

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования «Витебский государственный
университет имени П.М. Машерова»
Кафедра экологии и географии

РАДИАЦИОННАЯ ЭКОЛОГИЯ

Курс лекций

*Витебск
ВГУ имени П.М. Машерова
2023*

УДК 504.61(075.8)
ББК 28.080.116.38я73
Р15

Печатается по решению научно-методического совета учреждения образования «Витебский государственный университет имени П.М. Машерова». Протокол № 7 от 26.04.2023.

Составитель: доцент кафедры экологии и географии ВГУ имени П.М. Машерова, кандидат биологических наук **А.А. Лакотко**

Р е ц е н з е н т :
профессор кафедры фундаментальной и прикладной биологии
ВГУ имени П.М. Машерова,
доктор биологических наук, доцент *Д.Д. Жерносеков*

Р15 **Радиационная экология : курс лекций / сост. А.А. Лакотко. –**
Витебск : ВГУ имени П.М. Машерова, 2023. – 110 с.
ISBN 978-985-30-0063-4.

Курс разработан на основе модульной технологии. Содержит основные учебные элементы, в которых изложены теоретические и практические основы дисциплины, приведены темы изучаемого курса, рефератов и вопросы к итоговому зачету.

Предназначен для студентов специальности 1-33 01 01 Биоэкология, преподавателей и специалистов.

УДК 504.61(075.8)
ББК 28.080.116.38я73

ISBN 978-985-30-0063-4

© ВГУ имени П.М. Машерова, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Общие сведения о радиационной экологии	4
Модуль 1. Физические основы радиоэкологии	5
1.1. Явление радиоактивности	5
1.2. Активность	8
1.3. Виды ионизирующих излучений	9
1.4. Характеристики ионизирующих излучений. Единицы измерения излучений	13
Тесты и задания для контроля результатов обучения	19
Модуль 2. Радиационно-экологические характеристики естественных и искусственных	20
2.1. Космические лучи	21
2.2. Геологические источники естественной радиации	23
2.3. Техногенно измененный естественный радиационный фон	29
2.4. Радиоактивные источники, используемые в медицине ..	31
2.5. Ядерные взрывы	33
2.6. Атомная энергетика	34
2.7. Профессиональное облучение	37
Тесты и задания для контроля результатов обучения	38
Модуль 3. Миграция радионуклидов в экосистемах	39
3.1. Воздействие радионуклидов на биосферу	40
3.2. Поведение радионуклидов в почве	42
3.3. Радионуклиды в водных экосистемах	47
3.4. Воздушный перенос радионуклидов	50
3.5. Воздействие радионуклидов на растительность	54
3.6. Влияние радионуклидов на диких животных	58
3.7. Воздействие радионуклидов на агроэкосистемы	62
3.8. Радионуклиды в продуктах питания	67
3.9. Этапы действия ионизирующих излучений	71
3.10. Действие доз радиации	77
3.11. Действие инкорпорированных радионуклидов	86
3.12. Способы защиты человека от радиации	91
Тесты и задания для контроля результатов обучения	98
Вопросы к зачету	99
Примерные темы рефератов	100
Словарь понятий (термины, определения, используемые сокращения)	101
Литература	108
Приложение. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева ..	109

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИАЦИОННОЙ ЭКОЛОГИИ

Более 1 млрд лет отделяет нас от эры возникновения первых живых организмов. На заре своего возникновения простейшие формы жизни существовали, по-видимому, в сильно радиоактивной среде. Высокий уровень радиации изменил структуру их молекул и сыграл важную роль в биологической эволюции на Земле. Благодаря распаду ядер радиоактивных элементов снижается уровень радиации на земле.

Однако в XX–XXI веках все более существенный вклад в радиационную обстановку вносят антропогенные радиоактивные вещества. Продолжает неуклонно развиваться атомная энергетика. В странах мира сейчас работает около 500 атомных реакторов, но пока еще не исключены аварийные ситуации. Об этом же свидетельствуют более 150 аварий на предприятиях атомной энергетике в 141 стране мира, а также 715 испытаний ядерного оружия, приведших к загрязнению внешней среды на значительной части планеты. Огромную потенциальную экологическую опасность представляют захоронения радиоактивных отходов в морях Мирового океана, которые производили в XX веке США, СССР, Великобритания, Франция, Бельгия, Нидерланды, Швеция, Италия, Германия, Швейцария. Данная обстановка способствует глобальному повышению радиационного фона на Земле.

За всю историю изучения радиоактивных веществ и источников ионизирующих излучений, а также их влияния на живые организмы, включая человека, претерпели изменения отдельные принципы и подходы, исключались ранее используемые и вводились новые единицы измерения радиоактивности и доз излучения.

Радиоэкология – раздел экологии, изучающий концентрацию и миграцию радиоактивных нуклидов в биосфере, влияние ионизирующих излучений на организмы, их популяции и сообщества.

Целью преподавания дисциплины является получение студентами научно обоснованной системы сведений о механизмах биологического действия радиации и путях минимизации негативных последствий его воздействия на биосферу.

Модуль 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЭКОЛОГИИ

Одним из основных вопросов, представляющим научный, практический и экономический интерес, является влияние ионизирующих излучений на живые организмы и окружающую среду. К сожалению, достоверная научная информация по этому вопросу часто не доходит до населения.

Радиация действительно смертельно опасна. При больших дозах вызывает серьезные поражения тканей, а при малых может вызвать рак и инициировать генетические дефекты, которые могут проявляться у ближайших и отдаленных потомков человека и животных, подвергшихся облучению. Однако, для основной массы населения наиболее опасные источники радиации – не те, о которых больше всего говорят. Наибольшую дозу облучения человек получает от естественных источников радиации. Радиация, связанная с техногенной деятельностью, составляет лишь малую долю радиации, получаемую человеком. Кроме того, такие формы повседневной деятельности, как сжигание угля и использование воздушного транспорта, в особенности же постоянное пребывание в хорошо герметизированных помещениях могут привести к значительному увеличению уровня облучения за счет естественной радиации. Резерв уменьшения радиационного облучения – правильная и своевременная организация мер по определению радиационной ситуации.

1.1. Явление радиоактивности

Все вещества состоят из атомов и молекул. Атом – наимельчайшая частица химического элемента, которая сохраняет все его свойства. В 1911г. – Э. Резерфорд установил строение атома («*атомос*» – по гречески *неделимый*). До XIX века атом считался неделимым. Однако, строение атома подобно строению солнечной системы: вокруг ядра, состоящего из протонов и нейтронов движутся электроны*. Резерфорд считал ядро неделимым, однако в последствии было установлено, что не только ядро состоит из протонов и нейтронов, но и они в свою очередь делятся на более мелкие частицы – кварки. 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.

Общее название протонов и нейтронов – *нуклоны*. Ядро в 100 000 раз меньше размеров самого атома, но $\rho_{\text{ядра}}$ значительно больше общей плотности атома, поэтому $M_{\text{ядра}} \approx M_{\text{атома}}$, хотя $d_{\text{ядра}} = 10^{-15}$ м, а $d_{\text{атома}} = 10^{-10}$ м. Протоны и нейтроны относятся к разряду элементарных частиц, их основные

* В состав атома водорода входит только один электрон.

характеристики: q , m , устойчивость. $M_{\text{я}}$ и элементарных частиц измеряют в атомных единицах массы (а.е.м.).

Принято, что $1 \text{ а.е.м.} = 1/12 M_{\text{изотопа}} C_{12} = 1,667 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$.

Протоны – принадлежат к классу устойчивых стабильных частиц, которые являются положительно заряженными. Число протонов в ядре определяет к какому химическому элементу относится данный атом: Н – 1; О – 8; U – 92. В каждом атоме число электронов в точности равно числу протонов в ядре. Каждый электрон несет отрицательный заряд, равный по абсолютной величине заряду протона, так что в целом атом нейтрален.

Нейтроны – незаряженные частицы в свободном состоянии неустойчивы (существуют 11–16 сек). В ядре делаются устойчивыми, число их может быть различно (в отличии от протонов ядре). $M_N = 1,00897 \text{ а.е.м.} \approx M_P = 1,00758 \text{ а.е.м.}$ и в 1840 раз больше M_e (массы электрона).

Сумма всех протонов и нейтронов в ядре – это целое число и называется – массовое число. Массовое число записывают слева вверху, а заряд ядра слева внизу. Например: ${}_{11}^{22}\text{Na}$ – это значит у натрия массовое число 22, а заряд 11, т.е. в нем 11 протонов и 11 нейтронов.

Атомы, которые имеют ядра с одинаковым количеством протонов но с разным числом нейтронов (т.е. атомная единица разная, а заряд один) являются разновидностями одного и того же элемента – **изотопы**.

Различают устойчивые (нерадиоактивные, стабильные) и (неустойчивые (радиоактивные, нестабильные) изотопы. Вторые могут распадаться и превращаться в другие элементы.

Нуклид – это ядро атома с определенным количеством протонов и нейтронов, которые характеризуются массовым числом и порядковым атомным номером. Термин «нуклид» обычно используют в тех случаях, когда рассматриваются атомы разных химических элементов ($Cs-137$, $U-235$, $I-131$) – нуклиды записываются двумя любыми параметрами из трех: $A=Z+N$ (атомная масса = заряд ядра + число нейтронов) или $Z=A-N$ (для тория-90 (${}_{90}^{234}\text{Th}$): $90=234-144$).

Под **ядерной энергией** требуется понимать внутреннюю энергию ядер, которая освобождается при ядерных реакциях. Для освобождения внутриядерной энергии необходимо создать такие реакции, при которых будет изменяться структура самих атомных ядер, т.е. образуются ядра новых химических элементов.

Ядерные протоны и нейтроны мощно связаны между собой ядерными силами притяжения, удерживающие нуклоны в ядрах. Энергия связи частиц в ядрах составляет несколько МэВ (мега электрон-вольт). Установлено, что ядерные силы, действующие в парах ядерных частиц (протон-протон, протон-нейтрон, нейтрон-протон) – равны и не зависят от заряда частиц. Характерная особенность ядерных сил заключается в том, что они достигают очень большой величины на малых удалениях от ядра (размер $9 \cdot 10^{-15} \text{ м}$).

При увеличении расстояния ядерные силы резко уменьшаются. При этом, одноименно заряженные протоны отталкиваются, однако, в большинстве элементов силы притяжения больше сил отталкивания.

Однако, у тяжелых элементов, например торий-234, цезий-137 – электростатические силы отталкивания больше сил притяжения. В этом случае начинаются процессы самопроизвольного распада ядер с менее устойчивого положения в более устойчивое: – это и есть радиоактивность.

Радиоактивность – самопроизвольное преобразование радионуклидов в другие нуклиды, которое сопровождается ионизирующим излучением вместе с переносом энергии. Другими словами радиация – это ионизирующее излучение плюс перенос энергии.

Радионуклиды – это неустойчивые нуклиды, способные к самопроизвольным ядерным реакциям. Иначе радионуклид – это нуклид, обладающий радиоактивностью.

Впервые явление радиоактивности было открыто в 1896г. французским ученым Анри Беккерелем, который открыл излучение урана (положил в ящик стола фотопластинки и придавил их породой, содержащей уран, затем проявил). В 1898г. польские ученые Мария Складовская-Кюри и ее муж Пьер Кюри установили, что уран после излучения превращается в другие элементы: полоний и радий («испускающий лучи»). Этими учеными и было введено понятие радиоактивности.

Радиоактивность ядер, существующих в природных условиях, называется **естественной радиоактивностью**. Различают также **искусственную радиоактивность**, которая возникает в результате ядерных реакций. Принципиальной разницы между искусственной и естественной радиоактивностью нет. Закон радиоактивного распада в обоих случаях одинаков.

Начиная с номера 82 таблицы Д.И. Менделеева (прил.) ядра всех изотопов химических элементов нестабильны и распадаются, несмотря на избыток нейтронов, т.е. являются радиоактивными. Однако, имеются и легкие естественно радиоактивные ядра. Это изотопы калия-40, углерода-14, трития (${}^3_1\text{H}$).

Если поместить радиоактивное вещество в свинцовый контейнер с отверстием сверху, который находится между полюсами магнита, то положительно заряженные частицы (+) отклоняются на север – протоны и нейтроны (α -частицы ядра), а отрицательно заряженные (-) на юг – электроны (β^- - частицы). Радиоактивному веществу обычно присущ только один вид излучения: $\text{Th-234}(\beta)$, $\text{U-238}(\alpha)$, $\text{U-234}(\alpha)$, $\text{Th-230}(\alpha)$, $\text{Pb-214}(\beta)$. Излучение неотклоняющееся в магнитном поле (нейтральное) – γ -излучение.

Одновременно – α , β и γ -излучения бывают только, если вместе находятся сразу несколько радиоактивных веществ.

1.2. Активность

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

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.1)$$

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. 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. 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. Как следует из закона радиоактивного распада, постоянная распада и период полураспада соотносятся как:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (1.2)$$

Периоды полураспада радиоактивных элементов изменяются в широких пределах – от миллионных 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 (ЧАЭС), 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.

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:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \quad (1.3)$$

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 1 г ${}^{226}_{88}\text{Ra}$: 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), 1 г ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ ($T_{1/2} = 1600$ 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*);
- удельная объемная активность, определяющая активность единицы объема радиоактивного препарата: $A_v = \frac{A}{\Delta V}$, *Бк/м³* (*Бк/л*, *Ки/л*);
- удельная поверхностная активность, характеризующая активность единицы поверхности: $A_s = \frac{A}{\Delta S}$, *Бк/м²* (*Ки/км²*).

1.3. Виды ионизирующих излучений

Ионизирующее излучение (ИИ) – излучение, которое создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных

частиц в веществе и образуется при взаимодействии со средой ионов различных знаков*.

По своей природе различают два вида радиоактивных излучений:

– Корпускулярное – это поток частиц с массой отличной от нуля (α -частицы, электроны, протоны, нейтроны).

– Волновое (фотонное, квантовое) – это электромагнитное излучение (ЭМИ), причем γ (гамма)-излучение – ЭМИ длинноволновое, рентгеновское излучение – ЭМИ коротковолновое; косвенно ионизирующее излучение (характеристическое излучение, тормозное излучение, аннигиляционное излучение).

Энергия электромагнитного поля излучается не непрерывно, а отдельными порциями – квантами (фотонами). Поэтому ЭМИ – это поток квантов или фотонов.

Виды излучений отличаются по проникающей и ионизирующей способности.

Проникающая способность излучения определяется по проникновению в массу (на глубину) и может быть выражена длиной пробега.

Длина пробега – это расстояние, которое проходит частица от места образования, до места потери ею энергии (или глубина проникновения).

Ионизирующая способность излучения – обусловлена ионизацией атомов и молекул в результате взаимодействия частиц со средой (ионизирующее излучение) – характеризуется удельной ионизацией.

Удельная ионизация – это количество пар ионов, которые возникают на 1 см пути пробега частицы.

1.3.1. α - излучение

Возникает при самопроизвольной ядерной реакции. В результате этой реакции от атомного ядра отщепляется частица ядерного вещества, которая состоит из двух протонов и двух нейтронов – ядро *He* (гелия). Это получается следующим образом, например, внутри атомного ядра с массовым числом > 92 2 протона и 2 нейтрона за очень короткое время взаимодействия (10^{-21} с) объединяются и образуют α -частицу. Если энергии α -частицы хватает, чтобы преодолеть ядерные силы, то она вылетает из ядра – получается **α -излучение**.

При α -распаде исходное (материнское) ядро радионуклидов преобразуется в дочернее ядро новых элементов, атомный номер (заряд) которых меньше, чем в исходном элементе на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы (это обычно элементы конца таблицы Менделеева): ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{86}^{222}\text{Rn}$.

* Видимый свет и ультрафиолетовое излучение не относят к ионизирующим излучениям.

Скорость вылета α -частиц 10 000 – 25 000 км/с, а длина пробега 3–7 см (воздух), 0,05 мм (в биотканях). α -частицы, вылетающие из ядер попадают в окружающее их вещество и их энергия идет на ионизацию атомов этого вещества.

При этом атомы возбуждаются, это значит электроны атома переходят с более близкой от ядра оболочки на более далекую \rightarrow атом превращается в положительно заряженный ион. Оторванный от атома электрон присоединяется к внешней оболочке другого атома – получается отрицательно заряженный ион.

α -частицы имеют большую ионизирующую способность. На пути пробега их в воздухе образуется 100–300 тыс. пар ионов. Энергия α -частиц радионуклидов составляет 3–9 МэВ, а для образования 1 пары ионов требуется 30 эВ \Rightarrow α -частица с энергией 6М эВ на своем пути образует 200000 пар ионов в воздухе.

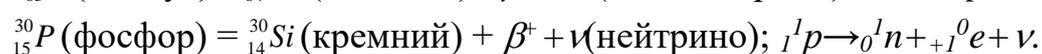
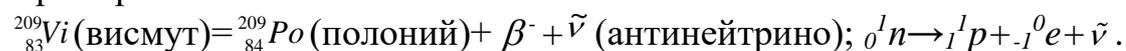
1.3.2. β -излучение

β -излучение является потоком электронов β^- или позитронов β^+ (похож на электрон, но со знаком «+» - возникает при позитронном распаде $m_{\beta^+} = m_e$). При β -распаде из ядра вылетает электрон или позитрон. Электроны и позитроны не входят в состав ядра, а образуются при распаде ядра.

Так при электронном β^- -распаде один из нейтронов ядра превращается в протон, электрон и нейтральную частицу (антинейтрино). Протон остается в ядре, а электрон и антинейтрино вылетают из него. При этом общая численность нуклонных частиц (массовое число) в новом ядре остается тоже, как и в исходном, а количество протонов, т.е. заряд и номер увеличивается на 1 ед.

При позитронном β^+ -распаде один из ядерных протонов преобразуется в нейтрон, позитрон и нейтрино. Нейтрон остается в ядре, а позитрон и нейтрино вылетают из него, т.е. заряд уменьшается на 1 единицу.

Примеры:



Длина пробега β -частиц в воздухе достигает 1м и больше (до 20 м), проникают в ткани организма на глубину 0,3–0,5 см. Средняя энергия, образующихся частиц соответствует скорости 10000–25000 км/с (максимальная скорость распространения β -частиц может достигать $1-3 \cdot 10^5$ км/с). Ионизирующая способность β -частиц – от 1000 до 5000 пар ионов. β -частицы относятся к классу легких ядерных частиц, масса их примерно в 7000 раз < массы α -частиц.

1.3.3. Нейтронное излучение

Нейтроны вылетают из ядер в момент ядерных реакций, например при делении ядер урана или плутония. Нейтроны имеют наибольшую проникающую способность в вещество.

Длина пробега n-частицы несколько километров. Электронейтральные нейтроны при прохождении через вещество (через тело человека) взаимодействуют не с заряженными электронами, а с ядрами атомов вещества, передавая им энергию. Таким образом, образуются заряженные частицы, которые осуществляют ионизацию среды. Характерной особенностью нейтронного излучения является его способность преобразовывать атомы устойчивых элементов в их радиоактивные изотопы – что увеличивает опасность нейтронного заражения.

Средства защиты: применяются массивные железобетонные стены и защитные экраны из кадмия и бора.

1.3.4. γ -излучение

γ -излучение является потоком электромагнитных волн (ЭМВ) – квантов, которые излучаются в процессе радиоактивного распада при изменении энергетического состояния атомных ядер. Энергия γ -излучения находится в пределах от 10 кэВ до 10 МэВ. γ -лучи не имеют заряда, следовательно, в электрическом и магнитном поле не отклоняются. γ -излучение распространяется прямолинейно и равномерно во все стороны от источника со скоростью света в вакууме (300000 км/с). Может вызвать излучение непосредственно или передавая энергию электронам. Энергетический спектр дискретен. Длина пробега γ -излучения более 100 метров и в отличие от β и α -частиц проходит сквозь тело человека.

2.3.5. Рентгеновские излучения (р.и.)

р.и. – это квантовые ЭМИ с длиной волн 10^{-9} – 10^{-12} м. Излучение с длиной волны $0,2 \cdot 10^{-9}$ м – условно называют «мягким» р.и., а с длиной волны меньше $0,2 \cdot 10^{-9}$ м – «жестким» р.и. Длина волны – расстояние, на которое излучение распространяется за один период колебания. р.и., как и всякое ЭМИ распространяется со скоростью света (300 000 км/с). Энергия р.и. обычно не превышает 500 кэВ.

2.3.6. Тормозное, характеристическое и аннигиляционное излучения

Тормозное излучение – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц.

Характеристическое излучение – фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атома.

Аннигиляционное излучение – фотонное излучение, возникающее в результате аннигиляции частицы и античастицы (например: позитрона и электрона).

Воздействие тормозного, характеристического и аннигиляционного излучений на компоненты экосистем аналогично γ - излучению.

1.4. Характеристики ионизирующих излучений. Единицы измерения излучений

Для установления закономерностей распространения и поглощения ионизирующих излучений в среде, в том числе и в биологической ткани, введены следующие основные характеристики ионизирующих излучений: энергия частиц и гамма-квантов, плотность потока частиц (фотонов), флюенс частиц (фотонов), керма, экспозиционная доза фотонного излучения, поглощенная доза, эквивалентная доза, эффективная доза, коллективная доза, ожидаемая(полная) доза и др.

2.4.1. Энергия ионизирующих излучений

Энергия частиц или гамма-квантов (E) – выражается в Джоулях и электрон-вольтах (эВ). Величина Джоуль используется в системе СИ, а электрон-вольт(эВ) – внесистемная единица*.

Мощность энергии ИИ в системе СИ измеряется в ваттах. 1 Вт = 1 Дж/сек – соответствует такой мощности энергии И.И., при которой через данную поверхность за 1с. проходит излучение с энергией 1 Дж.

1электрон-вольт (эВ) – соответствует энергии, которую приобретает электрон при движении в электрическом поле между потенциалами с напряжением 1В на пути в 1 см.

1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж = $1,6 \cdot 10^{-12}$ эрг. Справка: 1 Дж = 0,2388 кал = $6,25 \cdot 10^{18}$ эВ.
1 кал. $\approx 4,2$ Дж (4,188).

1 кэВ = 1000 эВ; 1 МэВ = $1 \cdot 10^6$ эВ; 1 ГэВ = $1 \cdot 10^9$ эВ.

1.4.2. Плотность потока и флюенс частиц

Плотность потока частиц (гамма-квантов) ϕ – выражается числом частиц (гамма-квантов), падающих на единицу поверхности в единицу времени. Поверхность расположена нормально к направлению движения частиц. Единица измерения – частица/м²с.

Флюенс частиц (фотонов) Φ – характеризует полное число частиц, прошедших через единичную поверхность за все время облучения:

$$\Phi = \phi \cdot t. \quad (1.4)$$

Единица измерения флюенса – частица/м².

* Многие приборы, использующиеся сегодня, отградуированы во внесистемных единицах. С 1990 г. Международной комиссией радиационной защиты (МКРЗ) установлен переходный период применения внесистемных единиц (электрон-вольт, Рентген, рад).

1.4.3. Керма

Керма – (аббревиатура английских слов в переводе обозначает: «кинетическая энергия ослабления в материале»). Характеристика используется для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений. Керма это отношение суммы первоначальных кинетических энергий dE_k всех заряженных частиц, образованных косвенно ИИ в элементарном объеме к массе dm вещества в этом объеме:

$$K=dE/dm. \quad (1.5)$$

Единицы измерения в СИ и внесистемная: *Грей* и *рад* соответственно.

Керма введена для более полного учета поля излучения, в частности плотности потока энергии и используется для оценки воздействия на среду косвенно ионизирующих излучений.

1.4.4 Экспозиционная доза

Доза - количество поглощенного излучения или энергии веществом.

Чем большую энергию радиоактивные излучения передают тканям и органам, тем они наносят больший вред человеку. Одной из задач радиационной экологии является определение количественной связи между уровнем воздействия и теми эффектами в экосистемах, которые обуславливает ИИ.

γ или рентгеновское излучение (фотонное) создает в воздухе определенное количество ионов. Для них и вводится понятие экспозиционная доза (ЭД)*.

Экспозиционная доза – является количественной характеристикой поля И.И., которая зависит от величины ионизации сухого воздуха при атмосферном давлении (760 мм.рт.ст.=101325 кПа). Т.е. ЭД – это относительная величина: (количество зарядов всех ионов одного знака (количество пар ионов), образованных на единицу массы воздуха, заключенной в этой единице объема:

$$D_{\text{экс}} = \frac{dq}{dm}, \text{ Кл/кг} \quad (1.6)$$

ЭД используют для оценки воздействия γ или рентгеновского излучения на местности, в помещениях (жилых, служебных).

В системе СИ единицей измерения ЭД является **Кл/кг**. 1 Кл/кг – равен экспозиционной дозе, при которой ИИ образует (ионизирует) в объеме сухого атмосферного воздуха массой 1кг ионы с общим зарядом 1 Кл.

Внесистемной единицей измерения ЭД является Рентген (**P**) – такая доза ИИ (γ или рентгеновского излучения) при которой в 1см³ воздуха (m=0,001293г при н.у. 0⁰С, 1атм) образуется 2,08·10⁹ (2 млрд.) пар ионов.

1 P=2·10⁹ пар ионов/см³; 1 мкP=1·10⁻⁶ P; 1 мP=1·10⁻³ P.

* α , β -излучения поглощаются воздухом и одеждой, поэтому ЭД для их оценки не используется.

Соотношение между старой и новой единицами экспозиционной дозы:
 $1 P=2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$; $1 \text{ Кл/кг}=3,876 \cdot 10^3 P$ (\approx новая в 4000 раз больше).

Мощность экспозиционной дозы – это экспозиционная доза в единицу времени

$$X=dD_{\text{эксп}}/dt \quad (1.7)$$

Единицей измерения мощности экспозиционной дозы в системе СИ является $A/\text{кг}$. $1 A/\text{кг}=1,397 \cdot 10^7 P/\text{ч}$. $1 P/\text{ч}=7,16 \cdot 10^{-8} A/\text{кг}$.

