении экспозиционной дозы должно выполняться условие электронного равновесия, при котором сумма энергий заряженных частиц, покидающих рассматриваемый объем, соответствует сумме энергий заряженных частиц, входящих в этот объем.

За единицу экспозиционной дозы принят один кулон электрического заряда в одном килограмме облучаемого воздуха – 1 Кл/кг . Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (1 P).

Рентген – единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,001293 грамма сухого воздуха создается $2 \cdot 10^9$ пар ионов.

Между этими единицами существуют следующие соотношения:

$$1 \text{ P} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}, \quad 1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ P}.$$

Интенсивность ионизирующих излучений на загрязненной территории не остается постоянной. Уровень загрязнения может уменьшаться, например, за счет распада части радионуклидов или их перераспределения по поверхности вследствие природных явлений и земледелия или, наоборот, увеличиваться при выпадении радиоактивных осадков. Поэтому часто пользуются понятием мощности экспозиционной дозы.

Мощность экспозиционной дозы – это величина, равная отношению изменения экспозиционной дозы к промежутку времени, за которое произошло это изменение

$$\dot{X} = \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

В системе СИ мощность экспозиционной дозы измеряется в **1 А/кг**. Внесистемной единицей является **1 Р/ч**. Соотношение между ними

$$1 \text{ А/кг} = 1,397 \cdot 10^7 \text{ Р/ч}; 1 \text{ Р/ч} = 7,16 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$$

Главным достоинством экспозиционной дозы является то, что для ее измерения существует простой физический метод, заключающийся в измерении суммарного заряда, образующегося под действием излучения в воздушной ионизационной камере.

Для расчета мощности экспозиционной дозы, создаваемой точечным источником радиации активностью A на расстоянии r , можно использовать простую формулу

$$\dot{X} = \gamma \frac{A}{r^2},$$

где γ – гамма-коэффициент радионуклида, который приводится в специальных справочниках.

Стоит отметить, что с 1990 года рекомендуется отказаться от практического применения экспозиционной дозы. Это связано с тем, что экспозиционная доза определяется только для фотонного излучения, что исключает ее использование для смешанного излучения, которое чаще встречается на практике. Кроме этого, внесистемные единицы экспозиционной дозы и единицы, используемые в СИ, связаны между собой нецелочисленными коэффициентами. Это может приводить к ошибкам на практике и представлять угрозу безопасности людей при радиационном контроле. Тем не менее, поскольку большинство приборов градуированы во внесистемных единицах, то предполагается ограниченное использование таких внесистемных единиц, как рентген, и кратных им.

Экспозиционная доза описывает радиационную обстановку независимо от свойств облучаемых объектов. Конечно, чем больше интенсивность радиации, о чем косвенно позволяет судить экспозиционная доза, тем опаснее. Однако воздействие на объект оказывает только та часть излучения, которая поглотилась в нем, поэтому на практике используются дополнительные величины.

2.3. Поглощенная доза

При определении дозы в объекте нужно учитывать как внешнее, так и внутреннее облучение, т.к. радиоактивные вещества попадают в организм с пищей, водой, вдыхаемым воздухом и т.д., когда из-за отсутствия защитных оболочек становятся опасными не только γ , но также α - и β -излучения.

Поглощенная доза – отношение средней энергии ионизирующего излучения ΔE , поглощенной элементарным объемом облучаемого вещества, к массе Δm вещества, заключенного в этом объеме

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}$$

Единицей поглощенной дозы в системе СИ является грей (1 Гр). Грей равен поглощенной дозе, при которой веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж; 1 Гр = 1 Дж/кг.

На практике до сих пор широко используется внесистемная единица поглощенной дозы – рад. 1 рад = 0,01 Гр; 1 Гр = 100 рад.

Поглощенная энергия излучения идет на нагрев вещества, возбуждение и ионизацию его атомов, другие физические, а также химические и биохимические процессы, происходящие в веществе при облучении. В отличие от экспозиционной дозы понятие поглощенной дозы применимо при описании воздействия любых видов ионизирующего излучения на любое вещество.

При облучении вещества поглощенная доза может изменяться. Скорость изменения дозы характеризуется мощностью поглощенной дозы. **Мощность поглощенной дозы** – отношение приращения поглощенной дозы излучения ΔD за интервал времени Δt к этому интервалу

$$\dot{D} = \frac{\Delta D}{\Delta t}$$

Единицей мощности поглощенной дозы в системе СИ является 1 Гр/с. Внесистемная единица – 1 рад/с. По величине мощности погло-

щенной дозы облучение делится на **острое** (с большой мощностью поглощенной дозы, более $0,1 \text{ Гр/мин}$) и **продолжительное** (с невысокой мощностью поглощенной дозы, менее $0,1 \text{ Гр/ч}$).

Следует отметить, что поглощенная доза и ее мощность характеризуют не само излучение, а результат его взаимодействия с веществом. Поэтому, говоря о поглощенной дозе, необходимо указывать, для какой среды рассчитана или измерена эта величина. Например, поглощенная доза излучения в мягкой биологической ткани называется **тканевой**. При расчете тканевой дозы принимается следующий состав биологической ткани: **76,2 % – кислород, 11,1 % – углерод, 10,1 % – водород, 2,6 % – азот.**

Поглощенная доза D фотонного излучения в веществе с известным химическим составом может быть рассчитана по его экспозиционной дозе

$$D = K_D X,$$

где K_D – энергетический эквивалент экспозиционной дозы. Его величина зависит от природы данного вещества. Например, для воздуха энергетический эквивалент $K_D = 34,1 \text{ Гр/Кл/кг}$ (во внесистемных единицах $K_D = 0,88 \text{ рад/Р}$), а для биологической ткани этот коэффициент имеет значение: $K_D = 37,2 \text{ Гр/Кл/кг}$, либо $K_D = 0,96 \text{ рад/Р}$.

2.4. Относительная биологическая эффективность излучения

Конечным итогом воздействия ионизирующего излучения на вещество является ионизация и возбуждение атомов среды. Интенсивность этого воздействия определяется дозой излучения, поглощенной веществом. Однако при одной и той же дозе облучения неблагоприятные биологические последствия оказываются разными для различных видов излучений. Это означает, что вероятность возникновения биологического эффекта зависит не только от количества, но и от "качества" поглощенной энергии. В конечном итоге, при одной и той же поглощенной дозе различные виды излучений вызывают неодинаковое повреждение биологических объектов. Объясняется это различной ионизирующей способностью излучений, т.е. числом ионов, возникающих на единице длины пути данного излучения в веществе.

Для сравнения биологических эффектов, вызываемых разными видами ионизирующих излучений, введено понятие **относительной биологической эффективности (ОБЭ)**. Под ОБЭ понимают отношение поглощенной дозы D_0 образцового излучения, вызывающего определенный биологический эффект, к поглощенной дозе D_x исследуемого излучения, вызы-

вающего тот же биологический эффект: $ОБЭ = D_0/D_x$. В качестве образцового принимается рентгеновское излучение с граничной энергией фотонов 200 кэВ. Величина коэффициентов $ОБЭ$ зависит от многих физических и биологических факторов: поглощенной дозы, вида облучаемого объекта и условий облучения, критерия оценки наблюдаемого биологического эффекта.

С введением относительной биологической эффективности непосредственно связано понятие радиационного риска, поскольку $ОБЭ$ показывает, насколько данное излучение опаснее, чем образцовое. Но в каком смысле опасно? Для жизни или для здоровья? А если для здоровья, то какие болезни имеются в виду? Поскольку для сравнения степени опасности применяются цифровые коэффициенты, то понятие радиационной опасности должно быть конкретно определено.

Степень радиационного риска можно определить, например, по числу погибших от излучения организмов. Но летальная доза ($ЛД$) зависит от вида и уровня сложности организмов (табл. 3), а также пола, возраста облучаемого и других факторов. Потому часто используют более сложные критерии, например $ЛД_{50/30}$ – полuletальная доза (50 % погибших за 30 суток).

Таблица 3

Полuletальные дозы для различных объектов живой природы					
Объект	Вирусы	Бактерии	Мхи	Насекомые	Деревья
$ЛД_{50}, Гр$	10000	2000	500–5000	600	10–350
Объект	Рыбы	Птицы	Кролик	Обезьяна	Человек
$ЛД_{50}, Гр$	7–15	6–8	6	3–6	2–3

Показателями радиационной опасности могут служить и другие радиационные эффекты: изменение состава крови, нарушения в хромосомах и другие. На основе подобных критериев устанавливается степень риска каждого излучения – относительная биологическая эффективность.

2.5. Коэффициент радиационного риска. Эквивалентная доза

Регламентированные значения $ОБЭ$, установленные для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении, называются коэффициентом качества излучения (k). Коэффициент качества определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от ионизирующей способности данного излучения в условиях хронического облучения в малых дозах. При больших дозах коэффициент качества начинает заметно зависеть от мощности по-

глошенной дозы, т.е. от промежутка времени, за который получена эта доза. Поэтому для оценки последствий аварийного облучения человека при больших уровнях воздействия излучения эквивалентную дозу применять не допускается. Значения коэффициента качества, рекомендованные МКРЗ (Международная комиссия по радиационной защите), приведены в табл. 4.

Таблица 4

Коэффициенты качества

Вид излучения	k
Рентгеновское и γ -излучение	1
Электроны, позитроны	1
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией в диапазоне 0,1 – 10 МэВ	10
α -частицы с энергией меньше 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Чтобы избежать ошибок при определении степени радиационной опасности облучения поглощенную дозу умножают на коэффициент качества. Полученную таким образом дозу называют эквивалентной дозой

$$H = kD$$

При сложном по составу излучении эквивалентная доза определяется суммой эквивалентных доз каждого компонента излучения

$$H = k_{\alpha}D_{\alpha} + k_{\beta}D_{\beta} + k_{\gamma}D_{\gamma} + \dots$$

Единица эквивалентной дозы – 1 *Зв* (*зиверт*). Используется также внесистемная единица – *бэр*. 1 *Зв* = 100 *бэр*, 1 *бэр* = 10^{-2} *Зв*.

Бэр (*биологический эквивалент рентгена*) – несистемная единица эквивалентной дозы любого вида излучения, которое создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 *рад* рентгеновского или γ -излучения с энергией квантов 200 кэВ.

2.6. Эффективная эквивалентная доза

В случае неравномерного облучения организма недостаточно определить эквивалентную дозу по ряду причин:

- облучение менее губительно для простых организмов, чем для сложных (см. табл. 3);

- наблюдения за облученными показали, что органы и ткани организма обладают различной чувствительностью к облучению, что определяется их функциональными особенностями;
- эквивалентная доза рассчитывается для "средней" биологической ткани организма и потому велика вероятность ошибки в случае неравномерного облучения;
- некоторые радионуклиды, попавшие в организм, избирательно накапливаются в определенных органах и тканях (например, йод в щитовидной железе);
- при лучевой терапии опухолей облучению подвергаются лишь отдельные их участки и надо знать, каким испытаниям подвергается весь организм.

Поскольку человек представляет собой сложно организованную систему, то при неравномерном облучении организма необходимо учитывать радиочувствительность органов и тканей, отличающихся по уровню сложности строения и функциональным особенностям.

Согласно беспороговой концепции действия радиации (см. главу 4), между вероятностью возникновения стохастических эффектов (опухоли, генетические повреждения) и дозой существует линейная зависимость. Тогда степень риска неблагоприятных последствий можно описать выражением

$$r_i = r_{i,H} H_i$$

где H_i – значение эквивалентной дозы в i -том органе или ткани; $r_{i,H}$ – коэффициент риска облучения i -того органа или ткани (N – общее число взятых в рассмотрение органов и тканей). Суммарный риск при неравномерном облучении всего тела определяется так

$$R_1 = \sum_{i=1}^N r_i = \sum_{i=1}^N r_{i,H} H_i$$

При равномерном облучении всего тела некоторой эквивалентной дозой H_E суммарный риск

$$R_2 = \sum_{i=1}^N r_{i,H} H_E = H_E \sum_{i=1}^N r_{i,H} = H_E r_{\Sigma,H},$$

где $r_{\Sigma,H} = \sum_{i=1}^N r_{i,H}$ – сумма коэффициентов риска для всех органов и тканей.

При совпадении риска в случае равномерного R_1 и неравномерного облучения R_2 можно записать

$$r_{\Sigma, H} H_E = \sum_{i=1}^N r_{i, H} H_i \Rightarrow H_E = \sum_{i=1}^N \frac{r_{i, H}}{r_{\Sigma, H}} H_i$$

либо

$$H_E = \sum_{i=1}^N \omega_i H_i; \quad \sum_{i=1}^N \omega_i = 1$$

Величина H_E называется **эффективной эквивалентной дозой** и используется в радиационной безопасности в качестве меры определения степени риска при облучении человека малыми дозами. Коэффициент ω_i – это **взвешивающий фактор (весовой коэффициент)**, характеризующий по определению отношение риска при облучении только одного органа или ткани к суммарному риску при равномерном облучении тела. Взвешивающий фактор ω_i определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий при равномерном облучении организма.

Эффективная эквивалентная доза при неравномерном облучении органов или тканей равна такой эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при данном неравномерном облучении. Единицы измерения эффективной эквивалентной дозы совпадают с единицами измерения эквивалентной дозы

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}; \quad 1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$$

В табл. 5 приведены рекомендованные МКРЗ значения взвешивающих факторов и коэффициентов риска смерти от рака и наследственных дефектов, применяемые для задач радиационной защиты. Они могут быть использованы для лиц всех возрастов и обоих полов. Приведенные величины для гонад учитывают серьезные наследственные эффекты, проявляющиеся в первых двух поколениях (т.е. дети и внуки подвергшихся облучению лиц). На практике за "другие" органы и ткани, не перечисленные в таблице, принимают пять получивших самые высокие эквивалентные дозы: для них берется $\omega_i = 0,06$. В действительности значение $r_{i, H}$ зависит от многих факторов (возраста, пола, состояния организма в момент облучения и т.д.). Поэтому их следует рассматривать как ориентировочные.

В рекомендациях МКРЗ предлагается использовать более простое название – **эффективная доза**, а также приводятся уточненные значения тканевых весовых множителей ω_i , входящих в выражение для определения эффективной дозы.

Таблица 5

Взвешивающие факторы и коэффициенты риска смерти от рака и наследственных дефектов

Орган или ткань	Заболевание	$r_{i,n} 10^{-2}, \text{Зв}^{-1}$	ω_i
Гонады	Наследственные дефекты	0,40	0,25
Молочная железа	Рак	0,25	0,15
Красный костный мозг	Лейкемия	0,20	0,12
Легкие	Рак	0,20	0,12
Щитовидная железа	Рак	0,05	0,03
Костная ткань	Злокачественные опухоли	0,05	0,03
Все другие органы и ткани	То же	0,5	0,3
Весь организм		1,65	1,00

Таблица 6

Уточненные значения взвешивающих факторов

Ткань или орган	ω_i
Половые железы (гонады)	0,20
Толстый кишечник	0,12
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Молочные железы	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа	0,01
Поверхность костей	0,01
Остальные органы (головной мозг, кишечник, почки, селезенка, поджелудочная железа, мышечная ткань и т.д.)	0,05

2.7. Ожидаемая доза

После аварии на ЧАЭС большое число людей вынуждено жить при повышенном радиационном фоне. Как в этом случае, так и в других, если радиозокологическая обстановка неблагоприятна, необходимо предвидеть, какую дозу облучения получит человек за предстоящий год, десять лет, в течение всей жизни. Это позволяет оценить вероятность последствий и принять соответствующие защитные меры: обеспечить население чистыми продуктами питания, ввести ограничения в привычный образ жизни или

вообще переселить в безопасное место. С введением ожидаемой дозы напрямую связано такое понятие как потенциальное облучение, которое возможно в будущем сверх обычных пределов.

Расчет ожидаемой дозы сложен. Он должен учитывать роль отдельных радионуклидов в общей радиоактивности, их периоды полураспада, способность накапливаться в органах и выводиться из организма, особенности рациона питания и загрязненность продуктов, долю внешнего облучения и множество других факторов. Ожидаемая доза тоже измеряется в зивертах и бэрах.

2.8. Коллективная доза

Эквивалентная доза и эффективная доза характеризуют опасность возникновения неблагоприятных последствий облучения для здоровья данного человека. Эти величины являются индивидуальными дозами.

В ряде случаев возникает необходимость оценить общий эффект воздействия ионизирующего излучения на группу людей. Такая ситуация имеет место, в частности, при сравнении уровней облучения малыми дозами. Для этой цели используются коллективная доза.

Коллективная эквивалентная доза S – сумма индивидуальных эквивалентных доз H_i у данной группы людей за данный промежуток времени

$$S = \sum_{i=1}^m H_i N_i,$$

где N_i – число лиц в данной группе, получивших эквивалентную дозу H_i ; m – общее число групп облученных людей.

Коллективная эффективная эквивалентная доза S_E – сумма индивидуальных эффективных доз H_E у данной группы людей за данный промежуток времени

$$S_E = \sum_{i=1}^m H_{E,i} N_i$$

Коллективные дозы измеряются в системе СИ в чел.-Зв, а в качестве внесистемной единицы используется чел.-бэр. Коллективные дозы, так же как и индивидуальные, можно использовать только при малых уровнях облучения, когда эквивалентная доза не превышает 0,25 Зв.

Коллективная доза, распространенная на популяцию, называется популяционной дозой, а если она рассчитана для населения определенного региона, то используется термин региональная коллективная доза. Если

происходит облучение населения всего земного шара от некоторого источника, то коллективная доза называется **глобальной**.

Коллективная эквивалентная доза является удобной величиной для оценки числа заболеваний со смертельным исходом среди рассматриваемого контингента лиц, вызванных облучением того или иного внутреннего органа или ткани. Для этого необходимо умножить значение коллективной эквивалентной дозы облучения этого органа или ткани на соответствующий коэффициент риска

$$R_i = S \cdot r_{i,H}$$

Для определения суммарного числа этих заболеваний можно использовать коллективную эффективную дозу, умноженную на суммарный коэффициент риска ($r_{\Sigma,H} = 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$)

$$R_{\Sigma} = S_E \cdot r_{\Sigma,H}$$

Коллективные дозы обладают важнейшим свойством – возможностью применять статистические методы усреднения, которые позволяют вычислить количество неблагоприятных последствий облучения в данной группе людей с большой степенью достоверности. Дело в том, что коэффициенты риска являются оценочными коэффициентами, и одна и та же доза облучения может проявляться по-разному в зависимости от пола, возраста и т.д. Однако в массе облученных людей предсказанное количество случаев гибели или заболеваний обычно осуществляется.

Стоит отметить, что из определения коллективных доз следует, что они не уменьшаются при разбавлении загрязненных радионуклидами продуктов питания безопасными продуктами. При такой операции уменьшаются индивидуальные дозы облучения, но во столько же раз увеличивается численность контингента облучаемых людей. В итоге радиационный эффект от употребления "загрязненных" продуктов остается неизменным.

Поскольку некоторые радиоактивные вещества распадаются достаточно долго и останутся радиоактивными даже в далеком будущем, то еще многие поколения людей будут находиться под действием излучения. Коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получает поколение людей за весь период своего существования, называется **ожидаемой коллективной эффективной эквивалентной дозой** или **полной дозой**. Она также измеряется в *чел.-Зв* и *чел.-бэрах*. Полная доза является наиболее удобной величиной для оценки суммарного ущерба здоровью при

обосновании оправданности технологического процесса, использующего ионизирующее излучение.

Таким образом, коллективные дозы – объективный показатель масштаба радиационного поражения, по которому воздействия ядерных взрывов или радиационных аварий на население сравниваются между собой. Например, проведенные расчеты после аварии на ЧАЭС показали, что дозовая нагрузка только от радионуклида цезия-137 на население Скандинавии и стран Центральной Европы в первый год составила 80000 чел.-Зв. За этот период жители Беларуси, Украины и России, проживающие на загрязненных территориях, получили 200000 чел.-Зв. Полная доза в результате аварии на ЧАЭС оценивается в 620000 чел.-Зв (по некоторым оценкам 1000000 чел.-Зв). Из них 52 % коллективной дозы приходится на европейские страны, 37 % – на территорию СНГ, 10 % – на Азию, 1 % – на Африку, 0,3 % – на Северную и Южную Америку.

2.9. Детектирование ионизирующих излучений

Распространение радиоактивных веществ, обусловленное выбросом при аварии IV блока Чернобыльской АЭС, сделало актуальной для широких слоев населения задачу контроля содержания радионуклидов в окружающей среде и особенно в продуктах питания.

Органы чувств человека не воспринимают непосредственно ионизирующие излучения, даже если речь идет об излучении, которое физически ничем, кроме длины волны, не отличается от видимого света. Это обстоятельство приводит к тому, что для регистрации ионизирующих излучений требуется применять специальные приборы. По своему функциональному назначению используемые в широкой практике приборы для контроля и измерения радиоактивных излучений делятся на три типа: дозиметры, радиометры и спектрометры.

Дозиметры – приборы, измеряющие экспозиционную или поглощенную дозу излучения или мощности этих доз, интенсивность излучения, перенос энергии или передачу энергии объекту, находящемуся в поле излучений.

Радиометры – приборы, измеряющие активность радиоактивного источника при радиоактивном загрязнении поверхности.

Спектрометры – приборы, измеряющие распределение радиоактивных излучений по энергиям и радионуклидный состав радиоактивного препарата.

Несмотря на различное назначение, все эти приборы в основном устроены одинаково. В каждом из них первичный измерительный акт обусловлен взаимодействием ионизирующих излучений с веществом **детектора** измерительного прибора. В зависимости от того, какие сигналы используются для регистрации, различают ионизационные, сцинтилляционные, химические и трековые методы обнаружения и измерения параметров ионизирующих излучений.

Ионизационный метод. Под действием излучения в газах и воздухе в результате ионизации образуются электроны и ионы. Если ионизация происходит в слое газа между двумя электродами, которые имеют различные потенциалы, то ионы и электроны будут двигаться к соответствующим электродам и в цепи возникает электрический ток. По величине этого тока судят об интенсивности ионизационного эффекта (счетчики Гейгера, ионизационные камеры, пропорциональные счетчики).

Сцинтилляционный метод. Под действием излучений некоторые вещества (йодит натрия, сульфид цинка, антрацен) могут излучать свет в видимом диапазоне (светиться) вследствие перехода атомов или молекул из возбужденного в основное состояние. С помощью фотоэлектронных умножителей энергия этих световых вспышек через процессы фотоэффекта превращается в импульсы электрического тока. По их количеству судят об интенсивности ионизирующих излучений.

Химический метод. Поглощение энергии веществом может вызывать различные химические реакции, при которых происходят необратимые изменения в самих веществах. По величине интенсивности, например, окраски судят о величине поглощенной энергии.

Трековый метод обусловлен свойством излучений при взаимодействии с различными веществами инициировать различные процессы. При этом по траектории частицы формируется след, анализируя параметры которого получают информацию о самой частице. Этот метод используется в пузырьковой камере, камере Вильсона, фотоэмульсионных пластинках.

3. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

3.1. Радиационный фон Земли

Радиационным фоном принято называть уровень дозы, создаваемой совокупностью всех ионизирующих излучений от различных источников естественного и искусственного происхождения.

Радиационный фон Земли складывается из естественного радиационного фона, технологически измененного естественного радиационного фона и искусственного радиационного фона.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) образуют ионизирующие излучения от природных источников космического и земного происхождения. Естественный радиационный фон является основным компонентом радиационного фона Земли. Его составляют космические лучи, излучение радионуклидов, образующихся под их действием в атмосфере, а также излучения многочисленных естественных радионуклидов, содержащихся в земной коре, почве, воде, воздухе и входящих в состав растений и живых организмов. ЕРФ является одним из факторов, которые постоянно воздействуют на все население Земли. Он представляет собой естественные условия среды обитания человека. Уровень воздействия ЕРФ на население сохраняется постоянным в течение очень длительного времени. Все это позволяет использовать ЕРФ в качестве эталона при оценке опасности облучения от искусственных источников ионизирующих излучений.

Техногенно измененным естественным радиационным фоном (ТИЕРФ) называют измененный в результате деятельности человека ЕРФ. Причинами возникновения ТИЕРФ являются добыча полезных ископаемых, использование строительных материалов, содержащих естественные радионуклиды, поступление в окружающую среду продуктов сгорания органического топлива, полеты на самолетах и другие виды хозяйственной деятельности человека, которые приводят к изменению окружающей среды и, как следствие, к увеличению уровня облучения от естественных источников излучения.

Искусственный радиационный фон (ИРФ) создают источники ионизирующих излучений искусственного происхождения. К таким источникам, в первую очередь, относятся генерирующие ионизирующие излучения установки, которые используются в научных целях, в медицине и промышленности. Испытания ядерного оружия и развитие атомной промышленности стимулировали создание огромного количества искусственных радионуклидов, которые находят широкое применение в различных сферах деятельности человека.

Источники ионизирующего излучения, которые формируют радиационный фон, подразделяют на **внешние** и **внутренние**. Радионуклиды, посту-

пившие внутрь с пищей, водой, воздухом или через кожу, являются внутренними источниками облучения (**инкорпорированные радионуклиды**). Внешними источниками называются источники ионизирующего излучения, расположенные вне организма.

Дозы облучения за счет радиационного фона часто выражают в единицах эффективной дозы. Это позволяет сравнивать риск возникновения неблагоприятных последствий при различных видах облучения.

В табл. 7 приведены расчетные значения средних годовых эффективных эквивалентных доз облучения населения земного шара от естественных и искусственных источников радиации.

Анализируя таблицу, можно сделать вывод, что основную часть годовой дозы, равную 2 мЗв, человек получает от естественных источников радиации, к рассмотрению которых мы перейдем в следующем разделе.

Таблица 7

Среднегодовые эффективные эквивалентные дозы облучения от естественных и искусственных источников радиации

Источники радиации	Доза облучения, мЗв
Естественные	2
Искусственные источники в медицине	0,4
Радиоактивные осадки	0,02
Атомная энергетика	0,001
Всего	2,4

3.2. Космическое излучение

Космическое излучение непрерывно воздействует на поверхность Земли. Оно складывается из **первичного излучения**, которое попадает в земную атмосферу из межзвездного пространства, и **вторичного излучения**, которое образуется при взаимодействии частиц первичного излучения с ядрами и атомами атмосферы. Первичное космическое излучение включает:

- галактическое, которое связано со звездными взрывами, образованием сверхновых звезд и т.д.;
- солнечное, обусловленное вспышками на Солнце (поэтому в период солнечной активности уровень космического излучения значительно усиливается);
- излучения заряженных частиц, захваченных магнитным полем Земли.

Первичное излучение состоит главным образом из протонов (92 %) и α -частиц (6 %). Небольшая доля (2 %) приходится на более тяжелые ядра, электроны, нейтроны и фотоны. Частицы первичного космического излучения обладают очень большой энергией, равной в среднем 10^{10} эВ

(1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж). Поэтому в результате взаимодействия высокоэнергетических частиц первичного излучения с атомами воздуха в атмосфере Земли образуется поток вторичного космического излучения, которое содержит почти все известные в настоящее время элементарные частицы.

Интенсивность вторичного космического излучения зависит от высоты над уровнем моря. На высоте приблизительно 45 км присутствует только первичное космическое излучение. С уменьшением высоты увеличивается доля вторичного космического излучения, которое достигает максимума на высоте 20 – 25 км. На уровне моря интенсивность вторичного космического излучения минимальна.

Интенсивность космического излучения в зависимости от географической широты увеличивается от экватора к полюсам, что обусловлено наличием у Земли магнитного поля. Население Земли, которое проживает в приэкваторной территории на уровне моря, получает наименьшую дозу радиации, что приблизительно составляет 0,35 мЗв в год. Средняя мощность дозы космического излучения в средней полосе около 50° широты, где расположены крупные города Нью-Йорк, Лондон, Москва, Токио, составляет 0,5 мЗв в год.

Высота над уровнем моря также имеет важное значение. Жители высокогорного города США Дэнвера, например, получают дозу радиации, примерно равную 0,9 мЗв в год. В табл. 8 приведены некоторые дозы, получаемые человеком от космических излучений.