Внесистемные единицы измерения: $P/\text{ч}$; $P/\text{мин}$; $P/\text{с}$.

1.4.5. Поглощенная доза

Экспозиционная доза характеризует поле радиации в каком-то объеме (т.е. количество ионов в единице объема). Влияние на организм оказывает только та часть радиоактивного излучения, которая поглощается организмом (объектом). Таким образом, более точно определять воздействие излучений на живой организм с помощью поглощенной дозы.

Изменения в организме, которые происходят под воздействием излучений (α , β , γ или рентгеновского излучения) зависят от величины поглощенной энергии излучения.

Поглощенная доза (ПД) – это количество средней энергии любого вида излучений, поглощенное единицей массы вещества.

Единицей измерения в системе СИ является **Грей (Гр)***. $1 \text{ Гр}=1 \text{ Дж/кг}$.
 $1 \text{ сГр}=1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$ (сантигрэй); $1 \text{ мГр}=1 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$; $1 \text{ мкГр}=1 \cdot 10^{-6} \text{ Гр}$.

1 Гр – это такая поглощенная доза излучения, при которой 1 кг массы облучаемого вещества передается энергия ионизирующего излучения в 1 Дж .

$$D_{\text{погл}}=\frac{dE}{dm}, \text{ Дж/кг} \quad (1.8)$$

Внесистемной единицей является **рад**. $1 \text{ рад}=100 \text{ эрг/г} = 10^{-2} \text{ Дж/кг}$.

$1 \text{ Гр}=100 \text{ рад}$; $1 \text{ рад}=0,01 \text{ Гр}=10^{-2} \text{ Дж/кг}$.

Применяется примерный перевод из экспозиционной дозы в поглощенную, при котором поглощенная доза излучения в веществе с известным химическим составом может быть рассчитана по его экспозиционной дозе, путем умножения последней на коэффициент дозы (κ_d):

$$ПД=\mathcal{E}D \cdot \kappa_d. \quad (1.9)$$

Для неорганического вещества (или воздуха): $\kappa_d=34,1 \text{ Гр/Кл/кг}$ ($0,88 \text{ рад/P}$);

Для биологического вещества: $\kappa_d=37,2 \text{ Гр/Кл/кг}$ ($0,96 \text{ рад/P}$).

Таким образом в среднем, для компонентов экосистем, облучаемых рентгеновским или γ -излучением внесистемный $1 P \approx 0,93 \text{ рад}$.

* Названа в честь английского радиобиолога П. Грэя.

Однако, величина поглощенной дозы (Gr) не учитывает, что при одинаковой поглощенной дозе α -излучение гораздо опаснее β -излучения или γ -излучения.

Мощность поглощенной дозы – отношение приращения поглощенной дозы $dD_{погл}$ за время dt :

$$P = dD_{погл}/dt \quad (1.10)$$

Единицы измерения мощности поглощенной дозы: рад/с, Гр/с, рад/ч, Гр/ч и т.д.

1.4.6. Эквивалентная доза

При одной и той же поглощенной дозе разные виды излучений оказывают неодинаковые влияния на биологические объекты. Таким образом, радиобиологический эффект зависит не только от поглощенной дозы, но и от удельной ионизации (от количества пар ионов, образующихся на одинаковом промежутке длины пробега) либо от линейной передачи энергии (ЛПЭ).

Поэтому, при одной и той же поглощенной дозе влияние излучений тем больше, чем сильнее (выше) созданная этим излучением ионизация среды (вещества). Таким образом биологический эффект зависит не только от полученной дозы но и от вида ИИ. Для сравнения разных видов излучений введена величина – **относительная биологическая эффективность (ОБЭ)**, которая указывает во сколько раз биологический эффект при воздействии этого вида излучений мощнее чем действие стандартного излучения на живой объект (живая клетка, весь организм).

$$ОБЭ = D_o/D_x, \quad (1.11)$$

где D_o – образцовое излучение, вызывающее радиобиологический эффект.

В качестве стандартного излучения принято рентгеновское излучение с энергией $E=188-200$ кэВ.

Регламентированные значения ОБЭ установленные для контроля степени радиационной безопасности при хроническом облучении называют **коэффициентом качества излучения – $K_{изл}$** .

$K_{изл}$ – это коэффициент, который показывает во сколько раз данный вид излучений более биологически опасен, чем рентгеновское или γ -излучение при одинаковой поглощенной дозе.

Рентгеновское и γ -излучение примерно одинаково влияют на живой организм $K_{р.и.,\gamma}=1$.

Для α -излучения $K_\alpha=20$, это означает, что α -излучение, которое попадает внутрь организма в 20 раз более опасно при одинаковой поглощенной дозе по сравнению с γ и р.и.

Чтобы избежать ошибок в степени радиационной опасности облучения различных ИИ Требуется умножить $ПД$ на $K_{изл}$, а полученную таким образом дозу называют *эквивалентной* ($Э_{экв}Д$).

$$D_{эkv} = ПД \cdot K_{изл}. \quad (1.12)$$

Таблица 1.1 – Коэффициенты качества излучения

Вид излучения	$K_{изл}$
Р.и., γ , электроны, позитроны	1
Протоны с энергией ≤ 10 мэВ	10
Нейтроны с энергией ≤ 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1...10мэВ	10
α -изл. с энергией ≤ 10 МэВ	20
Тяжелые ядра отдачи	20

Единица измерения эквивалентной дозы в системе СИ для рентгеновского излучения и γ -излучения – *Зиверт* ($Зв$), названа в честь шведского физика Р.Зиверта.

Зиверт ($Зв$) – это единица поглощенной дозы, умноженной на коэффициент качества излучения ($K_{изл}$). При помощи $Э_{экв}Д$ учитывают неодинаковую радиационную опасность для живого организма разных видов ИИ.

Соотношения между единицами измерения: $1 Зв = 1 Гр \cdot К = 1 Дж/кг \cdot К$; $1 мЗв = 1 \cdot 10^{-3} Зв$; $1 мкЗв = 1 \cdot 10^{-6} Зв$.

Внесистемная единица: $1 бэр$ – биологический эквивалент рада – это единица эквивалентной дозы любого вида ИИ в биологических тканях, которая создает такой же биологический эффект как и поглощенная доза в $1 рад$ р.и. или γ -излучения с энергией γ -квантов 200кэВ.

$1 бэр = 1 \cdot 10^{-2} Зв$, т.к. $1 рад = 0,01 Гр = 10^{-2} Дж/кг$. $1 Зв = 1 \cdot 10^2 бэр$.

Эквивалентная доза излучения является основной величиной, которая определяет уровень радиационной опасности при хроническом облучении человека в малых дозах до $0,25 Зв$ ($25 бэр$). При кратковременном воздействии в этой области малых доз (до $25 бэр$) $ЭквД$ зависит только от $ПД$ и $K_{изл}$.

Для $ПД$ и $ЭквД$ также как и для экспозиционной дозы вводится понятие мощности дозы – т.е. изменение дозы (приращение) в единицу времени.

Известно, что различные части тела человека по разному реагируют на радиоактивное облучение, поэтому для более точной характеристики ИИ на живой организм вводятся понятия – *эффективной, коллективной и полной дозы*.

1.4.7 Эффективная, коллективная и полная дозы

Если принять за $1,0$ величину безопасной дозы полученной человеком при равномерном облучении всего организма (тела) в целом, то для отдельных органов Международным Комитетом радиационной защиты введены уточняющие коэффициенты (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2 – **Весовые коэффициенты**

Орган	ω_i (весовой коэффициент, доля)
Половые органы	0,2
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Желудок	0,12
Легкие	0,12
Щитовидная железа	0,05
Молочная железа	0,05
Другие ткани, органы	0,22
Сумма всех ω_i	1

Органы и биологические ткани имеют разную чувствительность на действие ионизирующих излучений, т.е. при одинаковой эквивалентной дозе облучения возникновение рака в легких более вероятно, чем в щитовидной железе, а облучение половых желез ведет к генетическим изменениям, которые передаются из поколения в поколение.

Эффективная (эффективная эквивалентная) доза используется в случае неравномерного облучения различных тканей человека. Для определения ее величины вводится коэффициент радиационного риска (другие названия: взвешивающий фактор, весовой коэффициент) – ω .

ω – это величина, которая учитывает разную радиочувствительность органов и тканей человека при облучении. Определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий ($\omega_i \uparrow$ следовательно растет риск заболеваний раком и т.д.).

Эффективная эквивалентная доза (Эфф.ЭквД) – отражает суммарный эффект облучения для организма. (Единицы измерения те же, что и для эквивалентной дозы (Зв, бэр).

$D_{эфф.экв.} = \sum_{i=1}^n D_{экв} \cdot \omega_i$ – есть сумма эквивалентных доз каждого органа, умноженных на соответствующий коэффициент (сумма весовых коэффициентов всех органов – $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$).

Поглощенная, эквивалентная и эффективная эквивалентные дозы – описывают только индивидуально получаемые дозы.

Коллективная эффективная эквивалентная доза – это сумма индивидуальных эффективных эквивалентных доз (или сумма *Экв.Д*), полученная группой людей за определенный период:

$$D_{кол} = \sum_{i=1}^n D_{экв} \cdot N_i, D_{кол} = \sum_{i=1}^n D_{эфф.экв} \cdot N_i. \quad (1.13)$$

Единицей измерения коллективной эффективной эквивалентной дозы в системе СИ является **чел.-Зв (человеко-зиверт)**. Внесистемной единицей измерения является **человеко-бэр**. $100 \text{ чел.-бэр} = 1 \text{ чел.-Зв}$.

Коллективную дозу, также как и эффективную можно использовать только при получении малых инд. доз $\leq 0,25 \text{ Зв}$ (25 бэр).

При использовании коллективной дозы для оптимизации системы радиационной безопасности требуется учитывать условия ее формирования и связанную с ней среднюю дозу, которая определяет средний индивидуальный риск для данной профессиональной группы.

Коллективная доза в применении к региону называется – **региональной дозой**, а ко всему миру – **глобальной**. Коллективная доза в применении к популяции (животных) называется – **популяционной дозой**.

Ожидаемая (полная) доза – это коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают многие поколения людей от какого-либо радиоактивного источника за все время его дальнейшего существования.

Единицы измерения ожидаемой (полной) дозы те же что и для коллективной эффективной эквивалентной дозы. В системе СИ: **чел.-Зв (человеко-зиверт)**, а внесистемной единицей измерения является **человеко-бэр**. $100 \text{ чел.-бэр} = 1 \text{ чел.-Зв}$.

Тесты и задания для контроля результатов обучения

На оценки «4» и «5»

1. Что такое радиоактивность?
2. Состав атомного ядра?
3. Что такое ионизирующее излучение?
4. Дайте определение периода полураспада.
5. Перечислите основные характеристики ионизирующих излучений.

На оценки «6» и «7»

1. Дайте определение изотопов и радионуклидов.
2. Что такое активность?
3. Какие виды ионизирующих излучений вы знаете?
4. Поглощенная и экспозиционная доза.
5. Что такое 1 МэВ?
6. Что такое коэффициент излучения?

На оценки «8» и «9»

1. Перечислите внесистемные единицы измерения энергии ионизирующих излучений.
2. В чем заключается практическое значение закона радиоактивного распада?
3. Покажите соотношение между внесистемными и системными единицами измерения доз излучения.

4. Проникающая и ионизирующая способность излучения.
5. Эффективная эквивалентная доза.
6. Задача.

На оценку «10»

Необходимо показать отличные знания по всем вопросам тестирования, а также принять участие в исследовательской работе по темам модуля (написать реферативную работу).

Модуль 2

РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ РАДИАЦИИ

Основную часть облучения население земного шара получает от естественных источников радиации (примерно в пять раз больше, чем от искусственных). В тоже время, за последние полвека человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и начал использовать энергию атома в самых разных целях.

Среднегодовые эффективные эквивалентные дозы облучения, приходящиеся на каждого жителя Земли в *мЗв*:

А. естественные в сумме – 2 мЗв, в том числе:

- земного происхождения внутреннего облучения – 1,325 *мЗв*;
- земного происхождения внешнего облучения – 0,35 *мЗв*;
- космическое внешнее облучения – 0,3 *мЗв*;
- космическое внутренне облучение – 0,025 *мЗв*.

Б. искусственные в сумме – 0,43 мЗв, в том числе:

- источники, используемые в медицине – 0,4 *мЗв*;
- радиоактивные осадки – 0,02 *мЗв*;
- атомная энергетика – 0,001 *мЗв*.

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

Радиационный фон Земли складывается из естественного радиационного фона (**ЕРФ**), техногенно измененного естественного радиационного фона (**ТИЕРФ**) и искусственного радиационного фона (**ИРФ**).

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**.

2.1. Космические лучи

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации.

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. 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, отклоняющего заряженные частицы (из которых в основном и состоят космические лучи). 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. Уровень облучения растет с высотой, поскольку при этом под нами остается все меньше воздуха, играющего роль защитного экрана. Пример: Жители высокогорного города США Дэнвера, например, получают дозу радиации, примерно равную 0,9 мЗв в год.

В табл. 2.1 приведены некоторые дозы, получаемые человеком от космических излучений.

Экипажи пассажирских самолетов и пассажиры получают 30–50 мкЗв за 3,5 часа полета. Величина дозы зависит от высоты полета и скорости самолета (продолжительности полета) – на высоте 20000 м – 13 мкЗв/ч.

В момент вспышки на Солнце мощность эффективной эквивалентной дозы составляет от 4000 до 40 000 мкГр/ч (мкЗв/ч).

Таблица 2.1 – 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	–	0,7–0,9
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	–	–

2.2. Геологические источники естественной радиации

Естественный радиационный фон складывается из излучений от рассеянных в почве, воде, воздухе радионуклидов, возраст которых совпадает с возрастом планеты (примерно 4,5 млрд. лет). К таким радионуклидам относятся калий-40 (^{40}K), уран-238 (^{238}U), торий-232 (^{232}Th) и продукты распада тория и урана. Важными радионуклидами, определяющими уровень радиоактивности атмосферы являются радон-222 (^{222}Rn) и торон-220 (^{220}Tn)* и продукты их распада. Газ радон – сам продукт распада радия (^{226}Ra , ^{224}Ra). Вклад в естественный радиационный фон также вносят короткоживущие радионуклиды, образующиеся в верхних слоях атмосферы при взаимодействии газов стратосферы с потоком ядерных частиц высоких энергий, из разных областей Вселенной.

Первичным геологическим источником большинства радионуклидов фона являются верхние слои литосферы (граниты, сланцы, песчаники и др.), постоянное преобразование которых под воздействием сапрофитной микрофлоры почв, воды, воздуха, перепадов температур ведет к миграции излучателей в почву, растительность, животный мир (табл. 2.2).

Очевидно, что ведущим радионуклидом фона, определяющим радиоактивность растений и животных, уже по содержанию в исходном «депо» его миграции в экосистемах, является Калий-40 (^{40}K) - серебристо-белый металл, быстро реагирующий с кислородом, водой. Содержание радиоактивного калия в природной смеси изотопов (^{39}K , ^{40}K , ^{41}K) постоянно, независимо от звеньев миграции и составляет 0,0118 мас. %.

* Содержание ^{220}Tn в атмосфере значительно меньше, чем ^{222}Rn поэтому для удобства оба изотопа часто называют радоном.

Таблица 2.2 – Первичные источники основных радионуклидов естественного радиационного фона

Порода литосферы и тип почвы	Концентрация радионуклидов, Бк/кг		
	⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th
Граниты	999	54	0,81
Сланцы	703	0,440	0,044
Песчаники	570	0,020	0,010
Известняки	888	2,800	0,019
Сероземы	660	31	48
Черноземы	410	21	36
Серые лесные	370	17	27
Подзолистые	150	9	12
Торфяные	90	6	6
Усредненные данные по литосфере	370	26	26
Типичный диапазон колебаний	10–740	1–54	1–54

Соотношение содержаний $^{40}\text{K}/^{39}\text{K} = 1/85\ 000$. Удельная активность природного калия $8 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/г}$, или $29,6 \text{ Бк/г}$. В земной коре содержание радионуклидов достигает 3 мас. % (до $27 \text{ пкКи}^*/\text{г}$); в вулканических известковых породах – 5,1 мас. %; в почвах – 3,1 мас. %. В рационе питания человека содержание калия колеблется от 1,5 до 4,5 г/сут (от 0,12 до 3,6 нКи), в зависимости от состава питания. Наибольшее содержание ^{40}K регистрируется в бобовых культурах, до 370 Бк/г ; наименьшее – в зерновых, до $70 - 75 \text{ Бк/г}$. Содержания ^{40}K и ^{226}Ra в основных пищевых продуктах приведено в табл. 2.3, калия в организме человека – в табл. 2.4.

Таблица 2.3 – Содержание ^{40}K и ^{226}Ra в основных пищевых продуктах

Продукт	^{40}K , Бк/кг	^{226}Ra , Бк/кг
Хлеб: черный	66,6	0,096
белый	29,6	0,092
Картофель	107,3	0,35
Капуста	81,4	0,06
Молоко	44,4	0,01
Говядина	99,9	0,03
Свинина	74,0	0,05
Сельдь	77,7	0,12
Треска	103,6	0,15
Яйца, 10 шт.	-	0,05
Масло	3,7	0,01

Например, 1 г ^{40}K испускает 26,2 β-частиц с максимальной энергией 1,3 МэВ и 3,4 γ-кванта в секунду, взаимодействующих с веществом по типу фотоэффекта. Наибольшее биологическое значение природного калия в его смеси с излучателем заключается в обеспечении функций мембран клеток

* пкКи – пикоКюри. Множители приставки для образования кратных и дольных единиц.

(калий-натриевый ионный насос, передача нервного импульса, возбудимость нервных клеток). Поступая с продуктами питания и водой, элемент всасывается практически полностью.

Таблица 2.4 – Средняя концентрация, г/кг (числитель) и активность, Бк/кг (знаменатель), ^{40}K в организме человека

Объект исследования	Показатель	Объект исследования	Показатель
Тимус*	0,6/18	Сердце	2,1/63
Кожа	0,8/24	Печень	2,5/75
Щитовидная железа	1,2/36	ЦНС	2,9/87
Кишечник	1,2/36	Головной мозг	3,0/90
Тонкий кишечник	1,3/39	Мышцы скелетные	3,0/90
Кровь	1,6/48	Эритроциты	3,4/102
Легкие	1,9/57	Селезенка	3,1/93
Семенники	2,0/60	Красный костный мозг	4,0/121

Основными накопителями ^{40}K в организме являются, в убывающем порядке, эритроциты, нервная ткань (головной мозг), мышечная ткань, печень, легкие, кости (см. табл. 2.4). Изотоп ^{40}K не накапливается: время двукратного снижения его активности в организме от момента поступления за счет процессов распада и выведения $T_{эфф} = 58$ сут. Из организма взрослого человека ^{40}K выводится в три раза медленнее, чем вода. Средняя мощность поглощенной дозы ^{40}K составляет 170–190 мкГр (17–19 мрад/год).

Вторым, широко распространенным в земной коре, почве и дальнейших звеньях миграции радионуклидом фона является ^{239}U (в смеси с незначительным количеством ^{235}U и ^{234}U) – кальциеподобный белый серебристый металл, реагирующий с воздухом, водяными парами, кислотами, но не щелочами. В среде, как и кальций, встречается в минералах, с наибольшим содержанием в уранитах, карнотитах. Энергия распада невелика (1–1360 эВ), общее содержание урана в верхних (подпочвенных) слоях земной коры составляет примерно 10^{15} т ($2,4 \cdot 10^{-4}\%$), в морской воде – 10^{10} т ($3,13 \cdot 10^{-7}\%$). Фоновая удельная радиоактивность урана в среде составляет 0,33 мКи вещества.

Суточное поступление урана в организм человека колеблется в среднем от 1 до 10 мкг, достигая 300 мкг. Содержание урана в мягких тканях человека на территориях с нормальным радиационным фоном Земли чрезвычайно незначительно и составляет 0,33–0,99 фКи/г в мягких тканях и 0,7–8,9 фКи/г в костях. Дозы излучений, поглощенные тканями равны в среднем, 8,0 мкГр (0,03–0,8 мрад)/год.

* Вилочковая (зобная) железа, центральный орган иммунной системы.

Значительно большую роль в формировании фоновых лучевых нагрузок выполняет дочерний продукт распада ^{238}U – радий, отличающийся от урана большей химической активностью и соответственно большей подвижностью в звеньях миграции в среде. В отличие от ^{239}U дочерний продукт распада находится вне кристаллической решетки исходных минералов и легко переходит в воду. Наибольшее количество естественного излучателя характерно для воды с высоким природным содержанием в ней «родственных» элементов: кальция, стронция, бария.

Радий (Ra) – блестящий серебристый металл, быстро реагирующий с воздухом (кислородом), водой. Образует растворимые хлориды, бромиды, сульфиды, иодиды, а также ряд нерастворимых соединений (карбонатов, сульфидов, оксалатов). Все изотопы радия радиоактивны. Наиболее распространен долгоживущий изотоп с периодом полураспада 1620 лет. Соль чистого радия является α -излучателем. При накоплении в ней продуктов распада – радона (Rn), актиния (Ac) становится источником β -, γ -излучений. Энергия α -частиц велика: 4,6–4,7 МэВ. Энергия β -частиц значительно ниже. Равновесная соль радия является мощным постоянным источником γ -излучения с энергией фотонов 0,188 МэВ.

Радиоактивность радия в осадочных и вулканических породах подпочвенных слоев земной коры колеблется от 0,5 до 1,3 $n\text{Ku}/\text{г}$ (при максимальных регистрируемых значениях 60 $n\text{Ku}/\text{г}$). Удельная активность большинства почв 1 $n\text{Ku}/\text{г}$ ($1 \cdot 10^{-10}$ мас. %), питьевой воды – 0,01–6 $n\text{Ku}/\text{г}$, воды океана – 0,007 $n\text{Ku}/\text{г}$. Наибольшие содержания радия, поступающие в организм человека с продуктами питания, $n\text{Ku}/\text{год}$: с куриными яйцами – до 91, с картофелем – до 110, с мясом домашней птицы – до 15.

Поведение радия в организме сходно с миграцией и накоплением кальция. В целом на долю радия приходится < 0,1 % суммарной активности находящихся в организме радиоактивных веществ. Наибольшее количество радионуклида регистрируется в костях ($\approx 0,2$ Бк/г), в 30–70 раз меньшее количество фиксируется в паренхиматозных органах (печени и почках) и почти в 1000 раз меньшее – в мышечной ткани.

Радиоактивный торий (^{227}Th , ^{228}Th , ^{232}Th), как и предшествовавшие α -излучатели, – серебристый металл, активно взаимодействующий с кислородом, водяным паром и плохо – с кислотами. Широко распространен в горных породах (торианите, торите) и, как следствие естественного разрушения кристаллических решеток, – в почвах. Вследствие плохой растворимости в воде в растения поступает в незначительных количествах. Все изотопы являются мощными (~ 5 МэВ) α -излучателями. Длина пробега α -частиц в воздухе достигает 5 см. Соединения радионуклида в организм поступают в незначительных количествах, плохо всасываются желудочно-кишечным трактом, преимущественно откладываются в костях (1,8 Бк/г) и – на порядок в меньших количествах – в других органах и тканях.

Радон (^{222}Rn) и *торон* (^{220}Tn) – бесцветные, не имеющие вкуса и запаха газы – короткоживущие звенья естественных радиоактивных распадов радия, тория. В описаниях они чаще объединены под общим названием радон, в воздушную среду эмануруют (попадают) из минералов, содержащих ураниты, карнотиты, ториты.

Эти газы вследствие высокой удельной массы (в 7,5 раз тяжелее воздуха) «стекают» по поверхности материалов, накапливаясь в ложбинах, погребках, подвалах, ванных комнатах, первых этажах домов; в реакции обмена среды (биологические цепочки) вследствие химической инертности (относены к разряду ксенона) не вступают; в растительных и животных тканях отсутствуют; в воздухоносные пути, легкие проникают с воздухом, предварительно сорбируясь на мелкодисперсных частицах бытовой пыли. Газы являются мощными α -излучателями (до 5 МэВ), формирующими лучевые нагрузки на эпителий слизистых носоглотки, трахеи, бронхов, альвеол. Незначительная часть сорбированных излучателей проникает в желудочно-кишечный тракт с продуктами питания, водой. Размеры поступления изотопов в организм чрезвычайно варьируют в зависимости от географии места жительства, его высоты относительно нулевых значений рельефа местности, этажности дома, характера строительных материалов.

Максимальные лучевые нагрузки (на легкие) формируются в странах с длительным холодным периодом и вынужденным резким снижением вентиляции помещений. Внутри помещений максимальные концентрации газов накапливаются в ванных комнатах (вследствие водо-, газонепроницаемости пола, стен), в 40–50 раз превышая средние значения, приведенные в табл. 2.5 и 2.6, кухне (сжигание газа, содержащего, как правило, изотопы), комнатах квартир первых этажей (в 15–20 раз выше средних значений). Превышение средних значений фоновой радиоактивности газов (от 1 до 10 $\text{кБк}/\text{м}^3$) регистрируется в домах, построенных без предварительного радиационного контроля материалов (преимущественно шлакобетонов, ряда сортов красного кирпича, панелей). Доля такого радиационно опасного жилья, по данным МКРЗ, достигает 0,1%, преимущественно в странах Севера.