При взаимодействии некоторых высокоэнергетических частиц вторичного космического излучения с ядрами атомов азота и кислорода, входящих в состав воздуха, в атмосфере образуются различные радионуклиды, которых насчитывают около 20. Их называют космогенными радионуклидами (^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C , ^{22}Na , ^{24}Na и др.).

Таблица 8

Средние мощности доз и дозы от космических источников

Высота	Мощность погл. дозы, мкГр/ч	Мощность экв. дозы, мкЗв/ч	Среднегодовая доза, мЗв
Средние широты (уровень моря)	0,032	0,035	0,3
1,5 – 2 км	0,07	–	–
4 км	0,14	0,2	1,75
8848 м (Эверест)	0,84	1,0	8,0
10 – 12 км (реактивный самолет)	3,01	5	–
Сверхзвуковой самолет (20 км)	8,72	13,0	–
То же в момент вспышки на Солнце	4000 – 40000	–	–

3.3. Земные источники естественного радиационного фона

Наша планета образовалась примерно 4,5 миллиарда лет назад. Таков же возраст и химических элементов, в том числе и радиоактивных. Но за это время часть радиоактивных элементов распалась за исключением тех, у которых период полураспада больше этого промежутка времени или они возникали в результате распада первых. Такие радионуклиды подразделяются на две группы: радионуклиды, которые входят в радиоактивные семейства, и те, которые в эти ряды не входят. Первая группа содержит 82 радионуклида урано-радиевого и ториевого семейств (рядов) (^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn и др.), другая группа включает 11 радионуклидов (^{40}K , ^{87}Rb и др.), которые относятся к средней части периодической таблицы Менделеева.

Определяющую роль в формировании фонового облучения человека от естественных радионуклидов играет радиоактивность горных пород, почв, воздуха, водных ресурсов и самого человека. Основное количество естественных радионуклидов содержится в горных породах, которые в процессе их образования включили в свои структуры все радиоактивные элементы, существовавшие на первых этапах развития Земли.

Содержание радионуклидов в почвах определяется главным образом радиоактивностью пород, из которых образуются почвы, и характером процесса почвообразования. Атомы урана в почвах, как правило, очень подвижны и способны образовывать растворимые комплексные соединения. В результате уран легко вымывается из почв. Торий обычно прочно сцеплен с неразрушаемыми остатками пород и постепенно накапливается в верхних слоях почв. В целом большинство радионуклидов радиоактивных семейств (^{232}Th , ^{228}Ac , ^{214}Bi , ^{214}Pb , ^{40}K и т.д.) накапливается в верхних слоях почвы (не более 30 см) и обеспечивает значительную часть дозы внешнего γ -облучения (табл. 9).

Таблица 9

Средняя удельная активность ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th в различных почвах

Тип почвы	A_m , Бк/кг		
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th
Сероземы	670	31	48
Серо-коричневые	700	28	41
Кацтановые	550	27	37
Черноземы	410	22	36
Серые лесные	370	18	27
Дерново-подзолистые	300	15	22
Подзолистые	150	9	12
Торфянистые	90	6	6

Все природные радионуклиды, содержащиеся в атмосфере, можно условно разделить на следующие группы: космогенные радионуклиды; радиоактивные газы, поступающие в атмосферу с земной поверхности; радионуклиды, поступающие в атмосферу с земной поверхности вместе с пылью и в результате жизнедеятельности человека. Концентрация естественных радионуклидов в атмосфере независимо от их природы весьма изменчива и во многом зависит от метеорологических условий.

Наиболее важными радионуклидами, определяющими уровень радиоактивности атмосферы, являются ^{222}Rn (радон) и ^{220}Tn (торон) и продукты их распада. Эти газы – продукты распада ^{226}Ra и ^{224}Ra , но содержание ^{220}Tn в атмосфере значительно меньше, поэтому для удобства оба изотопа в дальнейшем будем называть радоном.

Радон – радиоактивный газ, невидимый, без запаха и вкуса, тяжелее воздуха в 7,5 раза, образует α -активные аэрозоли с весьма короткими периодами полураспада. Концентрация радона в приземном слое воздуха изменяется в достаточно широких пределах – от 0,1 до 10 Бк/м³ (в среднем 6 Бк/м³). Радон в основном выделяется из почв, поэтому его концентрация в различных регионах планеты неодинакова. Например, во Франции она составляет 9,3 Бк/м³, в Великобритании – 3 Бк/м³, в Японии – 2,1 Бк/м³, в Республике Беларусь около 2 Бк/м³.

Основную дозу облучения от радона человек получает, находясь в закрытом, непроветриваемом помещении, где повышена его концентрация. Установлено, что средняя концентрация радона в ванной примерно в 3 раза больше, чем на кухне, и в 40 раз выше, чем в жилой комнате. Радон может проникать сквозь трещины в фундаменте, через пол из поверхности Земли и накапливается в основном на нижних этажах жилых помещений, создавая дополнительное излучение (табл. 10). Одним из дополнительных источников могут быть конструкционные материалы, используемые в строительстве. К ним в первую очередь относятся материалы с повышенной радиоактивностью – гранит, пемза, глинозем, фосфогипс, шлакобетон (табл. 11).

Очевидно, что доза зависит от содержания урана и тория в материалах, из которых построено здание. В современных строительных материалах на территории стран СНГ средняя радиоактивность урана и тория составляет 50 Бк/кг (для сравнения: в древесине – 0,4 Бк/кг).

Концентрация естественных радионуклидов в природных водах обычно невелика. Радиоактивность дождевой воды обычно также мала и зависит от степени загрязненности воздуха дымовыми частицами, возникающими при сжигании угля и нефти. В дождевой воде содержатся

Таблица 10

Концентрация радона в различных помещениях

Тип помещения и условия вентиляции	Концентрация радона, 10^{-12} , Ки/л
Хорошо проветриваемые помещения с воздушным кондиционированием	0,06 – 0,35
Квартиры в кирпичных домах с воздушным кондиционированием	0,01 – 0,19
Квартиры в деревянных домах	0,03 – 1,7
Кирпичные дома:	
– нижние этажи	1,5 – 2,9
– верхние этажи	0,7 – 1,0
Каменные дома	2,3 – 5,8
Дома из шлаковых панелей	4,0 – 8,0
Подвальные помещения с плохой вентиляцией	3,6 – 7,8

главным образом космогенные радионуклиды, а также ^{40}K и продукты распада радона. Основным источником поступления радона в атмосферный воздух являются грунтовые воды. Максимальная удельная активность воды, которая используется в системе водоснабжения, составляет 100 млн Бк/м^3 , а минимальная равна 0. По оценкам НКДАР (Научный комитет по действию атомной радиации) среди всего населения Земли менее чем 1 % жителей пьют воду с удельной активностью больше 1 млн Бк/м^3 , около 10 % – с концентрацией радона 100 тыс. Бк/м^3 . Концентрация радона в глубоких колодцах и артезианских скважинах составляет в среднем 1200 и 1400 Бк/м^3 . Необходимо отметить, что при кипячении воды или приготовлении горячих блюд радон в основном уходит в атмосферу. Средняя удельная активность строительных материалов в различных местах земного шара может сильно отличаться (см. табл. 11).

Таблица 11

Средняя удельная активность строительных материалов

Строительный материал	Страна	Активность, Бк/кг		
		$^{40}_{19}\text{K}$	$^{226}_{86}\text{Rn}$	$^{232}_{90}\text{Th}$
Кирпич	ФРГ	330	280	230
Бетон, содержащий глинистые сланцы	Швеция	850	1500	70
Фосфогипс из фосфоритов	ФРГ	110	600	5
Фосфогипс	Великобритания	70	800	20
Фосфогипс	США	–	1500	7
Шлак силиката кальция	Канада	–	2150	–
Шлак силиката кальция	США	–	1400	–
Шлак из доменной печи	Россия	240	70	20
Гранит	Россия	1250	1000	2000

В результате распада радона ($^{222}_{88}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 3,82$ сут, $^{220}_{86}\text{Rn}$, $T_{1/2} = 54,5$ с) образуются долгоживущие радионуклиды ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22,3$ года), ^{210}Po ($T_{1/2} = 138,4$ сут), ^{212}Bi ($T_{1/2} = 60,6$ мин). В атмосфере эти радионуклиды присутствуют в виде аэрозолей. С атмосферными осадками и оседающей пылью эти продукты распада радона попадают в почву и усваиваются растениями.

Таким образом, естественные источники радиации оказывают как внешнее, так и внутреннее воздействие на человека. Внешнее облучение населения Земли от естественных источников складывается, главным образом, из космического излучения и излучения естественных радионуклидов, распределенных в почвах и горных породах. Поэтому мощность поглощенной дозы в воздухе на открытой местности не является постоянной величиной для всего земного шара, а во многом зависит от типа пород, над которыми производится измерение (табл. 12). Стоит отметить, что повышенный радиационный фон в перечисленных районах Земли обусловлен внешним γ -излучением природных радионуклидов (прежде всего, тория и продуктов его распада), которые, как правило, закреплены в горных породах и не попадают внутрь организма человека. В процессе эволюции население этих районов адаптировалось к повышенному фону. В этом состоит главное отличие этих районов от территорий, загрязненных радионуклидами после Чернобыльской аварии.

Таблица 12

Годовые дозы облучения населения в районах с повышенным фоном

Район наблюдения	Численность населения, чел.	Погл. доза, мГр
Штаты Керала и Мадрас (Индия)	100000	1,3 – 28
Штаты Рио-де-Жанейро и Эспириту-Санту (Бразилия)	30000	до 100
Штаты Минас-Энейрас и Гояс (Бразилия)	–	до 120
Остров Ниуэ (Тихий океан)	4500	до 10
Районы Франции	7000000	1,8 – 3,5

Таким образом, среднее значение мощности поглощенной и эффективной дозы космического излучения согласно данным НКДАР на уровне моря соответствует $0,28$ мГр/год и $0,28$ мЗв/год. Средняя мощность поглощенной дозы в воздухе вне помещений от γ -излучений естественных радионуклидов земного происхождения при усреднении по всему земному шару примерно равна $0,44$ мГр/год. Для расчета эффективной дозы в теле

человека на основании данных о поглощенной дозе в воздухе НКДАР рекомендует использовать переводной коэффициент $0,7 \text{ Зв/Гр}$ для всех γ -излучающих радионуклидов, присутствующих во внешней среде. В результате значение мощности эффективной дозы, обусловленной излучением радионуклидов земного происхождения, составляет $0,35 \text{ мЗв/год}$. Однако большинство жителей городов в промышленно развитых странах основную часть своего времени (80 %) проводят внутри помещений. Поэтому за счет более интенсивного облучения внутри зданий мощность эффективной дозы несколько выше – $0,45 \text{ мЗв/год}$.

Помимо γ -излучения естественные радионуклиды испускают другие частицы, из которых при внешнем облучении опасность представляет β -излучение. Однако вклад β -излучения в дозу внешнего облучения очень мал ($\sim 0,007 \text{ мЗв/год}$).

Внутреннее облучение человека формирует основную часть эффективной дозы (табл. 13), которую он получает от природных источников радиации. Естественные радионуклиды попадают в организм человека вместе с воздухом, едой и водой. Количество поступающих внутрь организма радионуклидов в значительной степени зависит от режима и рациона питания, условий труда и отдыха человека.

Космогенные радионуклиды вносят небольшой вклад в суммарную дозу. Наиболее существенный вклад составляет $0,012 \text{ мЗв/год}$ и обусловлен радиоактивным изотопом углерода ^{14}C . Он образуется в верхних слоях атмосферы, окисляется и путем фотосинтеза попадает в состав тканей растений и животных.

Среди радионуклидов земного происхождения, не входящих в состав радиоактивных рядов, наиболее высокий вклад в дозу внутреннего облучения человека вносят радионуклиды ^{40}K , ^{87}Rb .

Природный калий представляет собой смесь трех изотопов: двух стабильных ^{39}K (93,08 %), ^{41}K (6,91 %) и одного радиоактивного ^{40}K (0,0119 %) с $T_{1/2} = 1,31 \cdot 10^9 \text{ лет}$, который испытывает β -распад (89 % от общего числа радионуклидов) или K -захват (12 %), который представляет собой особый вид β -распада. Калий широко распространен в земной коре, гидросфере и биосфере. Он содержится во всех растениях и живых организмах, активно участвуя в обмене веществ. Недостаток калия в почве приводит к угнетению роста растений. Нарушение калиевого обмена является причиной ряда заболеваний животных и человека. Потребность челове-

ского организма в этом элементе удовлетворяется за счет различных продуктов питания растительного и животного происхождения. Например, в горохе в среднем содержится 0,9 % калия, а в сливочном масле 0,014 % (удельные активности соответственно 274 и 3,7 Бк/кг). Богаты ^{40}K зерновые, картофель, гораздо меньше содержание ^{40}K в молочных и мясных продуктах.

Таблица 13

Среднегодовая доза внутреннего облучения различных органов от некоторых натуральных радионуклидов, мЗв

Радионуклид	Красный костный мозг	Легкие	Костная ткань	Гонады	Средняя годовая
^{40}K	270	180	140	180	180
^{87}Rb	7	4,5	14	10	6
^{210}Po	5,1	2,7	36	5,4	130
$^{222}\text{Rn} + ^{220}\text{Rn}$	0,8	730-9300	0,9	0,03	800-1000

Калий входит в состав всех органов и тканей организма. Больше всего калия в мышечной ткани, головном мозге, сердце, печени, меньше всего в коже, костях, жировой ткани, крови. Общее содержание калия в теле условного взрослого человека массой 70 кг около 140 г. У мужчин, обладающих более развитой мускулатурой, содержание калия выше, чем у женщин. Распределение радиоактивного калия в организме идентично распределению стабильных изотопов. В теле условного взрослого человека содержится примерно 0,083 г ^{40}K с активностью $2,22 \cdot 10^4$ Бк. Масса и активность ^{40}K в зависимости от пола, возраста и развития мускульной ткани человека может в 1,5 раза отличаться от приведенных значений.

^{40}K является одним из основных источников внутреннего и внешнего облучения животных и человека. На его долю приходится около 13 – 15 % средней эффективной эквивалентной дозы, получаемой человеком от естественного фона.

По своим химическим свойствам рубидий близок к калию. Природная смесь рубидия содержит два изотопа – стабильный ^{85}Rb и радиоактивный ^{87}Rb ($T_{1/2} = 4,8 \cdot 10^{10}$ лет). Поведение ^{87}Rb в окружающей среде и его метаболизм в теле человека изучены плохо.

Анализ уровня внутреннего облучения от земных радионуклидов показывает, что несмотря на ничтожно малое поступление в организм с пищей (^{238}U – 5 Бк/год, ^{226}Ra – 15 Бк/год) и с вдыхаемым воздухом

(^{232}Th – 10 Бк/год) их вклад в среднегодовые эквивалентные дозы заметен. Это обусловлено тем, что значительное количество радионуклидов, входящих в радиоактивные семейства, являются α -излучателями. Основным дозообразующим радионуклидом при внутреннем облучении являются радон и продукты его распада (^{218}Po , ^{214}Rb , ^{214}Bi , ^{214}Po), причем значительная часть этой дозы (0,7 из 0,8 мЗв) создается во время пребывания людей в помещении (табл. 14). Это свидетельствует о важности организации системы радиационного контроля в строительстве.

Таблица 14

Расчетные годовые эффективные дозы за счет естественных источников излучения в регионах с нормальным радиационным фоном (данные НКДАР, 1982)

Источник радиации		Годовая эффективная доза, мкЗв		
		внешнее	внутреннее	всего
Космическое излучение				
1. Ионизирующее излучение		280	—	280
2. Космогенные радионуклиды		—	15	15
в том числе	^{14}C	—	12	
	^3H	—	0.01	
	^7Be	—	3	
	^{22}Na	—	0.2	
Земные радионуклиды				
в том числе	^{40}K	120	180	300
	^{87}Rb	—	6	6
ряд ^{238}U				1044
	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{U}$	—	10	
	^{230}Th	—	7	
	^{226}Ra	90	7	
	$^{222}\text{Rn} \rightarrow ^{214}\text{Po}$	—	800	
	$^{210}\text{Pb} \rightarrow ^{210}\text{Po}$	—	130	
ряд ^{232}Th				326
	^{232}Th	—	3	
	$^{226}\text{Ra} \rightarrow ^{226}\text{Ra}$	140	13	
	$^{220}\text{Rn} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$	—	170	
Всего		650	1340	2000

Необходимо отметить, что концентрация радона в воздухе умеренных широт выше, чем в экваториальных районах Земли. Поэтому население умеренных широт получает за счет радона дозу, равную примерно 1 мЗв. Более того, в некоторых районах мира концентрации отдельных радионуклидов могут существенно превышать средние показатели. Например, моллюски и некоторые сорта рыбы являются накопителями свинца (в том числе и радиоактивного ^{210}Pb) и полония ^{210}Po , поэтому люди, употребляющие эти морепродукты, будут иметь повышенное их содержание. Аналогичная ситуация характерна и для людей, употребляющих мясо северного оленя (карибу), который питается в основном лишайниками – накопителями ^{210}Pb и ^{210}Po . По этой причине для жителей Севера характерно значительное повышение содержания этих радионуклидов над средним уровнем (до 35 раз). Другой пример: курение способствует трехкратному увеличению содержания в легких ^{210}Po . Таким образом, естественные источники ионизирующих излучений обеспечивают облучение условно взрослого человека среднегодовой дозой 2 мЗв.

3.4. Техногенно измененный естественный радиационный фон

В процессе расширения промышленного производства и развития новых технологий человек может локально изменить распределение естественных источников радиации, что приводит к повышенному облучению. Такими примерами являются полеты человека на самолетах, применение материалов с повышенной концентрацией радионуклидов, использование каменного угля и природного газа. Наблюдаемые при этом повышенные уровни излучения называются **техногенно повышенным естественным радиационным фоном**.

Сжигание каменного угля. Вклад в общую дозу от естественных источников радиации вносит уголь, сжигаемый как на тепловых электростанциях, так и предназначенный для бытовых нужд. При этом в атмосферу выбрасывается 0,1 млн тонн пепла, в котором содержатся калий, уран, торий, радий и т.д. Концентрация природных радионуклидов в пепле значительно больше, чем в самом угле, вследствие его выгорания. Так, например, если первоначальное содержание радионуклидов в угле согласно данным НКДАР составляет ^{40}K – 50 Бк/кг, ^{238}U и ^{232}Th по 20 Бк/кг, то в золе их концентрация намного выше: ^{40}K – 265 Бк/кг, ^{238}U – 200 Бк/кг, ^{232}Th – 70 Бк/кг. Большие концентрации имеют в золе ^{210}Pb (930 Бк/кг) и ^{210}Po (1700 Бк/кг). По этой причине нецелесообразно использование шлаков в приготовлении бетонов, а золы – для улучшения почв.

Промышленное использование продуктов переработки фосфоритов. Залежи фосфатов содержат, как правило, продукты распада ^{238}U в срав-

нительно высоких концентрациях. При этом следует учесть, что добыча фосфатной руды в мире очень велика и из года в год возрастает. Применение фосфатных удобрений в сельском хозяйстве стимулирует усвоение естественных радионуклидов растениями из почвы. Согласно данным НКДАР удельная активность ^{238}U в фосфатных удобрениях равна 555 Бк/кг , ^{226}Ra – 370 Бк/кг . Внесение фосфатных удобрений может обеспечить повышение мощности экспозиционной дозы на этой территории на $0,5 \text{ мкР/год}$. Однако большую опасность представляет использование в строительстве отходов фосфатного производства – фосфогипс, что может увеличить дозовую нагрузку жильцов такого дома на 30 %.

Причиной повышения естественного фона может быть также использование большого количества потребительских товаров, содержащих естественные радионуклиды. К таким товарам можно отнести часы со светящимся циферблатом, содержащим радий; специальные оптические приборы, аппаратура, применяемые в аэропортах и таможенном досмотре; компьютеры и телевизоры, хотя стоит отметить, что при правильной настройке облучение от современных моделей телевизоров ничтожно мало. Установлено, что среднегодовая доза, обусловленная использованием изделий, содержащих радионуклиды, составляет менее 10^{-2} мЗв .

3.5. Искусственный радиационный фон

В результате хозяйственной деятельности за последние несколько десятилетий человек создал искусственные источники радиоактивного излучения. Он научился использовать энергию атома в самых разных целях: в медицине, для производства энергии и атомного оружия, для поиска полезных ископаемых и обнаружения пожаров, в сельском хозяйстве и археологии. Дозы, полученные каждым отдельным человеком от искусственных источников, очень разнятся. В большинстве случаев они невелики, но иногда облучение может оказаться весьма значительным.

Медицина. Основной вклад среди техногенных источников радиации вносят медицинские процедуры и методы лечения, которые связаны с применением радиоактивных препаратов и ионизирующих излучений:

- *использование излучения в диагностических целях.* Наибольшее распространение в медицине получили рентгенологические обследования населения с целью диагностики заболеваний. В промышленно развитых странах в течение года на тысячу человек приходится 300 – 900 рентгеновских процедур. В бывшем СССР в среднем на каждого человека приходилась одна процедура в год. Еще совсем недавно среднее

значение индивидуальной дозы за счет этого источника в Беларуси составляло $1,95 \text{ мЗв/год}$. Для сравнения в США эта величина равнялась $0,2$, в странах Европы – $1,2$. Лишь в последнее время этот показатель в нашей стране снизился до $1,4 - 1,5 \text{ мЗв/год}$ (табл. 15). Развитие компьютерной техники позволило совместить рентгеноскопию с современными методами обработки информации. Компьютерная томография позволяет снизить дозовые нагрузки в $5 - 25$ раз для отдельных органов по сравнению с обычными методами. К новым методам диагностики, не дающим дополнительной дозовой нагрузки, относится также ядерно-магнитный резонанс. Эти два метода диагностики в значительном числе случаев заменяют традиционные методы и по этой причине находят все большее применение;

Таблица 15

Средние дозовые нагрузки при рентгеновских исследованиях

Рентгенография зуба	0,03 мЗв
Рентгенография легких	0,02 – 0,08 мЗв
Рентгенография кишечника	0,3 мЗв
Рентгенография сердца и легких	0,2 мЗв
Рентгенография желудка	1,1 мЗв
Рентгенография толстой кишки	4,8 мЗв
Рентгенография органов деторождения	3,3 мЗв
Рентгеноурология	5,6 мЗв
Рентгенография брюшной полости	1,4 мЗв

- введение радиоактивных изотопов в организм человека в медицинских целях называется *радиоизотопным исследованием*. Метод основан на регистрации излучения снаружи организма после того, как изотопы сконцентрируются в определенном органе или ткани, расположенном в глубине тела. Величину излучения оценивают с помощью счетчиков и определяют локализацию, количество и характер распределения введенного изотопа. Такая информация очень важна для диагностики ряда медицинских нарушений. Годовая эффективная доза от данных исследований на все тело составляет 5 мкЗв за исключением дозы облучения щитовидной железы, приблизительно равной 1000 мкЗв ;
- использование радиации для лечения злокачественных опухолей называется *лучевой терапией*. Этот метод основан на способности рентгеновских лучей (или других видов излучения) вызывать угнетение способности клеток к размножению. В мире насчитывается несколько ты-

сяч радиотерапевтических установок. Суммарные локальные дозы для каждого человека довольно велики (20 – 60 Гр), однако их получает небольшое число людей. Поэтому их вклад в коллективную дозу незначителен. Средняя эффективная доза, получаемая от всех источников облучения в медицине, в промышленно развитых странах составляет около 1 мЗв на каждого жителя, т.е. половину средней дозы от естественных источников. Этот показатель неодинаков в различных странах и определяется уровнем социального развития страны, доступностью медицинской помощи и охвата населения медицинскими мероприятиями, материально-технической базой рентгенологической службы и т.д.

Ядерные взрывы. Испытания ядерного оружия в атмосфере, начатые после второй мировой войны, являются дополнительным источником облучения населения Земли. Наибольшее количество испытаний было проведено в 1954 – 1958 и 1961 – 1962 годах. За это время в СССР произвели 142 ядерных взрыва в атмосфере, в США – 193, во Франции – 45, в Китае – 25, в Великобритании – 21, причем Франция и Китай проводили серии ядерных испытаний и после подписания в 1963 году "Договора о прекращении испытания ядерного оружия в трех средах (атмосфере, космическом пространстве и под водой)" вплоть до 1974 и 1980 гг. соответственно.

Из множества разнообразных радионуклидов, образовавшихся при ядерном взрыве (по некоторым оценкам до 400), наибольшее значение для формирования доз облучения людей имели осколки деления: йод ^{131}I , цирконий ^{95}Zr , стронций ^{90}Sr , цезий ^{137}Cs , а также углерод ^{14}C , плутоний ^{241}Pu , тритий 3H , криптон ^{85}Kr . При этом основной вклад дают только четыре радионуклида ^{14}C (86,7 %), ^{137}Cs (7,33 %), ^{95}Zr (2,13 %), ^{90}Sr (1,57 %). Несмотря на то, что в целом вклад ядерных испытаний в суммарную дозу облучения невелик, образовавшийся при ядерных испытаниях радиоактивный углерод, смешавшись со стабильным углеродом биосферы, вследствие большого периода полураспада ($T_{1/2} = 5730$ лет) будет служить дополнительным источником облучения для многих поколений людей. Анализ влияния радиоактивных осадков ^{137}Cs и ^{90}Sr после ядерных испытаний может оказаться полезным при оценке влияния последствий Чернобыльской аварии. В табл. 16 – 17 приведены удельные активности содержания цезия и стронция в продуктах питания в СССР в период с 1963 по 1983 гг.

Таблица 16

Содержание ^{137}Cs в некоторых продуктах питания (СССР, 1963 – 1983 гг.)

Продукт	А, Бк/кг (Бк/л)					
	1963	1967	1970	1973	1981	1983
Хлеб пшеничный	9,3	2,0	0,9	0,55	0,08	0,06
Молоко коровье	7,8	1,4	0,86	0,70	0,12	0,10
Мясо говяжье	10,7	5,0	2,1	1,0	0,12	0,10
Рыба пресноводная	3,3	2,2	5,0	2,8	0,03	0,03
Картофель	2,3	0,9	0,65	0,4	0,15	0,09
Капуста	2,0	0,9	0,44	0,38	0,08	0,10

Таблица 17

Содержание ^{90}Sr в некоторых продуктах питания (СССР, 1963 – 1983 гг.)

Продукт	А, Бк/кг (Бк/л)					
	1963	1967	1970	1973	1981	1983
Хлеб пшеничный	2,2	0,161	0,43	0,33	0,06	0,05
Молоко коровье	1,1	0,37	0,32	0,25	0,03	0,04
Мясо говяжье	0,9	0,32	0,23	0,19	0,025	0,026
Рыба пресноводная	2,3	4,2	2,2	2,75	0,02	0,015
Картофель	0,18	0,25	0,27	0,23	0,1	0,009
Капуста	0,37	0,42	–	0,48	0,05	0,06

Атомная энергетика. В настоящее время во многих странах действуют атомные электростанции (АЭС). Например, в США их 85, во Франции – 41, в Японии – 31, в Великобритании – 37, в ФРГ – 19, в Канаде – 16, в Швеции – 10. В бывшем СССР их было 50 (Россия – 28, Украина – 20).

Работа АЭС является частью ядерного топливного цикла (ЯТЦ), который начинается с добычи урановой руды. Приблизительно половина ее добывается открытым способом и половина – подземным. Руда после добычи поступает на обогатительные фабрики, где натуральный уран выделяется из породы. При переработке руды появляется большое количество отходов, которые являются основным источником радиоактивного загрязнения. После очистки обогащенная руда превращается в ядерное топливо. Отработанное топливо проходит вторичную переработку для выделения урана и плутония с целью их повторного использования в ЯТЦ. В ядерный топливный цикл входит также транспортировка радиоактивных материалов. На каждом этапе ЯТЦ в окружающую среду переходят радионуклиды с различными периодами полураспада. Цикл заканчивается захоронением радиоактивных отходов.

В качестве ядерных отходов следует рассматривать и ядерные станции, отслужившие свой срок. В настоящее время ряд реакторных блоков в Западной и Восточной Европе подходит к критическим срокам своего существования, поэтому этот вопрос сегодня актуален, поскольку демонтировать АЭС так же сложно, как и построить.

По оценкам специалистов средние дозы облучения от объектов атомной энергетики малы и не превышают 1 % от естественного радиационного фона, хотя с учетом техногенных катастроф на атомных станциях это соотношение может существенно измениться (табл. 18–19).

Таблица 18

Структура доз, получаемых населением
от различных источников неаварийного облучения в течение года

Источник излучения	Эквивалентная доза, мЗв
1. Естественный природный фон в среднем (колебания)	2,0 (0,7 – 13)
2. Медицинская рентгенодиагностика в среднем (колебания)	1,5 (0,03 – 6)
3. Строительные материалы (кирпич, бетон, гранит и др.) и пребывание в зданиях в среднем (колебания)	1,0 (0,5 – 1,5)
4. Дополнительные источники, в том числе:	0,11 – 0,16
телевидение (4 часа в день)	0,01
ТЭС (1 МВт на угле в радиусе 20 км)	0,006 – 0,06
АЭС (все действующие 12 ГВт)	0,00017
полеты на высоте 12 км (5 раз в год)	0,005
испытания ядерного оружия (на 2000 год)	0,025
использование удобрений	0,000136
авария на ЧАЭС, 1986 г.	0,14
5. Другие источники	0,25
Всего:	5,0

Таблица 19

Фоновое облучение человека в течение года

Компонент фона	Эквивалентная доза, мЗв
ЕРФ	2,0 (0,7 – 13)
ТИЕРФ	1,05 (0,5 – 1,5)
ИРФ	1,6 (0,03 – 6)
Другие	0,13 (0,11 – 0,16)
Всего:	5,0

4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Под биологическим действием ионизирующих излучений понимают связанную с облучением совокупность морфологических и функциональных изменений в живом организме.

Все излучения обладают биологическим действием, т.е. способностью вызывать изменения в клетках тканей и органов организма. Для биологического действия ионизирующих излучений в отличие от результатов воздействия на неживые объекты характерен ряд особенностей:

1. Эффекты, связанные с облучением, обусловлены не столько количеством поглощенной энергии, сколько формой, в которой она передается. Ни тепловая, ни электрическая энергия, поглощенная биологической тканью в том же количестве, не вызывает таких изменений, которые возникают в результате воздействия ионизирующих излучений. Это означает, что первоначальный акт поглощения энергии излучения инициирует ряд процессов, многократно усиливающих первоначальный эффект.

2. Действие ионизирующих излучений на организм в малых дозах не ощутимо человеком. У людей отсутствуют органы чувств, которые воспринимали бы ионизирующие излучения. Дозиметрические приборы – это дополнительный орган чувств, который позволяет регистрировать ионизирующие излучения.

3. Существует так называемый скрытый (латентный) период проявления первых симптомов повреждения. Продолжительность его сокращается с увеличением дозы облучения.

4. Эффекты действия отдельных актов облучения суммируются, а полученная доза накапливается. При этом однократное облучение большой дозой вызывает более существенные повреждения, чем многократное (фракционированное) облучение с той же суммарной дозой.

5. Органы живого организма, а также организмы в целом обладают различной чувствительностью к воздействию ионизирующих излучений.

Действие ионизирующих излучений на биологические объекты можно разделить на несколько этапов (табл. 20).

Таблица 20

Этапы действия ионизирующих излучений

Этап	Явления	Длительность
1. Физический (начальный)	ионизация и возбуждение атомов и молекул	$10^{-16} - 10^{-13}$ с
2. Физико-химический	образование свободных радикалов	10^{-10} – часы
3. Биохимический	этап повреждения биологических молекул	10^{-5} – часы
4. Ранние биологические эффекты	от гибели отдельных клеток до гибели отдельных организмов	часы – недели
5. Отдаленные биологические эффекты	возникновение онкологических заболеваний и генетические дефекты	годы – столетия

4.1. Физический этап

К ионизирующим излучениям относятся пучки элементарных частиц, ядер, ионов, а также электромагнитные излучения: рентгеновское, γ -излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение, возникающее при прохождении через вещество заряженных частиц. Большинство из них имеют заряд: β -частицы (электроны, позитроны), протоны (ядра атома водорода), α -частицы (ядро атома гелия), а также различные ионы. Но есть и нейтральные частицы – нейтроны. Они не могут участвовать в процессах, зависящих от электрического заряда. Однако нейтроны, взаимодействующие с ядрами, вызывают испускание протонов и γ -квантов. Поскольку нейтроны и электромагнитные излучения не участвуют непосредственно в ионизации атомов и молекул, то их называют косвенно ионизирующими.

При прохождении через вещество заряженные частицы теряют свою энергию, вызывая возбуждение и ионизацию встречающихся на их пути атомов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока общий запас энергии частиц не становится настолько малым, что она утрачивает свою ионизационную способность. Если это электрон, то он захватывается каким-либо атомом с образованием отрицательного иона. Кроме этого в поле положительного заряженного ядра β -частица резко тормозится и теряет при этом часть своей энергии. Эта энергия излучается в виде тормозного рентгеновского излучения. Рентгеновское излучение, γ -излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение отличаются друг от друга происхождением и имеют свой диапазон энергии, хотя границы этих диапазонов точно не определены. Поэтому деление электромагнитных излучений на диапазоны весьма условно. Основными процессами, сопровождающими прохождение фотонного излучения через вещество (рис. 3), являются фотоэффект (взаимодействие с веществом электромагнитного излучения с малой энергией), комптон-эффект (взаимодействие с веществом

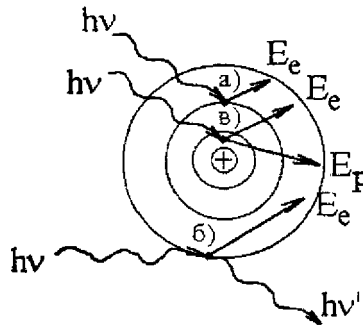


Рис. 3. Схема процессов, сопровождающих прохождение фотонного излучения через вещество: а) фотоэффект; б) комптон-эффект; в) образование электрон-позитронных пар

электромагнитного излучения со средней энергией) и образование электрон-позитронных пар (взаимодействие с веществом высокоэнергетического электромагнитного излучения).

Фотоэффектом называется процесс (рис. 3 а), при котором атом полностью поглощает γ -квант с энергией $h\nu$ и испускает электрон с кинетической энергией E_e , равной $E_e = h\nu - U_i$ (U_i – энергия связи электрона на i -той оболочке). **Комптон-эффектом** называется такой процесс (рис. 3 б), при котором γ -квант, взаимодействуя с электроном, передает ему часть своей энергии и рассеивается под некоторым углом, а электрон покидает атом с кинетической энергией E_e . Рождение **позитрон-электронной пары** – процесс, при котором γ -квант вблизи ядра превращается в пару частиц – электрон и позитрон (рис. 3 в), которые приобретают соответствующие кинетические энергии E_e и E_p .

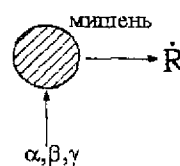
Таким образом, при прохождении ионизирующих излучений через вещество происходит ионизация или возбуждение (на один акт ионизации приходится несколько актов возбуждения) атомов и молекул вещества либо непосредственно заряженными частицами (α , β , протоны), либо опосредованно, через взаимодействие атомов вещества с вторичными заряженными частицами, возникающими вследствие различных процессов (фотоэффект, комптон-эффект и т.д.).

Однако деструктивное действие радиации нельзя объяснить только ионизацией и возбуждением атомов и молекул, поскольку энергия по тепловому эффекту чрезвычайно мала. Например, абсолютно смертельной дозе для человека, равной 10 Gr на все тело, соответствует тепловая энергия, которая позволяет нагреть организм всего только на $0,001^\circ\text{C}$, что соответствует употреблению одной чашки горячего чая. Не может объяснить действие радиации и непосредственная ионизация атомов, поскольку при дозах облучения организма, которые вызывают значительные повреждения и даже его гибель, относительное количество возникающих ионов незначительно. Например, однократное облучение дозой 6 Gr для человека соответствует образованию приблизительно 10^{13} ионов/ см^3 ткани, что в пересчете на ионизацию молекул воды составляет дополнительно одну пару ионов на 10 млн. молекул воды, а это значительно ниже естественного уровня ионизованности воды в организме. Все это означает, что биологическое действие ионизирующих излучений подразумевает существование других этапов, значительно усиливающих первоначальное воздействие излучения на физическом этапе.

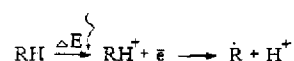
4.2. Физико-химический этап

Любой радиобиологический эффект начинается с взаимодействия ионизирующего излучения с биологическими молекулами, в результате которого происходит инактивация макромолекул, т.е. их биологические функции частично или полностью утрачиваются. В основе инактивации молекул лежат прямой и косвенный механизмы действия радиации.

Под **прямым механизмом** действия радиации понимают такие изменения, которые возникают при непосредственном поглощении молекулами энергии излучения. Этот механизм включает целый ряд сложных процессов. Акт взаимодействия в этом случае можно условно разделить на три стадии. На первой стадии энергия излучения поглощается непосредственно биологически активными молекулами или "мишенями", в результате чего возникают возбужденные и ионизированные молекулы.



На втором этапе происходит перераспределение возбужденными молекулами избыточной энергии. При этом образуются химически активные ионы и радикалы



где RH – биомолекула; H – атом водорода, который всегда присутствует в органических соединениях; \dot{R} – свободный радикал.

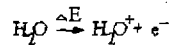
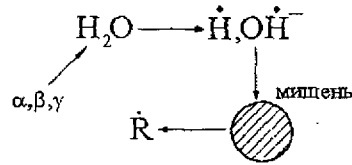
На третьем этапе ионы и радикалы взаимодействуют как друг с другом, так и с окружающими молекулами. В результате образуются различные типы структурных повреждений, например, разрушение ряда аминокислотных остатков в молекулах белка, нарушение структуры нуклеиновых кислот и т.д.

Свободные радикалы – это электрически нейтральные атомы и молекулы с неспаренным электроном на внешней орбите. Свободные радикалы весьма реакционноспособны, так как обладают возможностью связывать неспаренный электрон с аналогичным электроном в другом радикале или вообще ионизовать другой атом. Свободные радикалы отличаются высокой химической активностью и являются основными звеньями протекающих в поврежденной облучением клетке окислительно-восстановительных реакций. В качестве примера химической активности

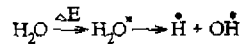
свободнорадикальных структур можно привести окислительную способность молекулы кислорода O_2 – неорганического радикала.

Косвенный механизм действия радиации – это взаимодействие биологически активных молекул с промежуточными продуктами, которые возникают под действием ионизирующих излучений.

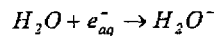
При косвенном действии биологические молекулы не поглощают непосредственно энергию излучения, а получают ее от другой молекулы. Поскольку клетка содержит 60 – 90 % воды, то основной вклад в косвенный механизм вносит радиоллиз воды. Под действием ионизирующих излучений молекулы воды превращаются в ион с образованием высокоэнергетического электрона



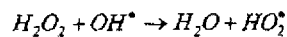
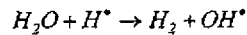
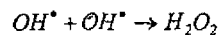
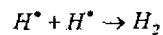
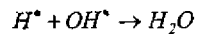
а также переходят в возбужденное состояние, из которого диссоциируют с образованием свободных радикалов,



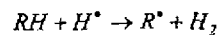
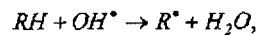
Свободный электрон может передавать свою энергию молекулам воды, существовать в виде гидратированного электрона e_{aq}^- , а также присоединяться к нейтральным молекулам



Возникающие ионы и свободные радикалы взаимодействуют друг с другом в различных сочетаниях, образуя молекулярные продукты

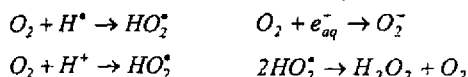


Они также могут взаимодействовать с биологическими молекулами

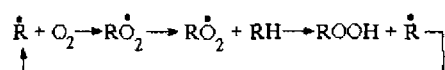


Свободные радикалы могут также взаимодействовать с молекулами растворенного кислорода, приводя к появлению перекисных радикалов водорода H_2O_2 и HO_2^* , например, взаимодействие кислорода с гидратирован-

ным электроном e_{aq}^- и H^+ приводит к появлению относительно стабильных радикалов, что можно оценить как защитный эффект в некоторых случаях



Наоборот, при избыточном количестве радикалов OH^* кислород усиливает радиационные повреждения вследствие увеличения выхода радикалов. Более того, присутствие кислорода может служить причиной запуска цепной реакции (кислородный эффект)



В результате таких реакций в биологических объектах накапливаются органические кислоты ROOH. В повседневной жизни это проявляется, например, в изменении поверхностного слоя сливочного масла. Накопление продуктов окисления ROOH приводит к наступлению следующей стадии окисления – появлению органических молекул с формальдегидными группами, которые являются ядами (например, прогорклость растительного и сливочного масел).

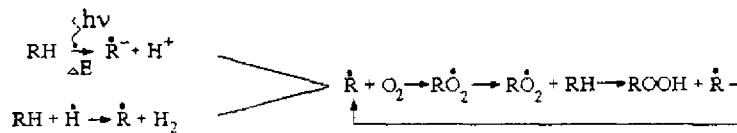
4.3. Биохимический этап. Действие ионизирующих излучений на клетку

Основные процессы лучевого поражения организма начинаются на уровне клетки. Любой многоклеточный организм берет свое начало с одной единственной клетки путем многократных клеточных делений. Выяснение механизма действия ионизирующего излучения на клетку – важнейшая задача, от решения которой зависят методы защиты и лечения организма от воздействия радиации. Клетка универсальна в том смысле, что она, имея схожее строение, присуща всему живому и уникальна, так как в зависимости от организации, специализации и выполняемых функций может принадлежать к одному из множества клеточных типов, образующих органы и ткани.

Любая клетка окружена мембраной, которая защищает ее от внешних воздействий, позволяет сохранять стабильность внутриклеточной среды и обеспечивает процессы жизнедеятельности и функционирования клетки. Основными компонентами мембраны биологической клетки являются липиды и белки.

Липиды характеризуются тем, что очень слабо растворимы в воде, но обычно хорошо растворимы в органических растворителях, например,

хлороформе или этаноле. Типичный липид состоит из молекулы глицерина, три гидроксильные группы которого соединены с жирными кислотами (длинные цепи атомов углерода с гидроксильной группой на конце). Основным механизмом действия радиации на липиды является перекисное окисление липидов. Химическая реакция заключается в том, что молекула липида под действием радиации переходит в свободнорадикальное состояние.



Этот процесс в присутствии кислорода становится цепным и уже не зависит от внешнего воздействия радиации. Так как мембрана имеет слоистую замкнутую структуру, то этот процесс достаточно быстро распространяется по всей мембране. В результате в мембране накапливаются дефекты вплоть до полного разрушения, а также нарабатывается большое число биологически активных молекул – радиотоксинов – свободных радикалов $\dot{\text{R}}$ и $\text{RO}_2 \cdot$, а также кислот RCOOH , которые оказывают воздействие на другие компоненты биологической клетки. В повседневной жизни с реакцией перекисного окисления липидов встречаются при изменении окраски поверхностных слоев сливочного и прогорклости растительного масла, которые подвергались воздействию прямых солнечных лучей.

Белки – азотистые соединения, в естественном состоянии обычно растворимы в воде. Особенности того или иного белка определяются последовательностью и природой аминокислот и сложной конфигурацией структуры. Несмотря на то, что белки в клетках выполняют целый ряд функций (строительная, информационная, ферментативная и др.), они относятся к объектам со слабой чувствительностью к воздействию радиации. Белки постоянно производятся в клетке и их функции восстанавливаются.

При общем рассмотрении клетка состоит из ядра (центральной части) и цитоплазмы. В ядре хранится наследственная информация, в цитоплазме расположены органеллы. Органеллы выполняют различные функции. Так, в лизосомах содержатся переваривающие ферменты, в эндоплазматической сети сосредоточено производство белков, а митохондрии – энергетические станции клетки и т.д.

В ядре находятся важнейшие структуры клетки – нити хроматина, которые в период клеточного деления образуют специфические структуры, называемые хромосомами. Хромосомы содержат молекулы дезоксирибонуклеиновой кислоты – ДНК, в которых зафиксирована вся наследственная информация.

Молекула ДНК представляет собой длинную неразветвленную цепь, образованную чередующимися фосфатными группами, азотистыми основаниями и молекулами дезоксирибозы. К каждому остатку дезоксирибозы присоединяется одно из возможных четырех азотистых оснований: аденин (А), гуанин (Г), тимин (Т), цитозин (Ц). Часть молекулы ДНК, образованная молекулами дезоксирибозы, азотистого основания и фосфатной группой, называется нуклеотидом. Молекула ДНК состоит из двух полинуклеотидных нитей, образующих двойную спираль. Основания нитей, соединенные водородными связями, никогда не бывают идентичными. Они связаны между собой попарно: А–Т (Т–А) и Г–Ц (Ц–Г). Последовательность из трех нуклеотидов в одной цепи ДНК представляет собой единицу наследственной информации (триплетный код, аналогом которого в информатике является двоичная система исчисления или десятичная – в математике).

Ионизирующее излучение может вызывать четыре основных типа повреждений: одиночные разрывы (1), двойные разрывы (2), повреждение азотистых оснований (3) и межмолекулярная сшивка (4), а также разрушение дезоксирибозы, высвобождение или обрыв азотистых оснований и др. (рис. 4). Так, например, установлено, что при дозе 1 Гр в каждой клетке человека повреждается 5000 оснований молекул ДНК, возникает 1000 одиночных и 10 – 100 двойных разрывов.

В природе ДНК подвержены не только действию радиации, но и химическим и бактериальным агентам. Поэтому значительная часть энергии клетки расходуется на поддержание постоянства генетического кода. В случае нарушения структуры ДНК включаются мощные механизмы восстановления (репарации). Считается, что основным является механизм эксцизионной репарации, которая состоит в эксцизии (вырезании) части цепи, содержащей поврежденные нуклеотиды, и синтезе нового участка, точно повторяющего поврежденный.

Репарации бывают, во-первых, безошибочные, которые не вызывают в дальнейшем летального исхода или мутаций; во-вторых, ошибочные репарации, которые могут повлечь за собой нелетальные или летальные мутации; в-третьих, существуют неполные репарации, когда непрерывность

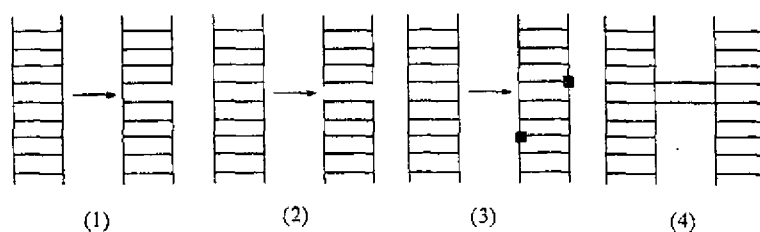


Рис. 4. Основные типы повреждений

нитей ДНК не восстанавливается и эта "нерепарация" может быть не только мутагенной, но даже летальной. Тем не менее, в клетках млекопитающих скорость репарации весьма значительна. Так, при нормальной температуре половина радиационных одиночных разрывов восстанавливается в течение примерно 15 минут. Однако учеными доказано, что число одиночных разрывов линейно зависит от дозы облучения в очень широком диапазоне энергий. Другими словами, как бы ни была мала доза облучения, должно возникнуть некоторое число одиночных разрывов. Эффективность их образования зависит от многих биохимических факторов. Поэтому особенно опасно внутреннее облучение, так как в этом случае происходит полное поглощение. Например, если в организм попал ^{90}Sr , то при испускании одной β -частицы может возникнуть порядка 30000 – 50000 одиночных разрывов. Дальнейшая судьба этих разрывов будет зависеть от многих факторов, в том числе от состояния клетки и ее способности к восстановлению.

При облучении в клетке возникают такие повреждения, которые могут привести к ее гибели и быть основной причиной ряда отдаленных последствий лучевого поражения, в том числе и образования раковых опухолей.

Облучение клеток очень высокими дозами (более 10 Гр) может вызвать мгновенное прекращение обменных процессов (метаболизм) и даже разрушение клетки. В этом случае говорят о **метаболической гибели**. При облучении в более умеренных дозах (менее 10 Гр) клетка остается живой, однако в ее органеллах наблюдаются существенные изменения: нарушается проницаемость мембран, угнетается дыхание. Клеточная гибель в этом случае наступает в первые часы и также является метаболической.

Если клетка после облучения теряет способность к неограниченному делению даже при сохранении ее функций, то это также можно рассмат-

ривать как гибель клетки – **репродуктивная гибель**. Этот термин применим как к клеткам делящимся, но постепенно деградирующим после облучения умеренными дозами, так и к клеткам, полностью утратившим репродуктивную способность. Основной причиной репродуктивной гибели клетки при облучении является структурное повреждение хромосом. Сильно поврежденные молекулы ДНК теряют способность к восстановлению, клетка утрачивает возможность делиться и гибнет. Менее выраженные повреждения могут проявиться в форме мутаций, которые в последующих делениях передаются следующим клеточным поколениям.

4.4. Мутации

Мутации определяют наследуемые изменения в молекулах ДНК. Появление мутаций означает, что клетка содержит генетический материал, отличный от генетического материала аналогичных клеток. Мутации могут усиливать, уменьшать или качественно менять признак, определяемый геном. Ген – единица наследственной информации (последовательность нуклеотидов), отвечает за формирование какого-либо элементарного признака, например, синтез определенного белка.

Мутации происходят как в соматических, так и в половых клетках. Мутация, возникающая в соматических клетках, может изменить наследственные признаки клетки и тех тканей и систем, которые образуются ее потомками. Считают, что некоторые виды рака, характеризующегося быстрым клеточным делением, вызываются мутациями в соматических клетках. Если мутации происходят в половых клетках, то измененные наследственные признаки могут быть переданы последующим поколениям.

Мутации, возникающие в пределах нескольких пар оснований, называются **генными** (точечными). Этот тип мутации связан с преобразованиями химической структуры ДНК. Изменение последовательности нуклеотидов, выпадение одних и включение других нуклеотидов в ДНК приводит к тому, что в клетке начинает синтезироваться новый белок, что вызывает появление у потомков новых свойств, которые могут проявляться в виде склонности к онкологическим заболеваниям.

Мутации, затрагивающие структуру хромосом, называют **хромосомными абберациями**. К этому типу относятся разрывы и различные типы перестроек хромосом. При этом образуются фрагменты, которые, имея "липкие" концы, могут воссоединяться, восстанавливая первоначальную структуру. Однако воссоединения могут быть неправильными, что приводит к образованию перестроек. Стоит отметить, что выживаемость клеток обратно пропорциональна числу хромосомных нарушений.

С увеличением дозы облучения увеличивается не столько степень поражения облученных клеток, сколько доля пораженных клеток. Даже при очень малых поглощенных дозах возможна гибель отдельных клеток, а при заведомо смертельных дозах отдельные клетки могут выжить.

В заключение раздела приведем шкалу биологических эффектов в зависимости от поглощенной дозы облучения (табл. 21).

Таблица 21

Шкала биологических эффектов

Доза, Гр	Биологический эффект
менее 10^{-3}	Угнетение жизнедеятельности (прекращение деления клеток)
$10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3}$	Оптимум
$2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	Стимуляция жизнедеятельности (стимуляция деления клеток)
$5 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$	Появление мутаций
0,1 – 0,5	Временная мужская стерильность
0,2 – 0,5	Лейкемический диапазон
0,5 – 1,0	Нарушение кроветворения, лейкоцитопения и эритроцитопения, удвоение числа мутаций, появление злокачественных новообразований
1,0 – 2,0	Иммунодефицитное состояние, легкая степень лучевой болезни
2,0 – 4,0	Средняя степень тяжести лучевой болезни, сокращение жизни
4,0 – 6,0	Костно-мозговой синдром, летальный исход через 2 – 4 месяца
6,0 – 10,0	Кишечный синдром, летальный исход через 1 – 2 недели
10,0 – 100	Церебральный синдром, летальный исход через 48 часов
более 100	Мгновенная смерть

4.5. Классификация радиационных эффектов

Действие радиации на органы, ткани и целостный организм не сводится к суммарному эффекту повреждения клеток биологического объекта, особенно в области доз ниже однократно летальных. Организм обладает новыми возможностями противодействия последствиям радиационного облучения, нежели отдельные органы и ткани. На тканевом уровне радиобиологические эффекты можно разделить на стохастические и нестохастические (рис. 5).

К нестохастическим (неслучайным) относят последствия действия больших доз, когда неизбежно и закономерно возникают патологические изменения, являющиеся неслучайными. Нестохастические эффекты рассматриваются как результат коллективного поражения определенной доли клеток в подвергшемся воздействию облучения органе или ткани. Поэтому

тяжесть нестохастических эффектов зависит от количества поврежденных клеток, поскольку с возрастанием дозы их количество может достичь уровня, когда наступают функциональные и структурные нарушения облученной ткани.

К таким повреждениям относятся, прежде всего, ближайшие последствия: острые лучевые поражения, в том числе острые лучевые болезни как результат кратковременного, преимущественно общего облучения организма. Нестохастические эффекты характерны также для отдельных тканей (катаракта, повреждения кожи – эритема, угнетение костномозгового кроветворения, бесплодие и т.д.). Другие нестохастические эффекты (хрупкость, ломкость, неэластичность) могут возникать в соединительной ткани (сухожилия, кости) и в кровеносных сосудах.

Для этих эффектов тяжесть поражения, согласно данным МКРЗ, зависит от полученной дозы, и для них должен существовать четкий порог дозы, ниже которого тот или иной нестохастический эффект не наблюдается. В этом состоит пороговая концепция действия радиации.

Стохастическими (вероятностными) называют такие эффекты, вероятность которых возрастает пропорционально дозе. Такие эффекты являются следствием того, что каждый двойной разрыв ДНК, являясь сам по себе вероятностным процессом, имеет, кроме того, и вероятностную природу для проявления как в виде мутации, так и в виде раковой опухоли. Подобные реакции (генетические и канцерогенные эффекты) считаются беспороговыми и проявляются в результате действия малых доз радиации. При этом считается, что даже единичный акт ионизации может вызвать нарушения некоторых последовательных механизмов, приводящих к стохастическим эффектам.

Однако деление эффектов на стохастические и нестохастические несколько условно. По крайней мере, некоторые нестохастические эффекты можно рассматривать как последствия стохастических, поскольку обе группы эффектов могут быть обусловлены общими повреждениями клеток.

Ионизирующее излучение поражает в разной степени все ткани и органы, но причиной гибели организма является поражение какого-либо одного органа, который в данной ситуации является критическим.

Критическими называются органы, первыми выходящие из строя в данном диапазоне доз облучения. Вследствие необратимого поражения соответствующих систем организма (кроветворной, кишечника и центральной нервной системы) развиваются основные клинические синдромы: костномозговой (кроветворный), желудочно-кишечный и церебральный.