Распад радиоактивных инертных газов завершается образованием твердых радиоактивных дочерних продуктов в виде частиц очень малых размеров (~ 100 нм) ^{210}Po и ^{210}Pb . Средняя концентрация ^{210}Pb в приземных слоях атмосферы Северного полушария составляет 0,5 $\text{мБк}/\text{м}^3$. Соотношение радиоактивностей ^{210}Po и ^{210}Pb равно 0,2. Концентрация аэрозолей в воздухе помещений увеличивается в той же кратности, что и концентрации радона, торона. В организм в отличие от инертных излучателей изотопы поступают как с аэрозолями воздуха, так и с продуктами питания, от 1 до 10 $\text{нКи}/\text{сут}$. В теле человека содержится от 100 до 400 нКи (от 0,37 до 1,48 Бк) ^{210}Po и столько же либо несколько больше свинца-210. В организм курильщика с дымом табака дополнительно поступает до 80 мКи изотопов в год.

Таблица 2.5 – Концентрация радона в воздушной среде, Бк/м³

Страна	Приземный слой открытого воздуха	Воздух квартир*	Накапливаемая доза, мкЗв
Франция	$22,1 \cdot 10^{-2}$	4,8–13	300,0
Россия	$0,2 \cdot 10^{-2}$	6–17	400–1000
США	$0,1 \cdot 10^{-2}$	17	Нет сведений
Аляска	$0,01 \cdot 10^{-2}$	Нет сведений	400
Швеция	Нет сведений	Нет сведений	3700

*Кроме 1-го этажа, где радиоактивность превышает приведенные значения в 15–20 раз.

Таблица 2.6 – Концентрация радона в воде, кБк/м³

Источник	Страна	Район	Концентрация
Моря и океаны	–	–	10^{-3}
Реки	–	–	7,4–11,1
Питьевая вода	Австрия	Зальцбург	1,5–7
		Багстайн	3700
	Финляндия	Хельсинки	1200
		Другие районы	280–45 000
	Италия	–	80
	Швеция	–	19–150
	США	Штат Мэн	660–5800
Штат Северная Каролина		100–1700	
Великобритания	Нет сведений	7,4–481	
Источники и буровые скважины	Франция	Тоже	≤ 3700
	Япония	»	$\leq 25\ 900$
	США	»	$\leq 11\ 100$

Незначительный вклад в метаболизм среды вносят радионуклиды, образующиеся в верхних слоях атмосферы под воздействием потока нейтронов космического происхождения. Скорость образования – $0,2 \text{ ат.}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ – и последующее содержание в среде наиболее велики для трития (^3H) и углерода (^{14}C) – $2,5 \text{ ат.}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$. Общее расчетное количество трития в биосфере (бесцветного газа, включенного в те же звенья метаболизма, что и водород) составляет $(92,5–185,0) \cdot 10^{16} \text{ Бк}$, из которых 65 % содержатся в океане, остальные – в почве и последующих звеньях миграции. Содержание естественного трития в продуктах питания крайне невелико (порядка 14–26 Бк/кг).

Содержание ^{14}C в среде несколько выше. Расчетное суммарное количество его в биосфере составляет 8,5 ЭБк (Экса = $1 \cdot 10^{18}$), при этом в атмосфере содержится 1,6 %, в почвах – 4, в верхних слоях океана 2,2, в глубинных 92, в донных отложениях 0,2%. Углерод является наиболее активным метаболитом среды, всасывается в растения непосредственно из воздуха в составе углекислого газа. В организм человека поступает с пищей, водой (99%), воздухом ($\leq 1\%$). Коэффициент усвояемости углерода равен 1.

Средняя удельная активность органических структур (в том числе и продуктов питания) составляет 230 Бк/кг.

Оба радионуклида – мягкие β -излучатели с родственными звеньями метаболизма равномерно распределены в тканях при несколько большей тропности к жировым структурам.

Наибольшие размеры фотон-электронных потоков (поглощенных доз) получают клетки тканей от равномерно распределенных в организме «мягких» β -излучателей (радиоактивных водорода, углерода, калия). Некоторые преимущества в формировании доз имеют клетки с максимальной функциональной активностью – скоростью обмена веществ.

Радионуклиды уранового, ториевого рядов отличаются меньшей тропностью к биологическим тканям. Проникая тем не менее в организм по эволюционно отработанной цепочке, эта группа излучателей фиксируется в костных структурах. Большие энергия (~ 5 МэВ) и плотность потока испускаемых α -частиц, взаимодействие с которыми завершается реакциями, протекающими по типу фотоэффектов (возбуждение при незначительной доле ионизации электронных оболочек), ведет к локальной эффективной (ОБЭ=20) активации обменных процессов, о чем свидетельствует эволюционно-сформировавшаяся локализация и функции «избирательно захватывающих» изотопы систем: нейро-эндокринная регуляция обмена, кроветворение.

2.3. 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**.

2.3.1. 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 Научного комитета ООН по изучению действия атомной радиации (НКДАР) составляет $^{40}\text{K} \sim 50$ Бк/кг, ^{238}U и ^{232}Th по 20 Бк/кг, то в золе их концентрация намного выше: $^{40}\text{K} - 265$ Бк/кг, $^{238}\text{U} - 200$ Бк/кг, $^{232}\text{Th} - 70$ 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.

2.3.2. Промышленное использование продуктов переработки фосфоритов

Залежи фосфатов содержат, как правило, продукты распада ^{238}U в сравнительно 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 Вк/кг , ^{226}Ra – 370 Вк/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 .

2.3.3. Радионуклиды в строительных материалах

Существенный вклад в дозу внешнего облучения вносят строительные материалы жилищ, стены и крыши которых являются эффективными экранами космического излучения (см. табл. 2.7). Вместе с тем в помещениях вследствие усложнения геометрии излучателей (стен, пола, потолка) и роста мощности потока фотонного излучения от современных строительных материалов дозы могут резко возрасти, превышая естественный фон в несколько раз.

Самые распространенные строительные материалы выделяют относительно немного радона:

Дерево – $1,1 \text{ Бк/кг}$; кирпич – 126 Бк/кг ; бетон – 45 Бк/кг .

Намного большая удельная активность радона в природных материалах, используемых в строительстве:

Гранит – 170 Бк/кг ; пемза – 341 Бк/кг ; шлак – 2140 Бк/кг ; глинозем $496\text{--}1367 \text{ Бк/кг}$;

В 50–70-х годах XX века в Швеции из глинозема изготавливали бетон, успели построить около 700 тыс. домов, а когда установили, что он является источником повышенной удельной активности, то его использование срочно прекратили.

2.4. Радиоактивные источники, используемые в медицине

Источники, используемые в медицине - вносят основной вклад в дозу, получаемую человеком от техногенных (антропогенных) источников радиации. Основные медицинские процедуры и методы лечения, связанные с применением радиоактивности:

- рентгеновский аппарат (один из самых распространенных мед приборов).
- лучевая терапия (при лечении рака);
- диагностические методы, опирающиеся на использование радиоизотопов.

Таблица 2.7 – Удельная активность ^{226}Ra и ^{232}Th в строительных материалах и внешние лучевые нагрузки внутри жилья

Вид строительного материала	Удельная активность, Бк/кг		Внешняя лучевая нагрузка, мбэр/год
	^{226}Ra	^{232}Th	
Шлакобетон на основе кварцевых глинистых сланцев	320–2620	24–115	93–170
Фосфогипс	24–555	3–22	–
Летучая зола	110–610	74–320	–
Цемент	9–168	4–81	–
Легкий заполнитель	36–195	37–182	–
Наполнитель бетона (гравий, галька, щебень)	4–167	4–463	–
Кирпич	33–152	21–178	37–100
Шлаковый заполнитель	84–151	32–182	–
1 Газобетон на основе песка	7–130	4–155	–
Черепица	63–91	32–64	–
Бетон	11–80	9–105	–
1 Известковый кирпич	6–25	4–29	–
Изоляционный материал (каменный, стеклянный войлок)	13–15	4,6–15	–
Штукатурка из природн. гипса	1–13	1–12	–
Дерево	0,3–0,5	0,2–1,2	21–50

Индивидуальная доза сильно варьируется для разных людей от 0 (кто не проходит рентген) до многих тысяч среднегодовых доз «естественных» (у больных).

Согласно статистическим данным в развитых странах на каждую тысячу жителей приходится от 300 до 900 обследований в год с использованием рентгена (не считая массовой флюорографии).

В развивающихся странах: 100–200 на 1000 жителей.

В действительности: 2/3 населения Земли проживает в странах, где среднее число обследований составляет не более 10% от числа обследований в промышленно развитых странах.

Попытки оценить среднюю дозу, получаемую населением при рентгенологических обследованиях, до недавнего времени ограничивались стремлением определить тот уровень облучения, который может привести к генетическим последствиям. Этот уровень называют *генетически значимой эквивалентной дозой (ГЗД)*.

Величина ГЗД определяется двумя факторами:

- 1) Вероятностью того, что пациент в последствии будет иметь детей (это в значительной степени определяется его возрастом);
- 2) Дозой облучения половых желез.

ГЗД также зависит от типа обследования (наиболее опасным считается: нижняя часть спины, бедер, мочевого пузыря). В 80^х годах:

ГЗД в развитых странах от 120 мкЗв (Великобритания, Австрия) до 230 мкЗв/г (Россия).

НКДАР проводит ежегодные обследования по оценке эффективной эквивалентной дозы для этого собираются данные от стран, содержащие сведения о количестве излучения поглощаемого различными органами или тканями во время каждого обследования.

По результатам этих подсчетов НКДАР принял в качестве оценки *годовой коллективной эффективной эквивалентной дозы от рентгеновских обследований* в развитых странах значение **1000 чел.-Зв на 1 млн. жителей**. В развивающихся странах эта цифра ниже, хотя индивидуальная доза может быть и выше.

Радиоизотопы используются при облучении онкобольных. В развитых странах на 1000 жителей приходится 10–40 обследований, при этом годовая коллективная эффективная эквивалентная доза составляет 20–150 *чел.-Зв* на 1 млн. жителей (США, Европа).

Во всем мире имеется более 4000 радиотерапевтических установок для лечения рака.

Таким образом, в среднем за год на каждого жителя от всех медицинских источников облучения в промышленно развитых странах приходится эффективная эквивалентная доза 0,4 *мЗв* т.е. ~93% средней дозы от всех искусственных источников. (Хотя значение величины средней дозы в отдельных странах отличается в 3 и более раз).

По оценкам НКДАР для всего населения Земли годовая коллективная эффективная эквивалентная доза, обусловленная медицинскими источниками, составляет **3000.000 чел.-Зв/год**.

2.5. Ядерные взрывы

К собственно антропогенным экологически новейшим излучателям от начальных почвенных каналов экосистемной миграции, клеточных мембран до популяционного распределения доз, меняющим энергетические спектры и распределение радиационного фактора, относятся радионуклиды ядерно-энергетического происхождения. Основными источниками равномерного (фоновое) включения искусственной радиоактивности в состав среды, завершившими переход фактора лабораторной случайности в разряд современных экосистемных воздействий, явились испытания ядерного оружия.

В период с 1945 по 1991г. общее число ядерных взрывов на нашей планете составило 2059, в том числе 508 в атмосфере. Максимум этих испытаний приходится на два периода: 1954–1958 (США, СССР, Англия) и 1961–1962 (США и СССР). Эти страны в 1963 году подписали договор об ограничении испытания ядерного оружия, обязывающий не испытывать его в атмосфере, под водой и в космосе (*можно только под Землей*). С тех пор лишь Франция и Китай провели серию ядерных взрывов в атмосфере небольшой мощности (последний взрыв в 1980 году, затем тоже присоединились к договору).

В 1990г. президент СССР М.С. Горбачев объявил мораторий на проведение ядерных взрывов, к которому затем присоединились другие ядерные державы. Однако, в 1999 году появились новые ядерные державы – Пакистан и Индия, которые провели испытания своих ядерных бомб. Таким образом, подземные испытания атомного оружия происходят до сих пор, но они обычно не сопровождаются образованием радиоактивных осадков.

При проведении наземного ядерного взрыва лишь небольшая часть радиоактивного материала выпадает неподалеку от места испытания, какая-то часть задерживается в тропосфере (самом нижнем слое атмосферы), подхватывается ветром и перемещается на большие расстояния, оставаясь примерно на одной широте. Находясь в воздухе в среднем около месяца радиоактивные вещества во время этих перемещений постепенно выпадают на Землю.

Однако, большая часть радиоактивного материала выбрасывается в стратосферу (слой атмосферы лежащий на высоте 10–50км), где он и остается многие месяцы, медленно опускаясь и рассеиваясь по всей поверхности Земного шара.

Радиоактивные осадки содержат несколько сотен различных радионуклидов, однако большинство из них имеет ничтожную концентрацию или быстро распадается. Основной вклад в облучение человека дает лишь небольшое число радионуклидов.

Вклад в ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу облучения населения от ядерных взрывов, превышающий 1% дают только четыре радионуклида:

– углерод-14 (^{14}C); цезий-137 (^{137}Cs); цирконий-95 (^{95}Zr); стронций-90 (^{90}Sr).

Дозы облучения за счет этих и других радионуклидов различаются в разные периоды времени после взрыва поскольку они распадаются с различной скоростью.

Так цирконий-95 – период полураспада 64суток (обычно является источником облучения непродолжительное время). Цезий-137 – период полураспада 30лет; стронций-90 – период полураспада 29,4года. Наибольший период полураспада имеет углерод-14 – 5730лет, поэтому он будет оставаться источником радиоактивного излучения (хотя и с низкой мощностью дозы) даже в отдаленном будущем.

За период проведения ядерных испытаний четко прослеживалось, что годовые дозы облучения коррелировали с испытаниями ядерного оружия в атмосфере, т.е. их максимумы приходится на те же периоды:

В 1961–1962 гг. среднегодовая коллективная доза, связанная с ядерными испытаниями составила около 7% дозы облучения от естественных источников;

В 1963 г. ее значение уменьшилось до 2%;

В 1980-х годах составила 1%.

Если ядерные испытания в атмосфере не проводить, то годовые коллективные дозы облучения будут становиться все меньше.

Однако: Все коллективные дозы – это средние цифры по Земному шару. Большинство испытаний России – на Севере, поэтому пастухи-оленьеводы получают в 100–1000 раз больше среднюю индивидуальную дозу. Жители Маршалловых островов (Тихий океан) тоже получают в несколько раз большую среднюю индивидуальную дозу, так как в Тихом океане проводили свои испытания США, Англия, Франция.

Таким образом, ожидаемая суммарная коллективная эффективная эквивалентная доза от всех ядерных взрывов в атмосфере – составит **30.000.000 чел.-Зв.** К началу XXI века человечество получило лишь 12–14% этой дозы, оставшуюся часть получит в течение миллионов лет.

2.6. Атомная энергетика

Источником облучения, вокруг которого ведутся наиболее интенсивные споры, являются атомные электростанции, хотя в настоящее время их вклад в суммарное облучение незначителен, за исключением Чернобыльской АЭС.

К 1986 г. в 26 странах работало 345 ядерных реакторов. Их мощность составляла 13% от суммарной мощности всех источников электроэнергии и была равна 220 ГВт. В 70–80-гг XX века их мощность каждые 5 лет удваивалась, сейчас темпы несколько замедлились по различным причинам.

В настоящее время существует около 500 ядерно-энергетических блоков общей мощностью – 750–950 ГВт, что составляет 22% от суммарной мощности всех источников электроэнергии.

Атомные электростанции являются лишь частью ядерного топливного цикла (ЯТЦ), который начинается с добычи и обогащения урановой руды. Следующий этап – производство ядерного топлива. Отработанное в АЭС ядерное топливо, иногда подвергают вторичной обработке, чтобы извлечь из него уран и плутоний. Заканчивается цикл захоронением радиоактивных отходов (рис.2.1):

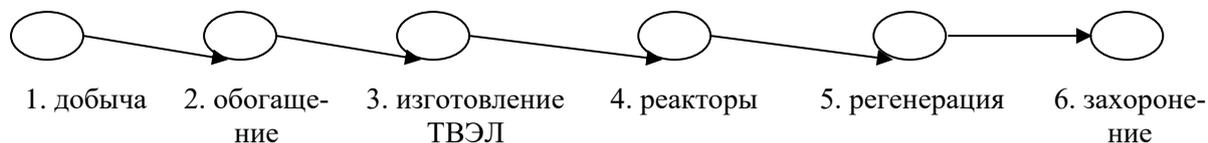


Рис. 2.1. Ядерный топливный цикл

На каждый $ГВт$ электроэнергии, вырабатываемой на всех АЭС в год для всего человечества ожидаемая полная доза на этапах ЯТЦ персонал/население, $чел.-Зв.$: 1. – 0,9/0,5; 2. – 0,1/0,04; 3. – 1/0,0002; 4. – 10/4; 5. – 10/1;

На каждой стадии ядерного топливного цикла в окружающую среду попадают радиоактивные вещества. Доза облучения от ядерного реактора зависит от времени и расстояния. Каждый реактор выбрасывает в окружающую среду целый ряд радионуклидов с разными периодами полураспада. При этом различные радионуклиды ведут себя по разному (помимо периода полураспада) одни распространяются в окружающей среде быстро, другие чрезвычайно медленно. Один из источников радиоактивного загрязнения:

Действующие обогатительные фабрики (в основном в Северной Америке) – вблизи них скопилось к 1980г. – 120 млн.т. отходов к 2000 г. – 500 млн.т. Эти отходы будут оставаться радиоактивными в течение многих лет.

По данным НКДАР весь ядерный топливный цикл дает полную дозу облучения за счет короткоживущих изотопов около $5,5чел.-Зв$ на каждый $1 ГВт-год$ вырабатываемой на АЭС эл. энергией для населения. Из этой дозы 90% человечество получает в течении 1года после выброса, еще 8% – в течении 5 лет. При этом, почти вся доза приходится на людей живущих не далее нескольких тысяч км. от АЭС.

Годовая полная доза за счет долгоживущих изотопов – $670 чел.Зв-год$ на каждый $1ГВт-год$ электроэнергии.

По оценкам НКДАР в 1980 г. от всего ядерного цикла (по всем АЭС во всем мире) годовая $D_{полн.}=500 чел.-Зв$. В 2010 г. (расчетная) – $D_{полн.}=200.000 чел.-Зв$.

Это прогноз пессимистический – если выбросы равны сегодняшним и технологии очистки тоже. Но и в этом случае в 2100году они составят всего лишь 1% от естественного фона при условии, что не будет таких глобальных аварий как Уиндслейл (1957), Гримайл_Айленд (1979), Чернобыль (1986).

2.6.1. Основные искусственные радионуклиды

Основными радионуклидами, входящими в состав наиболее массивных радиоактивных загрязнений среды ядерно-энергетического происхождения являются цезий-137 (^{137}Cs), стронций-90 (^{90}Sr), йод-131(129) ($^{131,129}\text{I}$).

Цезий-137 (^{137}Cs) – блестящий золотистый мягкий металл, бурно взаимодействующий. взрываясь с кислородом и водой, по химическим свойствам близкий к калию. Содержание стабильного изотопа (^{133}Cs) в среде крайне незначительно ($3 \cdot 10^{-6}\%$ в земной коре, костной ткани человека и животных и $3 \cdot 10^{-8}\%$ в морской воде). В среде до становления ядерной энергетики радиоактивный изотоп отсутствовал полностью. Естественных биологических функций не несет.

Наибольшее радиационно-экологическое значение имеет ^{137}Cs , суммарный выброс которого от АЭС мира в 2000 г. составлял $22,2 \cdot 10^{19}$ Бк ($6,0 \cdot 10^9$ Ки) в год (во время аварии на ЧАЭС выброс этого изотопа составил $22,9 \cdot 10^2$ Ки); образуется при делении ядер урана, плутония в ядерных реакторах, при ядерных взрывах; используется (выделяясь из осколочных продуктов АЭС) как γ -излучатель в медицине, металлургии, сельском хозяйстве; в настоящее время (в незначительных количествах) обнаруживается во всех объектах внешней среды.

Изотопы цезия при любом поступлении в организм полностью (коэффициент резорбции 100 %) включаются в метаболизм, конкурируя с калием, в том числе и ^{40}K . Скорость миграции в организме в 25 раз меньшая, что при более жестком γ -излучении изотопа ведет к формированию больших (по сравнению с ^{40}K) микролокальных (мембранных) лучевых нагрузок, при несколько ином (смещенном в сторону ионизации) характере поглощения энергии. В организме в отличие от естественного аналога миграции накапливается до предела насыщения, превышающего величину ежедневного поступления в 30 раз. Содержание в организме жителей с современной фоновой загрязненностью среды составляет (по расчетам) $0,4\text{--}0,5$ Бк/кг, но при 100-1000 кратном росте в группах населения территорий, прилегающих к АЭС, пострадавших от радиационных аварий.

Стронций (^{90}Sr) – серебристый кальциеподобный металл, покрытый оксидной оболочкой, плохо вступает в реакции, включаясь в метаболизм экосистем по мере формирования сложных $\text{Ca} - \text{Fe} - \text{Al} - \text{Sr}$ -комплексов. Естественное содержание стабильного изотопа в почве, костных тканях, среде достигает $3,7 \cdot 10^{-2} \%$, в морской воде, мышечных тканях $7,6 \cdot 10^{-4}\%$. Биологические функции не выявлены; нетоксичен, может замещать кальций. Радиоактивный изотоп в среде отсутствует. Источники поступления в среду те же, что и цезия. Содержание радионуклида от ядерно-энергетических источников в почвах и последующих звеньях миграции соответствуют содержанию ^{137}Cs .

Поступление стронция в организм зависит от степени и характера включенности метаболита в почвенные органические структуры, продукты питания и колеблется от 5 до 30%, при большем проникновении в детский организм. Независимо от пути поступления излучатель накапливается в скелете (в мягких тканях задерживается не более 1%). Выводится крайне плохо, что ведет к постоянному накоплению дозы при хроническом поступлении в организм. В отличие от естественных α -активных аналогов (урана, тория и др.) стронций является эффективным β -излучателем, что меняет спектр радиационных воздействий, в том числе и на гонады, эндокринные железы, красный костный и головной мозг. Накапливаемые дозы (фон) колеблются в тех же пределах, что и от поступления цезия (до $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ мкКи/г}$ в костях при дозах порядка $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ мЗв/год}$).

Йод ($^{131} \text{ } ^{129}\text{I}$) – неметалл черного с блеском цвета. Легко возгоняется (летуч). По последним данным, ^{129}I образуется в литосфере при спонтанном делении урана. Расчетная концентрация его составляет 10^{-14} г на 1 г стабильного йода (^{127}I). Содержание (по стабильному йоду) составляет $0,14 \cdot 10^{-4}\%$ в почве и $0,049 \cdot 10^{-4}\%$ в океане. Биологически активен, является обязательным микроэлементом, необходимым для синтеза гормонов щитовидной железы. Необходимое поступление с пищей $0,1-0,2 \text{ мг}$ ($0,1-0,2 \cdot 10^{-16} \text{ мг/Ки}$ естественного радиоактивного йода). Основным антропогенным изотопом является ^{131}I , образующийся при эксплуатации (авариях) АЭС, авариях реакторов, ядерных взрывах. Активно включается в экологические цепочки миграции. Выброс в среду при нормальной эксплуатации АЭС колеблется в пределах $5-400 \text{ Бк/(Вт}\cdot\text{год)}$, При поступлении радионуклида в организм через желудочно-кишечный тракт (основной путь) всасывается 100% изотопа с последующим скоплением его в щитовидной железе, особенно у детей, превышая дозы на щитовидную железу взрослого в 2–10 раз. Продолжительность радиоактивности среды (организма) после однократного загрязнения (проникновения) в организм составляет не более 1,5 мес.

2.7. Профессиональное облучение

Самые большие дозы облучения получают люди, которые работают на объектах атомной промышленности.

Оценки показывают, что коллективная доза, которую получают рабочие урановых рудников и обогатительных фабрик – $1 \text{ чел.}\cdot\text{Зв}$ на каждый 1 ГВт электроэнергии год. 90% этой дозы приходится на долю рудников, а при работе в шахте еще больше. Коллективная доза от заводов, на которых получается ядерное топливо – $1 \text{ чел.}\cdot\text{Зв}$ на каждый 1 ГВт электроэнергии год. Среднее значение коллективной дозы для работников, обслуживающих реакторы (водо-водяные): $10 \text{ чел.}\cdot\text{Зв}$ на каждый 1 ГВт электроэнергии год. Из этого числа 70% получают ремонтники.

2.7.1. Дозы, получаемые работниками различных категорий

Среднегодовые коллективные дозы, получаемые персоналом атомных электростанций:

- технический персонал – 97,5 чел.-Гр;
- администрация – 15,5 чел.-Гр;
- операторы – 13,5 чел.-Гр;
- дозиметристы – 10 чел.-Гр.

Среднегодовые коллективные дозы которые получают люди, занятые научно-исследовательской работой в области ядерной физики и энергетики сильно различаются в зависимости от страны и ее развитости (до 10 раз), а в среднем – 5 чел.-Зв на 1 ГВт электроэнергии год.

Однако, все эти величины добавляют к среднегодовой коллективной эквивалентной дозе (полной) для всего населения Земли меньше 30 чел.-Зв на 1 ГВт электроэнергии в год. Таким образом, вклад ЯТЦ в полную дозу для всего населения Земли составляет примерно 2000 чел.-Зв/год, а это всего лишь 0,03% дозы, получаемой от естественных источников.

В США – медицинский персонал, связанный с обслуживанием рентгеновского аппарата и лечением облучением составляет примерно 100 000 человек. В целом вклад дозы, получаемой мед. персоналом, занимающейся радиационным обследованием в коллективную дозу населения в странах с высоким уровнем медицинского обслуживания составляет 1 чел.-Зв/год на 1 млн жителей.

Облучение персонала промышленных предприятий в развитых странах дает дополнительную прибавку к коллективной дозе 0,5 чел.-Зв/год на 1 млн жителей.