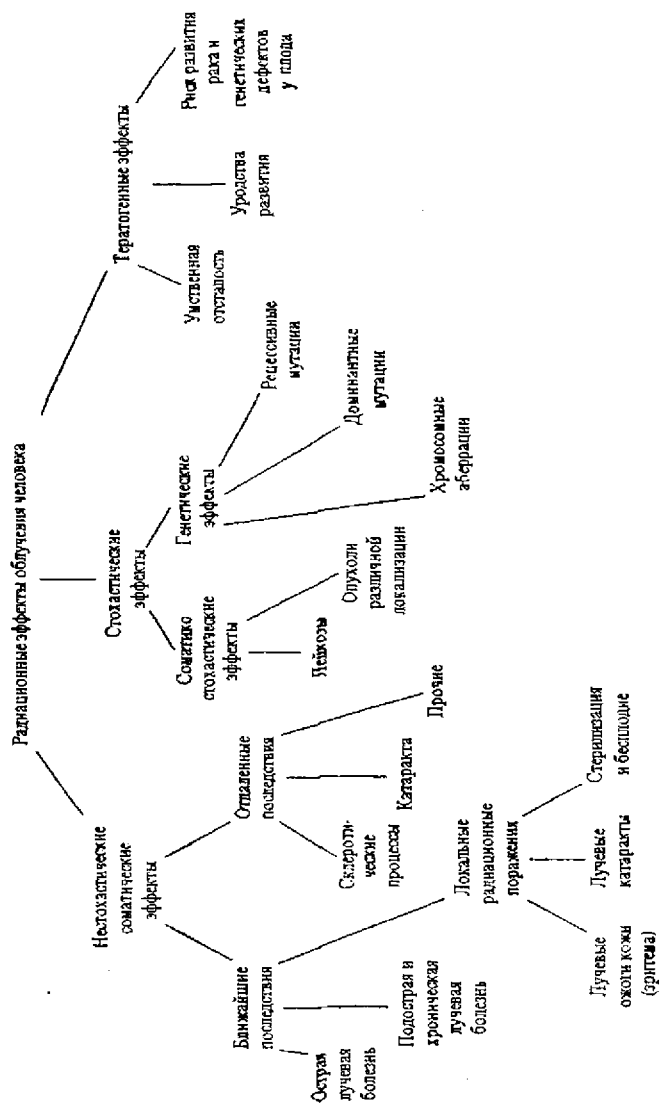


Рис. 5. Радикационные эффекты воздействия на человека

Кроветворная система и желудочно-кишечный тракт характеризуются большой скоростью клеточного обновления, тогда как клетки центральной нервной системы у взрослого человека практически не делятся. Наиболее чувствительными к радиации являются органы и ткани с интенсивно делящимися клетками. Как показывают исследования, при дозах 4 – 6 Гр, вызывающих снижение продолжительности жизни человека до 40 суток, поражается в основном кроветворная система. При больших дозах, когда средняя продолжительность жизни составляет 8 суток, поражается желудочно-кишечный тракт. При дозах более 30 Гр продолжительность жизни составляет не более 2 суток, поскольку поражается, главным образом, центральная нервная система.

Костно-мозговой синдром характеризуется кровоточивостью, анемией, понижением иммунитета вследствие недостатка в крови тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов. Однако кроветворная система обладает способностью к значительной регенерации, и если доза облучения менее некоторой критической величины, то функции кроветворения полностью восстанавливаются.

Признаки и симптомы **желудочно-кишечного синдрома** включают боли в желудочно-кишечном тракте, потерю аппетита, тошноту, рвоту, вялость, инертность и возрастающую острую депрессию. Диарея вызывает сильное обезвоживание организма, в результате чего изменяется объем крови, нарушаются обменные процессы. Это приводит к изменениям в составе крови и появлению инфекций.

Симптомы **церебрального синдрома** проявляются в виде раздражительности, чрезмерного возбуждения, судорог и комы. Эти симптомы связаны с повреждением нервных клеток и кровеносных сосудов головного мозга. Синдром может продолжаться от нескольких минут до двух суток в зависимости от дозы. Он является необратимым, лечение может быть только симптоматическим с целью уменьшить страдания.

4.6. Действие больших доз радиации. Лучевые болезни

Установлено, что в органах, состоящих в основном из неделящихся клеток, лучевые дефекты проявляются поздно, вызывая отдаленные последствия. Если же в органах и тканях происходит процесс интенсивного деления клеток, то поражение радиацией этих органов заметно уже при малых дозах. Действительно, половые железы отличаются повышенной чувствительностью к облучению. Однократное локальное облучение семенников дозой 0,1 Гр приводит к временной стерильности мужчин, а доза

выше 2 Гр может привести к полной стерильности. Яичники менее чувствительны к облучению, однако доза 1 – 2 Гр вызывает временное бесплодие женщин сроком на 1 – 3 года, а острое облучение дозой 3 Гр и более приводит к бесплодию. Кожа человека представляет собой активно обновляющуюся клеточную систему, поэтому она в целом радиочувствительна. При локальном облучении умеренными дозами 3 – 8 Гр возникает характерное покраснение кожи (эритема), которое проходит через 25 – 60 часов. Вторая фаза наступает через 2 – 3 недели. Она сопровождается потерей слоев эпидермиса. Состояние кожи близко к первой степени термических ожогов.

При облучении дозой 10 Гр и более вторая фаза эритемы очень болезненна, соответствует термическим ожогам второй степени и может длиться очень долго. При дозах 3 – 4 Гр также наблюдается эпиляция (выпадение волос) в течение 1 – 3 недель, но рост волос может возобновиться. При более высоких дозах происходит полная потеря волос. Одним из последствий облучения являются воспалительные процессы в глазах и помутнение хрусталика (катаракта). Воспалительные процессы проявляются при дозах 3 – 8 Гр, а катаракта у человека возникает при дозах более 6 Гр. Легкие являются наиболее чувствительным органом грудной клетки. При локальном облучении дозами порядка 3 – 6 Гр возможно возникновение радиационной пневмонии, а при дозах 25 Гр и выше наблюдается острая легочная недостаточность.

Из органов пищеварения наиболее чувствительным является тонкий кишечник, поражение которого обуславливает желудочно-кишечный синдром. В порядке убывания радиочувствительности следуют слизистая полости рта, слюнные железы, пищевод, желудок, толстый кишечник, поджелудочная железа и печень.

Сердечно-сосудистая система достаточно резистентна (не чувствительна) к облучению. Однако при облучении дозами выше 4 Гр обнаруживается уменьшение восстановления сосудов, повышается их хрупкость, снижается эластичность.

При локальном облучении развивающегося плода в чреве матери наблюдаются врожденные уродства, умственная отсталость, задержка роста, смертельный исход. Суммируя все немногочисленные данные, можно сделать вывод, что при дозе 0,5 Гр наблюдается гибель эмбриона или возникновение пороков развития. Поэтому, если доза облучения в течение первых 6 недель превышает дозу 0,1 Гр, следует рекомендовать прерывание

беременности. В западной литературе до 1986 года приводились следующие данные: облучение эмбриона человека дозой $0,05 \text{ Гр}$ в течение первых трех месяцев беременности увеличивает предрасположенность к раку в 10 раз. По этой причине не рекомендуется проводить рентгеновское обследование беременных женщин. В табл. 22 приведены радиационные эффекты, которые проявляются при соответствующих дозах облучения.

Таблица 22

Радиационные эффекты

Дозы, Зв	Орган, ткань	Эффект
0,1	плод	врожденные уродства
0,5	все тело	рвота
1,0	все тело	ранняя смерть
3,0	гонады	стерильность, бесплодие
3,0	кожа	эритема, эпиляция
5,0	хрусталик глаза	катаракта
5,0	легкое	радиационная пневмония
10,0	легкое	ранняя смертность
10,0	щитовидная железа	гипотериоз

Ионизирующее излучение может вызывать лучевое поражение человека, степень и характер которого обусловлены поглощенной дозой, распределением этой дозы в пространстве и во времени.

Лучевая болезнь – это комплексная реакция организма на воздействие больших доз ионизирующих излучений.

Острая лучевая болезнь возникает как реакция организма в результате однократного внешнего равномерного облучения в дозах от 1 до 10 Гр и более. В зависимости от полученной дозы острая лучевая болезнь имеет три степени тяжести: легкая ($1 - 2 \text{ Гр}$), средняя ($2 - 4 \text{ Гр}$), тяжелая ($4 - 10 \text{ Гр}$).

Клиническая картина развития острой лучевой болезни очень сложна и состоит из ряда стадий с чередованием периодов улучшения и ухудшения общего самочувствия.

При длительном облучении организма в относительно малых дозах развивается хроническая лучевая болезнь. К ее возникновению может привести ежедневное общее облучение $0,1 - 0,5 \text{ Гр}$ при достижении суммарной дозы $0,7 - 1,0 \text{ Гр}$. При этом наблюдаются волнообразные изменения со стороны кроветворения, причем продолжительное время сохраняется возможность восстановления клеточного состава крови. Наряду с изменениями в крови наблюдается нарушение нервной, сердечно-

сосудистой, эндокринной систем. Хроническая лучевая болезнь может развиваться при длительном местном облучении или избирательном накоплении радионуклидов в отдельных органах. Клиническая картина хронической лучевой болезни определяется радиочувствительностью органа или ткани, а также зоной преимущественного облучения.

4.7. Опосредованное действие радиации

Часть облученных клеток полностью восстанавливает свои функции, другая часть претерпевает различные физиологические, биохимические изменения, утрачивает свои биологические функции. Повреждение в облученном организме одних систем неизбежно вызывает реакцию и изменение в других. Это явление носит название опосредованного действия радиации. Подтверждением этому могут служить следующие факты:

1. Сравнение физиологических, биологических и других нарушений в некотором органе при облучении всего организма и нарушений при локальном облучении этого же органа одной и той же эквивалентной дозой показывает, что нарушения выражены существенно сильнее в случае общего облучения. Это отличие учитывается коэффициентом риска.

2. Гибель клеток костного мозга имеет место не только в облученных, но и в экранированных зонах, защищенных от радиационного воздействия. Правда, в экранированных зонах гибель выражена значительно слабее.

3. Изменения генетического аппарата обнаруживаются и в облученных, и в экранированных клетках.

4. Введение необлученным животным крови облученных особей воспроизводит многие симптомы лучевой болезни.

Эти аргументы позволяют заключить, что лучевая патология формируется не только при прямом поражении ионизирующим излучением, но и в результате опосредованных эффектов.

Лучевое воздействие приводит к снижению устойчивости организма к инфекциям: уменьшается естественная сопротивляемость организма, угнетается приобретенный иммунитет. Снижение иммунитета наблюдается и при хроническом облучении малыми дозами. Подавление иммунитета в облученном организме – сложный процесс, в основе которого лежат биохимические и биофизические нарушения в клеточных структурах.

Одним из большого многообразия опосредованных эффектов облучения является появление в облученном организме токсических веществ, получивших название "радиотоксины".

Таким образом, первичная реакция, развивающаяся при облучении, не может быть объяснена повреждением только критических систем. Существенным фактором в лучевом поражении служат опосредованные эффекты облучения.

4.8. Действие малых доз радиации. Беспороговая концепция действия радиации

Радиобиологические эффекты, проявляющиеся в результате действия малых доз радиации, носят, как правило, вероятностный характер. По этой причине нельзя достоверно сказать, как изменяется зависимость эффект – доза в этом диапазоне доз. Существуют различные гипотезы (рис. 6). Одни ученые считают, что данные, полученные при изучении действия радиации на отдельную клетку, нельзя переносить на весь организм. Поэтому в области допороговых доз радиационные эффекты не возникают и необходимо только установить пороговые дозы для всех эффектов (кривая 1). Другие считают, что организм имеет некоторый запас прочности к колебаниям естественного фона и при малых дозах число эффектов незначительно (кривая 2). Третьи придерживаются гипотезы об аномально неблагоприятном действии малых доз (кривая 3). Однако наибольшее число ученых придерживается концепции беспорогового действия радиации (кривая 4). Эта концепция основана на предположении, что нет причин, по которым ход зависимости эффект – доза при малых дозах должен отклоняться от хорошо подтвержденного известного диапазона достаточно больших доз.

В основе беспороговой концепции действия радиации лежат два постулата:

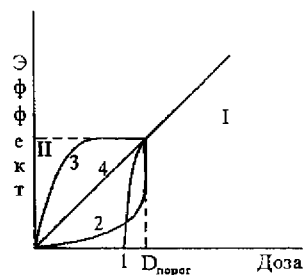


Рис. 6. Зависимость эффект – доза:
I – область больших доз; II – область малых доз;
1 – модель, учитывающая наличие пороговой дозы; 2 – модель, предполагающая слабое влияние малых доз радиации на организм; 3 – модель, предполагающая аномально высокое влияние малых доз радиации, основанная на беспороговой концепции

- как бы ни была мала доза, всегда существует риск радиационного поражения, или не существует такой дозы, при которой риск был бы равен нулю;
- если доза удваивается, то риск удваивается тоже, т.е. в области малых доз кривая эффект – доза имеет линейный вид, как и в области известных эффектов.

В настоящее время не существует экспериментальных данных, подтверждающих или опровергающих беспороговую концепцию действия радиации. Основным источником информации являются исследования Национального института здоровья (Япония) и Комиссии по изучению последствий атомных бомбардировок (США). Под наблюдением находилось около 110000 человек, непосредственно облученных, 2800 человек, облученных внутриутробно, и 54000 детей, рожденных от облученных родителей, а также некоторое количество облученных в других инцидентах. Выявлено три группы эффектов:

- эффекты, для которых установлена четкая зависимость от дозы (злокачественные опухоли, катаракты, задержка умственного развития для облученных внутриутробно);
- эффекты, для которых установлена предполагаемая зависимость от дозы (некоторые злокачественные опухоли нервной системы, кишечника, пищевода, слюнных желез, кроветворной и лимфоидной систем);
- эффекты, для которых дозовой зависимости не установлено (хронический лимфолейкоз, злокачественные опухоли костной ткани, бесплодие, врожденные дефекты, увеличение смертности в первом поколении).

Учитывая все это, МКРЗ считает, что при облучении в малых дозах нельзя полностью исключить возникновение отдаленных стохастических последствий в виде злокачественных опухолей и генетических эффектов. При нормировании радиационного воздействия целесообразно принять гипотезу отсутствия порога для возникновения названных эффектов и пользоваться линейной зависимостью (рис. 6, кривая 4). Эта концепция беспороговости действия радиации означает отказ от представлений о безвредности облучения в дозах, ниже допустимых. Она позволяет на основе данных, полученных при дозах 0,7 – 1 Зв и выше, путем экстраполяции установить вероятность возникновения опухолей и генетических повреждений при облучении в малых дозах.

Стоит отметить, что определение величины пороговой дозы – весьма сложная задача. Так, граница, разделяющая опасность – безопасность, постоянно изменяется. Первоначально в качестве границы выбиралась доза 1 Гр, необходимая для возникновения лучевой болезни. После обнаружения устойчивых изменений со стороны кроветворной системы (лейкоцитопения и эритроцитопения) при дозах облучения порядка 0,7 Гр граничная доза была уменьшена. Многочисленные эксперименты (лучевая терапия) и происшествия, связанные с облучением, свидетельствуют о том, что при дозах облучения, не превышающих 0,7 Гр, установить заметное повышение числа онкологических заболеваний не удастся, что обусловлено большим латентным периодом и неспецифичностью последствий действия радиации.

Однако поскольку наблюдение за жертвами бомбардировок в Японии показало, что при дозах 0,25 – 0,5 Гр число заболеваний лейкемией незначительно увеличивается (лейкемический диапазон), то в последних Рекомендациях МКРЗ в качестве граничной дозы указывается 0,35 Гр. При этом учитывается, что кроветворная система является наиболее радиочувствительной и нет никаких оснований считать, что в отношении онкологических заболеваний порог будет ниже "лейкемического", скорее наоборот.

Во всяком случае в Рекомендациях МКРЗ отмечается, что оценки радиационного риска, полученные по беспороговой концепции, следует воспринимать как теоретически максимально возможные, практически маловероятные, а при дозах ниже 0,25 Гр – невероятные, причем речь идет о дозах без учета радиационного фона, поскольку все данные получены в его присутствии.

4.9. Отдаленные последствия действия радиации

Острые эффекты облучения проявляются либо непосредственно, либо спустя несколько суток или недель после облучения. Они обычно проявляются в органах и тканях с быстроделющимися клетками. В медленно-делющихся и неделящихся тканях, таких как легкие, печень, почки, сердце и т.д., наблюдается широкое разнообразие всевозможных изменений, но спустя значительный промежуток времени после облучения (десятки лет). В этих органах и тканях возникают различные болезненные явления, которые называют **отдаленными последствиями облучения**.

Одним из универсальных отдаленных эффектов облучения является сокращение продолжительности жизни. Наблюдения за жертвами бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, а также исследования причин смертности врачей-радиологов показали, что сокращение продолжительности жизни

следует отнести за счет увеличения числа заболеваний крови (лейкозов) и рака. Многочисленные данные показывают, что на 1 *Гр* дозы внешнего облучения происходит уменьшение продолжительности жизни в среднем на 5 %. Было обнаружено увеличение на 15 % частоты смертности среди людей, находившихся в радиусе 1200 м от эпицентров взрывов. Смертность наступала исключительно в результате лейкемии. Однако исследования показали, что уменьшение продолжительности жизни вследствие облучения нельзя полностью объяснить возникновением опухолей и что определенную роль могут играть неспецифические эффекты. В настоящее время МКРЗ не считает, что доказательства уменьшения продолжительности жизни вследствие облучения человека являются достаточными для количественного определения этой опасности, однако не отрицает опасности этого последствия облучения.

Первыми в группе раковых заболеваний являются лейкозы. Максимальное развитие лейкозов после двухлетнего скрытого периода приходится в среднем на 6 – 7 лет после облучения (рис. 7). По оценкам НКДАР, при облучении каждого дозой

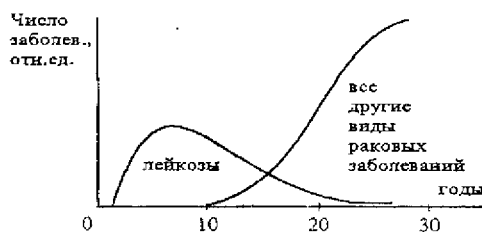


Рис. 6 Вероятность заболевания раком

1 *Гр* умрут от лейкозов в среднем 2 человека из 1000 (вероятность заболевания 0,002). Смертность от лейкозов среди японцев стала резко снижаться в 70-е годы. Самыми распространенными видами раковых заболеваний, вызванных действием радиации, являются рак молочной железы и рак щитовидной железы. Примерно у 10 из 1000 облученных возникает рак щитовидной железы, а у 10 из 1000 женщин – рак молочной железы на каждый 1 *Гр* поглощенной дозы (вероятность 0,01). Однако оба вида рака в принципе считаются излечимыми. Считается, что смертность от рака щитовидной железы особенно низка, менее 10 %. По данным врачей, в Белоруссии наблюдается аномально высокий уровень злокачественности рака щитовидной железы (более 50 %), тогда как в Японии этот показатель составил 18 %. Доля больных раком щитовидной железы детей в Белоруссии составляет более 100 случаев на 1 млн в год. В среднем в мире этот показатель составляет от 0,5 до 3 случаев.

Рак легких относится к практически неизлечимым видам и принадлежит к распространенным разновидностям рака среди облученных людей. Согласно оценкам в группе лиц из 1000 человек, возраст которых превышает 35 лет, 5 человек умрут от рака легких при облучении дозой 1 Гр (вероятность 0,005), тогда как в группе, состоящей из всех возрастов, — лишь половина этого числа (вероятность 0,0025).

Раковые заболевания других органов и тканей встречаются реже. Согласно оценкам НКДАР, вероятность возникновения рака желудка, печени, кишечника не превышает 1 из 1000 (0,001), а риск возникновения рака костной ткани, пищевода составляет 2 – 5 случаев на 10000 облученных дозой 1 Гр (0,0002 – 0,0005).

Необходимо отметить, что различные факторы, дополняя друг друга, вызывают более значительный эффект, причем он не равен просто сумме эффектов. Разного рода канцерогены, действуя одновременно, могут во много раз усиливать вероятность заболевания (рис. 8), поэтому для людей, подвергшихся облучению, особенно важным является фактор нормального здорового образа жизни и питания.

Изучение генетических последствий связано с определенными трудностями:

- достаточно мало известно о том, какие повреждения возникают в генетическом аппарате человека при облучении;
- полное выявление всех наследственных эффектов происходит лишь на протяжении многих поколений;
- эти эффекты невозможно отличить от тех, которые возникают совсем по другим причинам (экология, вирусы и т.д.).

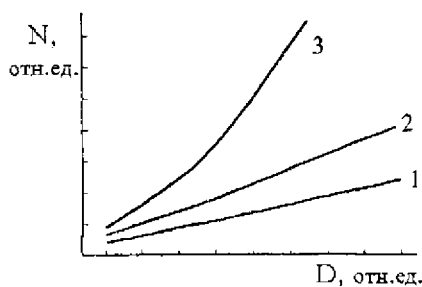


Рис. 8. Смертность N от рака органов дыхания как функция дозы для рабочих урановых рудников: 1 — некурящие; 2 — "умеренно" курящие (менее 20 сигарет в день); 3 — "заядлые" курильщики (более 20 сигарет в день)

Ситуация усугубляется тем, что около 10 % всех живых новорожденных имеют наследственные дефекты, начиная с необременительного дальтонизма и заканчивая такими тяжелыми состояниями, как синдром

Дауна, хорея Геттингтона, другие пороки развития. Согласно данным НКДАР, вероятность появления генетических отклонений оценивается не более чем 4 случая на 100000 облученных дозой 1 Гр (0,0004).

4.10. Действие инкорпорированных радионуклидов

Радионуклиды, попавшие в организм, называются инкорпорированными. В отличие от внешнего облучения, опасность радионуклидов, попавших внутрь, обусловлена рядом причин:

1. Некоторые радионуклиды обладают способностью избирательно накапливаться в отдельных органах и тканях, называемых критическими (до 30 % йода накапливается в щитовидной железе, которая составляет только 0,03 % массы тела). Локальные поглощенные дозы в этом органе могут оказаться большими.

2. Для оценки суммарного содержания радионуклида в организме служит отношение максимально накопленного количества данного элемента в организме или органе к величине ежедневного поступления. Это отношение называют кратностью накопления. Кратность накопления зависит от скорости всасывания изотопа, скорости его выведения из организма, периода полураспада (табл. 23).

Таблица 23

Кратность накопления радионуклида
в критических органах в расчете на 1 кг массы

Орган или ткань	Элемент	Кратность накопления
Щитовидная железа	^{131}I	164
Скелет	^{90}Sr	91
	^{226}Ra	46
	$^{134,137}Cs$	2,6
Мышцы	^{40}K	1,4

Для инкорпорированных радионуклидов характерно значительное время облучения до момента выведения нуклида из органа или уменьшения активности вследствие радиоактивного распада нуклида. Продолжительность облучения зависит от периода полураспада $T_{1/2}$ и периода его полувыведения из организма T_e , представляющего время, в течение которого количество радиоактивных изотопов в организме уменьшается вдвое. С учетом этого вводится эффективный период $T_{эфф}$, представляющий время, в течение которого активность изотопа уменьшается вдвое.

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

С увеличением $T_{эфф}$ возрастает, как правило, радиотоксичность изотопа. Это происходит вследствие того, что растет суммарная доза излучения. При инкорпорировании радионуклидов с периодом полураспада более 10 лет на первый план выступает их химическая токсичность; для радионуклидов с периодом полураспада, равным примерно 10 годам, проявляются в равной степени и радиационная, и химическая токсичность, а для радионуклидов с периодом полураспада менее года – преимущественно радиационная. При низкой концентрации вклад химической токсичности будет минимальным или вообще не проявится. Однако исследований о химической токсичности стабильных ядер, образующихся в результате распада радионуклидов, практически нет. Например, высоко биологически активный цезий превращается после распада в барий, который образует химически токсичные соли (за исключением сульфата бария).

Из-за радиоактивного распада и обмена происходит либо уменьшение концентрации радионуклидов в организме при однократном поступлении, либо накопление при хроническом поступлении. Поэтому при расчете поглощенной дозы, созданной инкорпорированными радионуклидами, следует учитывать параметр $T_{эфф}$ (табл. 24 -- 26).

Таблица 24

Коэффициенты всасывания и периоды полувыведения радиоактивных изотопов

Элемент	Изотоп	Коэффициент всасывания		T _e , сут	T _{1/2} , лет
		ЖКТ	легкие		
Тритий	³ ₁ H	1,0	1,0	12	12,3
Углерод	¹⁴ C	1,0	0,75	10	6730
Калий	⁴⁰ K	1,0	0,75	58	1,29·10 ⁹
Стронций	⁹⁰ Sr	0,3	0,45	18000	29,1
Йод	¹³¹ I	1,0	0,75	120	8,04 сут
Цезий	¹³⁷ Cs	1,0	0,75	70	30
Плутоний	²³⁹ Pu	0,0005	0,25	65000	2,4·10 ⁴

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт.

Таблица 25

Биологические T_b и эффективные $T_{эфф}$ периоды полувыведения радионуклидов цезия из некоторых органов и эффективная энергия $E_{эфф}$, передаваемая этим органом при облучении (определяет коэффициент качества)

Орган или ткань	T_b , сут	$T_{эфф}$, сут		$E_{эфф}$, МэВ/расп.	
		^{134}Cs	^{137}Cs	^{134}Cs	^{137}Cs
Все тело	70	64	70	1,1	0,59
Мышечная ткань	140	118	138	1,1	0,59
Легкие	140	118	138	0,57	0,41
Почки	42	40	42	0,46	0,36
Селезенка	98	87	97	0,46	0,37
Печень	90	80	89	0,57	0,41
Кости	140	118	138	0,99	1,4

Таблица 26

Биологические T_b и эффективные $T_{эфф}$ периоды полувыведения радионуклидов стронция из некоторых органов и эффективная энергия $E_{эфф}$, передаваемая этим органом при облучении

Орган или ткань	T_b , сут	$T_{эфф}$, сут		$E_{эфф}$, МэВ/расп	
		$^{89}\text{Sr}, ^{90}\text{Sr}$	^{89}Sr	^{90}Sr	^{89}Sr
Все тело	$1,3 \cdot 10^4$	50,3	5700	0,55	0,21
Кости	$1,8 \cdot 10^4$	50,4	6400	2,8	1,1

Накопление радионуклидов в организме или отдельном органе при их длительном поступлении описывается формулой

$$A = 1,45FT_{эфф} \left[1 - \exp\left(-0,693 \frac{t}{T_{эфф}}\right) \right],$$

где A – активность радионуклидов в рассматриваемом органе, $Bк$; F – скорость поступления радионуклидов в организм (орган), $Bк/сут$; t – время накопления, сут; $T_{эфф}$ – эффективный период полувыведения радионуклидов, сут.

При хроническом поступлении радиоактивного цезия его общее содержание в организме увеличивается, но довольно скоро, как следует из формулы, примерно через год, наступает равновесие, поскольку $[1 - \exp(-0,693t/T_{эфф})] \approx 1$. Это означает, что ежедневное поступление цезия уравнивается его биологическим выведением и распадом. При хроническом поступлении радионуклидов стронция-90 происходит их постепенное накопление преимущественно в костной ткани. Эффективный период их полувыведения при этом значительно увеличивается. Стронций-90 относится к тем радио-

нуклидам, которые не достигают равновесия в организме человека даже в течение 50 лет. Это означает, что его ежесуточное поступление приводит к постепенному накоплению.

Эквивалентную дозу внутреннего облучения организма (органа) взрослого условного человека можно оценить по формуле

$$H = AE_{эфф} \frac{t}{m},$$

где A – равновесная активность радионуклидов в облучаемом организме (органе), $Bк$; $E_{эфф}$ – эффективная энергия радионуклидов, передаваемая органу при распаде каждого ядра с учетом биологической опасности излучения (см. табл. 25, 26); t – время облучения, с; m – масса облучаемого организма (органа), кг.

Для инкорпорированных радионуклидов характерна высокая поражающая способность α - и β -излучением, которые несущественны при внешнем облучении вследствие низкой проникающей способности.

Существуют три пути поступления радионуклидов в организм: через легкие (ингаляционный); с пищей и водой в желудочно-кишечный тракт (пероральный); через кожу.

Наиболее опасен путь поступления радионуклидов в организм с пищей и водой. При всасывании из желудочно-кишечного тракта радиоактивных продуктов имеет значение коэффициент всасывания (резорбции), характеризующий долю вещества, поступающего из желудочно-кишечного тракта в кровь. В зависимости от природы и химических особенностей радиоизотопа процент всасывания из желудочно-кишечного тракта колеблется от сотых долей (цирконий, редкоземельные элементы) до нескольких процентов (рутений, полоний), десятков процентов (стронций, радий) и стопроцентного всасывания (тритий, калий, йод, цезий).

Из-за большого объема легочной вентиляции (в день человек вдыхает примерно 20 м^3 воздуха) высока опасность ингаляционного попадания радионуклидов. Радиоактивность воздуха обычно обусловлена содержанием в нем радиоактивных аэрозолей, существующих в виде пыли, тумана, дыма. Доля радионуклидов, которая задерживается в дыхательной системе, зависит от размера пылинок, частоты дыхания. В общем случае, согласно рекомендациям МКРЗ, для расчетов принимается диаметр аэрозолей 1 мкм и следующее распределение вдыхаемого вещества: выдыхается 35 %, осаждается в верхних дыхательных путях 30 %, осаждается в альвеолах легких 25 %, около 8 % откладывается в трахее. Дальнейшая судьба

осевшего радионуклида связана с его физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Хорошо растворимые вещества в течение нескольких десятков минут проникают в кровь. Слаборастворимые удаляются из верхних дыхательных путей, поступая, как правило, в желудочно-кишечный тракт.

Усвоение радионуклидов через неповрежденную кожу в 200 – 300 раз меньше, чем через желудочно-кишечный тракт. Только оксид трития, нитрат уранила и изотопы йода легко проникают через кожу и поступают в кровь.

По характеру распределения нуклидов в организме выделяют несколько групп. Различают изотопы остеотропные, накапливающиеся в костях (кальций, стронций, торий, радий, итрий, цирконий); накапливающиеся в печени (полоний, церий); концентрирующиеся в мышцах (калий, рубидий, цезий); в селезенке и лимфатических узлах (рутений, ниобий); в щитовидной железе (йод); равномерно распределяющиеся в организме (тритий, углерод, инертные газы) (табл. 27).

Таблица 27

Период полураспада $T_{1/2}$. Период биологического выведения T_b и эффективная энергия $E_{эф}$ некоторых радионуклидов при воздействии их излучения на критический орган

Радионуклид	Критический орган и его масса	$T_{1/2}$, сут	T_b , сут	$E_{эф}$, 10^{-13} Дж/расп.
^{40}K	все тело, 70 кг мышечная ткань, 28 кг	$4,67 \cdot 10^{11}$	58	0,96
^{60}Co	все тело печень, 1,8 кг	$1,9 \cdot 10^3$	9,5	2,4 1,15
^{90}Sr	костная ткань, 7 кг все тело	$1 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^4$	1,76 0,34
^{90}Y	костная ткань все тело	2,67	$1,8 \cdot 10^4$	7,04 1,42
^{131}I	все тело щитовидная железа, 20 г	8,04	138	0,66 1,28
^{137}Cs	все тело мышечная ткань: взрослый чел. подросток новорожденный	$1,1 \cdot 10^4$	70 70 45 10	0,94
^{198}Au	все тело	2,7	120	0,93
^{239}Pu	все тело костная ткань	$8,9 \cdot 10^8$	$6,5 \cdot 10^4$ $7,3 \cdot 10^4$	84,8 43,2
^{238}U	все тело кости	$1,6 \cdot 10^{12}$	3300 300	68,8 352

5. ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

5.1. Понятие приемлемого риска

В принципе невозможно доказать абсолютную безопасность какой-либо деятельности. В каждой деятельности есть своя доля риска, и его величину можно оценить только в сравнении. Различают профессиональные риски и риски, связанные со средой обитания человека. **Профессиональный риск** является добровольным и регламентируется международным правом (табл. 28).

Таблица 28

Профессиональный риск различных видов деятельности

Вид деятельности	Число смертельных случаев на 10000 работающих в год	Риск летального случая
легкая промышленность	0,15	$1,5 \cdot 10^{-5}$
автомобилестроение	1,3	$1,3 \cdot 10^{-4}$
ядерная энергетика	2	$2 \cdot 10^{-4}$
химическая промышленность	4	$4 \cdot 10^{-4}$
судостроение	8	$8 \cdot 10^{-4}$
сельское хозяйство	10	10^{-3}
угольная промышленность	14	$1,4 \cdot 10^{-3}$
рыболовство	36	$3,6 \cdot 10^{-3}$

Для современного общества характерен широкий диапазон индивидуальных показателей смертельного риска, обусловленные огромным числом факторов (табл. 29).

Таблица 29

Значение вероятности смерти, связанной со средой обитания

Фактор риска	Степень риска (за год)
общее число	10^{-2}
сердечно-сосудистые заболевания	$5 \cdot 10^{-3}$
онкологические заболевания	$1,6 \cdot 10^{-3}$
выкуривание 20 сигарет в день	$5 \cdot 10^{-3}$
транспортные происшествия	$1,7 \cdot 10^{-4}$
несчастные случаи: в быту	10^{-4}
на производстве	$5 \cdot 10^{-5}$
утопление	$3 \cdot 10^{-5}$
отравление	10^{-5}
каждые 20 мин возраста после 60 лет	10^{-9}
стихийные бедствия	$10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$

Анализируя данные таблиц, можно сделать вывод о том, что существует группа факторов, степень риска которых не зависит от деятельности человека. Поэтому согласно концепции приемлемого риска в качестве допустимого значения индивидуального риска рекомендуется принимать величину, не превышающую степень риска от стихийных бедствий, что составляет 10^{-6} (1 случай на 1000 000 человек в год). На основе этой концепции формируются общие принципы нормирования ионизирующих излучений, направленные на снижение степени риска до приемлемой величины.

5.2. Международные и республиканские организации, имеющие отношение к нормированию радиационного облучения

1. Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ). Действует с 1928 года и является международным органом, который разрабатывает правила работы с радиоактивными веществами, основы радиационной безопасности, принципы и подходы к нормированию облучения.

2. Национальная комиссия по радиационной защите (НКРЗ). Образована в Республике Беларусь в 1991 году. Ее задачей является обобщение материалов по научному обоснованию принципов, а также разработка основных концепций новых норм и правил радиационной безопасности.

3. Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР). Создан Генеральной Ассамблеей ООН в 1955 году для оценки в мировом масштабе доз облучения, их эффектов и связанного с облучением риска. Он является только источником знаний, на основе которых МКРЗ и НКРЗ разрабатывают соответствующие нормы и рекомендации.

4. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Эта специализированная организация создана при ООН в 1957 году для развития международного сотрудничества в области мирного использования атомной энергии. Объединяет более 100 государств.

5. Международная организация охраны здоровья. После открытия радиоактивности в 1896 году многочисленные факты позволили установить отрицательное влияние радиации на здоровье человека. Поэтому созданная в 1928 г. МКРЗ в 1934 г. выдала первые рекомендации по ограничению уровней радиации при облучении. Введено понятие толерантной (переносимой) дозы при мощности экспозиционной дозы $\dot{X} = 0,2 \text{ P/сут}$. В 1936 г. эта величина снижена до $0,1 \text{ P/сут}$. По мере накопления данных об отдаленных последствиях воздействия ионизирующих излучений введено понятие "предельно допустимая доза" (ПДД). В 1951 г. было установлено ее значение – $0,05 \text{ P/сут}$, а в 1958 – 5 бэр/сут . В 1990 г. МКРЗ

приняла новые рекомендации по обеспечению радиационной безопасности. На основании этих рекомендаций МКРЗ Совет управляющих МАГАТЭ в 1994 г. утвердил "Основные правила работы с источниками ионизирующих излучений".

Юридическими документами, регламентирующими воздействие ионизирующих излучений в республике, являются Закон Республики Беларусь "О радиационной безопасности населения", введенный в действие 5.01.1998 г., "Нормы радиационной безопасности" (НРБ-2000), утвержденные 5.01.2000 г., и "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности" (ОСП-2002), утвержденные 22.02.2002 г. Нарушение НРБ влечет за собой административную, а в случае грубых нарушений – уголовную ответственность. Никакие инструкции, издаваемые ведомствами и учреждениями, не должны противоречить положениям НРБ и ОСП.

5.3. Принципы радиационной безопасности

Нормирование радиационного облучения основано на беспороговой концепции действия радиации. Основой современных концепций нормирования радиационного фактора является принцип ограничения дозы внешнего и внутреннего облучения персонала, а также населения при использовании, захоронении и транспортировке радиоактивных веществ, эксплуатации ядерных реакторов, ускорителей частиц, рентгеновских установок и других источников ионизирующих излучений. Поэтому **основным принципом**, положенным МКРЗ в разработку безопасных условий труда и проживания, является *снижение дозы облучения до такого низкого уровня, насколько это разумно и достижимо с учетом экономических и социальных факторов*.

Основные положения, предложенные МКРЗ для регламентации дозовых нагрузок:

- любое ионизирующее излучение не должно быть использовано на практике, если оно не приносит реальной "чистой" прибыли;
- при использовании радиации следует добиваться, чтобы дозы были настолько малыми, насколько это допустимо с учетом различных факторов;
- эквивалентная доза для каждого конкретного лица не должна превышать предел, рекомендованный МКРЗ для данных условий.

При этом, однако, считается, что радиационная защита "должна обеспечивать защиту от ионизирующего излучения отдельных лиц, их по-

томства и человечества в целом и в то же время создать соответствующие условия для необходимой практической деятельности человека, во время которой люди могут подвергаться воздействию ионизирующих излучений.

Различают два вида условий облучения:

- облучение предвидимо и может быть ограничено контролем за источником и применением системы ограничения доз;
- источник не находится под контролем (при авариях на АЭС и т.п.), тогда облучение может быть ограничено различными формами деятельности.

В связи с этим различают два вида ситуации:

- нормальная (контролируемая) деятельность, когда источник находится под контролем (МКРЗ называет ее практической деятельностью);
- незапланированные ситуации, когда источник выходит из-под контроля в результате ядерной или радиационной аварии и когда единственной защитой является какое-либо вмешательство с целью снижения доз облучения (МКРЗ называет этот период деятельности вмешательством).

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине.

Нормы радиационной безопасности относятся только к ионизирующему излучению. В нормах учтено, что ионизирующее излучение является одним из множества источников риска для здоровья человека и что риски, связанные с воздействием излучения, не должны соотноситься только с выгодами от его использования, но их следует сопоставлять и с рисками нерadiационного происхождения.

Основные принципы обеспечения радиационной безопасности при практической деятельности (в условиях нормальной эксплуатации источников излучения):

- принцип нормирования – непревышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников ионизирующего излучения;
- принцип обоснования – запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при ко-

торых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного превышающим естественный радиационный фон облучением;

- принцип оптимизации – поддержание на достижимо низком уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения. Для обоснования расходов на радиационную защиту при реализации принципа оптимизации принимается, что при коллективной эффективной дозе облучения в 1 чел.-Зв приводит к потенциальному ущербу, равному потере 1 чел.-год жизни населения. Величина денежного эквивалента потери 1 чел.-год жизни населения устанавливается специальными документами.

5.4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000)

Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000) применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения. Нормы являются основополагающим документом, регламентирующим требования Закона Республики Беларусь "О радиационной безопасности населения" в форме основных пределов доз, допустимых уровней воздействия ионизирующего излучения и других требований по ограничению облучения человека. Никакие другие нормативные и методические документы не должны противоречить требованиям норм.

НРБ-2000 распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека:

- в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;
- в результате радиационной аварии;
- от природных источников излучения;
- при медицинском облучении.

Требования по обеспечению радиационной безопасности сформулированы для каждого вида облучения. Суммарная доза от всех видов облучения используется для оценки радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, а также для обоснования защитных мероприятий и оценки их эффективности.

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

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

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

Устанавливаются следующие категории облучаемых лиц:

- персонал;
- все население, включая лиц из персонала, вне сферы и условий их производственной деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД);
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионуклида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА), среднегодовые удельные активности (ДУА) и др.;
- контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.). Их значения должны учитывать достигнутый в организации уровень радиационной безопасности и обеспечивать условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

Основные пределы доз не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий. На эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) 1000 мЗв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв.

Для женщин в возрасте до 45 лет, работающих с источниками излучения, вводятся дополнительные ограничения: эквивалентная доза на поверхности нижней части области живота не должна превышать 1 мЗв в ме-

сяц, а поступление радионуклидов в организм за год не должно быть более $1/20$ предела годового поступления для персонала. В этих условиях эквивалентная доза облучения плода за 2 месяца невыявленной беременности не превысит 1 мЗв . Администрация предприятия должна перевести беременную женщину на работу, не связанную с источниками ионизирующего излучения, со дня ее информации о факте беременности и на период беременности и грудного вскармливания ребенка.

Для студентов и учащихся старше 16 лет, проходящих профессиональное обучение с использованием источников излучения, годовые дозы не должны превышать $1/4$ значений, установленных для персонала.

Лица, подвергшиеся облучению в эффективной дозе, превышающей 100 мЗв в течение года, при дальнейшей работе не должны подвергаться облучению в дозе свыше 20 мЗв за год.

Облучение эффективной дозой свыше 200 мЗв в год должно рассматриваться как потенциально опасное. Лица, подвергшиеся такому облучению, должны немедленно выводиться из зоны облучения и направляться на медицинское обследование. Последующая работа с источниками излучения может быть разрешена этим лицам только в индивидуальном порядке с учетом их согласия по решению компетентной медицинской комиссии.

Лица, не относящиеся к персоналу, привлекаемые для проведения аварийных и спасательных работ, должны быть оформлены и допущены к работам как персонал.

Предельно допустимая доза (ПДД) – такое наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за календарный год, при котором равномерное облучение в течение 50 лет не может вызвать в состоянии здоровья человека неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Предел дозы (ПД) – наибольшее среднее значение индивидуальной дозы за год, при котором при равномерном облучении в течение 70 лет в состоянии здоровья не будет наблюдаться неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами.

Сущность отличия между ПДД и ПД заключается в том, что ПДД нельзя превысить ни для одной части критического органа, ни для одного из профессиональных работников, за исключением особых случаев. В то же время некоторое превышение ПД для отдельных индивидуумов категории Б вследствие естественных отличий в условиях жизни считается допустимым и не создает какой-либо дополнительной опасности для общества в целом и для отдельных людей.

При попадании радионуклидов внутрь организма довольно трудно определить поглощенную дозу. Поэтому в целях текущего контроля предусматривают такие характеристики, как **предел годового поступления** радиоактивных веществ и **допустимое содержание радионуклидов** в критическом органе.

Предел годового поступления (ПГП) – такое поступление радионуклидов в организм в течение календарного года, которое за 70 последующих лет создает в критическом органе максимальную эквивалентную дозу, равную пределу дозы.

Под **максимальной эквивалентной дозой (МЭД)** понимают наибольшее значение суммарной эквивалентной дозы в критическом органе от всех источников внешнего и внутреннего облучения.

Допустимое содержание (ДС) – такое содержание радионуклида в организме (критическом органе), при котором максимальная эквивалентная доза за календарный год равна пределу дозы.

На основании предела годового поступления радионуклидов рассчитывают **допустимую концентрацию радионуклида** в атмосферном воздухе и воде (табл. 30)

$$ДК_B^1 = \frac{ПГП}{V_B}, \quad ДК_B^2 = \frac{ПГП}{M_B},$$

где V_B – объем воздуха, с которым радионуклид поступает в организм человека, стандартное значение $V_B = 7,3 \cdot 10^6$ л/год; M_B – масса воды (радиона), с которой радионуклиды поступают в организм в течение календарного года, стандартное значение $M_B = 800$ кг/год.

Таблица 30

Допустимые уровни для некоторых радионуклидов

Радионуклид	Критический орган	ПГП _B мкКи/год		ДК _B Ки/л	
		дыхания	ЖКТ	в воздухе	в воде
³ H, T _{1/2} =12,35 г	все тело	2,0·10 ³	3,0·10 ³	3,0·10 ⁻¹⁰	4,0·10 ⁻⁶
¹⁴ C, T _{1/2} =5730 лет	жировая ткань	8,7·10 ²	6,6·10 ²	1,2·10 ⁻¹⁰	8,2·10 ⁻²
⁹⁰ Sr, T _{1/2} =29,12 г	костная ткань	0,29	0,32	4,0·10 ⁻¹⁴	4,0·10 ⁻¹⁰
¹³¹ I, T _{1/2} =8,04 с	щитовидная железа	10	0,8	1,5·10 ⁻¹³	1,0·10 ⁻⁹
¹³⁷ Cs, T _{1/2} =30 лет	все тело	16	12	4,9·10 ⁻¹³	1,5·10 ⁻⁸
²³⁸ Pu, T _{1/2} =87,74 г	костная ткань	2,4·10 ⁻⁴	20	3,3·10 ⁻¹⁷	2,5·10 ⁻⁹

Примечание. ЖКТ – желудочно-кишечный тракт

В НРБ-2000 предполагается проведение различных мероприятий по ограничению последствий облучения источниками различного происхождения, включая природное, медицинское облучение и др.

– *Ограничение природного облучения:*

- допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. Снижение облучения населения достигается путем установления системы ограничений на облучение населения отдельными природными источниками излучения;
- при проектировании новых зданий жилищного и общественного назначения должно быть предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе помещений не превышала 100 Бк/м^3 , а мощность эффективной дозы гамма-излучения не превышала мощность дозы на открытой местности более чем на $0,2 \text{ мкЗв/ч}$;
- в эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность дочерних продуктов радона и торона в воздухе жилых помещений не должна превышать 200 Бк/м^3 . При более высоких значениях объемной активности должны проводиться защитные мероприятия, направленные на снижение поступления радона в воздух помещений и улучшение вентиляции помещений. Защитные мероприятия должны также проводиться, если мощность эффективной дозы гамма-излучения в помещениях превышает мощность дозы на открытой местности более чем на $0,2 \text{ мкЗв/ч}$;
- эффективная удельная активность ($A_{эф}$) природных радионуклидов в строительных материалах (щебень, гравий, песок, бутовый и пыльный камень, цементное и кирпичное сырье и пр.), добываемых на их месторождениях или являющихся побочным продуктом промышленности, а также отходы промышленного производства, используемые для изготовления строительных материалов (золы, шлака и пр.), не должна превышать:
 - для материалов, используемых в строящихся и реконструируемых жилых и общественных зданиях (I класс)

$$A_{эф} = A(^{226}\text{Ra}) + 1,3A(^{232}\text{Th}) + 0,09A(^{40}\text{K}) < 370 \text{ Бк/кг}$$

где A – удельные активности радия, тория и калия соответственно (для радия и тория при условии равновесия с остальными членами уранового и ториевого рядов), $Bк/кг$;

- для материалов, используемых в дорожном строительстве в пределах территории населенных пунктов и зон перспективной застройки, а также при возведении производственных сооружений (II класс)

$$A_{эф} < 740 Bк / кг ;$$

- для материалов, используемых в дорожном строительстве вне населенных пунктов (III класс)

$$A_{эф} < 1350 Bк / кг ;$$

- при $1350 Bк / кг < A_{эф} < 4000 Bк / кг$ (IV класс) вопрос об использовании материалов решается в каждом случае отдельно по согласованию с республиканским органом санитарно-эпидемиологической службы Министерства здравоохранения Республики Беларусь;

- при $A_{эф} > 4000 Bк / кг$ материалы не должны использоваться в строительстве.

В зависимости от допустимой активности изотопа, при которой еще не требуется получать на работу разрешения санитарно-эпидемиологической службы, все радиоактивные вещества подразделяются на несколько групп:

- группа А – элементы, обладающие особо высокой радиотоксичностью. Допустимая активность их на рабочем месте не должна превышать $3,7 \cdot 10^3 Bк$ ($^{210}Po, ^{226}Ra, ^{239}Pu$);

- группа Б – элементы с высокой радиотоксичностью. Допустимая активность на рабочем месте должна быть $3,7 \cdot 10^4 Bк$ ($^{90}Sr, ^{131}I, ^{235}U$);

- группа В – элементы со средней радиотоксичностью. Допустимая активность на рабочем месте должна быть $3,7 \cdot 10^5 Bк$ ($^{137}Cs, ^{32}P, ^{89}Sr$);

- группа Г – элементы с малой радиотоксичностью. Допустимая активность на рабочем месте $3,7 \cdot 10^6 Bк$ ($^3H, ^{14}C, ^{55}Fe$).

Чем больше активность препарата или источника на рабочем месте, тем жестче гигиенические требования. К таким требованиям относятся: защита количеством (уменьшение мощности источников до минимальной величины); защита расстоянием (увеличение расстояния до источников ионизирующих излучений); защита временем (сокращение времени работы с радиоактивными веществами); защита экранами (применение погло-

щающих материалов); устройство специальных систем вентиляции; использование средств индивидуальной защиты.

При содержании природных и искусственных радионуклидов в питьевой воде, создающих эффективную дозу меньше 0,1 мЗв за год, не требуется проведения мероприятий по снижению ее радиоактивности. Предварительная оценка допустимости использования воды для питьевых целей может быть дана по удельным суммарным α - и β -активностям, которые не должны превышать 0,1 Бк/кг и 1,0 Бк/кг соответственно. При возможном присутствии в воде ^{131}I , ^3H , ^{14}C , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{232}Th определение удельной активности этих радионуклидов является обязательным. Уровень вмешательства для содержания ^{222}Rn в питьевой воде составляет 60 Бк/кг. Критическим путем облучения людей за счет радона, содержащегося в питьевой воде, является переход радона в воздух помещения и последующее ингаляционное поступление дочерних продуктов радона. Для минеральных и лечебных вод устанавливаются специальные нормативы.

– *Ограничение медицинского облучения:*

- принципы контроля и ограничения радиационных воздействий в медицине основаны на получении необходимой и полезной диагностической информации или терапевтического эффекта при минимально возможных уровнях облучения. При этом не устанавливаются пределы доз, но используются принципы обоснования назначения радиологических медицинских процедур и оптимизации мер защиты пациентов;
- с целью снижения уровней облучения пациентов Министерством здравоохранения устанавливаются контрольные уровни медицинского облучения при рентгенологической и радионуклидной диагностике;
- при проведении профилактических медицинских рентгенологических и научных исследований практически здоровых лиц годовая эффективная доза облучения этих лиц не должна превышать 1 мЗв.
- установленный норматив годового профилактического облучения может быть превышен лишь в условиях неблагоприятной эпидемиологической обстановки, требующей проведения дополнительных исследований или вынужденного использования методов с большим дозообразованием. Такое решение о временном вынужденном превышении этого норматива профилактического облучения принимается Министерством здравоохранения Республики Беларусь;

- проведение научных исследований на людях с источниками излучения должно осуществляться по решению Министерства здравоохранения Республики Беларусь. При этом требуется обязательное письменное согласие испытуемого и предоставление ему информации о возможных последствиях облучения;
- лица, не являющиеся работниками рентгенорадиологического отделения, оказывающие помощь в поддержке пациентов (тяжелобольных, детей) при выполнении рентгенорадиологических процедур, не должны подвергаться облучению в дозе, превышающей 5 мЗв в год;
- мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 1 м от пациента, которому с терапевтической целью введены радиофармацевтические препараты, не должна превышать при выходе из радиологического отделения 3 мкЗв/ч;
- при использовании источников излучения в медицинских целях контроль доз облучения пациентов является обязательным.

5.5. Ограничение облучения населения в условиях радиационной аварии. Вмешательство и его уровни

В случае возникновения аварии должны быть приняты практические меры для восстановления контроля над источником излучения и сведения к минимуму доз облучения, количества облученных лиц, радиоактивного загрязнения окружающей среды, экономических и социальных потерь, вызванных радиоактивным загрязнением.

При радиационной аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничение облучения осуществляется защитными мероприятиями, применимыми, как правило, к окружающей среде и (или) к человеку. Эти мероприятия могут приводить к нарушению нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории, т.е. являются **вмешательством**, влекущим за собой не только экономический ущерб, но и неблагоприятное воздействие на здоровье населения, психологическое воздействие на население и неблагоприятное изменение состояния экосистем. Поэтому при принятии решений о характере вмешательства (защитных мероприятий) следует руководствоваться следующими принципами:

- предлагаемое вмешательство должно принести обществу, и прежде всего облучаемым лицам, больше пользы, чем вреда, т.е. уменьшение ущерба в результате снижения дозы должно быть достаточным, чтобы оп-

равдать вред и стоимость вмешательства, включая его социальную стоимость (принцип обоснования вмешательства);

- форма, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от снижения дозы, т.е. польза от снижения радиационного ущерба за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, была бы максимальной (принцип оптимизации вмешательства).

Ситуации вмешательства, к которым следует применять уровни вмешательства, включают в себя облучение двух типов: **острое** (кратковременное) и **хроническое**. Если предполагаемая поглощенная доза облучения за короткий срок (2 суток) достигает уровней, при превышении которых возможны клинически определяемые нестохастические (детерминированные) эффекты (табл. 31), необходимо срочное вмешательство (меры защиты). При хроническом облучении в течение жизни защитные мероприятия становятся обязательными, если годовые поглощенные дозы превышают значения, приведенные в табл. 32. Превышение этих доз приводит к серьезным детерминированным эффектам.

Таблица 31

Прогнозируемые уровни облучения, при которых необходимо срочное вмешательство

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

Таблица 32

Уровни вмешательства при хроническом облучении

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

Уровни вмешательства для временного отселения населения составляют: для начала временного отселения – 30 мЗв в месяц, для окончания временного отселения – 10 мЗв в месяц. Если прогнозируется, что накоп-

ленная за один месяц доза будет находиться выше указанных уровней в течение года, следует решать вопрос об отселении населения на постоянное место жительства.

При аварии, повлекшей за собой радиоактивное загрязнение обширной территории, на основании контроля и прогноза радиационной обстановки устанавливается зона радиационной аварии. В зоне радиационной аварии проводится контроль радиационной обстановки и осуществляются мероприятия по снижению уровней облучения населения на основе изложенных выше принципов.

Принятие решений о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, и уровней загрязнения с уровнями А и Б, приведенными в табл. 33,34.

Таблица 33

Уровни вмешательства и дозовые пределы

Меры защиты	Дозовые пределы, мГр					
	все тело		щитовидная железа		легкие, кожа	
	D_n	D_e	D_n	D_e	D_n	D_e
укрытие	5	50	50	500	50	500
йодная профилактика (взрослые)	—	—	250	2500	—	—
йодная профилактика (дети)	—	—	100*	1000*	—	—
эвакуация	50	500	500	5000	500	5000

Примечание. * — только для щитовидной железы

Таблица 34

Критерии для принятия решения об ограничении потребления загрязненных радионуклидами продуктов питания в первый год после возникновения аварии

Радионуклиды	Уровень активности в пищевых продуктах, кБк/кг	
	уровень А	уровень Б
^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs	1	10
^{90}Sr	0,1	1,0
^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Am	0,01	0,1

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

Если предотвращаемое защитным мероприятием облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки и местных условий. Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, достигает и превосходит уровень Б, необходимо выполнение соответствующих мер защиты, даже если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

На поздней стадии радиационной аварии, повлекшей за собой загрязнение обширных территорий долгоживущими радионуклидами, решения о защитных мероприятиях принимаются с учетом складывающейся радиационной обстановки и конкретных социально-экономических условий. При этом вмешательство обосновывается величиной **годовой эффективной дозы (ГЭД)**, которая может быть получена жителями в отсутствие мер радиационной защиты. Под ГЭД здесь понимается эффективная доза, средняя у жителей населенного пункта за текущий год, обусловленная искусственными радионуклидами, поступившими в окружающую среду в результате радиационной аварии.

Вмешательство осуществляется при использовании одного или нескольких защитных мероприятий:

- организация убежищ и укрытий;
- назначение препаратов стабильного йода (йодная терапия);
- эвакуация;
- отселение;
- защита органов дыхания;
- индивидуальная санитарная обработка;
- контроль доступа в зараженные районы;
- использование средств индивидуальной защиты;
- контроль загрязненности воды и пищевых продуктов и запрет (или ограничение) на отдельные пищевые продукты;
- дезактивация местности и объектов;
- изменение профиля сельскохозяйственного и промышленного производства.

Для каждого защитного мероприятия по соображениям радиационной безопасности определяется нижний предел дозы D_n (уровень А), ниже которого введение защитных мероприятий нецелесообразно, и верхний предел D_v (уровень Б), при котором обязательно следует принимать меры. О пользе каждого защитного действия следует судить по снижению с помощью этого защитного действия прогнозируемой дозы, т.е. по предотвращенной дозе (табл. 35).