Тесты и задания для контроля результатов обучения

На оценки «4» и «5»

1. Что такое радиационный фон?
2. Из чего складывается естественный радиационный фон?
3. Что такое техногенно измененный естественный радиационный фон?
4. Какие источники создают искусственный радиационный фон?
5. Внешнее и внутренне облучение.

На оценки «6» и «7»

1. Перечислите основные радионуклиды естественного радиационного фона.
2. Источники поступления урана в организм человека.
3. Экологическая характеристика радия.
4. Экологическая характеристика радона (торона).
5. Как уменьшить эмиссию радона в квартире?

На оценки «8» и «9»

1. Каково содержание радионуклидов в угле?
2. Охарактеризуйте ядерный топливный цикл.
3. Какие радионуклиды вносят основной вклад в ожидаемую дозу.
4. Что такое генетически значимая доза?
5. Годовые эквивалентные дозы, получаемые медицинским персоналом.
6. Задача.

На оценку «10»

Необходимо показать отличные знания по всем вопросам тестирования, а также принять участие в исследовательской работе по темам модуля (написать реферативную работу).

Модуль 3

МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ЭКОСИСТЕМАХ

Включение новейших по своим химическим свойствам и спектру излучений радионуклидов в состав среды меняет сформировавшийся баланс поглощаемой радиации и ее спектров во всех звеньях экосистем – от молекулярных до геопланетарных. Радионуклиды избирательно накапливаются в активных звеньях экосистем в нехарактерных для устоявшихся на протяжении миллионов лет количествах. Такое перераспределение спектра и эффектов радиационных воздействий при резких различиях радиочувствительности взаимозависимых звеньев экосистем (сапрофитной микрофлоры – простейших – растительности – млекопитающих) может по достижении предела, привести к резким нарушениям экосистемного гомеостаза, с последующим ростом паталогических реакций, при отсутствии прямой связи с радиоактивностью среды.

Под миграцией радионуклидов понимают совокупность процессов, приводящих к перемещению и перераспределению радионуклидов между любыми элементами экосистем, включающих в себя как живые объекты, так и неживую природу.

Все излучения обладают биологическим действием, т.е. способностью вызывать изменения в клетках тканей и органов живого организма. Под биологическим действием ионизирующих излучений (ИИ) понимают связанную с облучением совокупность морфологических и функциональных изменений в живом организме.

Для биологического действия ИИ в отличие от результатов на неживые объекты характерны ряд особенностей:

- 1) Эффекты, связанные с облучением, обусловлены не столько количеством поглощенной энергии, сколько формой ее передачи. (Ни тепловая

ни электрическая энергия, поглощенная биологической тканью в таком же количестве как ИИ не вызывает таких изменений, как ИИ).

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

3) Существует так называемый скрытый (латентный период) первых симптомов облучения, продолжительность которого снижается при увеличении Дозы.

4) Эффекты действия длительных актов облучения суммируются, а полученная доза накапливается.

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

3.1. Воздействие радионуклидов на биосферу

После Чернобыльской аварии в различных регионах северного полушария многие естественные биогеоценозы были подвержены воздействию радионуклидов.

Разные экосистемы поглощают радионуклиды различными способами. Однако было установлено, что лесные экосистемы наиболее подвержены радиоактивному загрязнению. Это происходит потому, что листва удерживает радионуклиды, которые выпадают с дождями, кроме того, радиоактивный углерод-14 и тритий поглощаются из воздуха в процессе фотосинтеза. В осенний период, когда листва опадает, большинство радионуклидов попадает на почву и концентрируется в опавшей листве и тонком верхнем слое почвы. Хвойные леса удерживают радионуклиды дольше.

В луговых экосистемах растительность поглощает радионуклиды, и осенью они попадают в верхние слои почвы. В сельскохозяйственных экосистемах радионуклиды с верхнего слоя почвы при вспахивании переносятся на глубину 20–40 см. Естественная миграция радионуклидов в почвах зависит от их типа, а скорость, с которой они передвигаются в почве, может составлять несколько сантиметров в год. Богатые почвы поглощают радионуклиды довольно легко и удерживают их более длительное время, чем бедные песчаные почвы. В водных экосистемах они постепенно оседают на дно озер и водохранилищ.

Другим важным фактором в процессе миграции и накопления радионуклидов в экосистемах является степень растворимости соединений, в которых они присутствуют. Стронций-90 входит в состав соединений с высокой растворимостью, поэтому он так быстро всасывается растениями. Йод-131, барий-140, цезий-137 и цезий-144 представляют собой группу таких же растворимых изотопов, которые мигрируют и концентрируются в естественных экосистемах (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Главные пути миграции радионуклидов в экосистемах

Накопление растворимых радионуклидов в растениях, организме животных и людей препятствует нормальному обмену веществ. Некоторые растения (лишайники, мхи, грибы, зерновые и двудольные) легко поглощают радионуклиды. Радиоактивные стронций и цезий накапливаются овощами и травами шпинат, фенхель, укроп и петрушка).

Радиоактивное заражение естественных экосистем имеет как долгосрочные, так и краткосрочные последствия. В табл. 3.1 показан биологический эффект радиоактивного загрязнения в результате аварии на ЧАЭС на уровне организма, популяции, экосистемы и биосферы. Принимая во внимание многомерность реакций, с которыми различные биологические системы реагируют на радиоактивное загрязнение, можно наметить много объектов для изучения и долгосрочного мониторинга на основе экологического подхода.

Таблица 3.1 – Основные биологические эффекты Чернобыльской катастрофы, вызванные загрязнением радионуклидами естественных экосистем

Уровень биологической организации	Реакция	
	краткосрочная	долгосрочная
Биосфера	Глобальные и локальные изменения в накоплении радионуклидов и их рассеянии	Глобальные и локальные нарушения генетической и фенетической структуры биосферы
Экосистемы	Изменения в биологическом разнообразии, стабильности и особенностях развития экосистем	Изменения в процессе коэволюции и смене сообществ в экосистеме
Популяции	Изменение в соотношении рождаемости и смертности	Изменения частоты мутации, интенсивности естественного отбора и адаптивных реакций
Организмы	Физиологические и биохимические нарушения, сдвиги в психике и поведении	Изменения частоты появления рака, наследственных болезней и отклонений

3.2. Поведение радионуклидов в почве

Почвенная оболочка (педосфера) является одним из основных компонентов природы, где происходит локализация как естественных, так и искусственных радионуклидов, откуда по пищевым цепям они попадают в состав земной биоты. Радиоактивные вещества, отложившиеся на поверхности почвы могут мигрировать как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении под действием различных процессов.

Действующим началом пусковых преобразований в почвах является ее сапрофитная микрофлора первичного синтеза (продуценты) и первичного потребления (консументы), разрушающая отмершие биологические субстраты до органических мономеров, легко вступающих в повторные циклы синтеза биологического вещества.

Синтез происходит с использованием воды, диоксида углерода, кислорода, азота, фосфора, энергоемких макроэлементов (*Si, Al, K, Na, Ca, P, S*), микроэлементов (*Cu, Mo, I, B, F, Pb* и др.), радионуклидов фона, с постепенным вовлечением в обмен минералов горных пород. Процесс чрезвычайно многосложен, взаимосбалансирован, «отработан» на протяжении миллионов лет и имеет крайне незначительные резервы устойчивости: почвенный слой 1,5–2 см формируется не менее 100 лет при нормальном состоянии среды. В разрыхлении почв, формировании капилляроподобных каналов тока ее активного компонента, водного почвенного раствора (осуществляющего перенос химических, в том числе и радиоактивных веществ), почвенных пор, заполненных воздухом, богатым углекислотой и радоном, участвует корневая система растительности, черви, насекомые. Уровни организации, а следовательно, и радиочувствительности активных биологических начал почв чрезвычайно различны. Поэтому внесение в почвенный обмен дополнительного радиационного фактора может проявиться в резких нарушениях почвенной экосистемной организации. Помимо вероятных нарушений процессов почвенного обмена, загрязнение почв дополнительным аварийным радиоактивным веществом является исходным началом его дальнейшего транспорта по биологическим цепям с неизбежной конечной кумуляцией в организме человека.

Радионуклиды, отложившиеся на поверхности почв, под действием разных факторов могут перемещаться в любом направлении. Причиной «горизонтального» перемещения свежевыпавших радионуклидов может быть поверхностный сток после сильного дождя, отложившихся в снегу за зиму – смыв тальмими водами. Установлено, что ^{90}Sr , мигрирующий с тальмими водами, почти полностью (82–100%) находится в катионной форме.

«Вертикальная миграция» радионуклидов по профилю почвы может быть следствием механического переноса частиц, на которых сорбированы радионуклиды, а также собственного перемещения в виде свободных ионов. На обрабатываемых сельскохозяйственных почвах радионуклиды

сравнительно равномерно распределяются в пределах пахотного слоя. Некоторый механический перенос их с поверхности в глубь почвы возможен вследствие разрыхления ее дождевыми червями и землероющими животными.

Вертикальная миграция продуктов деления в целинной почве идет очень медленно. Установлено, что преобладающая часть осколочных радионуклидов прочно фиксируется в тонком слое верхнего горизонта почвы, и их вертикальное перемещение не превышает нескольких миллиметров в год. В целом можно считать, что ^{90}Sr и ^{137}Cs являются основными излучателями, формирующими почвенную радиоактивность, величина и характер которой зависят от *радиационной емкости почв*. Последняя складывается из ее физической сорбционной способности (зависящей от пористости, количества почвенного раствора в порах и его катионного состава); химической поглотительной способности (образования плохорастворимых соединений с элементами почв и горных пород); биологической поглотительной способности (включение в состав микрофлоры и дальнейших звеньев обмена на правах естественных фоновых аналогов, стабильных элементов).

Суммарная радиационная (сорбционная) емкость почвы колеблется от одного до нескольких десятков миллиграмм-эквивалентов радия на 100 г почвы, что в сотни тысяч раз превосходит реальные сформировавшиеся величины активности почв радиоактивных территорий, максимально загрязненных от аварий на ЧАЭС, ПО «Маяк». Сравнительная оценка сорбционной радиационной емкости почв (проводимая по соотношению содержания радионуклида в твердой фазе почв – нерастворимой фракции) к содержанию в почвенном растворе дана в табл. 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение сорбционных емкостей почв по соотношению активности радионуклидов в твердой фазе почв – нерастворенной фракции и в почвенном растворе

Почва	Соотношение активности твердой и жидкой фаз почв	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Тундры	25–35	1200–1600
Серая лесная	70–100	5000–7000
Среднеподзолистая	45–55	2000–2400
Чернозем	291–430	В растворе не обнаруживается

Приведенные данные указывают на большую сорбционную емкость (способность к захвату растворенных в осадках радионуклидов) почв чернозема, лесной подстилки, более выраженную по отношению к калиевому аналогу почвенного метаболизма – ^{137}Cs .

Функционально связаны с сорбционными процессами почв скорость проникновения радионуклидов в прикорневую глубину и последующее

включение в экосистемные цепи миграции. Скорость процесса (после загрязнения среды) определяется прочностью связи излучателей с твердой фазой почв, скоростью диссоциации и последующего ионного перемещения радионуклида, зависящей от химических свойств излучателя и его соединений.

В миграцию существенные коррекции вносит рельеф местности (горизонтальное перемещение с талыми и дождевыми водами с последующим большим накоплением в низинах), а также механическая (глубокая вспашка) переработка почв, ведущая к ускоренному перемещению радионуклидов в подкорневую глубину и исключению фактора радиационной опасности из активной миграции в экосистемах. Долгосрочное сохранение радионуклидов в прикорневой глубине, на необрабатываемых землях (луга, лесная подстилка), включение в почвенный метаболизм ведут к их накоплению через концентрацию в травах, листве, с последующим неоднократным повторным включением (через гниение опада) в почвенные процессы. Такой растягивающийся на десятилетия процесс вертикальной миграции дополняется горизонтальным перемещением и распространением радионуклидов на более обширные и менее контрастные по радиоактивности среды (в отличие от первичной загрязненности) территории. В процессе участвуют сообщества живых организмов почв (педоценозы), грызуны, травоядные. Перераспределения являются здесь следствием активной и пассивной мобильности представителей фауны, распространения продуктов их метаболизма, сложных пищевых цепей миграции радионуклидов. Скорость таких процессов зависит от химических свойств загрязнителей и соответственно функций, выполняемых их нерадиоактивными аналогами в экологических цепях обмена (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Содержание и вертикальное распределение радионуклидов после аварии на Чернобыльской АЭС в естественных – необработанных (числитель) и пахотных (знаменатель) почвах, Бк/кг (1995)

Глубина, см	Загрязненность почв	
	цезием	стронцием
0–2	16121/3163	522/60,6
2–15	8315/3285	134/57,9
15–23	46/3343	6,5/71,7
23–57	3/3421	1,2/91,4
57–91	4/3319	0,7/83,6

Все животные и растения обладают способностью избирательно и интенсивно накапливать рассеянные в экосистемах в ничтожных концентрациях микроэлементы, к конкурентам которых (в том числе и по характеру биологических функций) относятся долгоживущие радиоактивные загрязнители среды. Количественной характеристикой поступления радионуклида

из почвы в растения и параметром их биогенной миграции является коэффициент накопления (K_n):

$$K_n = C_p / C_n, \quad (3.1)$$

где C_p – концентрация радионуклида в золе растений, $Bк/кг$; C_n – концентрация радионуклида в почве, $Bк/кг$.

Высокие коэффициенты накопления приводят к тому, что концентрация излучателей в биомассе загрязненных биоценозов становится более высокой по сравнению с радиоактивностью среды (что ведет к неадекватной оценке радиационного риска при простом санитарном анализе событий).

Мощный процесс избирательной биогенной концентрации рассеянных излучателей наиболее интенсивен в первые годы от момента выпадения радиоактивных осадков. Радионуклиды в этот период представляют собой новейшие для среды, легко диссоциирующие соединения, не вкрапленные, как это происходит в последующем в кристаллические решетки глинистых минералов (процесс старения элементов). Комплекс почвенно-химических реакций старения и последующее включение радионуклидов в состав трудно-растворимых почвенных и минеральных структур переводит метаболизм изотопов на равные с их естественными химическими аналогами права. Скорость таких процессов зависит от физико-химических свойств радионуклидов, а также характера загрязнения почв (влажности, концентрации ионов). Максимальная скорость поглощения радионуклидов растениями происходит при рН, близком к нейтральному и слабощелочному. В кислой среде усиливается сорбция твердой фазой почв. Влажность, как следствие увеличения массы сельскохозяйственной продукции, снижает концентрацию радионуклидов в биомассе. Высокие концентрации ионов стабильных элементов препятствуют проникновению радионуклида в корневую систему.

Стронций – наиболее доступен для корневых систем растительности, особенно в первые годы после загрязнения среды. Старение радионуклида происходит медленно. Через 12 лет после внесения ^{90}Sr в почву более 95% изотопа остается в обменной, кальцийподобной форме (табл. 3.4).

Переход радионуклида из органической дернины в минеральную фракцию и последующее ускоренное (семикратное) снижение поступления в растительность происходят только после глубокой вспашки почв. Вместе с тем такие вспашки, проводимые на территориях с загрязненностью свыше $40 Ки/км^2$, ведут к ускоренной гибели сапрофитной микрофлоры почв, беспозвоночных, обедняют видовой состав биомассы в целом, что ускоряет процесс минерализации изотопов, но при резкой патологической деформации почвенных функций.

Накопление стронция в растениях обратно пропорционально количеству обменного конкурента изотопа кальция почвы. Такая блокада метаболизма имеет предел. Избыточное ($>25 мг-экв$ на 100 г почвы) внесение

кальция не ведет к дальнейшему снижению скорости перехода радионуклида в растительность. В целом, как по классическим экспериментальным исследованиям, так и по наблюдениям последних лет, стронций относится к группе радионуклидов, отличающихся равномерным распределением между водой, минеральной основой и биомассой почв, коэффициент накопления его в грунте низкий (1 – 65), в биомассе 1000 – 2000.

Таблица 3.4. – Классификация химических элементов по коэффициентам накопления (коэффициентам переноса) в растительности

Коэффициент накопления	Химический элемент
10–1000 (сильное накопление)	<i>K, Cs, Pb, N, Cl, Br, Na, Li</i>
1–10 (слабое накопление)	<i>Mg, Ca, Sr, B, Se, Fe, Mn</i>
0,1–1 (отсутствие накопления)	<i>Ba, Ra, Si, F, I, Co, Ni, Cm</i>
0,01–1 (слабая дискриминация)	<i>Cs, Be, Fe, Ru</i>
0,01 (сильная дискриминация)	<i>Sc, Y, Zn, Ta, Pm, Pb, Pu</i>

Цезий, судя по коэффициентам накопления в почвах, по разным источникам, относится либо к сильно, либо к слабо накапливаемой группе элементов. Очевидно, это связано со временем оценки процесса миграции от момента загрязнения среды и соответственно степенью минеральной фиксации (кристаллизации) изотопа. В экспериментах и наблюдениях по миграции изотопа (почва – вода – растительность) выявлено его преимущественное накопление в неорганической фазе почв (коэффициент накопления 0,25), но при высоком содержании излучателя в биомассе (8000–9000).

Почва территорий, пострадавших от аварии на ЧАЭС (и других, связанных с выбросом радионуклидов), находится в экологически невыгодном положении и по такой интегративной радиационно-экологической величине, как период получищения корнеобитаемого слоя (совокупность функций экспоненты радиоактивного распада, минерализации, перехода в подкорневую систему и др.), составляющий 129 лет, что позволяет прогнозировать радиационную «чистоту» таких территорий только через 600–1000 лет (см. табл.3.5).

Таблица 3.5 – Периоды получищения корнеобитаемых слоев почв от суммарной радиоактивности

	Тип почвы				
	Дерново-подзолистые	Дерново-глиевые суглинные	Торфяные	Низменные торфяные	Болота
Период получищения, лет	129	78	28	13,9	12,4

Очевидно, радионуклидом, определяющим опасность радиоактивного загрязнения среды от аварии на Чернобыльской АЭС, является цезий-137, несмотря на более низкий по сравнению со стронцием коэффициент накопления, что связано с его более высоким уровнем содержания в почве. Наибольшее количество изотопов накапливается в надпочвенной (листовой) части растений, поэтому наибольшим кумулятором активности являются многолетние травы, а среди непосредственно употребляемых в пищу – зерновые, бобовые. Дальнейшая миграция радионуклидов «почва – растительность – животные – человек» ведет к кумуляции радионуклидов при максимальном накоплении в теле человека.

Наименее исследована миграция и последующее накопление в теле человека *плутония* и сопутствующих ему (в крайне незначительных, «следовых» количествах) *нептуния*, *америция*, *кюрия*. Эти элементы относятся к сильно дискриминированным метаболитам, не включающимся в активный экосистемный обмен. Первичная загрязненность почв радионуклидами этого ряда регистрируется в виде «горячих частиц» PuO_2 диаметром порядка 10 мкм, активностью от 50 до 1000 мкБк. Включение в почвенную миграцию происходит медленно, после образования *Fe-Pu-Al*-комплексов с низкомолекулярными фульвокислотами. Скорость последующего вертикального движения в прикорневую систему зависит от сформировавшейся в почвах скорости движения радиоактивных носителей. До 9% от плутониевых выпадений мигрируют на глубину 10–90 см чернозема и до 20% на аналогичную глубину – серозема торфяников спустя 10–15 лет после загрязнения среды. Почвенные загрязнения плутонием, их долгосрочное содержание в поверхностных слоях ведут к аэрозольному проникновению α -излучателя в организм человека и накоплению радионуклида в легких (от 4 до 83 мБк), лимфоузлах по ходу дыхательных путей и лучевым нагрузкам порядка 0,8 фЗв на легкие и 3,6 фЗв на гонады. После чернобыльской аварии лучевые нагрузки от плутония возросли в среднем в 1,5 раза и достигли 2 мкЗв/год.

3.3. Радионуклиды в водных экосистемах

Значительная часть радионуклидов первичного загрязнения среды смывается с загрязненных поверхностей и с талыми, дождевыми водами поступает в открытые и, частично, грунтовые воды. Источниками постоянных (незначительных) загрязнений являются АЭС, строящиеся, как правило, на берегах водоемов – рек, озер, морей: в ядерно-энергетических установках для охлаждения реакторов используются большие объемы воды, в которые попадают радиоактивные продукты коррозии и незначительная часть радиоактивных отходов. В Республике Беларусь в последние 20 лет основным источником поступления искусственных радионуклидов в водные объекты был смыв их с загрязненных территорий, которые образовались в результате аварии на Чернобыльской АЭС. В целом в водную среду Земли (водная

площадь которой составляет $\approx 70\%$ всей ее поверхности) поступает до 80 % антропогенных радиоактивных загрязнений, превращая ее в наиболее мощное депо не только естественных, но и искусственных радионуклидов. Сток радионуклидов в водоемы зависит от скорости взаимодействия радионуклидов с почвами. Период полураспада стока ^{90}Sr из почв в водоемы равен 2,4 годам, ^{137}Cs в 10 раз меньше по сравнению со стронцием.

Практический интерес представляет поведение радионуклидов в морской воде, в прибрежных районах, в местах впадения (эстуарии) рек, в лагунах, водных пространствах над континентальным шельфом, так называемых «окраинных» морях континентов с глубиной не свыше 1 км.

Поступающие на водную поверхность и в верхние ее слои радиоактивные вещества первоначально содержатся в верхних горизонтах морей, постепенно мигрируя вниз. На глубине 700 м содержание стронция составляет 20–30% от концентрации поверхностных слоев моря. Содержание радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в открытых морях выше по сравнению с океаном. Например, фоновая активность радионуклидов в Балтийском море в 6–10 раз выше, чем в Атлантическом океане на тех же широтах.

В прибрежных водах вертикальные перемещения радионуклидов с последующим накоплением в донных отложениях протекают со значительно большей скоростью по сравнению с открытым океаном. Основные причины различий:

- сорбция и осаждение радионуклидов массивными крупнодисперсными стоками, поступающими в прибрежные воды;
- большая биологическая и биохимическая активность биогенной и литогенной взвеси, легко поднимающейся во время шторма со дна прибрежных вод с последующим захватом радионуклидов и осаждением;
- большое количество и громадная биологическая активность биогенной массы прибрежных вод мелководья, эстуарии рек, лагун.

Наибольшая концентрация радионуклидов обнаруживается в биомассе гидробионтов и особенно в планктоне. Включение $\text{Cs} - \text{Sr}$ -излучателей в метаболизм водных биот во многом зависит от степени минерализации воды. С ее увеличением скорость и величина захвата радиоактивности снижаются. Так, содержание стронция-90 в костях рыб Балтийского моря в 5 раз выше по сравнению с рыбами Атлантики. Наибольшее содержание радионуклидов обнаруживается в биомассе пресноводных.

Гидробионты поглощают радионуклиды непосредственно из воды и по пищевым цепям. Наиболее мощное поглощение радионуклидов происходит в верхних слоях воды и осуществляется ее обязательными биологическими составляющими – планктоном и nekтоном. Большая суммарная биомасса фито-, зоопланктона прибрежных морей, наибольший коэффициент накопления радионуклидов этим звеном (10 000 и более) и наибольшая скорость экосистемного обмена (репродукция массы одноклеточных с последующим осаждением омертвевшей части и ее дальнейшей донной миграции

по биологическим цепям) ставят этот вид биологической дезактивации водной среды на первое место по эффективности. До 90–99% радионуклидов уходят в донные отложения по этой цепи миграции.

Коэффициент накопления снижается по мере перехода к более высоким трофическим уровням (до 360 у зоопланктона, до 33 у рыб). Как и в случае почвенного загрязнения, большое значение в миграции играет экосистемная «новизна» изотопа: накопление ^{55}Fe у зоопланктона в 670 раз выше по сравнению с накоплением стабильного железа. Пресноводные микроорганизмы, являясь основным начальным звеном водной миграции, более активно поглощают радионуклиды ядерно-энергетического происхождения. При этом слабые концентрации излучателей стимулируют активность и сорбционную способность биомассы. Такие особенности, прослеживаемые и в дальнейших звеньях обмена, ведут к более эффективному очищению пресных водоемов по сравнению с морскими при прочих равных условиях. Время полураспада (протекающего, как и радиоактивный распад, по экспоненте) непроточных вод, озер средних широт от ^{90}Cs , ^{137}Sr составляет 10–20 лет. В реках процесс идет значительно быстрее, усиливаясь стоком загрязненных вод в океан.

Коэффициенты накопления радионуклидов в грунте дна пресных водоемов невелики, превышая активность воды в 5–10 раз; в биомассе вышших водных растений этот коэффициент равен 200–1000; в планктоне – до 1000 (в среднем), в иловых отложениях – 400–4000.

По общему характеру распределения в водных экосистемах - радионуклиды подразделяются на четыре группы:

- гидротропные, остающиеся в относительно высоких концентрациях в воде;
- равномерно распределяющиеся в воде, грунте, биомассе;
- педотропные, преимущественно накапливающиеся в грунте;
- биотропные – в биомассе.

Основной современный загрязнитель среды – цезий – преимущественно накапливается в грунте; стронций относительно равномерно распределяется между водой, грунтом, биомассой. Подразделение тем не менее условно: при перерасчете накопления радионуклидов на массу составляющих водоемов очевидна наибольшая активность биологической компоненты водной среды, эффективно поглощающей и накапливающей радионуклиды среды, даже при чрезвычайно малых концентрациях изотопов. В последующем биомасса с поглощенной радиоактивностью откладывается в донных отложениях, имеющих самостоятельные циклы обмена.

Поведение радионуклидов в подземных водах резко отличается от их миграции в почве, открытых водоемах. Радиационные емкости этих водисточников существенно разнятся в зависимости от путей, гидрогеологических условий поступления радионуклидов в подземные воды и характера гидродинамики (движения) воды, Дренажирования подземных вод, их

химического состава. Такая многофакторность процесса обуславливает разнообразие поведения радионуклидов в этих водоемах.