Таблица 35
Критерии для принятия решения об отселении и ограничении потребления загрязненных пищевых продуктов

Мера защиты	Предотвращаемая эффективная доза, мЗв	
	уровень А	уровень Б
Ограничение потребления продуктов и воды	5 за первый год 1 ежегодно в последующие годы	50 за первый год 10 ежегодно в последующие годы
	50 за первый год	500 за первый год
Переселение	1000 за все время проживания	

5.6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСП-2002

Данные правила являются документом, регламентирующим требования по защите людей от вредного радиационного воздействия при всех условиях облучения от источников ионизирующего излучения, на которые распространяется действие НРБ-2000.

Радиационная безопасность персонала и населения при эксплуатации техногенных источников излучения включает в себя классификацию радиационных объектов по степени их потенциальной опасности и заключается в следующем:

- размещение радиационных объектов и зонирование территорий;
- проектирование радиационных объектов;
- организация работ с источниками излучения;
- поставка, учет, хранение и перевозка источников излучения;
- вывод из эксплуатации радиационных объектов;
- работа с закрытыми источниками излучения и устройствами, генерирующими ионизирующее излучение;
- работа с открытыми источниками излучения;
- санитарно-технические системы обеспечения работ с открытыми радионуклидными источниками излучения;

- санпропускники и саншлюзы;
- обращение с материалами и изделиями, загрязненными или содержащими радионуклиды;
- обращение с радиоактивными отходами;
- радиационный контроль при работе с техногенными источниками излучения;
- методы и средства индивидуальной защиты и личной гигиены;
- радиационная безопасность пациентов и населения при медицинском облучении.

5.7. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов в продуктах питания

В настоящее время в Республике Беларусь действуют **республиканские допустимые уровни (РДУ)** (утв. 26.04.1999 г.), регламентирующие содержание радионуклидов цезия и стронция в продуктах питания и воде (табл. 35, 36). Как видно, с течением времени с 1986 года временные уровни претерпели значительные изменения, направленные в сторону уменьшения содержания радионуклидов в продуктах питания.

Превышение регламентируемых уровней радионуклидов в продуктах питания дает основания для уполномоченных органов запретить реализацию населению данных продуктов через торговую сеть и сеть общественного питания

Для продуктов питания, потребление которых составляет менее 5 кг/год на человека (специи, чай, мед и др.), устанавливаются допустимые уровни в 10 раз более высокие, чем величины для прочих пищевых продуктов. Для колбасных, мясных изделий и мясных консервов, в рецептуру которых входит конина, мясо диких животных, устанавливаются величины, как для говядины. Для макаронных изделий устанавливаются величины, как для хлеба и хлебобулочных изделий.

Поскольку в РДУ-99 допускается употребление продуктов питания, содержащих определенное количество радионуклидов, то возникает резонный вопрос, каким образом достигается эта концентрация радионуклидов – либо за счет разбавления загрязненных продуктов более "чистыми", либо за счет ограничения использования загрязненных продуктов.

По этой причине кроме допустимых уровней по содержанию радионуклидов в продуктах питания вводятся допустимые уровни содержания радионуклидов в сырье (табл. 36). Как видно из таблицы, допустимые

уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в сырье незначительно превышают допустимые уровни содержания этих радионуклидов в продуктах питания. Поэтому можно полагать, что при надлежащем контроле на перерабатывающих предприятиях и предприятиях пищевой промышленности содержание радионуклидов стронция-90 и цезия-137 в пищевых продуктах сводится к минимуму. Тем не менее, допустимое содержание данных радионуклидов не является абсолютно безопасным для человека (в соответствии с беспороговой концепцией действия радиации), что предполагает существование дополнительных защитных мер, включающих в себя как новые методы переработки продукции, так и оздоровительные мероприятия (табл. 37).

Таблица 36

Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде, Бк/л; Бк/кг

№ п/п	Наименование продукта	ВДУ-86 1986	ВДУ-88 1988	РКУ-90 1990	РКУ-92 1992	РДУ-96 1996	РДУ99 1999
Цезий -137							
1	вода питьевая	370	18,5	18,5	18,5	18,5	10
2	молоко цельное	370	370	185	111	111	100
	молоко стуженное и концентрированное	-	-	-	-	-	200
	творог и творожные изделия	-	-	-	-	111	50
	молоко сухое	18500	1850	740	740	-	-
	сыры	-	-	-	-	111	50
	масло коровье	-	-	-	-	185	100
3	мясо и мясные продукты	3700	1850	592	600	600	
	говядина, баранина	-	-	-	-	600	500
	свинина, птица	-	-	-	-	370	180
4	картофель	3700	740	592	370	100	80
5	хлеб и хлебобулочные изделия	-	370	370	185	74	40
6	мука, крупы, сахар	-	370	370	370	100	60
7	жиры растительные	7400	370	185	185	185	40
	жиры животные и маргарин	-	-	-	-	185	100
8	овощи, корнеплоды	-	11100	3700	3700	100	100
9	садовые фрукты	-	-	-	-	100	40
	садовые ягоды	-	-	-	-	100	70
	консервированные продукты (из овощей, фруктов и ягод)	-	740	185	185	74	74

Окончание табл. 36

1	2	3	4	5	6	7	8
	дикорастущие ягоды и продукты из них	-	-	-	-	185	185
10	грибы сушеные	-	-	-	-	3700	2500
	грибы свежие	-	-	-	-	370	370
11	детское питание	-	1850	37	37	37	37
12	прочие продукты питания	-	-	592	370	370	370
Стронций-90							
1	вода питьевая	-	-	0,37	0,37	0,37	0,37
2	молоко цельное	-	-	3,7	3,7	3,7	3,7
3	хлеб и хлебобулочные изделия	-	-	1,85	3,7	3,7	3,7
4	картофель	-	-	-	3,7	3,7	3,7
5	детское питание	-	-	1,85	1,85	1,85	1,85

Таблица 37

Содержание радионуклидов, при котором допускается
прием продукции на переработку для пищевых целей

Продукция		Содержание, Бк/кг	
		цезий-137	стронций-90
1	молоко	370	18
2	мясо: говядина, баранина	600	не нормируется
	свинина, птица	370	не нормируется
3	растительное сырье	100	не нормируется
4	зерно	160	11
5	зерно на детское питание	55	3,7
6	прочее сырье	370	не нормируется

6. АВАРИЯ НА ЧЕРНОВЫЛЬСКОЙ АЭС И ЛИКВИДАЦИЯ ЕЕ ПОСЛЕДСТВИЙ

6.1. Принцип действия ядерного реактора

Ядерный реактор — это устройство, в котором осуществляется управляемая ядерная цепная реакция деления, сопровождающаяся выделением тепла, которое используется для производства электроэнергии. Практическое использование ядерной энергии возможно благодаря открытию реакции деления ядер тяжелых элементов — урана или плутония — при облучении их нейтронами. Природный уран состоит из двух изотопов — ^{238}U (99,3 %) и ^{235}U (0,7 %). ^{238}U делится только на быстрых нейтронах (нейтронах с большой энергией, возникающих в результате деления), однако реакция идет неэффективно. В большинстве действующих реакторов используется урановое топливо, обогащенное изотопом ^{235}U , который делится на нейтронах очень малой энергии (тепловые нейтроны) (рис. 8). Поэтому нейтроны, освобождающиеся вместе с осколками ядер, необходимо предварительно замедлить, т.е. уменьшить их энергию. Важнейшим условием цепной реакции является размножение нейтронов. Регулируя их число с помощью поглощающих нейтроны веществ — бора, кадмия, индия — можно поддерживать реакцию на выбранном уровне мощности, замедлить или ускорить цепной процесс. Для этого из элементов-поглотителей изготавливаются поглощающие стержни. Чем глубже стержни введены, тем медленнее идет реакция, а при полном их погружении реакция прекращается.

Основную часть ядерного реактора на тепловых нейтронах составляет активная зона (рис. 9), в которой происходит реакция деления. В активной зоне находится ядерное топливо, которое размещено в тепловы-

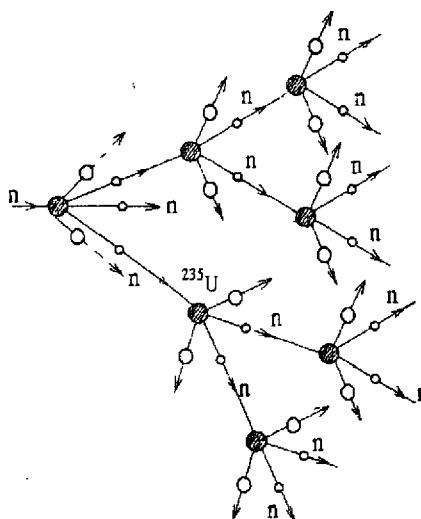


Рис. 8. Цепная реакция деления урана

водящую переборку (1) и замедлитель (2). Некоторая часть нейтронов, возникающих в процессе цепной реакции, может вылетать за пределы активной зоны в окружающее пространство. Поэтому для снижения потерь нейтронов активную зону окружают слоем отражателя (3).

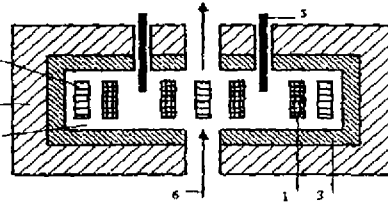


Рис. 9. Схема ядерного реактора

За отражателем располагают биологическую защиту (4), которая предохраняет персонал и окружающее пространство от ионизирующего излучения реактора. Управление цепной реакцией осуществляется с помощью регулирующих стержней (5), которые поглощают нейтроны. Во время работы энергетического ядерного реактора в активной зоне выделяется значительное количество теплоты, которое непрерывно отводится потоком теплоносителя (6) через каналы охлаждения (7), расположенные внутри активной зоны. Вода, превращенная в пар в активной зоне, передает свою энергию турбинам, которые вырабатывают электроэнергию. Если вода служит замедлителем и теплоносителем одновременно, то такие реакторы называют водо-водяными (ВВР). Существуют также реакторы, в которых замедлителем является графит, а теплоносителем – вода (например, РБМК – реактор большой мощности, каналный).

6.2. Критерии оценки аварий на АЭС

Ежегодно в мире происходят десятки аварий, связанных с утерей радиоактивных веществ, беспечностью, незнанием опасности ионизирующих излучений и правил защиты.

Так, в 1987 г. в Гоянии (Бразилия) частная радиотерапевтическая клиника, переехав на новое место, оставила в старом помещении без присмотра стационарную цезиевую пушку. Двое посторонних, не зная, что собой представляет установка, извлекли капсулу с цезием, активностью $5,1 \cdot 10^{13}$ Бк. Их внимание привлекло голубое свечение источника в темноте. Посмотреть на него приходили друзья и знакомые, а некоторые брали часть порошка "на память". В результате четверо жителей получили дозы от 4,6 до 6 Зв и скончались. Еще 249 имели внутренние и внешние загрязнения сильной степени и получили лучевые поражения разной тяжести, а врачам в общей сложности пришлось обследовать 112000 человек.

Авария 4 июля 1961 г. на первой советской атомной подлодке К-19 с баллистическими ракетами на борту привела к разгерметизации первого контура реактора и облучению экипажа. Десять подводников от лучевой болезни скончались.

Первый случай гибели атомной подлодки зарегистрирован в апреле 1970 г. Вследствие пожара лодка К-8 Северного флота затонула у Бермудских островов. В октябре 1986 г. в 500 км от Бермудских островов затонула атомная подлодка К-219 вместе с баллистическими ракетами. 7 апреля 1989 г. в Норвежском море погибла еще одна советская атомная лодка "Комсомолец". Известны также два случая гибели атомных подлодок ВМФ США.

В докладе МАГАТЭ 27 сентября 1957 г. отмечалось, что из-за неполадок в системе охлаждения бетонных емкостей, содержащих высокоактивные отходы, химический взрыв выбросил в атмосферу около 10^{17} Бк радиоактивных продуктов деления (главным образом ^{90}Sr), которые рассеялись и осели в Челябинской, Свердловской и Тюменской областях. Сильно загрязнено свыше 16 тыс. км² территории, где проживало 300000 человек. Десять тысяч наиболее пострадавших жителей этих областей за несколько лет были эвакуированы.

В октябре 1957 г. на другом военном заводе в Великобритании (Уиндскейл, ныне Селлафильд) из-за частичного расплавления активной зоны реактора в окружающую среду было выброшено $7,5 \cdot 10^{14}$ Бк ^{131}I и $2,2 \cdot 10^{13}$ Бк ^{137}Cs . С территории около 500 км² власти эвакуировали население. В настоящее время в Селлафильде на месте закрытого военного завода действует всемирно известный экскурсионный центр.

В 1979 г. произошла авария на АЭС в Три-Майл-Айленде (Пенсильвания, США), где частично расплавилась активная зона. Произошла утечка ксенона в атмосферу. Эта авария заставила пересмотреть принципы надежности и безопасности атомных реакторов. Из-за мощного "зеленого" движения в США электроэнергетическим компаниям пришлось пойти на значительные затраты.

Учитывая участившиеся инциденты на атомных объектах (один из последних – сентябрь 1999 г., Япония, утечка радиоактивных веществ, 2 человека погибли, более 10 получили облучение выше допустимых уровней), МАГАТЭ предложила оценивать тяжесть радиационных аварий по семибалльной шкале. Чернобыльская авария по этой шкале соответствует 7 баллам.

6.3. Причины аварии на Чернобыльской АЭС

Авария на ЧАЭС в 1986 г. по своим масштабам беспрецедентна, а по радиоэкологическим последствиям сравнима лишь с южно-уральской катастрофой 1957 г.

Четвертый блок ЧАЭС был введен в эксплуатацию в декабре 1983 г. В пятницу 25 апреля 1986 года планировалась остановка блока для регламентированных работ. В процессе остановки намечалось провести электротехнический эксперимент, суть которого заключалась в том, что один из турбогенераторов ядерной энергетической установки после прекращения подачи пара на турбину должен был, вращаясь по инерции, производить электроэнергию, предназначенную для обеспечения работы электромеханизмов при обесточивании реактора. При этом для исключения возможности срабатывания защиты предусматривалось отключение системы аварийного охлаждения реактора. По мнению экспертов, отключение этой системы было совершенно необязательно, а выполнение этого означало снижение безопасности реактора на все время проведения эксперимента.

25 апреля в 1 час ночи началось снижение мощности реактора, работавшего до этого при номинальных параметрах. К 13 часам его мощность была снижена, однако по просьбе диспетчера "Киевэнерго" к запланированному опыту приступили только в 23 часа. Несмотря на падение мощности реактора значительно ниже запланированного уровня (200 МВт при запланированных 700 – 1000 МВт), принимается решение начать эксперимент.

Приблизительно в 1 час 22 мин оператор уменьшает подачу воды в активную зону, что приводит к увеличению количества пара и кажущейся стабилизации работы реактора. *В 1 час 23 мин 04 секунды* принято решение отключить подачу пара на турбогенератор. Поток воды вследствие снижения энергопитания насосов уменьшается, охлаждение зоны делается слабее, температура воды растет.

1 час 23 мин 30 секунд. Кипение усиливается. Мощность повышается. Автоматические стержни начали опускаться, но стабилизировать реакцию не успели (скорость опускания стержней 40 см/с, а высота реактора 7 м).

1 час 23 мин 40 секунд. Начальник смены дал команду нажать сигнал "максимальной аварийной защиты", по которому в зону немедленно вводятся все стержни-поглотители нейтронов. Управляющие стержни заклинило на высоте 2 – 3 метра.

1 час 23 мин 44 секунд. Мощность цепной реакции значительно превысила номинальную. За доли секунды разрушились тепловыделяющие элементы. Произошел первый взрыв. Управление реактором становится невозможным. Давление пара разрушило часть каналов. Вода начала поступать не только к теплоэлементам, но и к графиту. Началась бурная химическая реакция. Из-за бурного выделения газов давление возросло и накрывающая активную зону 1000-тонная плита приподнялась.

1 час 23 мин 46 секунд. Образование смеси водорода и окиси углерода с кислородом спровоцировало второй взрыв. Разрушилось перекрытие реакторного зала, около четверти всего графита и часть топлива выброшены наружу. Взрывы вызвали около 30 пожаров, наиболее опасные – над машинным залом и на крыше третьего блока. Пожарные команды прибыли из Припяти и Чернобыля через 90 мин и к 5 часам пожар был потушен. По официальным данным в результате ликвидации аварии погибли 30 человек.

Таким образом, по заключению комиссии, причинами аварии на Чернобыльской АЭС стали конструктивные недостатки реактора, дополненные крайне маловероятным сочетанием нарушений порядка и режима эксплуатации, допущенных персоналом энергоблока. Разработчики реакторной установки не предусмотрели создание защитных систем безопасности, способных предотвратить аварию, в том числе, бетонных колпаков, которые могли бы предотвратить катастрофический выброс радиоактивных веществ в окружающую среду даже при взрыве в активной зоне реактора.

6.4. Особенности радиоактивного загрязнения местности

В результате аварии из поврежденного реактора было выброшено в атмосферу большое количество продуктов ядерного деления, ядерного топлива. Суммарная активность аварийного выброса оценивается в $5 \cdot 10^7$ Ки ($1,85 \cdot 10^{18}$ Бк), что составляет 3,5 – 6 % общей активности продуктов ядерного деления в реакторе. Выбросы радиоактивных веществ продолжались с 26 апреля по 6 мая. В первые сутки в атмосферу устремились радиоактивные газы и легкие аэрозольные частицы. В соответствии с метеорологической обстановкой радиоактивное облако распространялось в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях в зависимости от высоты выброса, направления и скорости ветра на этих высотах. Загрязнение по этой причине оказалось неравномерным (рис. 10). Радиоактивные частицы наблюдались во многих странах Северного полушария и даже в странах Латинской Америки и Южной Азии. Однако наиболее сильному

загрязнению подверглись ряд областей России, Украины и Беларуси. Так, в первые дни после аварии в Минске фоновое значение превышало норму в 9000 раз, в Бресте – в 6000 раз, в Гомеле – в 130000 раз.

Для локализации очага аварии, предотвращения концентрирования расплавленного топлива и недопущения создания тем самым условий для протекания цепной реакции в первые же дни после аварии шахту реактора стали забрасывать с вертолетов нейтронопоглощающими (40 т соединения бора B_4C), теплоотводящими (2400 т свинца) и фильтрующими (1760 т песка и глины), противопожарными (80 т доломита) материалами. К сожалению, свинец, не долетев до активной зоны, испарялся, в результате чего отмечалось существенное увеличение содержания свинца у жителей южных областей Беларуси. В результате принятых мер мощность выброса начала снижаться. Однако после второго мая вынос радиоактивных продуктов из реактора начал опять нарастать. Это было обусловлено разогревом ядерного топлива в результате тепловыделения при радиоактивном распаде самого топлива. Благодаря принятым экстренным мерам 6 мая выброс радиоактивных продуктов резко снизился (реактор охлаждали жидким азотом) и практически завершился к концу мая.

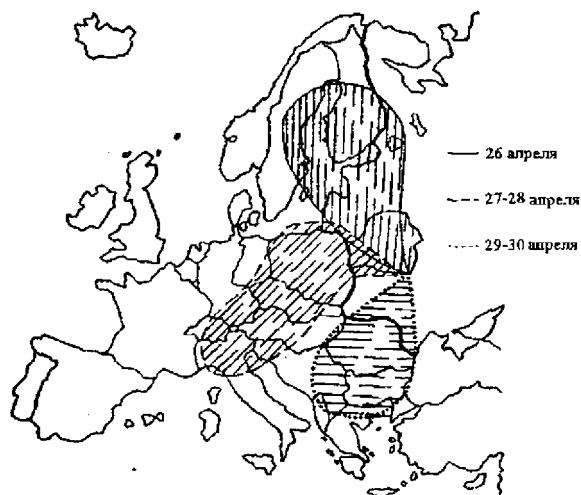


Рис. 10. Направление перемещения радиоактивного облака

Состав радионуклидов в аварийном выбросе примерно соответствует составу, накопленному в активной зоне реактора за три года его работы (по некоторым данным число выброшенных радиоактивных изотопов достигало 400), и отличается от него повышенным содержанием летучих продуктов деления (йод, цезий, инертные газы). Считается, что были выброшены все радиоактивные инертные газы (ксенон, криптон), 20 % йода, 10 % цезия-134, 13 % цезия-137, 4 % стронция-90, стронция-89.

В начальный период после аварии основной вклад в суммарную активность вносили сравнительно короткоживущие изотопы ^{131}I , ^{89}Sr , ^{132}Te , инертные газы (период йодной опасности). В настоящее время опасность представляют долгоживущие изотопы ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{241}Pu (период цезиево-стронциевой опасности). Большая часть ^{90}Sr и "горячих" радиоактивных частиц, входящих в состав ядерного топлива, в основном выпали в 30-километровой зоне. Более летучий цезий был отнесен на большие расстояния, а газообразные (радиоуглерод и другие элементы) распространились повсеместно. Цезий определяет загрязнение 23 % территории Беларуси – 46450 км² (рис. 11), стронций распространился на 2 % территории – 4320 км² (рис. 12), плутоний – на 0,32 % территории – 430 км² (табл. 38 – 39).

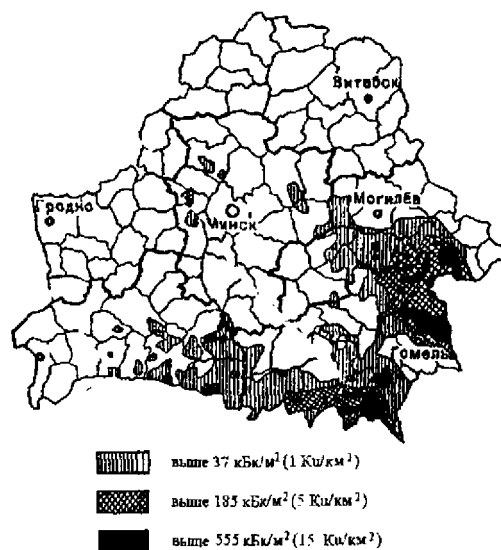


Рис. 11. Загрязнение территории цезием-137

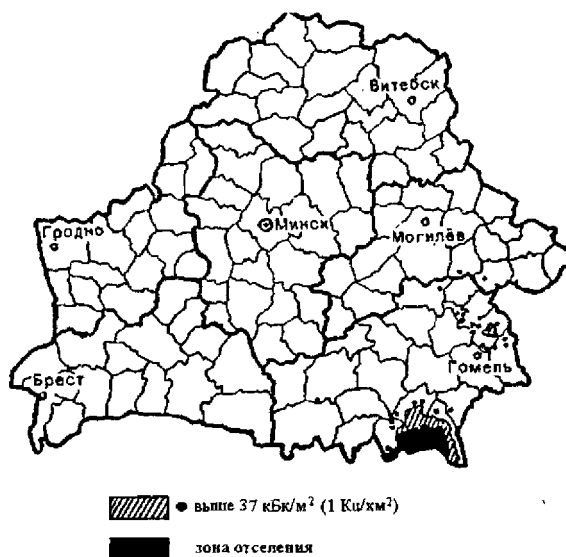


Рис. 12. Загрязнение территории стронцием-90

Таблица 38

Состав радиоактивного выброса четвертого блока ЧАЭС
(по данным МАГАТЭ, 1986 г.)

Нуклид	Активность выброса, МКи 26.04.86	Суммарный выброс, МКи 06.05.86	$T_{1/2}$	Доля активности, выбро- шенной из реактора, %, 06.05.86
^{133}Xe	5	45	5,25 сут	до 100
^{85}Kr	0,15	0,9	10,72 ч	до 100
^{131}I	4,5	7,3	8,01 сут	20
^{132}Te	4	1,3	3,26 сут	15
^{134}Cs	0,15	0,5	2,06 ч	10
^{137}Cs	0,3	1,0	28 лет	13
^{99}Mo	0,45	3,0	2,75 сут	2,3
^{95}Zr	0,45	3,8	64 сут	3,2
^{103}Ru	0,6	3,2	39,3 сут	2,9

Окончание табл. 38

1	2	3	4	5
^{106}Ru	0,2	1,6	368 сут	2,9
^{141}Ce	0,4	2,8	32,5 сут	2,3
^{144}Ce	0,45	2,4	284 сут	2,8
^{89}Sr	0,25	2,2	50,5 сут	4,0
^{90}Sr	0,015	0,22	29,12 г	4,0
^{238}Pu	0,0001	0,0008	87,74 ч	3,0
^{239}Pu	0,0001	0,0007	24390 лет	3,0
^{240}Pu	0,0002	0,001	6537 лет	3,0
^{241}Pu	0,02	0,14	14,4 г	3,0
^{242}Cm	0,003	0,021	2,35 сут	3,0
^{239}Np	2,7	1,2	162,8 сут	3,2

Таблица 39

Масштабы загрязнения территории

Республика, тыс. км ²	Поверхностная активность, Ки/км ²			
	1 – 5	5 – 15	15 – 40	> 40
Россия	39,28	5,45	2,13	0,31
Украина	34,0	1,99	0,82	0,64
Беларусь	29,92	10,17	4,21	2,15
Всего	103,2	17,61	7,16	3,1

6.5. Основные радионуклиды, определяющие радиоактивное загрязнение местности после Чернобыльской аварии

Цезий – щелочной металл серебристо-белого цвета, мягкий, летучий. В воздухе моментально воспламеняется. В природе входит в состав отдельных минералов.

Природный цезий – это стабильный изотоп ^{133}Cs . Искусственным путем получены 23 радиоактивных изотопа этого элемента с массовыми числами 123-132, 134-144. Радиозкологическое значение имеют ^{134}Cs и ^{137}Cs , являющиеся продуктами ядерного деления тяжелых радионуклидов (урана, плутония).

Цезий-134 является β и γ -излучателем. Период полураспада $T_{1/2}=2,06$ года. Распадается с испусканием электронов. Цезий-137 также β и γ -излучатель. Период полураспада $T_{1/2}=30,17$ года. Распадается с испусканием электронов и γ -квантов.

В экологических системах поведение цезия и калия сходно благодаря их химической схожести. Большинство соединений цезия (хлориды, нитраты, карбонаты) хорошо растворимы в воде. Поэтому из загрязненной почвы радионуклиды цезия через корневую систему попадают в растения и накапливаются в его различных частях. Растворимые соединения цезия могут также всасываться и надземной частью растений. Накопление цезия в растениях зависит от вида растения, загрязненности почвы и коэффициентов перехода радионуклидов из почвы в растения. Больше других накапливают цезий мхи, лишайники, грибы, злаковые, бобовые. Наиболее высокие коэффициенты перехода радионуклидов цезия в растения характерны для легких почв – торфяно-болотистых и песчаных.

Черноземы и глиноземы хорошо фиксируют радиоактивный цезий, поэтому его переход в растения на таких почвах происходит гораздо медленнее. Скорость перехода радионуклидов цезия из почвы в растения зависит также от климатических и метеорологических условий.

В организм животных и человека радионуклиды цезия попадают через органы дыхания и через желудочно-кишечный тракт. Ингаляционный путь поступления радионуклидов цезия составляет примерно 0,25 % от поступления с пищей. Всасывание через неповрежденную кожу еще меньше.

Степень всасывания цезия-134 и цезия-137 в желудочно-кишечном тракте животных и человека достигает 100 %. С кровью радионуклиды цезия разносятся по всем органам и тканям тела и накапливаются в них. Максимальное накопление цезия происходит в мышечной ткани, сердце, печени и почках. В коже, крови и жировой ткани его в несколько раз меньше. В процессе обмена веществ радионуклиды цезия выводятся из живых организмов, у человека – преимущественно через почки.

При хроническом поступлении радиоактивного цезия его общее содержание в организме увеличивается, но довольно скоро, примерно через год, наступает равновесие. Это означает, что ежедневное поступление радионуклидов уравнивается их биологическим выведением и распадом.