Наиболее подвержены радиоактивному загрязнению ненапорные грунтовые воды, имеющие непосредственную связь с атмосферными осадками, открытыми водоемами. Вместе с тем большинство почв, особенно глинистых, является мощным барьером для проникновения этих загрязнений в грунтовые воды. Исследования показали, что через 40 лет после загрязнения поверхности Земли ^{90}Sr на глубину 1 м относительное содержание радионуклида, проникающего через делювиальные глины, составит $4 \cdot 10^{-3}$, а через 100 лет составит $8 \cdot 10^{-4}$ от начальной концентрации радионуклида.

Напорные (артезианские) водоисточники, не питающиеся непосредственно от осадков и пополняющиеся за счет медленной нисходящей фильтрации подземных вод, радиоактивному загрязнению не подвержены.

В целом миграция радионуклидов техногенного происхождения как в почве, так и в водной среде подчиняется общим закономерностям. Первичный выброс в среду вследствие легкой диссоциации новых изотопных соединений до их минерализации, перехода в донные отложения, ведет к массивному первичному включению в почвенно (водно)-растительный метаболизм и последующему активному включению радионуклидов в трофические цепи миграции.

Радиационная емкость цепей (почвы – вода, первичная сапрофитная микрофлора – растительность – животные) в целом зависит от минеральной отрицательной ионной насыщенности среды; в достаточно минерализованной почве (черноземе), морской воде процессы миграции и накопления радионуклидов в конечных, радиационно опасных для человека звеньях обмена (продуктах питания) идут значительно медленнее.

Скорость миграции во многом зависит от климатических условий метаболизма. Наиболее интенсивно процесс протекает в районах, не превышающих нулевой температурный барьер водно-почвенного метаболизма, но при обязательном условии достаточного разнообразия (экологической дифференцировки) среды и ее экосистемных компонентов: микро-, макрофлоры (широколиственные, смешанные леса, лесостепи), фауны. В аналогичных географических зонах, но при обеднении среды растительным, животным миром скорость метаболизма снижается (степь, пустыни, территории активной человеческой деятельности).

3.4. Воздушный перенос радионуклидов

Атмосфера является мощным акцептором техногенных, в том числе и ядерно-энергетических, радиоактивных газоаэрозольных выбросов. Их последующее включение в токи воздушных масс, рассеяние, медленная механическая (гравитационная) седиментация ведут к относительно равномерному (глобальному) распределению цезий-стронциевых фоновых

загрязнений среды. Наиболее загрязняют атмосферу наземные испытания ядерного оружия. Поступление и последующее распределение радиоактивности подчиняется здесь ряду закономерностей, предполагающих длительное присутствие фактора в составе среды.

При взрыве ядерных устройств суммарная цепная реакция деления в критической массе ядерного топлива происходит за 0,1 мкс. Процесс сопровождается выделением громадной энергии, ведущей к разрушению не только молекулярных (химических), но и ядерных связей вещества, образованию чрезвычайно активного шарообразного скопления плазмы (оголенных ядер), быстро расширяющегося в атмосфере. В процесс вовлекаются газы и аэрозоли воздушной среды, образующие радиоактивные аэрозоли с частицами разных диаметров, поднимающиеся в виде гриба.

При попадании радиоактивных аэрозолей в тропосферу происходит их глобальное «размывание» и перемещение током воздушных масс с большой скоростью, преимущественно по географическим параллелям от мест взрыва. Так, продукты ядерных испытаний 07.03.1955 в штате Невада (США) в значительных количествах выпали 12.03.1955 в Ленинградской области. После взрыва в Сахаре 13.02.1966 продукты деления были обнаружены 17.02.1966 в Крыму. Аналогично распространялись радионуклиды после чернойбыльской аварии.

Основная часть загрязнений тропосферы выпадает с осадками в ближайшие дни-недели от момента взрыва в результате вовлечения аэрозолей в процессы формирования облаков. Незначительная часть радионуклидов сорбируется аэрозолями воздуха, коагулируется с последующим «сухим» выпадением частиц. Скорость очищения тропосферы подчиняется экспоненциальному закону с периодом полуочищения 20–40 суток.

Гравитационное оседание частиц, ушедших в стратосферу, происходит крайне медленно, на протяжении десятилетий. Облако, ушедшее в «резервуар» антропогенных радионуклидов, захватывается стратосферными воздушными течениями по параллелям со скоростью – 100 км/ч и, постепенно вытягиваясь, формирует антропогенные радиоактивные кольца планеты. Гравитационное оседание аэрозолей протекает здесь медленно вследствие постоянных турбулентных токов плотных подлежащих слоев атмосферы при незначительных, порядка 0,1–10 мкм, размерах радиоактивных частиц. Формирующееся равновесие с некоторым (незначительным) преобладанием седиментационных процессов ведет к длительному, равномерному малоинтенсивному загрязнению среды преимущественно северного полушария планеты.

Состав радионуклидов ядерного происхождения за время циркуляции в стратосфере меняется. Короткоживущие радионуклиды (наибольшая часть взрыва) распадаются, оставляя место цезий-стронциевым источникам глобального малоинтенсивного загрязнения среды. Переход стратосферных радионуклидов в тропосферу с последующим осаждением (механизмы

невьяснены) происходит преимущественно на широте 25–30 град в обоих полушариях с максимумом в Северном (рис. 3.2).

Наибольшая часть выпадений (стратосфера – тропосфера – земная поверхность) смещается на широту 40–50 град. Динамика глобальных выпадений меняется в течение года, при максимуме, приходящемся на весну и начало лета (I и II кварталы – в северном и IV – в южном полушариях). В изменения собственно функций и структуры атмосферы радиационные загрязнения этого ряда существенного вклада не вносят.

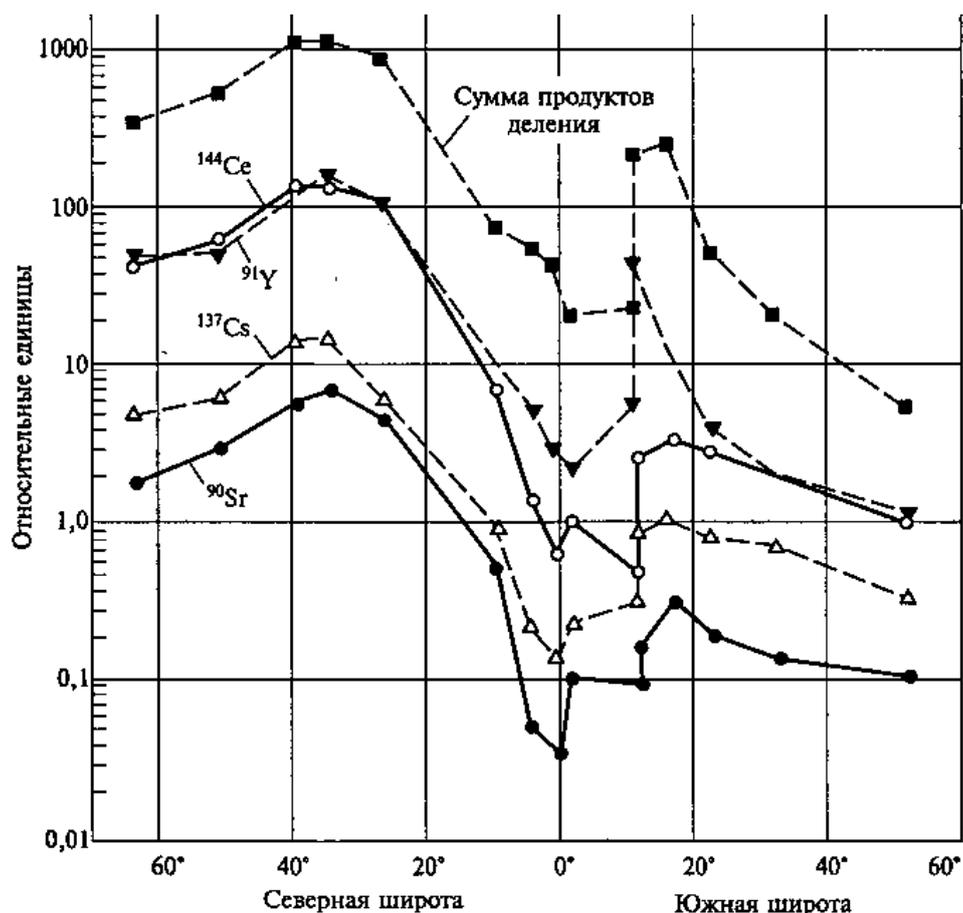


Рис. 3.2. Распределение концентраций продуктов деления ядерных взрывов в воздухе планеты на разных широтах

Безаварийные выбросы атомными электростанциями являются незначительными, но постоянными источниками поступления радионуклидов в атмосферу. Большая часть атмосферных загрязнений, выпадающих на поверхность Земли, при нормальном режиме работы АЭС крайне незначительна. В состав аэрозолей, выбрасываемых в атмосферу вследствие аварийной утечки теплоносителя первого контура реактора, входит сложный комплекс радионуклидов, в том числе ^{88}Kr , ^{134}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{140}Ba , ^{140}Za , ^{89}Sr , ^{131}I . Количество радиоактивных веществ, поступающих с выбросами реакторов в атмосферу, невелико. Коллективная ожидаемая доза

облучения населения, проживающего в радиусе 100 км от реактора при плотности $100 \text{ чел.} \cdot \text{кг}/\text{км}^2$, рассчитанная из среднего выброса и соответствующих дозовых коэффициентов, может колебаться от $3 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-4} \text{ чел.} \cdot \text{Гр}/\text{год}$.

Наибольшую опасность как потенциальные источники загрязнения атмосферы представляют предприятия по переработке ядерного топлива. Отходы (тепловыделяющие элементы – ТВЭЛы) этих предприятий содержат значительное количество долгоживущих радиоактивных веществ, в том числе радионуклиды, которые могут беспрепятственно поступать во внешнюю среду вследствие отсутствия разработок методов, позволяющих связывать или механически задерживать их. К таким радионуклидам относятся, в частности, тритий (^3H) и криптон (^{85}Kr), образующиеся при обработке ТВЭЛов. Отработавшие ТВЭЛы, поступающие на радиохимические заводы по переработке ядерных отходов, хранят под водой, которая одновременно служит охлаждающей средой и защитой (экраном) от ионизирующих излучений. Из хранилища ТВЭЛы направляют в камеру предварительной обработки, где их демонтируют, а стержни подвергают механической обработке для извлечения остатков топлива, которые выщелачивают азотной кислотой, а затем разделяют уран, плутоний, продукты деления и активации. Такая обработка ТВЭЛов сопровождается выделением газообразных и летучих продуктов деления. Опыт эксплуатации заводов по переработке ядерного топлива показал, что с выбросами этих предприятий в атмосферу поступают ^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{129}I , ^{131}I , ^{106}Ru , ^{134}Cs , ^{137}Cs , радиоактивные актиноиды.

Особого внимания в плане загрязнения атмосферы заслуживает радиоактивный криптон. На заводах по переработке ядерного топлива образуется около $400 \text{ Ки } ^{85}\text{Kr}$ ($14,8 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$) на 1 МВт электроэнергии в год. Доза на гонады от ^{85}Kr на расстоянии 1-100 км от завода крайне незначительна и составляет $2 \cdot 10^{-6} \text{ чел. рад}$ ($2 \cdot 10^{-8} \text{ чел. Гр}$) на 1 Ки ($3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$), или $0,0007 \text{ чел. рад}$ ($7 \cdot 10^{-6} \text{ чел. Гр}$) на 1 МВт (эл.) в год.

Вместе с тем именно эта химически инертная и безопасная в радиационном отношении составляющая выбросов является агрессивной по отношению к физическим экосистемным функциям атмосферы вследствие ее мощного вклада в ионизацию воздушной среды и трансформации нормального распределения этого процесса в разных слоях атмосферы.

Ионизация верхних слоев атмосферы под действием жесткого ультрафиолетового и ионизирующего излучений ведет к фотодиссоциации кислорода и образованию атмосферного озонового слоя планеты, выполняющего одну из важнейших экосистемных функций – экранирования и фильтрации космических излучений.

Второй, аналогичный, приземный слой атмосферы формируется благодаря реакциям ионообразования в непосредственной близости от поверхности Земли под действием радиации от естественных радионуклидов, преимущественно радона. При взаимодействии с этим газом над морем образуется до $12 \cdot 10^3$ пар ионов в 1 м^3 воздуха в секунду и до $5 \cdot 10^6$ пар ионов – над

сушей. Образование ионов в приземных слоях играет, очевидно, существенную антибактериальную (противоэпидемическую) функцию в биоценозах.

Распределение антропогенного источника ионизации атмосферы резко отличается от естественного. Практически весь образующийся ^{85}Kr выбрасывается в атмосферу в северном полушарии. Это приводит к некоторой неравномерности его распределения в атмосфере земного шара. Концентрация ^{85}Kr в южном полушарии в 1,3–1,4 раза ниже, чем в северном. По высоте ^{85}Kr распределяется практически равномерно вплоть до 20–25 км над уровнем моря. В настоящее время концентрация ^{85}Kr в атмосфере составляет $\sim 3 \text{ нКи/м}^3$ воздуха независимо от высоты над уровнем моря. Равномерное (по высоте) распределение криптона (β -активного излучателя с энергией β -частиц 0,25 МэВ и энергией γ -квантов 0,514 МэВ, периодом полураспада 10,75 лет) в атмосфере может привести к неблагоприятным экологическим последствиям.

Ионы воздуха являются ядрами конденсации и соответственно образования и роста водяных капель, сорбирующих основные сульфатные и нитратные токсические загрязнители атмосферы. Повышенная конденсация, как следствие повышенного диффузного ионообразования, в сочетании с массивным токсическим техногенным загрязнением среды является одним из факторов образования кислых туманов и дождей, закисления почв и ухудшения их репродуктивных функций, ведет к снижению иммунитета и, как следствие, к росту респираторных заболеваний. Массивное (диффузное) увеличение числа ядер конденсации может привести к формированию стратосферного сульфато-нитратного слоя, нарушению радиационного баланса Земли и к последующим труднопредсказуемым (нестабильным) изменениям климата.

Другим критическим радионуклидом, удаляемым в атмосферу в основном с выбросами заводов по переработке ядерного топлива, является тритий. Около 75% трития, содержащегося в ядерном топливе, выбрасывается в атмосферный воздух, что соответствует 19 Ки ($70,3 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$) ^3H в год на 1 МВт электроэнергии. При этом $1,2 \text{ Ки}$ ($4,4 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$) поступает с выбросами из реакторов, а 16 Ки ($59,2 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$) – от заводов по переработке ТВЭЛов. Расчетная коллективная доза облучения населения крайне невелика и составляет $2 \cdot 10^{-2} \text{ чел.} \cdot \text{Зв}$ на 1 МВт (эл.) в год. Явные экологические изменения от присутствия трития в среде не прогнозируются.

3.5. Воздействие радионуклидов на растительность

В растительные организмы радионуклиды попадают:

- 1) Во время атмосферных осадков;
- 2) При фотосинтезе (углерод и тритий участвуют в образовании углеводов, белков и других компонентов растительной ткани);
- 3) Из почвы.

Радионуклиды мигрируют в растения в основном через корневую систему. При этом из почвы потребляются лишь те изотопы, которые растворяются в воде: ^{90}Sr , ^{131}I , ^{140}Ba , $^{137,134}\text{Cs}$, ^{144}Ce (церий).

Степень воздействия радионуклидов на растительность зависит, прежде всего, от радиочувствительности различных видов растений. Естественный спектр видовой радиочувствительности и диапазон сопротивляемости воздействию радиации очень широки. Например, радиоустойчивость хвойного леса в 10 раз ниже, чем лиственного, в сотни раз ниже, чем дубового леса или травяного сообщества, и в тысячи раз ниже, чем радиоустойчивость лишайников (табл. 3.6). Накопление радиоизотопов растениями зависит и от типа почвы и от ее водного режима. Меньше накапливают радионуклидов произрастающие на песчаных и подзолистых почвах.

При этом экспериментально установлено, что осколочные продукты цезия и стронция в Белорусском Полесье аномально подвижны при одинаковой загрязненности почв в растениях зоны их оказывается обычно в 3–5 раз больше, чем в других географических районах.

Скорость поступления радионуклидов в растения зависит от плотности загрязнения почвы и форм подвижности нуклидов. На перепаханных полях усваиваются быстрее, на не вспаханных – медленнее. На переувлажненных угодьях почти четвертую часть рутения-106 и цезия-137 находили в корнях, около $2/3$ – в прикорневой почве и небольшую долю в почве, где не было корневой системы. На песчаной, свободной от корней почве содержится больше цезия-137, чем на увлажненной. Накопление стронция-90 в растениях не зависит от вида почвы, а лимитируется формой нахождения в ней нуклида. Стронций-90 попадает в организм в основном с картофелем и овощами. Существует также выраженная зависимость между количеством обменного кальция в и содержанием стронция-90 в растениях: чем больше в почве обменного кальция, тем меньше радионуклида поступает в растения.

Очень активно всасывают микроэлементы, в том числе радиоактивные вещества: *лишайники, мхи, грибы, бобовые, злаки* - так называемые *растения-концентраторы*. Из дикорастущих ягод таким свойством обладают: *клюква, малина, черника, земляника, голубика, крушина*. Правда их «загрязненность» зависит от уровня радиоактивности почвы. В лесу он всегда выше. В то же время выращенные на приусадебном участке ягоды обычно пригодны в пищу.

Радиационное воздействие на естественную растительность включает в себя такие явления, как внешнее облучение сообществ растений, поглощение ими радионуклидов и биологическая реакция на облучение. Распределение радионуклидов в экосистеме зависит от видовой структуры фитоценозов и их фотосинтезирующей активности. Очевидно, что пути миграции радионуклидов в сообществах растений луга и леса будут различными. Что касается луговых сообществ однолетних или многолетних трав, то к концу летнего сезона радионуклиды с остатками растений концентрируются в верхнем

слое почвы или дерна. На следующий год их распространение в травяной растительности и почве будет обусловлено процессами поглощения радионуклидов и их миграцией. Иная картина наблюдается в лесных экосистемах. Воздействие радионуклидов на лесные экосистемы зависит от уровня загрязнения. Активными накопителями радионуклидов являются такие древесные породы, как *ива*, *береза*, *сосна* и *ель*. Имея большую площадь листовой, деревья по сравнению с травами накапливают больше радионуклидов в кроне и коре.

В последующие годы радионуклиды попадают в слой подстилки. Сосновый лес содержит 55–90% радионуклидов в подстилке, а березовый – только 20%, тогда как главная часть оседает в верхнем слое почвы толщиной до 4 см.

Таблица 3.6 – Реакция сообществ наземных растений облучение γ -лучами

Сообщество	Минимальная доза, Гр	Обнаруживаемые изменения
Сообщество лишайников	2300	Коэффициент сообщества Индекс разнообразия Индекс подобия Индекс биомассы
	2000	
Сообщество трав	150–500	Коэффициент сообщества Индекс разнообразия Индекс биомассы
	100–900	
Дубово-сосновый лес	250	Коэффициент сообщества Индекс разнообразия
	420	
Лиственный лес	40	Индекс биомассы
Сосновый лес	3	Коэффициент сообщества

Корневая система растений поглощает радионуклиды главным образом в зоне их максимальной концентрации и выделяет их в любых зонах корневой системы. Рассмотрим механизм этого процесса. Корни растения поглощают радионуклиды из верхнего слоя почвы толщиной до 5 см, где концентрация радионуклидов является максимальной. Затем радиоизотопы по ксилемным путям переходят в листву и по флоэмным путям – в остальные части растения, включая корни. Таким образом, радионуклиды проникают в глубокие почвенные горизонты благодаря выделительной способности корневой системы. Такой процесс переноса радионуклидов является более интенсивным по сравнению с почвенным механизмом переноса, что способствует снижению радиоактивного заражения верхних слоев почвы, подстилки лесных или дерна травяных сообществ.

Реакция хвойного леса в окрестностях Чернобыля на воздействие радиации представлена в таблице 3.7.

Прежде всего, происходит радиоактивное заражение крон деревьев, поэтому в первый год после аварии на ЧАЭС относительно высокие дозы радиации были отмечены на иглах, листве и апикальной меристеме в точках роста. В последующие годы, когда большинство радионуклидов

мигрировало в подстилочный слой, а кроны деревьев восстановились, деревья все же стали более чувствительны к болезням. Степень радиационного повреждения растительных сообществ зависит от уровня загрязнения и поглощенной дозы. Тяжесть биологических повреждений возрастает с повышением уровня загрязнения.

Летальный эффект наблюдается при таких уровнях облучения, когда сильно поражены и нарушены основные жизненные процессы. Колебание и разнообразие индивидуальной летальности может изменять эффективные размеры растительных популяций и соотношение их биомасс в сообществе. Второй биологический эффект облучения состоит в том, что нарушаются функции репродуктивной системы. Облучение может привести к мужской и женской стерильности и снижению производства семян. Последствием радиационного воздействия является и снижение всхожести семян, вызванное серьезным повреждением генетической структуры зародыша. Совместное действие индивидуальной смертности, угнетения репродуктивной системы и снижения всхожести семян может изменить структуру растительного сообщества вследствие вытеснения радиочувствительных и экспансии радиоустойчивых видов.

Таблица 3.7 – Воздействие радиационного облучения на хвойные леса в Чернобыле и его окрестностях (оценка поглощенной дозы на 1 октября 1986 г.)

Доза, Гр	Зона
80–100	<i>Зона летального воздействия.</i> Полное отмирание деревьев в возрасте 40–50 лет видов <i>Pinus silverstris</i> (сосна обыкновенная) и <i>Picea excelsa</i> (ель обыкновенная) и различные повреждения части лиственных пород, образовавших так называемый «рыжий лес». Территория, где произошло отмирание сосны, составляет 4400 га, включая 600 га чистого соснового леса. Ожидается, что в летальной зоне на месте сосновых лесов со временем вырастут мягко-лиственные с преобладанием березы.
10–20	<i>Зона полуметального воздействия.</i> У большинства деревьев наблюдалось отмирание верхушечных точек роста, тогда как молодые деревья высотой 1–2,5 м, а также некоторые взрослые деревья вообще погибли. У лиственных деревьев сформировались ненормальные репродуктивные органы, часть их листы пожелтела. Эта зона занимает площадь 12500 га, включая 3800 га чистых сосновых лесов. Ожидается, что здесь сосна все-таки уцелеет, но спустя некоторое время на этой территории будут преобладать лиственные породы.
4–5	<i>Зона среднего воздействия (доза облучения 4–5 Гр).</i> Наблюдалось, судя по опаданию иголок и массовому образованию радиоморфозов, сильное подавление процессов роста. Зона занимает площадь 43400 га, включая 11900 га хвойного леса. Ожидается, что в этой зоне будут происходить активные репарационные процессы. Будет преобладать сосна обыкновенная, но возрастет удельный вес лиственных пород.
1–1,5	<i>Зона слабого воздействия.</i> Отмечены отклонения в образовании генеративных органов и подавление процесса роста. Эти леса занимают большую часть запретной 30-километровой зоны.

Специфической реакцией популяции растений на облучение является возрастание частоты морфологических нарушений. В Чернобыльской зоне часто наблюдались такие изменения, как гигантизм, который либо связан с увеличением числа хромосомных наборов, либо представляет собой радиоморфоз. Широко распространенными морфологическими отклонениями в популяции растений являются хлорофильные морфозы и мутации. Показательным также было увеличение различных морфологических отклонений в развитии листьев, стеблей и побегов, которое наблюдалось после катастрофы в популяциях различных видов растений.

Облучение может подавлять, а в малых дозах стимулировать процесс развития и роста. Иногда в сообществах растений подверженных облучению наблюдается подавление роста одних видов и стимуляция других, более радиоустойчивых.

Облучение изменяет биохимические, физиологические и генетические процессы в растительных организмах. Многие виды деревьев могут поглощать радионуклиды, которые откладываются в различных частях деревьев, что создает проблемы при практическом использовании растительных природных ресурсов. Воздействие радионуклидов на растительность можно представить как процесс, развивающийся в трех направлениях. Во-первых, происходит негативная селекция радиочувствительных генотипов и индивидов в популяциях растений. Во-вторых, радиация изменяет соотношение между различными видами в сообществе растений, давая преимущество радиоустойчивым видам и поражая радиочувствительные. В-третьих, облучение изменяет способ взаимодействия видов, поражая иммунную систему растений и активизируя мутационный процесс, который приводит к изменению сукцессии сообщества и процесса коэволюции видов.

3.6. Воздействие радионуклидов на диких животных

Радиационное воздействие на популяции диких животных и зооценозы имеет сходство и различие по сравнению с воздействием на растительность. В организм животного радионуклиды попадают с пищей. Но накапливаются они не одинаково не только разными видами животных, птиц, насекомых, но и различными их органами. Например, йод накапливается в щитовидной железе млекопитающих, стронций – в скелете. Различные виды животных отличаются разной радиочувствительностью. Низшие формы имеют высокий уровень устойчивости к воздействию радиации, а позвоночные, наоборот, предельно чувствительны к ней (табл. 3.8). Радиочувствительность организмов в процессе их онтогенеза также изменяется в широких пределах. Поглощенную дозу для отдельных животных можно разделить на внешнюю и внутреннюю. Если внутренняя индивидуальная доза формируется в результате вдыхания и передачи радионуклидов по трофическим цепям, то внешняя доза сильно варьирует вследствие нерегулярного

характера загрязнения наземных экосистем и подвижности животных. Если поглощенная доза для сообществ растений достаточно жестко связана с уровнем заражения окружающей среды, то для различных видов животных эта связь ослабевает вследствие их различной способности к передвижению и селективных контактов с окружающей средой.

Таблица 3.8 – Радиочувствительность видов животных (ЛД_{50/30} – доза, при которой гибнет 50% популяции через 30 дней после облучения)

Таксономическая единица	ЛД _{50/30} , Гр
Инфузория туфелька (<i>Paramecium aurelia</i>)	3000
Беспозвоночные	50–2000
Насекомые	25–2000
Рыбы	4–50
Птицы	5–30
Млекопитающие	2–11

Биологическая реакция животных на облучение включает летальные эффекты, репродукционные нарушения, снижение жизнеспособности потомства, отклонения в развитии и морфологии. В популяции диких животных в результате радиационного воздействия происходят биохимические, физиологические и генетические отклонения. Биогеоценозы как комплексные естественные экосистемы реагируют на любое радиационное воздействие. Генетические системы популяций реагируют на любую сколь угодно низкую дозу облучения, поскольку генетическое воздействие радиации порога не имеет.

Воздействие низких доз облучения (0,1–0,2 Гр в год) можно обнаружить в генетической системе зооценоза. Биохимические и физиологические изменения в организмах животных проявляются в популяциях при уровне облучения 1–2 Гр в год. Снижение численности популяции наблюдается при облучении примерно 5–25% летальной дозы (ЛД). Многие экосистемы проявляют негативную реакцию лишь при дозе 10–15 Гр/год.

Особенностью загрязнения радионуклидами является его долгосрочное воздействие на экосистемы. Популяции по-разному реагируют на острое и длительное облучение. При долговременном облучении низкими дозами негативная биологическая реакция популяции на облучение может снизиться благодаря физиологической и генетической адаптации.

Например, долгосрочное многократное облучение популяции плодовых мушек *Drosophila melanogaster* в каждом поколении дозой 7,5 Гр, которая увеличивает частоту рецессивных летальных мутаций от 0,1 до 0,8%, повлекло за собой снижение на 20% средней плодовитости самок в течение приблизительно первых пяти поколений. Такая депрессия наблюдалась у 20 поколений, но у следующих 20 поколений плодовитость постепенно повышалась на 20% по сравнению с интактной популяцией. Жизнеспособность

потомства снижалась у первых 10 поколений и от 20-го до 40-го поколения. Адаптивная реакция генетической системы популяции включала в себя повышение генетической устойчивости и снижение частоты мутаций.

В таблице 3.9 представлены данные о накоплении радионуклидов в различных таксономических группах диких животных на загрязненных радионуклидами, в результате аварии на ЧАЭС территориях. Мониторинг динамики накопления радионуклидов – необходимая часть комплексного исследования реакции зооценозов на воздействие радионуклидов. Очевидно, что между процессами распада и рассеяния радионуклидов в окружающей среде, накопления их животными, поглощенной дозой и биологической реакцией на уровне организма и биоценоза существует многофакторная корреляция. Изучение возможных взаимосвязей и их изменений во времени является одной из целей дальнейшего исследования биологической долгосрочной реакции зооценозов на загрязнение радионуклидами.

Следует принять во внимание, что в результате Чернобыльской катастрофы исследователь имеет дело не только с радиоэкологией экосистем, но и с изменением интенсивности человеческой деятельности в этой зоне, которая ранее оказывала сильное давление на популяции диких животных и весь зооценоз. Рост численности популяций основных видов животных, представляющих интерес для охотников, на загрязненных территориях показывает, что исследования должны быть междисциплинарными и комплексными, а также международными, по масштабу, так как радиационное заражение млекопитающих отмечено во многих странах Европы и Северной Америки.

В озерах и реках тоже существуют организмы-концентраторы, жадно поглощающие радиоактивные вещества. Радионуклиды обычно связаны с аэрозольными и пылевыми частицами, которые в воде оседают довольно быстро, и вся радиоактивность скапливается в придонных илах. Поэтому некоторые водоросли, ракообразные, моллюски, придонные животные и растения загрязняются в сильной степени. У рыб происходит накопление радионуклидов в печени и других органах. Особенно сильно в икре.

Таблица 3.9 – Накопление чернобыльских радионуклидов дикими животными

Почвенные беспозвоночные – наиболее многочисленная группа диких животных, на которых оказали воздействие радионуклиды (примерно 95% от общего числа животных видов и 90–99% биомассы наземных зооценозов). Эта группа животных активно влияет на миграцию радионуклидов. Исследование содержания радионуклидов показало, что почвенные беспозвоночные были сильно заражены в окрестностях Чернобыльской АЭС в 1986 г. (уровень гамма-активности составлял примерно 21,8–34,8 кБк/кг, а бета-активности – 48,1–166,7 кБк/кг). Наиболее загрязненными оказались сапрофаговые виды, на которых замыкаются трофические цепи, а им предшествуют фитофаговые и зоофаговые виды. В следующем году содержание радионуклидов в организме снизилось почти в 10 раз, и такой уровень долго сохранялся.

Насекомые. Обследование образцов насекомых показало, что наиболее загрязненные насекомые жили в экосистемах, близких к 30-километровой зоне. Интенсивность гамма-излучения насекомых летом 1986 г. составляла 4,8–218,3 *кБк/кг*, а бета-излучения – 0,2–37,0 *кБк/кг*. Самое высокое содержание радионуклидов отмечено у личинок фитофаговых насекомых: гамма-излучение – около 70,3 *кБк/кг*, бета-излучение – 59,2 *кБк/кг*. Содержание радионуклидов в организмах насекомых различалось на загрязненных территориях и в относительно чистых экосистемах в 10 и даже в 100 раз.

Амфибии и рептилии. Содержание радионуклидов в тканях амфибий и рептилий изменялось в широких пределах, однако наблюдалась несомненная взаимосвязь с уровнем загрязнения окружающей среды. В 1986 г. самое высокое содержание радионуклидов наблюдалось в организме животных, обитающих в экосистемах, близких к 30-километровой зоне (вплоть до 370 *кБк/кг*). Уровень гамма-радиации на относительно чистых территориях в 1986 г. составлял 2,4 *кБк/кг*. Пятилетние наблюдения показали, что в экосистемах, расположенных внутри 30-километровой зоны, уровень содержания радионуклидов в тканях амфибий и рептилий стабилизировался, и только в отдельных местах максимальный уровень гамма-излучения возрос благодаря накоплению радионуклидов.

Птицы. Содержание радионуклидов в организме птиц сильно колебалось, но наблюдалась взаимосвязь с уровнем загрязнения окружающей среды. Максимальный уровень радиации, зарегистрированный в тканях птиц, составлял 300 *кБк/кг* и превышал допустимый уровень для мяса в 3–6 раз.

Спустя 2 месяца после аварии организм каждой третьей птицы был серьезно поражен радионуклидами, у 15% особей уровень бета-радиации составлял более 18,5 *кБк/кг*. Через год в тканях птиц из экосистем, примыкающих к 30-километровой зоне, содержалось в 5–7 раз больше радионуклидов, чем у птиц из экосистем на относительно чистых территориях. Летом 1987 г. уровень радиоактивности водных видов повысился в 2–5 раз. Интересно, что в организме молодого поколения он был намного выше, чем у взрослых особей, у самок выше, чем у самцов. Содержание радионуклидов в тканях птиц через год после аварии снизилось в 5–10 раз, и уровень гамма-радиации составил 0,5–8,3 *кБк/кг*. В 1988–1990 гг. он изменялся слабо, а в некоторых случаях наблюдалось повышение содержания радионуклидов.

Млекопитающие, живущие в наземных экосистемах, тесно контактируют с загрязненной поверхностью почвы. Обследование 12 видов мелких млекопитающих показало, что эти животные, обитающие в загрязненных экосистемах, имеют высокий уровень содержания радионуклидов. Отличительной чертой этой группы животных является то, что с течением времени уровень загрязнения их организма не изменяется, а в некоторых случаях даже возрастает. Уровень гамма-радиации мелких млекопитающих из 30-километровой зоны составил в 1989 г. до 225 *кБк/кг* и в 1990 г. – до 335 *кБк/кг*. Концентрация стронция-90 в 1986 г. составляла 0,5–0,6 *кБк/кг* и возросла в 1990 г. до 0,7 *кБк/кг*. Почки и печень мелких млекопитающих имели самую высокую концентрацию бета-излучения. Гамма-радиоактивность трехнедельных грызунов составляла 15 *кБк/кг*, а взрослых особей – до 70 *кБк/кг*. Это означает, что радионуклиды накапливаются с возрастом. Увеличение содержания радионуклидов в организме млекопитающих-хищников было отмечено в 30-километровой зоне. В организме лис и диких кабанов в 1986 г. оно составило 400 *кБк/кг*, лосей – 100 и косуль – 50 *кБк/кг*. С течением времени содержание радионуклидов в тканях млекопитающих-хищников снизилось в 5–10 раз, однако до сих пор сохранилась его высокая индивидуальная изменчивость. Отмечена взаимосвязь между накоплением радионуклидов в организме млекопитающих-хищников и загрязнением окружающей среды.

Действие радиации на животный мир изучено недостаточно. Известно, что очень высокие дозы приводят к гибели млекопитающих, меньшие – к заболеваниям, генетическим изменениям, половым расстройствам, неспособности к воспроизведению, выкидышам.

3.7. Воздействие радионуклидов на агроэкосистемы

Основным последствием Чернобыльской катастрофы в Беларуси является резкое изменение землепользования и сельскохозяйственной практики в результате загрязнения радионуклидами почвы, растений, животных и продуктов животного происхождения.

Миграция радионуклидов зависит от их химической формы и концентрации, типа почв, присутствия стабильных изотопов радиоактивных элементов, их растворимости и доступности для корневой системы растений. Концентрация в почвах калия, который может замещать цезий-137, и кальция, замещающего стронций-90, также сильно влияет на скорость поглощения радионуклидов растениями и динамику их попадания в почву.

При запахивании радионуклиды перемещаются на глубину 15–25 см или более, но их дальнейшее проникновение вглубь происходит медленнее. Поскольку растения могут поглощать радионуклиды в растворимой обменной форме, тип почв влияет на их доступность.

Растения могут «захватывать» выпавшие радионуклиды непосредственно воздушной биомассой, хотя с большей вероятностью они поступают внутрь через корневую систему. Овощи с большой листовой поверхностью, например капуста, поглощают радионуклидов больше, чем редкооблиственные (томаты и лук). Корневое поглощение радионуклидов растениями изменяется в зависимости от вида, но в целом существует взаимосвязь между уровнями загрязнения почвы и произрастающих на ней растений.

Коэффициент переноса почва–растение для стронция-90 намного ниже на песчаных почвах, чем на глинистых. Для цезия-137 отмечена меньшая разница. Коэффициенты переноса различны также для разных групп растений. Для стронция-90 и цезия-137 они меньше у зерновых и клубневых и выше у трав и зелени.

Радионуклиды попадают в организм животных с водой, пищей и по воздуху. Существует прямая взаимосвязь между уровнем радиоактивного загрязнения сельскохозяйственных земель и содержанием радионуклидов в продуктах животноводства. Специальная обработка некоторых продуктов животного происхождения перед употреблением в отдельных случаях позволяет снизить уровень радиоактивного загрязнения.

Проникнув в организм животных, радионуклиды влияют на основные жизненные процессы. Так, у скота отмечается расстройство половых циклов, наблюдаются отклонения в развитии, возрастает количество ненормальных родов, повышается частота цитогенетических аномалий в клетках как животных, так и растений.

3.7.1. Радионуклиды и растениеводство

Процесс накопления радионуклидов растениями зависит от физических и химических характеристик. Химические элементы делятся на пять групп в зависимости от степени их накопления растениями (см. табл.3.4). Коэффициент переноса (КП) для цезия-137 на кислых почвах (рН 4,5–5,5) почти в 8 раз выше, чем в почвах с рН от 6,6 до 7,5; для озимой пшеницы КП = 0,8 и 0,1, для картофеля – 0,7 и 0,1, для естественных пастбищ – 4,0 и 1,9 соответственно.

Изучение процессов всасывания радионуклидов растениями из водных растворов и почв показало, что коэффициенты переноса для различных радионуклидов различаются: до 20 раз для стронция-90, до 1000 раз для цезия-137. Примерно десять физических и химических характеристик почвы влияют на перенос радионуклидов в системе почва–растение. Для различных радионуклидов коэффициенты переноса изменяются в 10–20 раз, а для некоторых радионуклидов – даже в 100 или 200 раз в соответствии с изменением химических и физических характеристик почвы. Коэффициент переноса для бедных песчаных почв обычно выше, чем для плодородных, с высоким содержанием частиц глины и гумуса. На карбонатных типах почв процесс всасывания растениями стронция-90 снижается в 1,1–3 раза, а цезия-137 – повышается в 1,3–1,4 раза.

Биологические особенности различных видов растений влияют на перенос радионуклидов из почвы в растение. Межвидовые различия уровней накопления радионуклидов растениями через корневую систему могут достигать 10 и даже 30 раз. Бобовые растения поглощают стронций-90 в 2–6 раз интенсивнее, чем зерновые. Межсортовая разница в накоплении радионуклидов растениями меньше, чем межвидовая, и обычно колеблется (не более чем в 3 раза). Различные органы растений накапливают радионуклиды по-разному: листья и стебли – в большей степени. Например, в листьях фасоли содержалось 53–68% стронция-90, а в стебле – 15–28%, в стручках – только 7–14%.

Из огородных растений повышенное содержание стронция и цезия накапливается в укропе, шпинате, петрушке, лекарственных растениях. Но не все органы растения «загрязняются» одинаково. Более всего радиоактивных веществ накапливают семена.

По количеству цезия-137 от меньшего к большему растения можно расположить в ряд: *пшеница* < *ячмень* < *горох* < *гречка* < *овес* < *фасоль* < *картофель* < *морковь* < *свекла* < *бобы*. Салат и ботва многих растений накапливают в 5–50 раз больше нуклидов, чем зерно и корнеплоды. Большое количество накапливают огурцы, морковь, томаты, небольшое – лук, капуста, свекла. Накапливают нуклиды тимopheевка, тысячелистник, клевер. Устойчиво чистые корма луговых трав можно получить, если уровень загрязнения по цезию-137 не превышает 555 $\text{кБк}/\text{м}^2$. В то же время клевер, пригодный для кормления, получают при плотности загрязнения изотопами цезия до 925 $\text{кБк}/\text{м}^2$, злаковые травы – до 1480 $\text{кБк}/\text{м}^2$.

Необходимо при этом помнить, что загрязнение, превышающее в 2–3 раза корневой путь поступления, происходит в период уборки урожая.

Применение калийных и фосфорных удобрений, известкование почв и использование органических веществ перед посадкой растений способствуют снижению поглощения радионуклидов и уменьшают радиоактивное загрязнение в 1,5–5 раз. Внесение азотных удобрений вместе с калийными и фосфорными или отдельно дает обычно отрицательный результат и повышает уровень загрязнения продуктов растениеводства.

Травы являются интенсивным накопителем радионуклидов. Мелиорация естественных лугов и пастбищ значительно сдерживает процесс накопления радионуклидов растениями (в 1,4–9 раз). Улучшение лугов путем вспашки снижает загрязнение трав радионуклидами в 2–4 раза, а внесение перед вспашкой таких мелиорантов, как цеолит или доломитовая мука, уменьшает загрязнение продуктов растениеводства в 5–7 раз.

Различают прямое и косвенное воздействие радиации на биологические процессы, происходящие в живых клетках. Биологическое воздействие зависит от физических характеристик облучения и сопутствующего воздействия других физических и химических факторов. Биологическая реакция растений на облучение основана на принципе мишени и усиления. Основой реакций организма растений на облучение являются микролокальные события, связанные с изменением структуры ДНК и РНК под воздействием ионизирующей радиации с последующим усилением изменений в метаболизме клетки и программе дальнейшего развития. На уровне клетки радиационные эффекты могут проявляться в виде подавления активности деления клетки и возрастания частоты цитогенетических повреждений. Организм растения реагирует на воздействие радионуклидов путем подавления или стимуляции процессов роста и обмена веществ. Клетки меристемной ткани очень чувствительны к облучению, их радиационное поражение приводит к различным морфологическим изменениям листьев, стеблей, корней, цветков и семян. Стимуляция роста и индивидуального развития растений наблюдалась при относительно низких дозах облучения (5–10 Гр для семян и 1–5 Гр для растущих растений). Уровень радиостойкости растений изменяется и зависит от вида и сорта. Облучение растений значительно изменяет их продуктивность. Качество урожая облученных растений, как правило, ниже, причем соотношение главных химических соединений может быть также изменено.

Загрязнение радионуклидами сельскохозяйственных земель требует изменения традиционной практики выращивания растений. Разработка и использование адаптивных сельскохозяйственных технологий необходимы для реабилитации и восстановления растениеводства на территориях с низким уровнем загрязнения. Адаптивная стратегия ведения сельского хозяйства включает в себя изменения практики землепользования, разработку и использование специальных агротехнических контрмер, изменение набора сортов и биологических видов выращиваемых растений, а также приемов уборки урожая и его хранения.

3.7.2. Радионуклиды и животноводство

Радионуклиды попадают в организм животного в основном с пищей и в меньшем количестве через дыхательные пути или проникают через кожу. Уровень загрязнения продуктов питания является основой, определяющей общее количество радионуклидов в организме. После проникновения в желудок животного радионуклиды включаются в процесс обмена веществ, и организм реагирует на воздействие радиации. Они участвуют в процессе всасывания и усвоения, переносятся с кровью к различным органам и тканям, осаждаются в них или удаляются из тела животного. Содержание радионуклидов в различных органах и тканях животных определяется равновесием между этими процессами.

Процесс всасывания радионуклидов и переноса их через мембраны клеток основан на пассивной диффузии или на механизмах активного перемещения и пиноцитоза. Скорость усвоения и переноса радионуклидов зависит от физических и химических характеристик соединений, в которые включены эти нуклиды. Первой стадией метаболизма радионуклидов является их преобразование в усвояемую форму с помощью физической фрагментации, обработки ферментами и кислой средой желудочного сока. Усвоение радионуклидов, трансформированных в ионизированные формы, зависит от химической природы элементов и вида животных. Например, иод-131 полностью усваивается мясным и молочным скотом, на 75–80% – домашней птицей и на 33–76% – свиньями. Цезий-137 усваивается на 100% свиньями, на 67% – домашней птицей и на 50–75% крупным рогатым скотом и овцами. Стронций-90 обычно усваивается меньше, чем другие радионуклиды (6–16% для скота и овец, 13% – для свиней и 50–80% для домашней птицы).

Степень усвоения радионуклидов зависит от возраста животных. Например, организм новорожденных телят усваивает до 93% стронция-90, ягнят – до 100, поросят – до 97, а цыплят – до 50%. Усвоение цезия-137 молодняком колеблется от 93 до 100%.

После усвоения радионуклиды проникают в кровь и соединяются с кроветворными элементами и компонентами сыворотки. Иод-131 входит в состав белков крови, около 65% его содержится в крови в связанном с эритроцитами состоянии. Цезий-137 не образует связей с белками крови овец, около 93–99% его ионов находится в состоянии диализа. Что касается стронция-90, то 30–40% его ионов концентрируется в белках сыворотки. Радионуклиды, которые переносятся кровью к органам и тканям, могут селективно откладываться в них. Избирательность тканей при распределении радионуклидов по телу животного лучше проявляется у молодых организмов. Например, концентрация стронция-90 в скелете телят составляет 1,9% от общего количества, поступившего перорально, ягнят – 69,0 и поросят – 14,0%. У взрослых животных соответствующие концентрации достигают 0,1, 5, и 1%. В мышцах, сердце, печени, почках и легких у телят откладывается 0,01–0,04% стронция-90, а в органах взрослых животных – 0,002–0,005%.

В скелете телят откладывается 0,27% цезия-137, в мышцах – 0,35, в сердце – 3,6, в легких – 1,7, в печени – 1,65 и в почках – 4,8%. При длительном потреблении пищи, загрязненной радионуклидами, стронций-90 обычно концентрируется в скелете животных, а цезий-137 – в мягких органах и тканях. В случае долговременного поступления радионуклидов в тело животных вначале их содержание в органах и тканях возрастает, а затем устанавливается баланс между их поступлением и выведением и содержание радионуклидов в тканях животных поддерживается на одном уровне. Состояние равновесия в мягких тканях крупного рогатого скота и овец для стронция-90 достигается через 5–7 дней, а для свиней и птицы – через 30–90 дней. По содержанию цезия равновесное состояние достигается позднее: для овец – через 105 дней, для крупного рогатого скота – через 150 дней. В результате долговременного поступления радионуклиды концентрируются следующим образом: стронций-90 – в скелете (21–28% от ежедневного рациона), а цезий-137 – в мягких тканях телят (20–55%), в тканях взрослых животных – от 4 до 9%.

Радионуклиды выводятся из органов и тканей животных через желудочно-кишечную систему, легкие, почки, кожу и молочные железы. Из мягких тканей они удаляются более легко, чем из костей скелета. Например, цезий-137 через 3 дня выводится на 45%, а через 46 дней – на 55%, но на выведение половины содержащегося в скелете коров стронция-90 необходимо более 3000 дней. Цезий-137 и иод-131 выделяются в основном почками и в меньшем количестве (около 3%) через молочные железы коров.

Радионуклиды, содержащиеся в мясе, яйцах и молоке, могут попасть в организм человека. Перенос радионуклидов в мясные продукты из пищевого рациона скота зависит от физических и химических характеристик нуклидов, вида животных и их возраста. После долговременного поступления стронция-90 в костях скелета крупного рогатого скота его накапливается 7380% от содержания в ежедневном рационе, а в мышцах – только 8%, для свиней – соответственно 1320 и 1,1%. В состоянии равновесия содержание цезия-137 в скелете коров составляет 22%, а в мышцах – 810% содержания в ежедневном рационе. В скелете свиней откладывается 3,5% ежедневной концентрации этого радионуклида в рационе, а в мышцах – 22%. Причем молодые животные накапливали намного больше радионуклидов в органах и тканях.

После поступления радионуклидов в организм коров в течение 2 дней они интенсивно переносятся в молоко. За это время 0,09% стронция-90 и 0,42% цезия-137 содержится в 1 л молока. В течение последующих 8 дней 18% цезия-137 и 2,8% стронция-90 попадает из организма животного в молоко. Интенсивность переноса радионуклида в молоко зависит от вида, породы и индивидуальных характеристик животных (средний коэффициент их переноса в молоко составляет 1,0 для цезия-137 и 0,15 для стронция-90).

Переход стронция-90 из пищевого рациона кур в яйца составляет от 40 до 60% ежедневного поступления. Около 96% концентрируется в скорлупе яйца, 3,5 – в желтке и 0,2% – в белке. Максимальное содержание

радионуклидов отмечено в первый день после их поступления. Максимальная концентрация стронция-90 обнаружена в скорлупе, цезия-137 – в белке (68,7%), а иода-131 – в желтке (170%).

Итак, основными источниками поступления радиоактивности в организм человека являются мясо-молочные продукты. Больше накапливает стронция и цезия говядина, меньше свинина. Менее всего накапливают радионуклиды жиры.

3.8. Радионуклиды в продуктах питания

Загрязняющие внешнюю среду радионуклиды способны включаться в качестве «чужеродных веществ» в «пищевую цепь» и вместе с продуктами питания попадать в организм человека. Источники таких радионуклидов приведены на рис.3.3.

К естественным источникам относят радиоактивные вещества, находящиеся в земной коре, ее породах и почве, откуда они попадают в воду и пищевые продукты. В эту группу входит прежде всего ^{40}K и ряд других космогенных радионуклидов, относительно равномерно распределенных на поверхности земного шара, а также, в меньшей степени, долгоживущие радионуклиды – продукты распада цепочек ^{238}U , ^{232}Th . В регионах со средним уровнем естественной радиации годовое поступление ^{238}U в организм человека с продуктами питания оценивается, по данным Японии, Англии и США, примерно величиной 5 Бк, превышая таковые за счет воздуха и питьевой воды. Аналогичная зависимость наблюдается, по данным Англии и России, в отношении поступления в организм человека ^{226}Ra . Годовое поступление этого изотопа с пищей достигает 15 Бк, что в 1000 и более раз превышает его поступление с воздухом.

Основным поставщиком в организм человека долгоживущих продуктов распада ^{222}Rn (^{210}Pb и ^{210}Po) также являются продукты питания. Концентрации этих изотопов в молоке и мясе обычно невелики, в хлебопродуктах и овощах – умеренные, в рыбе и других обитателях морской среды – относительно высокие. Годовые поступления связаны с характером питания и колеблются от 20 – 30 Бк в США и Англии, до 40 Бк – в Германии, России, Беларуси, Индии, Италии и до 200 Бк – в Японии. Особенно большое годовое поступление этих радионуклидов (до 140 Бк ^{210}Pb и 1400 Бк ^{210}Po) отмечено у населения, проживающего в арктических и субарктических регионах, что связано с употреблением в пищу в качестве основного продукта питания мяса северных и канадских оленей, питающихся в зимний период лишайниками, накапливающими в своем составе эти изотопы.

^{232}Th и ^{228}Ra поступают в организм человека также в основном с пищей растительного и животного происхождения. Другие естественные радионуклиды поступают в организм человека в очень небольших количествах, вследствие чего интереса не представляют.