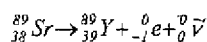
Внутреннее облучение цезием-134 и цезием-137 может стать причиной лейкемии, рака молочной железы, почек, печени, легких, кишечника, подавления лимфоидного кроветворения, угнетения функций костного мозга.

В результате аварии на ЧАЭС в природную среду из поврежденного реактора было выброшено по различным оценкам от 19 до $47 \cdot 10^{12}$ Бк цезия-134 и от 37 до $87 \cdot 10^{12}$ Бк цезия-137. Анализ сложившейся радиэкологической обстановки показал, что наибольший вклад в индивидуальные дозы облучения от компонентов чернобыльского выброса вносят и будут вносить в ближайшие десятилетия радионуклиды цезия. При этом цезий-134 через 10 – 15 лет после аварии не будет иметь практического значения.

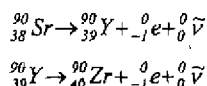
Основными источниками поступления радионуклидов цезия в организм человека являются загрязненные продукты питания растительного и животного происхождения. С целью снижения внутреннего облучения населения после аварии на ЧАЭС введены временно-допустимые уровни содержания цезия-134 и цезия-137 в основных продуктах питания.

Стронций – серо-белый металл, легкий, ковкий, пластичный. Природный стронций представляет собой смесь их четырех стабильных изотопов, основными из которых являются ^{84}Sr (7,02 %), ^{86}Sr (82,56 %). Искусственным путем получены также радиоактивные изотопы с массовыми числами 77-83, 85, 89-99. Радиозкологическое значение имеют изотопы – стронций-89 и стронций-90, являющиеся продуктами ядерного деления тяжелых радионуклидов.

Стронций-89 – практически чистый β -излучатель. Период полураспада $T_{1/2} = 50,55$ сут. Испытывает β -распад, в результате образуется стабильный иттрий-89



Стронций-90 – чистый β -излучатель. Период полураспада $T_{1/2} = 28,6$ года. Испытывает β -распад, в результате образуется радиоактивный иттрий, который в свою очередь распадается с образованием стабильного циркония



Стронций по своим химическим свойствам близок к кальцию. Активно участвует в обмене веществ у растений и животных. Из почвы радионуклиды стронция легко проникают в растение через корневую систему. Возможно и прямое всасывание их растворимых соединений через загрязненные наземные части растений – листья, стебли и т.д. Основная доля (92,8 %) поступившего в растение стронция откладывается в его наземной части. Накопление стронция растениями зависит от его количественного содержания в почве, вида растения, коэффициентов перехода из почвы в растение, минерального состава почвы, климатических и метеорологических условий. Больше других растений накапливают стронций корни и клубнеплоды, злаковые и бобовые растения.

Переход радионуклидов стронция в растения происходит быстрее из торфяно-болотистых и песчаных почв, медленнее – из черноземов и глиноземов. На усвоение растениями стронция существенное влияние оказывает присутствие в почве кальция. При наличии в почве доступного каль-

ция поступление стронция в растение уменьшается. Поэтому известкование почв является эффективным агротехническим способом получения более "чистой" продукции на территориях, загрязненных радионуклидами стронция.

Стронций образует хорошо растворимые (нитраты, хлориды, бромиды), плохо растворимые (нитриты) и нерастворимые (карбонаты) соединения. В желудочно-кишечном тракте в зависимости от растворимости всасывается от 5 до 100 % поступившего в него соединения стронция. Стронций очень быстро всасывается из легких. Радионуклиды стронция лучше усваиваются в детском возрасте. При любом способе поступления в организм человека радиоактивный стронций накапливается преимущественно в костях. В мягких тканях радионуклиды стронция обнаруживаются в значительных количествах только в первое время после поступления в организм. Стронций выводится из организма человека преимущественно через почки и желудочно-кишечный тракт. У кормящих матерей стронций выводится также с молоком. При хроническом поступлении стронция-90 в организм с 1 л молока выводится от 0,05 до 6,3 % его ежесуточного поступления. Стронций, отложившийся в костях, с молоком почти не выводится. Биологическое выведение стронция из различных органов и тканей тела происходит с различной скоростью. Биологический период полувыведения из мягких тканей всего 2,5 – 8,5 суток. Из костей стронций выводится крайне медленно. Уменьшение содержания стронция в организме происходит также вследствие распада. При хроническом поступлении радионуклидов стронция-89 и стронция-90 происходит их постепенное накопление преимущественно в костной ткани. Эффективный период полувыведения при этом сильно увеличивается. Стронций-90 относится к тем радионуклидам, которые не достигают равновесия в организме человека даже в течение 50 лет. Это означает, что его ежесуточное накопление при хроническом поступлении в организм больше, чем выведение.

Стронций-90 обладает большей экологической и биологической опасностью, чем стронций-89, во-первых, из-за того, что период полураспада стронция-89, равный 50,55 сут, гораздо меньше, чем у стронция-90 (28,6 года) и поэтому его содержание в природной среде быстро уменьшается; во-вторых, при распаде стронция-90 образуется радиоактивный иттрий-90, а эффективная энергия $^{90}_{38}\text{Sr} + ^{90}_{39}\text{Y}$ значительно больше, чем у стронция-89.

Стронций-90 обладает высокой радиотоксичностью. При его внутреннем поступлении возникают эффекты острого лучевого поражения.

Специфическое скелетное распределение радионуклидов стронция в живых организмах приводит к более интенсивному, по отношению к другим органам и тканям тела, облучению костей и красного костного мозга, которое может вызвать развитие лейкозов и остеосарком. У облученных потомков отмечаются аномалии развития, снижение жизнеспособности, уменьшение рождаемости и нормального соотношения полов.

В 1986 г. из поврежденного блока ЧАЭС вместе с радиоактивной струей по одним оценкам выделилось $200 \cdot 10^{12}$ Бк стронция-89 и $20 \cdot 10^{12}$ Бк стронция-90, по другим – $81 \cdot 10^{12}$ Бк и $8,1 \cdot 10^{12}$ Бк соответственно. Большая часть этих радионуклидов выпала в густонаселенных районах Беларуси и Украины. Наибольшая плотность загрязнения $3 - 5 \text{ Ки/км}^2$ характерна для районов, сопредельных с 30-километровой зоной аварии. Однако в отдельных районах Гомельской и Могилевской областей, удаленных от поврежденного реактора на 100 – 200 км, плотность загрязнения стронцием-90 достигает 2 Ки/км^2 (см. рис. 11 и 12).

Основными источниками поступления радионуклидов стронция в организм человека являются продукты питания растительного и животного происхождения.

Плутоний (^{239}Pu) – металл серого цвета, α -излучатель. Особенно опасен при попадании в органы дыхания и желудочно-кишечный тракт. Избирательно накапливается в костях, а если попадает в кровь, то 45 % накапливается в печени, откуда половина его выводится только через 20 лет. Однако на практике уже через 2 – 3 месяца возникает цирроз печени. Плутоний подавляет систему кроветворения и иммунную систему. Наибольшая плотность загрязнения характерна для 30-километровой зоны отчуждения.

6.6. Особенности миграции радионуклидов

Под миграцией понимают совокупность процессов, приводящих к перемещению, перераспределению радионуклидов между любыми элементами экосистемы, которая включает в себя живые объекты и неживую природу.

Общая схема миграций зависит от конкретных условий. При постоянном выбросе радиоактивности в атмосферу наибольшую опасность представляет аэрогенный путь миграции радионуклидов. Спустя некоторое время после аварии в результате миграции по пищевым цепочкам основной путь поступления радионуклидов в организм человека – с пищей и водой.

При аварии на ЧАЭС значительная часть радионуклидов была выброшена в атмосферу. Их поведение было обусловлено особенностями метеорологических условий и размерами частиц. Крупные частицы под действием силы тяжести выпали, как правило, в 30-километровой зоне и на юге Гомельской области. Частицы меньшего размера оседали медленно. Выпадение этих частиц, спровоцированное дождями, привело к неоднородному загрязнению местности, удаленной от места аварии на многие километры и даже тысячи километров. Регулярные наблюдения показали, что в настоящее время даже в 30-километровой зоне ЧАЭС концентрация радиоактивных веществ в воздухе в 2 – 3 раза ниже концентраций, устанавливаемых нормами радиационной безопасности НРБ-2000. Это позволяет исключить аэрогенный (ингаляционный) путь миграции радионуклидов в настоящее время.

Миграция радиоактивных веществ, попавших в почву, определяется физико-химическими свойствами изотопов, типом их химических соединений, типом почвы, характером движения грунтовых вод и т.д.

Вследствие сельскохозяйственных, мелиоративных работ, а также смыва радионуклидов происходит горизонтальная миграция. Этот тип миграции характерен, главным образом, для водорастворимых соединений радиоактивных изотопов. В последнее время отмечается даже некоторое увеличение площади, загрязненной радионуклидами. Происходит перераспределение радионуклидов на большей территории. При этом наблюдается обмен радионуклидами между грунтовыми и подземными водами. Это может стать потенциальным источником радиоактивного загрязнения систем водоснабжения.

Продукты деления, осевшие на поверхности почвы, фиксируются в ее верхнем слое. Дождевые осадки способствуют вертикальной миграции радионуклидов в глубь почвы. Из загрязненной почвы радионуклиды поступают в растительность. За счет механического распределения, а также поглощения растениями, почва теряет в год до 2,5 % стронция и до 0,7 % цезия. Поэтому использование специальных растений, интенсивно поглощающих радионуклиды, может служить эффективным способом очистки почв.

Цезий и стронций содержатся во всех частях растений, а такие элементы, как церий, рутений, цирконий, плутоний, накапливаются в основном в корневой системе. Накопление радиоактивных веществ растениями может быть существенно снижено внесением в почву стабильных аналогов, содержащихся в минеральных удобрениях. Например, при обогащении почвы кальцием (известкование) и фосфором уменьшается накопле-

ние стронция-90, а при обогащении калием (калийные удобрения) снижается поступление в растения цезия-137.

Исследованиями установлено, что 80 – 90 % радионуклидов сосредоточено в корнях сельскохозяйственных культур. На не обрабатываемых после Чернобыльской аварии землях практически все радионуклиды находятся в верхней части (до 10 – 15 см) гумусовых горизонтов, а на пахотных почвах радионуклиды распределены сравнительно равномерно по всей глубине обрабатываемого слоя. Расчеты показывают, что в ближайшей перспективе самоочищение верхнего слоя загрязненных почв за счет вертикальной миграции радионуклидов будет незначительным.

Вместе с тем наблюдаются процессы локального вторичного загрязнения почв сельскохозяйственных угодий за счет горизонтальной миграции радионуклидов вследствие ветровой и водной эрозии. Это подчеркивает необходимость защиты почв от водной и ветровой эрозии, что обеспечивает также снижение потерь плодородного слоя и уменьшает вероятность загрязнения продукции на локальных участках угодий.

Доступность растениям цезия-137 в почве со временем снижается, а подвижность стронция-90 остается высокой и имеет тенденцию к повышению. Основное количество цезия-137 (70 – 84 %) находится в прочно связанной форме. Для стронция-90, наоборот, характерно преобладание легкодоступной для растений водорастворимой формы, которая в сумме может составлять 53 – 87 % от общего содержания.

Отмеченные изменения обусловили разную биологическую доступность указанных радионуклидов. Анализ большого массива экспериментальных данных показал, что коэффициенты перехода для цезия-137 в основные сельскохозяйственные культуры по сравнению с 1991 г. снизились в среднем в 1,5 раза по сравнению с 1987 г. Для стронция-90 наблюдается устойчивая тенденция к повышению его перехода из почвы в растения. Установлено, что на кислых, малоплодородных почвах доля подвижных форм радионуклидов выше, чем на высокоплодородных. Поэтому по-прежнему целесообразны агрохимические меры, направленные на повышение плодородия почв, увеличение емкости поглощения и снижение подвижности радионуклидов в почвенном комплексе. Поведение стронция-90 и цезия-137 в системе "почва – растение" имеет ряд отличительных особенностей. Поступление стронция-90 из почв в растения практически в 10 раз выше, чем цезия-137 при одинаковой плотности загрязнения земель.

Содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции зависит как от плотности загрязнения, так и типа почв, их состава и агрохимических свойств, а также биологических особенностей возделываемых культур. Пока-

затели почвенного плодородия оказывают существенное влияние на накопление радионуклидов всеми сельскохозяйственными культурами, особенно многолетними травами. Еще большее влияние на накопление радионуклидов в сельскохозяйственной продукции оказывает режим увлажнения почв. Установленные в исследованиях закономерности подтверждены практикой. На переувлажненных песчаных и торфяных почвах, например, в Наровлянском и Лельчицком районах Гомельской области, Столинском и Лунинецком районах Брестской области высокая степень загрязнения травяных кормов и молока наблюдается даже при относительно низких плотностях загрязнения цезием-137 ($2 - 5 \text{ Ки/км}^2$) и стронцием-90 ($0,3 - 1,0 \text{ Ки/км}^2$). В то же время на окультуренных участках дерново-подзолистых суглинистых почв продукция с допустимым содержанием радионуклидов может быть получена при плотности загрязнения цезием-137 до $20 - 30 \text{ Ки/км}^2$.

Особенности минерального питания, разная продолжительность вегетационного периода и другие биологические особенности различных видов растений влияют на накопление радионуклидов. Содержание цезия-137 в расчете на сухое вещество отдельных культур может различаться до 180 раз, а накопление стронция-90 – до 30 раз при одинаковой плотности загрязнения почв. Сортные различия в накоплении радионуклидов значительно меньше (до 1,5 – 3,0 раз), но их также необходимо учитывать при подборе культур. Накопление радионуклидов обусловлено также условиями роста и типом почв. Песчаные и болотистые почвы способствуют накоплению радионуклидов в растениях. Леса, особенно хвойные, эффективно задерживают радиоактивные вещества. Миграция радионуклидов в почвах лесов идет крайне медленно. До сих пор до 95 % радионуклидов находится в верхнем слое почвы (до 5 см). В лесах наиболее радиоактивными являются растения из напочвенного слоя: мхи, грибы, лишайники. Меньшей активностью обладают голубика, черника, малина. Наименее радиоактивны древесные растения.

6.7. Последствия радиоактивного загрязнения местности и их ликвидация. Социально-экономические последствия

Чернобыльская авария оказала воздействие на все сферы общественной жизни, образования, культуры, производства республики. Из общего потребления исключены значительные природные ресурсы – плодородные пахотные земли, леса, полезные ископаемые и т.д. Существенным образом изменились условия функционирования объектов производственного и социального назначения, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами.

Отселение жителей из загрязненных радионуклидами районов привело к прекращению деятельности многих предприятий и объектов социальной сферы. Республика понесла большие потери и продолжает нести убытки от снижения объемов производства, неполной окупаемости средств, вложенных в здания, оборудование, мелиоративные системы. Существенны потери топлива, сырья и материалов.

По оценкам общая сумма социально-экономического ущерба от Чернобыльской катастрофы за 1986 – 2015 гг. в Республике Беларусь составила 235 млрд. долларов США (5871,8 млрд. руб. в ценах на 1 июня 1992 г.). Это равно почти 32 государственным бюджетам Беларуси доаварийного 1985 года. Поскольку государственный бюджет за указанный год далеко не самый малый за все годы, истекшие после аварии на ЧАЭС, то даже если вся экономика Республики будет работать только на преодоление и ликвидацию ее негативных последствий, то и в этом случае нам самим будет не под силу выполнить запланированный объем мероприятий, направленных на решение данной проблемы. Это являлось основанием для того, чтобы Беларусь была объявлена зоной экологического бедствия.

В структуре общего ущерба преобладающее место занимают мероприятия по преодолению и минимизации негативных последствий Чернобыльской катастрофы. Это непосредственные расходы на преодоление последствий катастрофы и обеспечение безопасной жизнедеятельности различных отраслей народного хозяйства на территориях, загрязненных радионуклидами. К ним также относятся расходы по компенсации последствий катастрофы. В среднем за весь анализируемый 30-летний период их доля в общей сумме социально-экономического ущерба составляет 81,6 % (191,7 млрд. долларов США) (табл. 40).

Таблица 40

Суммарный социально-экономический ущерб
Республики Беларусь от катастрофы на Чернобыльской АЭС (млн. дол. США)

Периоды	Виды ущерба			Итого
	прямые и косвенные потери	улучшенная выгода	дополнительные затраты	
1986-1990	14,3	1,4	13,3	29,0
1991-1995	5,0	2,0	43,0	50,0
1996-2000	7,3	2,9	50,8	61,0
2001-2015	3,0	7,4	84,6	95,0
1986-2015	29,6	13,7	191,7	235,0

На втором месте находятся прямые и косвенные потери — 12,6 % (30 млрд. дол. США). Прямые потери включают стоимость выведенной из использования составной части национального богатства: основные и оборотные производственные фонды, объекты социальной инфраструктуры, жилье и природные ресурсы. К косвенным отнесены потери, обусловленные влиянием экономических и социальных факторов (условия жизни, быта, состояние здоровья населения) на нарушение или прекращение производства, на снижение производительности труда, увеличение стоимости и сложности обеспечения других объектов государственной, кооперативной и личной собственности, а также потери от миграции населения из пострадавших районов. Упущенная выгода оценивается в 5,8 % (13,7 млрд. дол. США). Составляющими упущенной выгоды, выраженной в стоимостной форме, являются сокращение объемов производства, работ и услуг на загрязненных территориях, стоимость непригодной из-за радиационного загрязнения продукции, дополнительные затраты на восстановление утраченного качества продукции, потери от расторжения контрактов, аннулирования проектов, замораживание кредитов, выплаты штрафов, неустоек и т.д. Структура ущерба по отраслям народного хозяйства и сферам общественной деятельности показана в табл. 41.

Таблица 41

Отраслевая структура социально-экономического ущерба
Республики Беларусь от аварии на ЧАЭС (млрд. дол. США)

Отрасли народного хозяйства или сферы общественной деятельности	Периоды (годы)				
	1986- 1990	1991- 1995	1996- 2000	2001- 2015	1986- 2015
Здоровье населения	4,05	16,77	18,13	54,32	93,27
Агропромышленный комплекс	18,30	20,00	15,60	18,10	72,00
Лесное хозяйство	0,58	0,68	0,70	2,15	4,11
Промышленность	0,06	0,13	0,11	0,33	0,63
Строительный комплекс	0,15	1,25	0,32	0,96	2,68
Минерально-сырьевые и водные ресурсы	2,00	0,12	0,15	0,40	2,67
Транспорт и связь	0,93	1,20	0,36	0,90	3,39
Социальная сфера	2,84	5,45	2,96	6,45	17,70
Дезактивация загрязненных территорий	0,04	4,19	22,48	10,12	36,83
Радиоэкологический мониторинг	0,05	0,21	0,19	1,27	1,72
Всего	29,00	50,00	61,00	95,00	235,00

Как видим, наибольшая часть общей суммы ущерба падает на долю ухудшения здоровья населения (включая затраты на переселение и выплаты различного рода социальных льгот и компенсаций населению в соответствии с законодательством). В среднем за все 1986 – 2015 гг. его индивидуальный вес в общей сумме социально-экономического ущерба составил лишь немногим менее 40 %.

Если же к ущербу, отнесенному на счет потери здоровья населения, добавить ущерб, исчисленный по здравоохранению, входящему в состав социальной сферы, которое также имеет прямое отношение к здоровью людей, то его удельный вес в совокупном ущербе составит 41,6 %.

Из всех отраслей народного хозяйства наиболее сильно пострадало сельское хозяйство. Второе место по доле в общем объеме ущерба, причиненного Республике Беларусь аварией на ЧАЭС, занимает агропромышленный комплекс – 30,6 %. Радиоактивному загрязнению подверглись более 1,8 млн. га сельскохозяйственных угодий (около 22 % их наличия), из которых 264 тыс. га полностью исключено из хозяйственного оборота.

В этих районах расположено 3210 сельских населенных пунктов, в которых проживает 774,4 тыс. человек или 23,5 % всего сельского населения Беларуси. В 720 сельскохозяйственных предприятиях данных районов сосредоточено более 20 % основных производственных фондов сельского хозяйства, которые обеспечивали в общем объеме валовой продукции около 19 %.

Ликвидировано 54 колхоза и госхоза. Соответственно пострадали и предприятия по переработке мяса, молока, картофеля, льна, по заготовке и переработке хлебопродуктов.

Лесное хозяйство после сельского занимает третье место по величине социально-экономического ущерба. Радиоактивному загрязнению плотностью более 1 Ки/км^2 подверглись более 2 млн. га леса, что составляет около 30 % всего лесного фонда Беларуси. Если учесть площади, загрязненные радионуклидами плотностью до 1 Ки/км^2 , то этот показатель возрастет до 40 %. Особенно сильно загрязнены леса Гомельской и Могилевской областей – соответственно 67,4 и 49,1 %.

В результате сильно сократились размеры пользования лесными угодьями, а вместе с ними и доходы предприятий лесного хозяйства. Загрязнение лесных массивов вызвало ликвидацию ряда предприятий по переработке древесины и сокращение общих объемов производства. Одновременно возникла острая необходимость в проведении целого комплекса мероприятий, направленных на предотвращение дальнейшего распростра-

нения радионуклидов. Промышленность меньше других отраслей реальной экономики пострадала от Чернобыльской катастрофы, хотя в зоне радиоактивного загрязнения оказалось около 340 промышленных предприятий, на долю которых приходилось 17 % общего объема выпуска промышленной продукции. В зоне наибольшего загрязнения были только 20 предприятий, в основном небольших, входящих в состав пищевой промышленности.

Результаты расчетов по определению социально-экономического ущерба, понесенного промышленностью Беларуси вследствие аварии на ЧАЭС в целом за весь анализируемый период, представлены в табл.42. Согласно данным таблицы, в наибольшей мере пострадали от катастрофы те отрасли промышленности, которые работают на местных минерально-сырьевых ресурсах: лесная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная, а также пищевая промышленность.

Строительный комплекс пострадал от аварии, по сравнению с промышленностью, в значительно большей степени. Не в меньшей мере здесь сказался характер производственной деятельности строительного комплекса, а главное – та роль, которая была отведена ему в преодолении и минимизации негативных последствий аварии. После аварии в зоне ее влияния продолжали функционировать все строительные-монтажные организации, выполняя поставленные задачи по дезактивации и социальному благоустройству населенных пунктов на загрязненных территориях, а также по перебазированию производственных мощностей в чистые районы и созданию там новых рабочих мест.

Таблица 42

Социально-экономический ущерб промышленности
за 1986-2015 гг. (млрд. долларов)

Отрасли промышленности	Виды ущерба			Итого
	прямые и косвенные потери	упущенная выгода	дополн. затраты	
Легкая	1,6	7,0	2,4	11,0
Местная	5,5	2,0	9,4	16,9
Электроэнергетика		0,2		0,2
Топливная		3,2		3,2
Черная металлургия		10,4		10,4
Химическая		11,9		11,9
Машиностроение		72,3		72,3
Лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная		503,3		503,3
Всего	7,1	610,3	11,8	629,2

Авария на ЧАЭС привела к радиоактивному загрязнению значительной части минерально-сырьевых и водных ресурсов страны. Это главным образом месторождения глины, различного рода песков и песчано-гравийных смесей, цементного и известкового сырья, строительного и облицовочного камня. В зону загрязнения попали также Припятский нефтегазоносный бассейн и Житковичское месторождение бурого угля и горючих сланцев.

Немалые потери понесла и продолжает нести Беларусь вследствие радиоактивного загрязнения водных ресурсов. Наибольшие водные площади, загрязненные радионуклидами, расположены в бассейнах рек Днепр, включая Припять и Сож. Особую опасность для водопользователей представляют донные отложения, содержащие в большом количестве радионуклиды.

Из всех отраслей транспорта больше всего пострадали дорожное хозяйство и железные дороги. Здесь сказалась большая пространственная рассредоточенность предприятий той или иной отрасли. В результате в зоне отчуждения Гомельской области оказалось 270 км дорог различного значения, которые пришлось законсервировать. Положение серьезно усугубилось тем, что на момент аварии очень многие дороги местного значения отличались низким уровнем капитальности и благоустроенности. Они стали дополнительным источником радиоактивного загрязнения. Чтобы ослабить негативное влияние, пришлось в кратчайшие сроки выполнить большой объем работ по асфальтированию улиц и подъездов к населенным пунктам.

Существенные потери вследствие аварии понесли и продолжают нести предприятия связи. В частности, после аварии пришлось ликвидировать 30 почтовых отделений связи. В итоге полностью потеряно 2432 км линий радиотелефонии, 1650 км телефонной связи и т.д.

Огромный урон нанесла авария социальной сфере, которая играет решающую роль в жизнеобеспечении человека и общества в целом (табл. 43). При этом наиболее сильно пострадало жилищное хозяйство, рассредоточенное по всей территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению.

В составе дополнительных мероприятий по содержанию и обслуживанию жилого фонда в загрязненных районах основное место занимает дезактивация и благоустройство городских поселений, расширение сферы услуг. Среди них строительство и реконструкция сис-

тем водоснабжения и водоотведения, строительство пунктов захоронения радиоактивных отходов, асфальтирование дорог и тротуаров, дополнительная электрификация. Специальные меры потребовались для обеспечения населения чистой водой.

Таблица 43

Социально-экономический ущерб социальной сферы
за 1986 - 2015 гг. (млрд. дол. США)

Отрасли социальной сферы	Виды ущерба			Итого ущерба
	прямые и косвенные потери	упущенная выгода	дополн. затраты	
Жилищное хозяйство (включая жилкомхоз)	1416,3		9133,4	10549,7
Народное образование и культура	50,2		823,3	873,5
Здравоохранение	7,9	3,0	4413,2	4424,1
Торговля и общественное питание	22,0	35,5	1780,8	1838,3
Бытовое обслуживание	2,1	1,5	1,6	5,2
Всего	1498,5	40,0	16152,3	17690,8

6.8. Ликвидация последствий радиоактивного загрязнения

После аварии на ЧАЭС правительственные органы республики приняли комплекс мер по радиационной защите населения и обеспечению радиационной безопасности. К основным из них относятся:

- эвакуация и отселение;
- дозиметрический контроль радиационной обстановки на всей территории республики и ее прогнозирование;
- дезактивация территории, объектов, техники и продуктов питания;
- комплекс лечебно-профилактических мероприятий;
- комплекс санитарно-гигиенических мероприятий;
- контроль за переработкой и распространением загрязненных радионуклидами продуктов;
- компенсация ущерба (социального, экономического, экологического);
- контроль за использованием, распространением и захоронением радиоактивных материалов, система мониторинга;

- пропаганда рационального питания;
- реабилитация сельскохозяйственных угодий;
- организация агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения.

6.8.1. Эвакуация и отселение

Эти мероприятия должны быть организованы в соответствии с НРБ-76. Однако масштабы радиоактивного загрязнения оказались больше, чем прогнозировалось МКРЗ и НРБ. Поэтому в первые дни и месяцы после аварии на ЧАЭС Минздрав СССР вынужден был давать рекомендации по эвакуации и отселению, не предусмотренные НРБ-76. Так, в первые недели и месяцы в местах, где люди могли получить более 75 бэр на все тело, а дети – более 400 бэр на щитовидную железу, эвакуация была экстренной, тогда как согласно НРБ-76/87 срочная эвакуация была предусмотрена и для людей, которые могли получить 25 бэр за неделю. С учетом складывающейся обстановки в первую очередь проводилась эвакуация людей, которые могли получить: в 1986 году – 0,1 Зв/год, в 1987 году – 0,03 Зв/год, в 1988 – 89 годах – 0,025 Зв/год, в 1990 году – 0,035 Зв за всю жизнь (70 лет).

В республике на первом этапе было эвакуировано 24,7 тыс. человек. К 1995 году из зон радиоактивного загрязнения было в общей сложности переселено более 130 тыс. человек. В настоящее время установлены следующие зоны:

- 1 – зона немедленного отселения, где поверхностная активность более 40 Ки/км²;
- 2 – зона последующего отселения, где поверхностная активность соответствует диапазону 15 – 40 Ки/км²;
- 3 – зона с правом на отселение, где поверхностная активность соответствует диапазону 5 – 15 Ки/км²;
- 4 – жилая зона с повышенным контролем, где поверхностная активность соответствует диапазону 1 – 5 Ки/км².