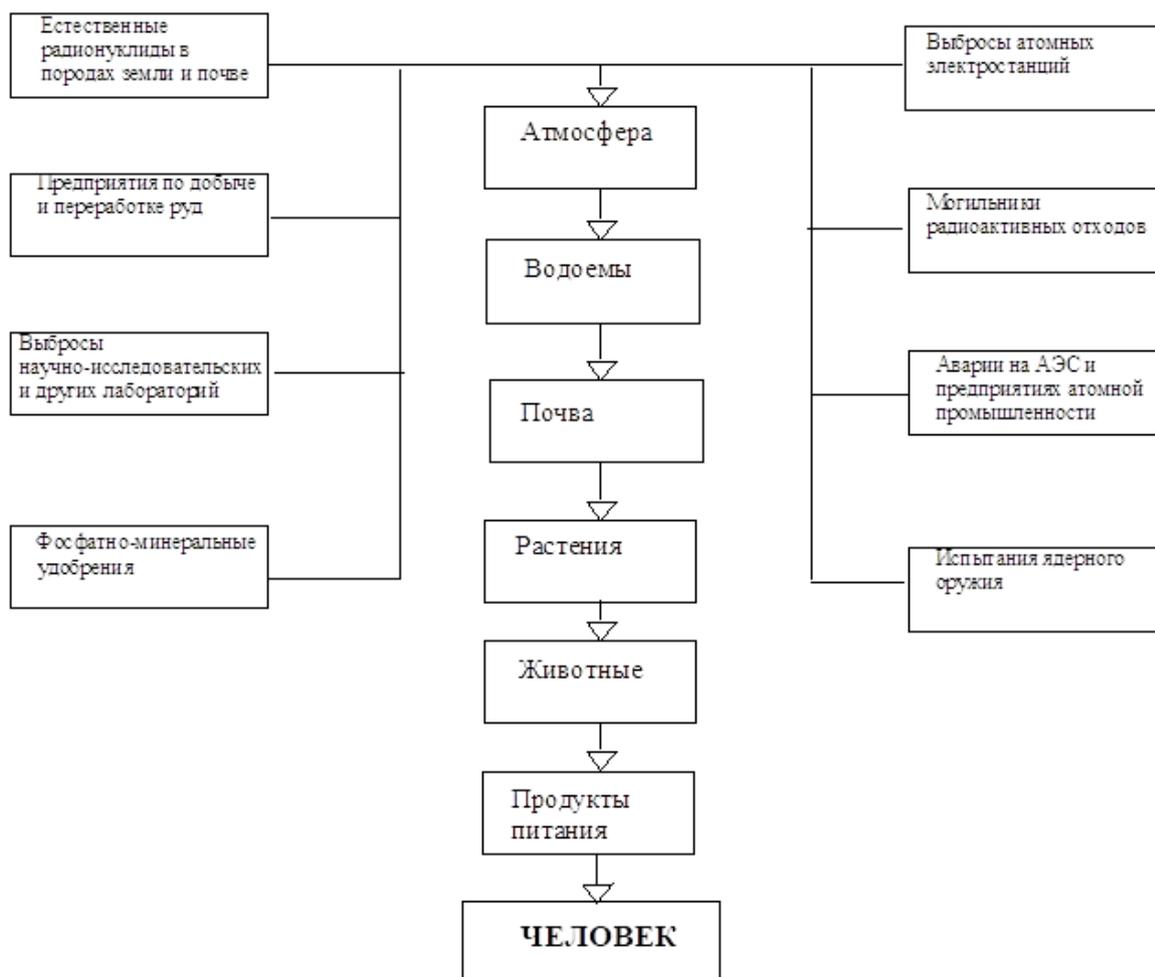


Рис. 3.3. Источники поступления радионуклидов в «пищевую цепь» и организм человека

Перечисленные естественные радионуклиды могут попадать в продукты питания в результате применения фосфорсодержащих минеральных удобрений за счет высокого уровня их содержания в фосфатных породах – исходном материале для их получения.

Значительно более важным с экологической и гигиенической точек зрения представляется загрязнение окружающей среды в результате строительства и эксплуатации ядерных реакторов и использования радиоактивных изотопов в других отраслях народного хозяйства, а также захоронения твердых и жидких отходов таких производств. В этих случаях в окружающую среду, а следовательно, и в продукты питания могут попадать большие количества самых разнообразных искусственных радионуклидов (^7Be , ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{59}Fe , $^{57,58\text{и}60}\text{Co}$, ^{63}Ni , ^{65}Zn , ^{76}As , ^{88}Rb , 89,90 и ^{91}Sr , 95 и ^{97}Zr , ^{95}Nb , ^{99}Mo , ^{99}Tc , 103,105 и ^{106}Ru , $^{108\text{и}110}\text{Ag}$, ^{113}Sn , ^{115}Cd , 124 и ^{125}Sb , ^{123}Sn , ^{123}Te , $^{134\text{и}137}\text{Cs}$, 139,141 и ^{144}Ce , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{182}Ta) и самое главное, ряд изотопов с большим периодом полураспада: ^{14}C (5730 лет), ^{129}I (16 млн лет) и др.

Поступление столь широкого спектра радионуклидов в окружающую среду приводит к загрязнению ими рыбы и других морепродуктов.

По данным зарубежных источников, радиоактивность рыбы (треска, камбала, палтус, сельдь) может достигать 690–750 *Бк/кг* (суммарно по β -излучению), 23–28 *Бк/кг* (по ^{134}Cs), 570–590 *Бк/кг* (по ^{137}Cs). Еще более загрязненными являются морские животные, имеющие раковину или панцирь. В них концентрация активности превышает аналогичную у рыбы, выловленной в тех же местах, в семь – десять (омары и крабы соответственно) и даже в 90 раз (береговые моллюски).

Наиболее серьезные изменения в окружающей среде были отмечены в период испытаний в атмосфере или на поверхности Земли ядерного оружия и при серьезных авариях на ядерных предприятиях.

НКДАР на основании данных из разных стран мира, в той или иной степени пострадавших в результате аварии на Чернобыльской АЭС, пришел к заключению (1993), что загрязненные продукты питания явились одним из наиболее важных источников облучения людей ^{131}I и ^{137}Cs . В общем выбросе в результате чернобыльской аварии на долю этих радионуклидов, а также ^{134}Cs приходится более 43% радиоактивных веществ. Указанные радионуклиды попадали в организм человека с молоком и зеленью вскоре после их непосредственного выпадения на траву, растущую на пастбищах, и на огородные культуры. Другие основные продукты питания (зерновые, корнеплоды, фрукты, мясо) попадали в организм человека лишь спустя некоторое время после загрязнения, что снизило их опасность как источника поступления ^{131}I (период полураспада 8,04 суток), к этому времени в значительной степени снизившего свою активность.

Проведенный НКДАР анализ показал, что на долю ^{137}Cs , а также ^{134}Cs приходится более 50% дозы внутреннего облучения радионуклидами, поступающими с пищей.

Следует упомянуть и о возможности поступления в организм через «пищевую цепь» еще одного радионуклида – ^{90}Sr . Хотя в общем выбросе Чернобыльской АЭС на долю ^{90}Sr приходится около 4%, значение его чрезвычайно велико: при поступлении в организм человека стронций накапливается в костной ткани и практически не выводится, период его полураспада очень большой (29,12 лет).

Стронций в больших количествах поступал во внешнюю среду и ранее – в период испытаний ядерного оружия. За этот период суммарное поступление этого радионуклида составило 600 *ПБк*, а его среднее содержание в почве северного полушария планеты в 1975 г. составляло 2068 *Бк/кг*.

Источниками ^{90}Sr в продуктах питания являются молоко, хлеб, овощи и фрукты. Так, в 1960–1975 гг. население США и Дании потребляло с молочными продуктами 30 % ^{90}Sr ; с зерновыми продуктами – 17 и 45%; с овощами и фруктами – 54 и 24% соответственно. На мясные продукты приходится очень небольшой процент.

Концентрация ^{90}Sr , попавшего в атмосферу в результате взрывов ядерного оружия и затем перешедшего в продукты питания, в последующие годы постоянно снижалась.

Одним из основных направлений профилактики неблагоприятного воздействия радионуклидов является контроль за содержанием их 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. 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. 3.10).

Таблица 3.10 – Содержание радионуклидов, при котором допускается прием продукции на переработку для пищевых целей

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

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.

3.9. Этапы действия ионизирующих излучений

Действие ИИ на биологические объекты можно разделить на несколько этапов:

– физический, – физико-химический, – биохимический, ранние биологические эффекты, отдаленные биологические эффекты.

2.9.1. Физический (начальный) этап

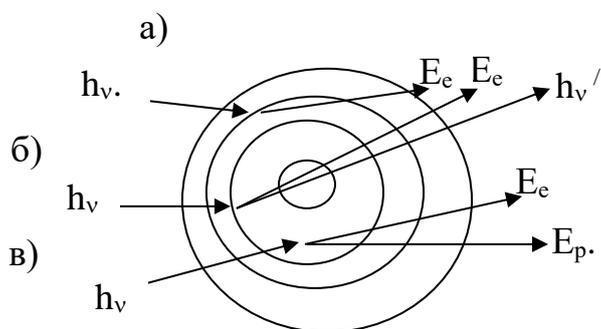
Этап длится 10^{-16} – 10^{-13} с.

При прохождении через вещество заряженные частицы теряют свою E , вызывая возбуждение и ионизацию встречающихся на их пути атомов. Этот процесс продолжается до тех пор, пока общий запас E частиц не становится настолько малым, что они утрачивают свою ионизирующую способность.

Если это (e), 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 (E) излучается в виде тормозного рентгеновского излучения.**

Рентгеновское излучение, γ -излучение, тормозное излучение – отличаются друг от друга происхождением и имеют свой диапазон E , хотя границы диапазонов обычно не определены, т.е. условны.

Основными процессами, сопровождающими прохождение фотонного (ЭМИ) излучения через вещество являются: фотоэффект; Комптон-эффект; рождение позитрон-электронной пары (см. рис.3.4).



а) $E_e = h\nu - u_i$ - фотоэффект; б) $E_e = h\nu - u_i - h\nu'$ - Комптон-эффект; в) $h\nu = E_e + E_p$ - образование пары позитрон-электрон.

Рис.3.4. Схема процессов, сопровождающих прохождение фотонного излучения через вещество

а) фотоэффект (взаимодействие с веществом ЭМИ с малой энергией) – это процесс при котором атом полностью поглощает γ -квант с энергией $h\nu$ и испускает e (электрон) с кинетической энергией: $E_e = h\nu - u_i$, где u_i – энергия связи электрона на i -той оболочке, $h\nu$ – энергия γ -кванта.

б) Комптон-эффект – это процесс при котором γ -квант, взаимодействуя с электроном, передает ему часть своей энергии и рассеивается под некоторым углом, а электрон покидает атом с кинетической энергией: $E_e = h\nu - u_i - h\nu'$, где $h\nu'$ – энергия γ -кванта после частицы.

в) рождение позитрон-электронной пары – это процесс при котором γ -квант вблизи ядра превращается в пару частиц- электрон и позитрон, которые приобретают соответствующие кинетические энергии: E_e и E_p .

Таким образом, при прохождении ИИ через вещество происходит ионизация или возбуждение (на один акт ионизации происходит несколько актов возбуждения) атомов и молекул вещества либо непосредственно заряженными частицами (α , β , протоны), либо опосредовано 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 его энергия по тепловому эффекту очень мала: так смертельная доза $10 \text{ Gr} = 1000 \text{ рад}$ на все тело, но ей соответствует тепловая энергия, которая позволяет нагреть тело человека на $0,001^\circ\text{C}$, что соответствует употреблению 1 чашке горячего чая.

Не может объяснить действие радиации и непосредственная ионизация атомов, поскольку при дозах облучения организма, которые вызывают значительные его повреждения и даже его гибель, относительное количество возникающих ионов незначительно. Например, однократное облучение дозой 6 Gr для человека соответствует образованию приблизительно 10^{15} ионов/ см^3 ткани, что в пересчете на ионизацию молекул воды составляет дополнительно 1 пару ионов на 10 млн. молекул воды, что значительно ниже естественного уровня ионизованности воды в организме. Все это означает, что биологическое действие ИИ подразумевает существование других этапов, значительно усиливающих первоначальное воздействие излучения на физическом этапе.

3.9.2. Физико-химический этап

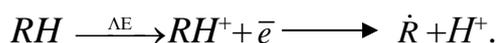
Этап длится от 10^{-10} с до нескольких часов. Любой радиобиологический эффект, начинается с взаимодействия ИИ с биологическими молекулами, в результате которого происходит инактивация макромолекул, т.е. их биологические функции частично или полностью утрачиваются. В основе инактивации молекул лежит прямой и косвенный механизмы действия радиации.

Прямой механизм действия радиации – это такие изменения, которые возникают при непосредственном поглощении молекулами энергии излучения включающий три стадии.

1 стадия: Энергии ИИ ($E_{и.и.}$) поглощается непосредственно биоактивными молекулами («мишенями»), в результате чего возникают возбужденные и ионизированные молекулы.



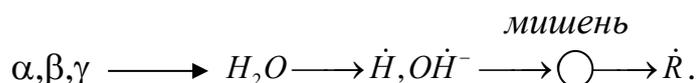
2 стадия: Перераспределение возбужденными молекулами избыточной энергии (ΔE):



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

3 стадия: 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 или нарушение структуры нуклеиновых кислот и т.д.

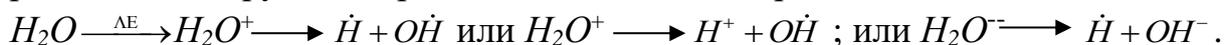
Косвенный механизм действия радиации – это взаимодействие биологически активных молекул с промежуточными продуктами, которые возникают под действием ИИ.



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 косвенное излучение вносит **радиолиз воды**. Под действием ИИ молекула воды превращается в ион с образованием высокоэнергетического электрона:

$H_2O \xrightarrow{\Delta E} H_2O^+ + e^-$, 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: $\longrightarrow H_2O^+ e_{aq}^- H_2O$.

Возникающие ионы и свободные радикалы взаимодействуют как с друг другом (образуя молекулярные продукты) так и с биологическими молекулами и с молекулами растворенного кислорода (образуются перексид водорода – H_2O_2 , гидропероксидный радикал HO_2).

При избыточном количестве радикалов OH^- кислород усиливает радиационные повреждения, вследствие увеличения выхода радикалов.

* Свободный радикал – это электрически нейтральные атомы и молекулы с непарным электроном на внешней орбите.

Более того, присутствие кислорода может служить причиной запуска 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).

3.9.3. Биохимический этап. Действие ионизирующих излучений на клетку

Этап длится от 10^{-6} с до несколько часов.

Основные процессы лучевого поражения органа начинаются на уровне клетки. Любой многоклеточный организм берет свое начало с одной единственной клетки путем многократных клеточных делений. Клетка универсальна в том смысле, что она имея схожее строение присуща всему живому и уникальна, т.к. 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, позволяющих сохранять стабильность внутриклеточной среды и обеспечивает процессы жизнедеятельности и функционирования клетки.

Основными компонентами мембраны биологической клетки являются **липиды и белки**.

Типичный липид – состоит из молекулы глицерина, три гидроксильные группы которого соединены с жирными кислотами (длинные цепи атомов «С» с гидроксильными группами 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 свободно-радикальное состояние.

Этот процесс в присутствии кислорода становится цепным и уже не зависит от внешнего воздействия радиации, т.к. мембрана имеет слоистую замкнутую структуру, то этот процесс достаточно быстро распространяется по всей мембране – что в конце концов приводит к ее разрушению. При этом также нарабатывается большое число биологически активных молекул и радиотоксинов-свободных радикалов \dot{R} и $R\dot{O}_2$, а также кислот RCOOH – которые оказывают воздействие на другие компоненты клетки.

В повседневной жизни с реакцией перекисного окисления липидов встерчаются при изменении окраски поверхностных слоев сливочного и прогорклости растительного масел, 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, ферментная и др.), они относятся к объектам со слабой чувствительностью к воздействию радиации. Белки постоянно производятся в клетке и их функция восстанавливается.

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

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

Молекула ДНК – представляет собой длинную неразветвленную цепь, образованную чередующимися фосфатными группами, азотистыми основаниями и молекулами дезоксирибозы.

ИИ может вызвать 4 основных типа повреждений (рис. 3.5): одиночные разрывы (1), двойные разрывы (2), повреждение азотистых оснований (3), межмолекулярная сшивка (4), а также разрушение дезоксирибозы, высвобождение или отрыв азотистых оснований.

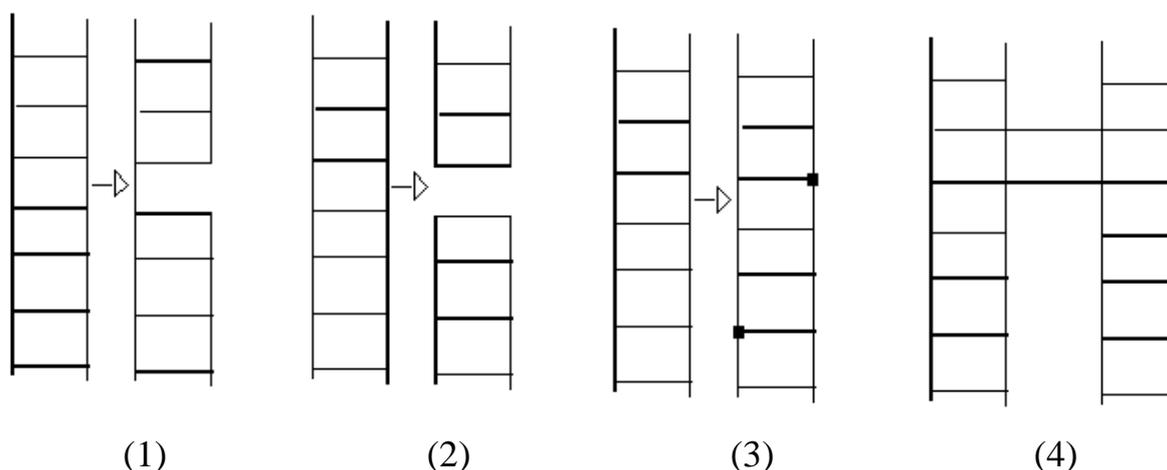


Рис. 3.5. Основные типы повреждений

Установлено, что при дозе в 1 Гр в каждой клетке человека повреждается 5000 оснований молекул ДНК, возникает 1000 одиночных и 10–100 двойных разрывов. В случае нарушения структуры ДНК включаются мощные механизмы репарации (восстановления). Считается, что основным является

механизм эксцизионной репарации, которая заключается в эксцизии (вырезании) части цепи, содержащей поврежденные нуклеотиды и синтезе нового участка, точно повторяющего поврежденный.

При нормальной температуре, половина радиационных одиночных разрывов восстанавливается за 15 мин. Конечно, число одиночных разрывов зависит от дозы. Чем больше доза, тем больше разрывов, следовательно снижается репарация. Образование разрывов зависит и от многих других биохимических факторов. Наиболее опасно внутреннее облучение т.к. при этом происходит полное поглощение ИИ. Например, если в организм попал стронций-90, тогда при испускании одной β -частицы может возникнуть порядка 30.000–50.000 одиночных разрывов.

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

1) Облучение дозой больше 10 Гр (1000 рад) – вызывает мгновенное прекращение обменных процессов (метаболизм) и даже разрушение клетки – **метаболическая гибель**.

2) Облучение дозой от 5 до 10 Гр (5000–10000 рад) – клетка остается живой, однако в ее органеллах наблюдаются существенные изменения: нарушается проницаемость мембран, угнетается дыхание – клеточная гибель наступает через несколько часов (тоже метаболическая гибель).

3) облучение дозой от 1 до 5 Гр – клетка теряет способность к неограниченному делению, даже при сохранении ее функций – **репродуктивная гибель**.

Менее выраженные повреждения проявляются в форме мутаций.

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, возникшая 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 aberrациями**. 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 (табл.3.11).

Таблица 3.11 – Шкала биологических эффектов

Доза, Гр	Биологический эффект
$<10^{-3}$	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)
$5 \cdot 10^{-2}-1 \cdot 10^{-1}$	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

3.10. Действие доз радиации

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. 3.6).



Рис. 3.6. Классификация радиационных эффектов

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 подвергнувшемся 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 наследственных 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: костно-мозговой (кроветворный), желудочно-кишечный и церебральный.

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 ($D \leq 4-6 \text{ Гр}$).

Желудочно-кишечный синдром - признаки и симптомы 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 (Доза от 6 Гр до 30 Гр).

Церебральный синдром – симптомы 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 ($D > 30 \text{ Гр}$).

3.10.1. 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 слюнистая полость 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. По этой же причине *не рекомендуется проводить рентгеновское обследование беременных женщин*. В таблице 3.12 приведены радиационные эффекты, которые проявляются при соответствующих дозах облучения.

Таблица 3.12 – 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 воздействии 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 четыре степени тяжести:

1ст. – легкая (1–2 Гр),

2ст. – средняя (2–4 Гр),

3ст. – тяжелая (4–6 Гр),

4ст. – крайне тяжелая (>6 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 Гр при достижении суммарной дозы 0,7–1,0 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.

3.10.2. 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.

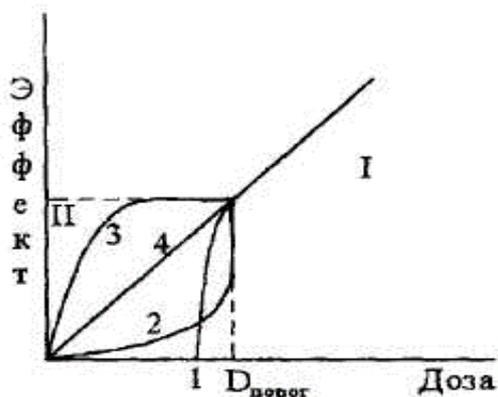
Одним из большого многообразия опосредованных эффектов облучения является появление в облученном организме токсических веществ, получивших название "радиотоксины".

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

3.10.3. Действие малых доз 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. 3.7): 1) модель, учитывающая наличие пороговой дозы (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). 2) Модель слабого влияния малых доз (организм имеет некоторый запас прочности к колебаниям естественного фона и при малых

дозах число эффектов незначительно-кривая 2). 3) Модель аномально неблагоприятного действия малых доз (кривая 3). 4) Основная модель – 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.



I – область больших доз

II – область малых доз

Рис. 3.7. Зависимость эффект – доза

В основе беспороговой концепции действия радиации лежат два постулата:

- 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:

1) эффекты, для которых установлена четкая зависимость от дозы (*злокачественные опухоли, катаракты, задержка умственного развития для облученных внутриутробно*);

2) эффекты, для которых установлена предполагаемая зависимость от дозы (*некоторые злокачественные опухоли нервной системы, кишечника, пищевода, слюнных желез, кроветворной и лимфоидной систем*);

3) 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. Т.е., при нормировании радиационного воздействия целесообразно принять гипотезу отсутствия порога для возникновения названных эффектов и пользоваться линейной зависимостью (рис. 3.7, 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. 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.

3.10.4. 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 быстроделяющимися клетками. В медленно-делящихся 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. 3.8). По оценкам НКДАР, при облучении каждого дозой 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).

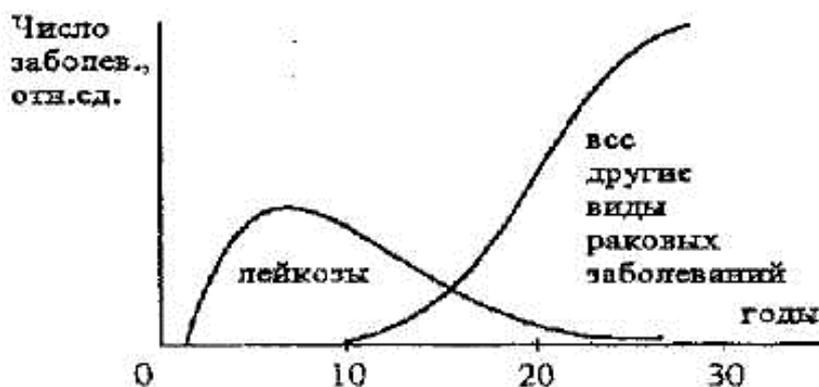


Рис. 3.8. Вероятность заболевания раком

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, 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.).

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).

3.11. 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. 3.13).

Таблица 3.13 – Кратность накопления радионуклида в критических органах в расчете на 1 кг массы

Орган или ткань	Элемент	Кратность накопления
Щитовидная железа	<i>I-131</i>	164
Скелет	<i>Sr-90</i>	91
	<i>Ra-226</i>	46
	<i>Cs-134(137)</i>	2,6
Мышцы	<i>K-40</i>	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:

$$T_{эфф} = \frac{T_{1/2} \cdot T_e}{T_{1/2} + T_e} \quad (3.2)$$

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. 3.14–3.16).

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

$$A = 1,45 FT_{эфф} \left[1 - \exp \left(-0,693 \frac{t}{T_{эфф}} \right) \right], \quad (3.3)$$

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.

Таблица 3.14 – Коэффициенты всасывания и периоды полувыведения радиоактивных изотопов

Элемент	Изотоп	Коэффициент всасывания		T_6 , сут	$T_{1/2}$, лет
		ЖКТ	легкие		
Тритий	3H	1,0	1,0	12	12,3
Углерод	^{14}C	1,0	0,75	10	6730
Калий	^{40}K	1,0	0,75	58	$1,29 \cdot 10^9$
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	$2,4 \cdot 10^4$

Примечание: ЖКТ – желудочно-кишечный тракт

Таблица 3.15 – Биологические T_6 , 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_6 , сут	$T_{эфф}$, сут		$E_{эфф}$, МэВ/расп	
	$^{134}Cs, ^{137}Cs$	^{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 3.16 – Биологические T_6 , и эффективные $T_{эфф}$ периоды полувыведения радионуклидов стронция из некоторых органов и эффективная энергия $E_{эфф}$, передаваемая этим органом при облучении при облучении

Орган или ткань	T_6 , сут	$T_{эфф}$, сут		$E_{эфф}$, МэВ/расп	
	$^{89}Sr, ^{90}Sr$	^{89}Sr	^{90}Sr	^{89}Sr	^{90}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

При хроническом поступлении радиоактивного цезия его общее содержание в организме увеличивается, но довольно скоро, как следует из формулы, примерно через год, наступает равновесие, поскольку $[1 - \exp(-0,693 t/T_{эфф})] \approx 1$. 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 радионуклидам, 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:

$$D_{экр} = \frac{A \cdot E_{эфф} \cdot t}{m}, \quad (3.4)$$

где A – равновесная активность радионуклидов в облучаемом организме (органе), Бк; $E_{эфф}$ – эффективная энергия радионуклидов, передаваемая органу при распаде каждого ядра с учетом биологической опасности излучения (см. табл. 3.15, 3.16); 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.