6.8.2. Дезактивация, утилизация и захоронение радионуклидов

Среди многих мер, предпринятых государством с целью ограничения отрицательных последствий радиоактивного загрязнения территорий для жизнедеятельности населения, одно из центральных мест за-

нимают дезактивация, утилизация и захоронение радиоактивных отходов. Особенно большое внимание этому уделялось в первые годы после аварии. За 1986 – 89 годы за пределами 30-километровой зоны было дезактивировано 11,6 млн. м² внешних поверхностей зданий и сооружений, снято и захоронено 13,3 млн. м³ загрязненного грунта, взамен его завезено 2,8 млн. м³ чистого грунта, снесено 7570 ветхих строений. Все эти мероприятия отличаются исключительно высокой капиталоемкостью.

В мировой практике используются различные методы проведения дезактивационных работ – глубокая перепашка, удаление грязного слоя, промывка, изоляция на месте путем оплавления, засыпка чистого грунта. Однако в данном случае такие методы оказались либо малоэффективны, либо экономически неприемлемы. В принципе, подход к проблеме очистки почв может быть реализован одним из трех способов:

1. Не предпринимать никаких усилий и ждать, когда радионуклиды распадутся либо за счет миграции произойдет очистка верхних слоев почв. Этот подход фактически неприемлем, поскольку период полураспада цезия-137 и стронция-90 соответствует 30 годам и промежуток времени до самоочищения территории в результате радиоактивного распада превышает сотни лет (десять периодов полураспада). Что касается миграции, то ее эффективность определяется видом почв и типом радионуклидов, поскольку в этом случае определяющую роль играет растворимость органических соединений, которые образуют радионуклид. Поэтому такой вариант реализуется в пределах 30-километровой зоны эвакуации.

2. Извлечь радионуклиды из почв. Этот способ дезактивации пытались применить на первом этапе. Для этого применялись специальные передвижные установки, с помощью которых снимается верхний 8-сантиметровый слой почвы, содержащий до 90 – 98 % общей радиоактивности. Отказ от дальнейшего использования такого метода был продиктован его дороговизной.

3. Ускорить процесс миграции радионуклидов в почве. Такой способ может быть реализован только на основе глубоких знаний форм нахождения цезия, стронция, плутония, америция в различных почвах, их сорбционных свойств по отношению к различным компонентам почв, кинетики изотропного обмена этих радионуклидов. Одним из методов реализации

такого способа очистки почв может служить использование специфических растений, которые интенсивно поглощают из почвы соединения стронция и накапливают их в верхней части растения. В этом случае дезактивация сводится к захоронению таких растений.

6.8.3. Дезактивация продуктов питания

Следует помнить, что при загрязнении территории радионуклидами с поверхностной активностью свыше 10 Ки/км^2 их содержание в продуктах животноводства и земледелия часто превышает предельно допустимые уровни. Однако в крайних случаях такие продукты можно употреблять в пищу (после переработки), если провести их дезактивацию.

В мясе и мясных продуктах накапливаются радионуклиды цезия и стронция. Цезий прежде всего накапливается в мышцах, почках, печени и сердце. Стронций накапливается в костях, особенно молодых. Дезактивация заключается в промывании в проточной воде, вымачивании в подсоленной воде в течение 2-х часов и неиспользовании отваров. При этом количество радионуклидов уменьшается на 50 – 80 %.

Наибольшее содержание радионуклидов приходится на голову и внутренности рыбы. Свежую рыбу, очищенную от чешуи и внутренностей, вымачивают в течение 10 – 15 часов, меняя периодически воду. Этот способ уменьшает количество радионуклидов цезия на 70 – 75 %. При этом следует помнить, что в озерной рыбе содержание радионуклидов в несколько раз выше, чем в речной. Отваривание уменьшает количество радионуклидов примерно вдвое.

Дезактивацию овощей и фруктов следует начинать с механической очистки поверхности от земли, промывки их в теплой проточной воде. Перед мытьем следует удалить верхние наиболее загрязненные листья (капуста, лук). По степени накопления радионуклидов, таких как цезий и стронций, овощи размещаются в следующей последовательности: капуста, огурцы, томаты, лук, чеснок, картофель, морковь, свекла, редис, фасоль, горох, бобовые, щавель.

Среди ягод и фруктов в меньшей степени накапливают радионуклиды яблоки и груши, а в большей – красная и черная смородина. Механическая обработка (снятие кожуры 3 – 5 мм толщиной) позволяет удалить до 50 % радионуклидов. Засолка овощей и фруктов снижает количество ра-

дионуклидов на 30 – 40 % . В процессе варки с регулярной сменой воды количество радионуклидов может быть снижено на 80 %.

Грибы и ягоды могут оказаться сильно радиоактивными, поэтому их кулинарная обработка должна быть более тщательной и без необходимости их употребление нежелательно.

Количество радионуклидов в молоке зависит от кормов. Переработка молока позволяет значительно снизить содержание радионуклидов. Так, до 90 % радионуклидов остается в сыворотке. В сливках сохраняется только 15 % радионуклидов цезия и 8 % стронция, в твороге обезжиренном – 10 % цезия и 12 % стронция, в сливочном масле – 2,5 % цезия и 1,5 % стронция, в топленом масле – 0.

6.8.4. Организация агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения местности

Снижение концентрации радионуклидов в сельскохозяйственных растениях может быть достигнуто различными приемами:

- традиционные мероприятия, направленные на сохранение и увеличение плодородия почв, способствующие уменьшению перехода радионуклидов из почвы в растения;
- специальные приемы: глубокая вспашка с захоронением загрязненного слоя почвы; внесение специальных мелиорантов, связывающих радионуклиды в труднодоступные для растений формы;
- агрохимические мероприятия, направленные на ограничение поступления радионуклидов в растения (внесение минеральных и органических удобрений, известкование почвы, добавление торфа);
- технологические приемы, направленные на снижение содержания радионуклидов в выращенной продукции (промывка и первичная очистка убранных растений, применение специальных методов уборки урожая), на предотвращение вторичного загрязнения урожая, переработка полученной продукции в целях снижения концентрации радионуклидов;
- агротехнические методы.

Агротехнические методы включают в себя подбор растений при производстве сельхозпродукции на загрязненных территориях. В порядке

убывания по накоплению цезия-137 сельскохозяйственные культуры распределяются следующим образом:

- зерновые и бобовые: овес, гречиха, горох, ячмень, пшеница, кукуруза, просо, фасоль;
- овощные и картофель: капуста, картофель, свекла, морковь, огурцы, томаты.

По накоплению цезия-137 культуры разделяют на три группы:

- слабонакапливающие – зерновые (ячмень, пшеница, овес);
- средненакапливающие – крупяные (просо, гречиха);
- сильнонакапливающие – зернобобовые (фасоль, горох, бобы).

По концентрации стронция-90 овощные культуры располагаются следующим образом: свекла, огурцы, морковь, капуста, томаты, картофель.

Содержание радионуклидов в продуктах животноводства также может быть уменьшено, если проводить соответствующие мероприятия:

- ограничение (прекращение) поступления радионуклидов с пищей;
- введение в рацион животных специальных добавок, ускоряющих связывание и выведение радионуклидов из организма;
- технологическую переработку продуктов животноводства;
- перепрофилирование отраслей животноводства с учетом формируемых условий.

7. МЕРОПРИЯТИЯ ПО РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЮ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

7.1. Система радиационного мониторинга

Успешное решение поставленных задач по преодолению и минимизации негативных последствий аварии на Чернобыльской АЭС было бы практически невозможным без налаженной системы радиэкологического мониторинга.

Система радиационного мониторинга в Республике Беларусь носит в основном ведомственный характер. Основную нагрузку по сбору информации и регулярному контролю несут службы Главгидромета. К их функциям относятся ежедневное измерение мощности экспозиционной дозы γ -излучения (52 станции); ежедневное измерение естественных радиоактивных выпадений (20 пунктов); ежедневное измерение содержания аэрозоль в воздухе (5 пунктов), а также регулярное обследование и уточнение радиоактивного загрязнения почвы, вод и донных отложений, домов и подворий (при плотности загрязнения более 37 кБк/м^2). В ведении Главгидромета имеется ряд дополнительных средств: лаборатории спектрометрии и радиометрии в областных центрах; лаборатории радиационного мониторинга, а также другие станции, лаборатории и посты. Кроме этого радиологические службы созданы в рамках различных ведомств (Минсельхозпрод, Минздрав, Минсельхоз, Минторг и др.). Например, в Министерстве сельского хозяйства и продовольствия создана сеть радиологических лабораторий и дозиметрических постов. На 1995 год было 549 лабораторий и постов, в том числе в ветеринарной службе – 257, в агрономической – 76, на мясокомбинатах – 24, на молокоперерабатывающих предприятиях – 98, на пищевых предприятиях и плодоовощных базах – 94. Всего в колхозах и госхозах – 525 дозиметрических постов. Кроме государственной системы радиационный мониторинг осуществляется негосударственным институтом радиационной безопасности, силами которого создано 370 (на 1995 год) центров радиационного контроля, которые обеспечивали отбор проб продуктов питания и проведение сложных анализов общим числом 50-100 в месяц.

7.2. Санитарно-гигиенические мероприятия

Для обеспечения защиты человеческого организма от действия ионизирующих излучений необходимо проведение целого комплекса защитных санитарно-гигиенических мероприятий. Перечислим основные задачи радиационной гигиены:

1. Снижение дозы внешнего облучения. Этот тип мер относится к защите от поражения γ -излучением и потоком нейтронов, которые обладают большой проникающей способностью. Эффективной защитой от γ -излучения может быть использование материалов, толщина которых определяется их поглощающей способностью. Так, в этом качестве может быть использована пластина из свинца толщиной несколько сантиметров или многослойный слой бетона. И то, и другое применяется при строительстве специальных убежищ. Однако в связи с тем, что внешнее облучение в послеварийный период несущественно, этот способ защиты не имеет большого значения.

2. Снижение дозы внутреннего облучения от радионуклидов, попавших в организм из внешней среды. При облучении тела человека разрушаются клетки, повреждаются молекулы ДНК, нарушаются жизненные процессы в организме. Однако замечено, что введение в организм некоторых химических или биологических веществ последние стимулируют восстановительные процессы в клетках. Такие вещества называются **радиопротекторами**. Механизм действия радиопротекторов до конца не изучен, имеются только гипотезы. Различают несколько групп радиопротекторов.

А. Радиопротекторы, снижающие последствия от полученной дозы облучения за счет перехвата биологически активных свободных радикалов:

- цистеин, цистеамин (дают эффект при дозах до 300 бэр, если их применять за 30 – 45 минут до облучения);
- амины (сиротимин, негафен, аминазин, мексамин). Эти препараты задают кислородное голодание, замедляют обмен веществ и обладают некоторым радиопротекторным действием при дозах 400 – 500 бэр. Однако этот эффект незначителен и не защищает половые клетки;
- антибиотики (пенициллин, актиномицин и др.). Эти препараты увеличивают сопротивляемость организма и обладают способностью восстанавливать пептидные связи;

- фенольные соединения. Это сложные полимерные молекулы, например, меланин. В сочетании с витамином С он обладает достаточно высокой эффективностью;
- спирты. Однако их радиопротекторные свойства слабо выражены, поэтому концентрации, необходимые для достижения защитного эффекта, чрезмерно высоки.

Б. Радиопротекторы, которые не являются перехватчиками, но снижают последствия от полученной дозы облучения за счет ускорения выведения радионуклидов из организма:

- гексацианоферрат железа (FeCN) используется для быстрого выведения из организма цезия-137;
- хлорид аммония, сульфат бария, фосфат алюминия. Применяются для выведения радионуклидов, которые адсорбируются в межклеточной жидкости и в костях. Это главным образом изотопы стронций-89 и стронций-90;
- кальциевые соли с диамином и триамином. Применяются для ускорения выведения из организма плутония-239;
- пектины, клетчатка и дубильные вещества – сложные соединения, ускоряющие выведение из организма тяжелых металлов и радиоактивных веществ. Пектины обеспечивают окраску ягод, поэтому они содержатся в большом количестве в черной смородине, винограде, фруктовых соках. Клетчатку содержат различные крупы – гречка, овсяная и перловая крупы, а также хлеб, кукуруза, яблоки, сливы, груши, чечевица, смородина, малина, клубника. Важно отметить, что ускоренному выведению радионуклидов и тяжелых металлов (свинца, висмута) способствуют различные микроэлементы, мочегонные средства, массаж, спорт, голодание.

В. Радиопротекторы, препятствующие возникновению биологических повреждений. К ним относится ряд веществ, обладающих выраженным антимутагенным действием, главным образом, витамины *A, C, E, P, B*.

Источниками витамина *A* являются желтые и зеленые овощи, говяжья печень, сливочное масло, маргарин, сметана, хурма, куриные яйца, икра, фасоль. Витамин *A* способствует поглощению радикалов воды.

Источниками витамина *C* являются шиповник, облепиха, цитрусовые, черная смородина, красный сладкий перец, картофель, капуста. Этот витамин активизирует процессы кроветворения и выведения свободных радикалов.

Источниками витамина *P* являются черноплодная рябина, черная смородина, боярышник, клюква, брусника, чай.

Источниками витамина *E* являются зерновые, овощи, орехи, растительное масло, печень, зеленый горошек, гречиха, лук, чеснок, яблоки, персики, кукуруза, капуста, редис, сельдерей. Витамин *E* укрепляет сердце, улучшает кровообращение, способствует выведению радикалов, обладает выраженным антимуtagenным действием.

Витамины группы *B*, имеющиеся в бобовых и зелени, стимулируют иммунную систему.

3. Концентрация радионуклидов в организме может быть снижена за счет ограничения их поступления в процессе жизнедеятельности человека, главным образом с продуктами питания. К этому способу защиты относится целый комплекс мер. Часть из них относится к ограничению потребления продуктов питания, содержащих избыточное количество радионуклидов, и представляет собой комплекс мер по рациональному питанию в условиях проживания на территориях, загрязненных радионуклидами.

Существуют различные варианты рационального питания, которые могут предложить врачи конкретному человеку с учетом состояния здоровья, степени радиоактивного облучения и т.д. Коротко остановимся только на питании детей – будущего генофонда нации.

Для детей грудного и раннего возраста:

- обеспечение экологически чистыми продуктами питания;
- обеспечение сбалансированного питания по содержанию белков, жиров, витаминов-антиоксидантов, минеральных веществ, микроэлементов;
- обеспечение продуктами, содержащими компоненты с радиопротекторными свойствами.

При питании детей ясельного возраста преимущество отдается молочным продуктам. Имеются специальные смеси детского питания, выпускаемые предприятиями.

При питании детей дошкольного возраста преимущество отдается молочным продуктам, сокам, фруктам, яйцам.

При питании детей школьного возраста преимущество отдается некоторым молочным продуктам, рыбе, мясу, маслу сливочному, фруктам, соку, меду. Для лечебных целей при облучении радиацией применяется цветочная пыльца и такие продукты, как спирулина. Добавки в продукты

(например, в хлеб) тмина, каротина, пищевого железа и т.п. могут способствовать уменьшению последствий действия радиации.

Другой комплекс мер включает в себя гигиенические мероприятия для людей, проживающих на территориях, загрязненных радионуклидами. Переносчиком радионуклидов является пыль. Чтобы уменьшить попадание ее в организм, надо по возможности увлажнять землю возле дома. Во время сельскохозяйственных работ лучше использовать респиратор или защитить себя марлевой повязкой. В загрязненном лесу нельзя разжигать костры, так как при пожаре радиоактивные вещества попадают в воздух и ветром могут переноситься на большие расстояния.

Уменьшить поступление радионуклидов в дом можно частой чисткой ковров и мягкой мебели, чисткой одежды. Особого ухода требует обувь. Чаше требуется устраивать стирку, особенно повседневной одежды. Необходимо, возвратившись с улицы, мыть руки с мылом, полоскать рот, а еще лучше – принимать душ. Эти рекомендации, конечно, создают неудобства. Однако их соблюдение – вынужденная необходимость, позволяющая намного уменьшить риск неблагоприятных радиационных последствий для населения, проживающего на территориях, загрязненных радионуклидами.

7.3. Законодательство Республики Беларусь по обеспечению радиационной безопасности

Правовое решение проблем, возникающих в связи с развитием атомной энергетики, нашло отражение в законодательных актах. Первый закон по данной проблеме появился в США в 1946 году. В Великобритании в 1954 и 1957 годах были приняты законы об управлении в области атомной энергии, в 1965 и 1969 годах – законы о ядерных установках, в 1970 году – о радиологической защите. Обширное ядерное законодательство сложилось в Японии. В государствах Восточной Европы с 60-х годов действуют законы об атомной энергии и многочисленные нормы, регламентирующие вопросы охраны здоровья людей и окружающей среды от негативного воздействия радиации. Указанные нормы регламентируют также общественные отношения по развитию атомной энергетики и использованию источников ионизирующего излучения, государственному управлению, осуществлению контроля и надзора за обеспечением безопасности, гражданско-правовой ответственности за ядерный ущерб, административной и уголовной ответственности за нарушение ядерного законодательства.

В масштабах СНГ в целом и в пострадавших государствах – Беларуси, Украине, России надлежащая правовая основа использования атомной энергии практически отсутствовала. Законотворческий процесс в этой области нашел свое проявление в пострадавших странах СНГ в 1991 году. В феврале 1991 года Верховный Совет Республики Беларусь принял закон "О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС", направленный на защиту прав и интересов граждан, которые принимали участие в ликвидации последствий катастрофы, граждан, проживающих на загрязненных территориях и отселенных с них. Закон дает право на получение льгот и компенсации за ущерб, причиненный здоровью в результате аварии.

В законе регламентировалось понятие ликвидатора аварии на ЧАЭС. Поскольку достаточно сложно определить, кто является ликвидатором, а кто – нет, эта норма закона подвергается постоянной критике и по этой причине достаточно регулярно уточняется.

Согласно закону загрязненная территория делится на зоны:

- зона эвакуации: 30-километровая зона вокруг ЧАЭС и территория, из которой было проведено дополнительное отселение в связи с загрязнением по стронцию-90 свыше 3 Ки/км^2 , по плутонию-239 – свыше $0,1 \text{ Ки/км}^2$;
- зона первоочередного отселения: территория с загрязнением по цезию-137 свыше 40 Ки/км^2 и по стронцию и плутонию свыше $3,0$ и $0,1 \text{ Ки/км}^2$;
- зона последующего отселения: загрязнение по цезию-137 от 15 до 40 Ки/км^2 , по стронцию-90 от 2 до 3 Ки/км^2 , по плутонию-239 от $0,05$ до $0,1 \text{ Ки/км}^2$;
- зона с правом на отселение: загрязнение по цезию-137 от 5 до 15 Ки/км^2 , по стронцию-90 от $0,5$ до 2 Ки/км^2 , по плутонию-239 от $0,01$ до $0,05 \text{ Ки/км}^2$, где мощность дозы облучения может превысить 5 мЗв ($0,5 \text{ бэр}$) в год;
- зона проживания с периодическим радиационным контролем: загрязнение территории по цезию-137 от 1 до 5 Ки/км^2 , где мощность дозы облучения населения не превышает допустимый предел 1 мЗв ($0,1 \text{ бэр}$) в год.

В настоящее время существует закон "О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС", который в определенной мере регламентирует проблемы при-

родопользования на загрязненных территориях, порядок отселения и эвакуации.

Гражданам, проживающим на загрязненных территориях, предусмотрен ряд льгот по лечению, обслуживанию, налогообложению, оплате труда, пенсионному обеспечению, обеспечению жильем и т.д.

Резэвакуация в зону прежнего проживания возможна лишь по решению Совета Министров при наличии заключения национальной комиссии по радиационной защите. Резэвакуация должна быть добровольной.

Все продукты, производимые на территории Беларуси, должны иметь сертификат с указанием места производства и содержания радионуклидов. Продукты, не удовлетворяющие республиканским допустимым условиям, нельзя использовать. Они подлежат уничтожению.

Верховным Советом Республики Беларусь в феврале 1991 года принята "Национальная программа профилактики генетических последствий, обусловленных катастрофой на Чернобыльской АЭС", которая предусматривает, в частности, научное обеспечение профилактики генетических последствий аварии, а также мероприятия по выявлению врожденных пороков развития и дородовой диагностики этих пороков и наследственных болезней. Программа обязывает вести пропаганду предпочтительно деторождения в возрасте 25 – 35 лет. Беременные женщины со сроком беременности 15 – 16 и 23 – 25 недель обязательно проходят двукратное ультразвуковое сканирование с целью выявления врожденных пороков развития.

Новые населенные пункты следует размещать там, где сохранился доаварийный уровень загрязнения: по цезию-137 – менее $0,2 \text{ Ки/км}^2$, по стронцию-90 – менее $0,02 \text{ Ки/км}^2$, по плутонию-239 – менее $0,005 \text{ Ки/км}^2$. Если такие территории отсутствуют, то для строительства выбирают места, в которых доза облучения человека за жизнь (70 лет) не будет превышать 7 бэр. Загрязнение продуктов питания по цезию-137, полученных на загрязненных площадях, не должно превышать по молоку $5 \cdot 10^{-9} \text{ Ки/л}$, по мясу – 10^{-8} Ки/кг . При этом после проведения агротехнических мероприятий и спустя два года загрязнение по цезию-137 в молоке и мясе должно быть снижено в 10 раз. Такая радиационная обстановка должна быть не только в самом населенном пункте, но и вокруг него в радиусе 10 км.

Хозяйственная деятельность на загрязненных территориях также регламентируется законами Республики Беларусь "О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате ка-

тастрофы на Чернобыльской АЭС" и "О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС".

Юридическими документами, регламентирующими воздействие ионизирующих излучений в республике, являются также "Нормы радиационной безопасности" (НРБ-2000), "Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности" (ОСП-2002) и закон Республики Беларусь "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 23.10.1993 г. Нарушение НРБ и ОСП влечет за собой административную ответственность, а в случае грубых нарушений – уголовную. Никакие инструкции, издаваемые ведомствами, учреждениями, не должны противоречить положениям НРБ и ОСП.

Основным документом, регламентирующим деятельность различных субъектов государства по обеспечению радиационной безопасности, является закон Республики Беларусь "О радиационной безопасности населения", принятый 5.01.1998 г. Закон содержит ряд основных положений, направленных на решение задачи снижения риска неблагоприятных последствий для населения от действия ионизирующих излучений природного или техногенного характера. Основными из этих положений являются следующие:

1. Государственное нормирование в области обеспечения радиационной безопасности осуществляется путем установления санитарных правил, норм, гигиенических нормативов, правил радиационной безопасности, государственных стандартов, строительных норм и правил, правил охраны труда, распорядительных, инструктивных, методических и иных документов по радиационной безопасности, которые не должны противоречить положениям настоящего закона. Санитарные правила, нормы и гигиенические нормативы в области обеспечения радиационной безопасности утверждаются в порядке, установленном законодательством Республики Беларусь.

2. Устанавливаются следующие основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз) облучения на территории Республики Беларусь в результате воздействия источников ионизирующего излучения:

- для населения средняя годовая эффективная доза равна 0,001 Зв или эффективная доза за период жизни (70 лет) – 0,07 Зв; в отдельные годы допустимы большие значения эффективной дозы при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная последовательно за пять лет, не превысит 0,001 Зв;
- для работников средняя годовая эффективная доза равна 0,02 Зв или эффективная доза за период трудовой деятельности (50 лет) – 1 Зв;

допустимо облучение в размере годовой эффективной дозы до 0,05 Зв при условии, что средняя годовая эффективная доза, исчисленная последовательно за пять лет, не превысит 0,02 Зв.

3. Регламентируемые значения основных пределов доз облучения не включают в себя дозы, создаваемые естественным радиационным и техногенно измененным радиационным фоном, а также дозы, получаемые гражданами (пациентами) при медицинском облучении. Указанные значения пределов доз облучения являются исходными при установлении допустимых уровней облучения организма человека и отдельных его органов.

4. В случае радиационных аварий допускается облучение, превышающее установленные основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз), в течение определенного промежутка времени и в пределах, определенных санитарными нормами и правилами.

5. Правила радиационной безопасности, регламентирующие требования по обеспечению технической безопасности при работах с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения, утверждаются уполномоченным на то органом государственного управления в порядке, установленном законодательством Республики Беларусь.

6. Государственные стандарты, строительные нормы и правила, правила охраны труда, распорядительные, инструктивные, методические и иные документы по вопросам радиационной безопасности принимаются и утверждаются уполномоченными на то органами государственного управления в пределах их полномочий.

7. Обеспечение радиационной безопасности граждан (пациентов) при медицинском облучении достигается следующими мероприятиями:

- дозы облучения граждан (пациентов) при медицинском облучении должны соответствовать установленным нормативам в области радиационной безопасности;
- при проведении медицинских рентгенорадиологических процедур необходимо использовать средства защиты граждан (пациентов);
- гражданину (пациенту) по его требованию предоставляется информация об ожидаемой или получаемой им дозе облучения и о возможных последствиях при медицинском облучении;
- гражданин (пациент) имеет право отказаться от медицинских рентгенорадиологических процедур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Машкович В.П., Панченко А.М. Основы радиационной безопасности: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. Кужир П.Г., Сатиков И.А., Трофименко Е.Е. Радиационная безопасность. – Мн.: Пион, 1999.
3. Аверьянова А.В., Луговский В.П., Русак И.М. Что нужно знать о радиации. – Мн.: Выш. школа, 1992.
4. Люцко А.М., Ролевич И.В., Тернов В.И. Чернобыль: шанс выжить. – Мн.: Польша, 1996.
5. Маргулис У.Я. Атомная энергия и радиационная безопасность. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
6. Савенко В.С., Холбрук Тетер. Радиация: физический и психологический аспекты: Учеб. пособие. – Мн.: Дизайн ПРО, 1996.
7. Савастенко В.А. Практикум по ядерной физике и радиационной безопасности: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Дизайн ПРО, 1998.
8. Ярмопенко С.П. Радиобиология человека и животных. – М.: Высш. школа, 1988.
9. Антонов В.П. Уроки Чернобыля: радиация, жизнь, здоровье. – Киев: Знание, 1989.
10. Моисеев А.А., Иваков В.И. Справочник по дозиметрии и радиационной гигиене. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
11. Люцко А.М., Ролевич И.В., Тернов В.И. Выжить после Чернобыля. – Мн.: Выш. школа, 1990.
12. Постник М.И. Экологическая и радиационная безопасность: Учеб. пособие для вузов. – Мн.: Ин-т современных знаний, 1998.
13. Дараткевіч М.П., Гапановіч Л.Б. Асновы радыяцыйнай бяспекі: Вучэб. дапаможнік. – Мн.: Выш. школа, 1995.
14. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
15. Лыч Г.М., Патеева З.Г. Чернобыльская катастрофа: Социально-экономические проблемы и пути их решения. – Мн., 1999.
16. Лисовский Л.А. Радиационная экология и радиационная безопасность. – Мн., 1997.
17. Закон Республики Беларусь от 23 ноября 1993 г. № 2583-ХП "О санитарно-эпидемическом благополучии населения". – Ведомости Вярхоўнага Савета Рэспублікі Беларусь. – 1993. – № 36. – С. 451.
18. Закон Республики Беларусь от 5 января 1998 г. № 122-З "О радиационной безопасности населения". – Ведомости Нацыянальнага сходу Рэспублікі Беларусь. – 1998. – № 5. – С. 25.
19. О введении в действие гигиенических нормативов. Постановление Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 25.01.2000 г. №5.
20. Национальный реестр правовых актов РБ. – 2000. – № 35.
21. Национальный реестр правовых актов РБ. – 2002. – № 35.

Учебное издание

Автор: Виталий Геннадьевич Залесский

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Конспект лекций для студентов нетехнических специальностей

Подписано в печать 23.12.02 Формат 60x84 1/16 Печать офсетная

Усл. печ. л. 3,82 Уч.-изд. л. 9,12 Тираж 150 Заказ 15 Бесплатно

Отпечатано на ротапринте УО "ПГУ"

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29