Установлено, что существует 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 (третий, 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 изотопов:

остеотропные – накапливаются 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. 3.17).

Таблица 3.17 – Период полураспада $T_{1/2}$. Период биологического выведения T_e , и эффективная энергия $E_{эфф}$ некоторых радионуклидов при воздействии их излучения на критический орган

Радионуклид	Критический орган и его масса	$T_{1/2}$, сут	T_e , сут	$E_{эфф}, 10^{-13}$ Дж/расп. =МэВ/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 /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

3.12. Способы защиты человека от радиации

Снизить величину полученной дозы – значит, уменьшить вклады внешнего и внутреннего облучения. Внешнему γ -облучению человек подвергается только на загрязненной местности, а внутреннее поступление радионуклидов возможно как в местах выпадения радиоактивных веществ, так и при питании радиоактивно зараженными продуктами.

Уменьшить радиационные эффекты в организме человека можно физическими, химическими, биологическими способами защиты человека от радиации а также санитарно-гигиеническими мероприятиями.

2.4.1. Физические способы защиты

К физическим способам относятся: защита временем и расстоянием, использование экранов от источников облучения, дезактивация продуктов питания, воды, различных поверхностей, использование средств защиты органов дыхания, вентиляция помещений, рабочих объемов и др. Эти способы применяются, в основном, персоналом, обслуживающим радиационно-опасные объекты.

2.4.2. Химические и биологические способы защиты

К химическим средствам защиты относятся: радиопротекторы, отдельные лекарственные препараты, микроэлементы.

К биологическим средствам защиты относятся: некоторые радиопротекторы, отдельные продукты питания, витамины.

Часто эти два способа применяются вместе, а также в комплексе с физическим.

Как уже отмечалось, при облучении тела человека разрушаются клетки и молекулы ДНК, нарушаются жизненные процессы в организме. Замечено, что при вводе в организм некоторых химических или биологических веществ последние стимулируют процессы восстановления клеток и молекул ДНК. Такие вещества называют **радиопротекторами**. Механизм воздействия радиопротекторов до конца не изучен, имеются только гипотезы.

Различают следующие виды радиопротекторов:

– **Серосодержащие** (цистеин, цистеамин, АЭТ). Эти препараты дают некоторый эффект только при дозах до 300 бэр, если их принимать за 30–45 минут до облучения. Эффективны только при гамма- и рентгеновском облучении. Очень токсичны, поэтому необходимо соблюдать нормы приема. Лучше вводить в организм внутривенно, так как таблетки быстро разрушаются в кислой среде желудка. Эти препараты не защищают половые клетки.

– **Амины** (серотонин, мегафен, аминазин, мексамин и др.). Эти препараты создают кислородное голодание, замедляют обмен веществ (их иногда используют при хирургических операциях) и обладают некоторыми

радиопротекторами свойствами. Дают эффект только при дозах до 400–500 бэр, но этот эффект незначителен и не защищает половые клетки.

– **Антибиотики (пенициллин, актиномицин и др.)**. Эти препараты увеличивают сопротивляемость организма бактериям. Одновременно они способны восстанавливать пептидные связи. Этим объясняются их радиопротекторные свойства.

– **Фенольные соединения**. Они имеют полимерную структуру и являются наиболее эффективными радиопротекторами. Учеными США был выделен препарат меланин*. В сочетании с витамином С он показал достаточно высокую эффективность и защищает даже половые клетки. Тот же меланин содержится в кофе, какао, красном вине, винограде, грибах. Радиопротекторными свойствами обладает и ряд продуктов, содержащих некоторые витамины и микроэлементы.

2.4.2.1. Ускоренное выведение радионуклидов из организма

Учитывая, что радионуклиды выводятся из организма за счет процессов обмена, этот обмен можно ускорить следующими способами:

- за счет массажа и занятий спортом;
- при мытье в бане с парилкой;
- при голодании;
- при употреблении мочегонных средств и желчегонных средств (настои белой ромашки, зверобоя, бессмертника, тысячелистника, мяты, шиповника, укропа, тмина, зеленого чая);
- при употреблении фруктовых соков, чая, компотов;
- при употреблении фруктов, мармелада, т.е. продуктов, содержащих пектины. Последние аккумулируют радионуклиды (яблоки, персики, крыжовник, клюква, слива, черная смородина, клубника, вишня, черешня, цитрусовые) с дальнейшим выводом из организма;
- путем регулярного опорожнения кишечника, для чего включают в рацион питания: хлеб грубого помола, пшено, крупы (гречку, перловую, овсяную), капусту, свеклу, чернослив; рекомендуется также употреблять о семян льна, крапивы, ревеня, чернослива;
- путем использования продуктов, связывающих радионуклиды (гречка, зерновые, овощи и продукты, содержащие клетчатку);
- за счет употребления зеленых овощей, содержащих повышенное количество солей кальция и калия, выводящих из организма цезий-137 и стронций-90;
- путем применения специальных медицинских препаратов: для выведения цезия-137 используют, в частности, гексацианоферрат железа; для

* Было замечено, что высоко в горах растут растения, содержащие значительное количество меланина, который обеспечивает их выживание в условиях значительного УФ-излучения Солнца. Для промышленного изготовления медицинского препарата в качестве сырья используют бычий глаз. Стоимость одного грамма меланина в 1990 г. составляла 60 долларов США.

выведения стронция-90 применяют хлорид аммония, сульфат бария или фосфат алюминия; для выведения плутония применяют внутривенное введение кальциевой соли с диамином или с триамином;

– для стимуляции лимфатического дренажа используют лекарственные травы: овес обыкновенный (семена, овсяные хлопья), листья черной смородины, подорожник, цветки календулы, кукурузные рыльца.

Особую опасность представляют радионуклиды в сочетании с нитратами или тяжелыми металлами.

Совместное ускоренное выведение из организма радионуклидов с нитратами достигается за счет насыщения организма водой с одновременным применением мочегонных средств.

2.4.2.2. Применение принципа конкурентного замещения

Радионуклиды по своим химическим свойствам и, соответственно, путям метаболизма сходны с некоторыми стабильными элементами: цезий с калием и рубидием; стронций с кальцием; плутоний с трехвалентным железом. При этом организм человека усваивает, прежде всего, калий и кальций, а при их дефиците – их радиоактивные конкуренты цезий-137 и стронций-90. Поэтому необходимо больше потреблять продуктов, содержащих калий, рубидий, кальций, железо.

- **Источниками калия** являются (суточная потребность 3г): *курага, урюк, изюм, чернослив, чай, орехи, лимон, фасоль, картофель, пшеница, рожь, Редька, овсяная крупа, яблоки, хурма, черешня, томаты, капуста, чеснок, черная смородина, свекла, абрикосы.* Содержат калий и продукты животного происхождения - *свинина, икра, сливочное масло.*

- **Источником рубидия** является *красный виноград.*

- **Источником кальция** (суточная потребность 1 г в сутки) являются: *творог, сыр, мясо, рыба, яйца, капуста, зеленый лук, бобы, укроп, репа, рушка, хрен, шпинат, зеленый горошек, яблоки, огурцы, морковь, овсяная па, пшеница, апельсины, лимоны, картофель, семечки.*

- **Источником железа** (суточная потребность 15–30 мг в сутки) являются: *мясо, рыба, яблоки, изюм, салат, черноплодная рябина, зеленый и яичный желток.* Лучше усваивается железо животного происхождения.

Кроме продуктов питания для насыщения организма кальцием и калием используют и медицинские препараты, в частности, такие антагонисты стронция как кальция хлорид, кальция альгинат, кальция лактат.

2.4.2.3. Употребление продуктов, слабо аккумулирующих радионуклиды

- **Слабо накапливающими цезий-137 культурами** являются: *ячмень, пшеница, овес, томаты, огурцы, морковь, чеснок, лук, свекла, капуста, все фрукты, малина, рябина, белая смородина, крыжовник, земляника.* Картофель занимает промежуточное положение по накоплению радионуклидов, но учитывая, что при приготовлении он, как правило, очищается

от кожуры, можно считать его относительно «чистым». Необходимо только учесть, что при использовании вышеперечисленных культур их необходимо мыть в проточной воде и очищать от земли.

- **Слабо накапливают стронций-90:** *картофель, томаты, капуста, хрен, редька, ирис.*

2.4.2.4. Насыщение организма микроэлементами

В противостоянии радиации и укреплении здоровья человека микроэлементы играют важную роль. Рассмотрим наиболее важные.

- **Железо** – способствует образованию эритроцитов, блокирует поглощение плутония (продукты, содержащие железо рассмотрены выше).

- **Селен** – поглощает радикалы воды в значительных количествах, восстанавливает иммунную систему, снижает частоту опухолей молочной и щитовидной железы. Содержится в рисе, ячмене, овсе, зелени, чесноке, мясопродуктах, рыбе.

- **Сера** – повышает сопротивляемость клеток организма к действию радиации, помогает восстанавливаться молекулам ДНК. Ее содержат капуста, петрушка, водяной кресс.

- **Магний** – способствует обмену углеводов и белков, а, следовательно, и выведению радионуклидов из организма. Его содержат орехи, бобы, зерно, морская капуста, листовые овощи, яичный желток, печень, овес.

- **Йод** – способствует укреплению иммунной и других систем, нормальной работе щитовидной железы. Его содержат яйца, гречка, морковь, овес, морская капуста, чеснок, фасоль, картофель, клубника, свекла.

Непосредственно после аварии на АЭС с выбросом радиоактивных веществ проводят йодную профилактику. Сущность ее заключается в том что людям дают препараты стабильного нерадиоактивного йода, который будет блокировать поступление радиоактивного. В качестве препаратов можно применять йодид калия, антисруммин или 5%-ную йодную настойку. Однократный прием для взрослого человека – 125 мг йодида калия. Защитный эффект при этом длится 24 часа. Взрослому человеку допускается прием йодида калия по 125мг в течение 10 суток.

- **Фосфор** – способствует нормальной работе системы кроветворения, подавляет раковые клетки. Его содержат рыба, яблоки, зеленый горошек, овес, гречка, пшено, мясо, яйца, огурцы, молоко.

Калий – не только блокирует цезий-137, но и регулирует деятельность сердца, почек, скелетных мышц, улучшает работу печени (продукты, содержащие калий, рассмотрены выше).

- **Натрий** – стимулирует активность пищеварительных ферментов, способствует проникновению в клетки аминокислот. Является конкурентом цезия-137. Его содержат соль и некоторые овощи.

- **Кальций** – не только блокирует стронций-90, но и укрепляет кости.

• **Медь** – необходима для нормального функционирования антиоксидантов и иммунной систем организма. Медь содержат свекла, картофель, яблоки, горох, фасоль, орехи, соя, гречка, сыр, печень, рыба, мясо, яйца, молочные продукты.

• **Фосфор** – необходим для протекания нормальных процессов обмена в костной ткани, но избыток его тормозит всасывание кальция.

Кобальт – необходим для системы кроветворения, входит в состав витамина В₁₂. Его содержат щавель, груша, укроп, свекла, зеленый лук, черная смородина, рыба, морковь, клюква, рябина, орехи, горох, фасоль, бобы, сливочное масло, печень, почки.

Употребление повышенного количества отдельных витаминов

• **Витамин А** – обладает антиоксидантными свойствами, укрепляет кожный покров, защищает от инфекций, помогает освободиться от свободных радикалов воды. Его содержат говяжья печень, сливочное масло, яичный желток, морковь, кукуруза, капуста, тыква, хурма, чеснок, сельдерей, красный сладкий перец, облепиха, петрушка.

Витамины группы В стимулируют нервную и иммунную системы. Особенно активно помогают противостоять радиации прямо или косвенно витамины В₆ и В₁₂. • Витамин В₆ – повышает кроветворение и иммунитет. Его содержат зерновые, капуста, морковь, зелень.

• Витамин В₁₂ – способствует образованию эритроцитов, помогает работе нервной системы. Его содержат соя и продукты животного происхождения.

• **Витамин С** – активизирует процессы кроветворения, обладает антиоксидантным действием, укрепляет надпочечники, повышает иммунитет, выводит из организма свободные радикалы. Его содержат шиповник, черная смородина, сладкий перец, облепиха, черноплодная рябина, цитрусовые, земляника, томаты, капуста, зеленый лук.

• **Витамин Е** – помогает избавиться от свободных радикалов, улучшает кровообращение, является антиоксидантом. Его содержат облепиха, кукуруза, бобовые, нерафинированные масла (лучше оливковое), гречка, семечки подсолнуха, орехи, чеснок, лук, яблоки, персики.

• **Витамин РР** – улучшает обменные процессы в организме, а следовательно, и стимулирует выведение радионуклидов из организма. Его содержат рисовые и пшеничные отруби, сухие дрожжи, печень, почки, сердце.

Важную роль в воздействии витаминов на организм играет правильное их сочетание, назначение с учетом возраста и состояния здоровья человека.

Рациональное питание

Правильный режим питания в условиях радиоактивного загрязнения местности является одним из основных способов противостояния радиации. Понятие «правильный режим питания» включает:

- а) употребление достаточного количества полноценного белка;
- б) ограничение пищи, богатой жирами.

Потребление белков должно быть на 10–12% выше суточной нормы. Много белков содержат мясо, морская рыба, яйца, молочные продукты. Кроме того, в рационе питания должно быть больше овощей, особенно капусты, репчатого лука и петрушки. Именно они снижают риск заболеть раком и обладают радиопротекторными свойствами.

Существуют разные варианты рационального питания, которые может предложить врач каждому человеку с учетом состояния его здоровья, возраста, условий радиоактивного облучения и т.д.

Для детей грудного и раннего возраста предлагается:

- обеспечение экологически чистыми продуктами питания как матерей, кормящих грудью, так и детей;
- обеспечение сбалансированного питания по содержанию белков, жиров, полиненасыщенных жирных кислот, витаминов-антиоксидантов, минеральных веществ и микроэлементов;
- обеспечение продуктами, в которых содержатся компоненты с радиопротекторными свойствами.

В питании *детей ясельного возраста* преимущество отдается молочным продуктам. В продаже имеются смеси детского питания.

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

В питании *детей школьного возраста* преимущество отдается молочным продуктам, рыбе, мясу, сливочному маслу, фруктам, сокам, меду.

Рацион питания применяется с учетом рекомендаций врача.

Употребление пищевых добавок способствует повышению устойчивости организма к радиационному воздействию и выведению радионуклидов из организма. К пищевым добавкам относятся:

– *зерна проросшей пшеницы*, которые содержат значительное количество антиоксидантов и иммуномодуляторов. Курсовой прием составляет три недели ежедневно натощак за 30 минут до еды.

– *спирулина* (из сине-зеленых водорослей) содержит до 70% протеинов. В состав ее входят все незаменимые аминокислоты, большинство витаминов и минеральных веществ.

– *мипровит* (из культуры мицелия высших грибов). Содержит аминокислоты, ненасыщенные жирные кислоты, витамины группы В, другие витамины. Обладает иммуномодулирующими и антиоксидантными свойствами антианемическим действием, нормализует биоценоз кишечника.

Периодическая очистка органов и систем человека от шлаков

Неблагоприятные условия жизни и работы, не совсем экологически чистые продукты питания, экологическое загрязнение воздуха и воды, нерациональное питание и другие причины вызывают засорение организма различными шлаками, что еще больше ухудшает работу органов и систем. Сопротивляемость организма радиации и различным болезням резко падает

По этим причинам рекомендуется периодически освобождаться от шлаков и токсинов. Существуют методики по очистке почек, печени, крови, сосудистой системы и др. Вместе со шлаками обычно выводятся и радионуклиды. Очистку организма от шлаков рекомендуется проводить под наблюдением врача.

Мероприятия по повышению адаптационно-компенсаторных возможностей организма человека

К таким мероприятиям можно отнести: соблюдение режима труда и отдыха, прием адаптогенов, уменьшение психологической дезадаптации, массаж, гидротерапию, светолечение, электролечение, теплогрязелечение, минеральные воды, витаминпрофилактику.

Особую роль играет борьба со стрессовыми ситуациями и радиофобией. Как уже отмечалось, они ухудшают последствия облучения человека радиацией. В этом случае привлекаются врачи-психиатры, большую роль играет разъяснительная работа в средствах массовой информации. Существуют специальные методики по укреплению психического здоровья населения, живущего на радиоактивно загрязненной территории.

Санитарно-гигиенические мероприятия

Соблюдение санитарно-гигиенических мероприятий существенно может снизить поступление радионуклидов в жилые помещения и в организм человека, поэтому рекомендуется:

- регулярно проводить влажную уборку помещений;
- проветривать в летнее время помещения при малых скоростях ветра;
- закрывать в летнее время форточки и окна при сильном ветре;
- иметь на окнах и форточках пылезащитные сетки;
- перед приемом пищи полоскать горло, рот, мыть руки и лицо мылом;
- чаще принимать душ, лучше мыться в бане с парилкой; – чаще стирать, подвергать химчистке и менять верхнюю одежду;
- рабочую одежду и обувь в сельской местности предварительно чистить после возвращения с улицы и оставлять вне жилых помещений;
- возле домов сажать деревья и кустарники для поглощения пыли;
- не разжигать костры в лесу и не дышать дымом от них;
- на приусадебных и дачных участках увлажнять землю, если при работе на них поднимается пыль;
- чаще дома чистить ковры и мебель, другие вещи и предметы, поглощающие пыль;
- после топки печей дровами хоронить золу;
- в сельской местности чаще чистить печные дымоходы;
- иметь водостоки с крыш домов и места захоронения дождевой воды;
- во время сельскохозяйственных работ для защиты органов дыхания от пыли использовать респираторы, ватно-марлевые повязки, противопылевые маски;

- использовать защитные свойства зданий, сооружений, техники;
- не пить воду из незнакомых источников и не купаться в них;
- ограничивать время пребывания в лесу, особенно не рекомендуется лежать на земле;
- колодцы в сельской местности должны иметь цементную или бетонную стяжку, и на колодцах должны быть крышки для недопущения попадания пыли в воду;
- на местности работать в головных уборах и защитной одежде, по окончании всех видов сельскохозяйственных работ принимать душ;
- в зимнее время проветривать кухню и жилые помещения не менее 5 часов в сутки для удаления радона;
- для удаления радона из воды во время ее кипения открывать на несколько секунд крышку посуды;
- всегда соблюдать правила личной гигиены.

Тесты и задания для контроля результатов обучения

На оценку «4» и «5»

1. Что понимают под миграцией радионуклидов?
2. Чем определяется количественная характеристика поступления радионуклидов из почвы в растения?
3. Какие особенности биологического действия ионизирующих излучений?
4. Приведите классификацию радиационных эффектов.
5. На какие широты приходится максимум радиоактивных осадков ядерного происхождения?
6. Как зависит накопление радиоизотопов в растениях от типа почвы?

На оценку «6» и «7»

1. На какие этапы делится биологическое действие ионизирующих излучений?
2. Охарактеризуйте влияние радионуклидов на животных.
3. Какие радионуклиды называются инкорпорированными?
4. Что такое шкала биологических эффектов?
5. Каков характер миграции радионуклидов в воде?
6. Какие основные типы радиационных повреждений молекулы ДНК?

На оценку «8» и «9»

1. Что такое «Комптон-эффект»?
2. Охарактеризуйте прямой и косвенный механизм действия радиации.
3. Что такое хромосомная абберрация?
4. Дайте характеристику стадий лучевой болезни.
5. На какие группы распределяются радионуклиды водных экосистем?
6. Что такое эффективный период?
7. Задача.

На оценку «10»

Необходимо показать отличные знания по всем вопросам тестирования, а также принять участие в исследовательской работе по темам модуля (написать реферативную работу).

ВОПРОСЫ К ЗАЧЕТУ

1. Изотопы и радионуклиды.
2. Явление радиоактивности.
3. Активность.
4. α и β -излучения и их характеристики.
5. Виды волнового излучения.
6. Характеристики ионизирующих излучений.
7. Энергия ионизирующих излучений.
8. Экспозиционная доза.
9. Поглощенная доза.
10. Эквивалентная доза.
11. Эффективная коллективная и полная дозы.
12. Дозиметрия ионизирующих излучений.
13. Космические лучи.
14. Геологические источники естественной радиации.
15. Радон и торон.
16. Техногенно измененный естественный радиационный фон.
17. Искусственные источники радиации.
18. Поведение радионуклидов в почве.
19. Распределение и миграция радионуклидов в воде.
20. Воздушный перенос радионуклидов.
21. Воздействие радионуклидов на растительность.
22. Воздействие радионуклидов на диких животных.
23. Радионуклиды и растениеводство.
24. Радионуклиды и животноводство.
25. Физический этап действия ионизирующих излучений на биологические объекты.
26. Физико-химический этап действия ионизирующих излучений на биологические объекты.
27. Биохимический этап действия ионизирующих излучений на биологические объекты.
28. Шкала биологических эффектов.
29. Классификация радиационных эффектов.
30. Действие больших доз радиации. Лучевые болезни.
31. Опосредованное действие радиации.
32. Действие малых доз радиации.
33. Отдаленные последствия действия радиации.
34. Инкорпорированные радионуклиды.
35. Радионуклиды в продуктах питания.
36. Радиационный фон в Республике Беларусь.
37. Загрязнение территории Республики Беларусь цезием-137 и стронцием-90.

38. Прогноз радиационной обстановки на территории Республики Беларусь.
39. Экологическое нормирование радиационных воздействий.
40. Воздействие радионуклидов на биосферу.
41. Физические и химические способы защиты человека от радиации.
42. Биологические способы защиты человека от радиации.
43. Санитарно-гигиенические мероприятия, снижающие поступление радионуклидов в организм человека.
44. Система радиационного мониторинга в Республике Беларусь.

ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ РЕФЕРАТОВ

1. Экологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС.
2. Прогноз радиационной обстановки на территории Республики Беларусь.
3. Радиационный мониторинг в Республике Беларусь.
4. Миграция радионуклидов в почве.
5. Воздушный перенос радионуклидов.
6. Наиболее значимые естественные радиоизотопы на территории Витебской области.
7. Миграция радионуклидов в водных экосистемах.
8. Воздействие радионуклидов на растительность.
9. Воздействие радионуклидов на диких животных.
10. Влияние биологических особенностей агрокультурных растений на характер переноса радионуклидов из почвы в растение.
11. Радионуклиды и животноводство.
12. Источники и пути поступления радиоактивных веществ в наземные экосистемы.
13. Искусственные радиоизотопы и их включение в биогеохимический круговорот.
14. Радиационные аварии и их влияние на экологическую обстановку в мире.
15. Опосредованное влияние биоты на миграцию радионуклидов в водных экосистемах.

СЛОВАРЬ ПОНЯТИЙ (ТЕРМИНЫ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОКРАЩЕНИЯ)

Активность – количество ядер, которые распадаются в единицу времени

Аннигиляционное излучение – фотонное излучение, возникающее в результате аннигиляции частицы и античастицы (например: позитрона и электрона).

Беккерель (Бк) – единица измерения активности вещества в СИ. 1 Бк это активность вещества у которого за каждую секунду распадается 1 ядро ($1 \text{ Бк} = 1 \text{ распад/с}$).

Белки – азотистые соединения, в естественном состоянии обычно растворимы в воде. Особенности того или иного белка определяются последовательностью и природой аминокислот и сложной конфигурацией структуры.

Биологический эквивалент рада (бэр) – это внесистемная единица измерения эквивалентной дозы любого вида И.И. в биологических тканях. 1 бэр создает такой же биологический эффект как и поглощенная доза в 1 рад р.и. или γ -излучения с энергией γ -квантов 200 кэВ.

Биологическое действие ИИ – способность вызывать изменения в клетках тканей и органов живого организма.

ВОЗ – Всемирная организация охраны здоровья. Организация создана в 1928 г.

Волновое (фотонное, квантовое) ИИ – это электромагнитное излучение (ЭМИ), причем γ -излучение – ЭМИ длинноволновое, рентгеновское излучение – ЭМИ коротковолновое; косвенно ионизирующее излучение (характеристическое излучение, тормозное излучение, аннигиляционное излучение).

Ген – единица наследственной информации (последовательность нуклеотидов), отвечает за формирование какого-либо элементарного признака, например, синтез определенного белка.

Генетически значимая эквивалентная доза (ГЗД) – уровень облучения, который может привести к генетическим последствиям.

Гидротропные радионуклиды – остающиеся в относительно высоких концентрациях в воде.

Годовая эффективная доза (ГЭД) – эффективная доза, средняя у жителей населенного пункта за текущий год, обусловленная искусственными радионуклидами, поступившими в окружающую среду в результате радиационной аварии.

Грэй (Гр) – это единица измерения поглощенной дозы в СИ. $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$.

Длина пробега (глубина проникновения) – это расстояние, которое проходит частица от места образования, до места потери ею энергии.

Доза – количество поглощенного излучения или энергии веществом.

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

Естественная радиоактивность – радиоактивность ядер, существующих в природных условиях.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) – образуют ионизирующие излучения от природных источников космического и земного происхождения.

Желудочно-кишечный синдром – признаки и симптомы 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.

Зиверт (Зв) – единица измерения эквивалентной дозы в СИ.
 $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} \cdot K_{\text{изл}}$.

Изотопы – атомы, которые имеют ядра с одинаковым количеством протонов но с разным числом нейтронов Являются разновидностями одного и того же элемента.

Инкорпорированные радионуклиды – попавшие в организм.

Ионизирующая способность излучения – обусловлена ионизацией атомов и молекул в результате взаимодействия частиц со средой – характеризуется удельной ионизацией.

Ионизирующее излучение (ИИ) – излучение, которое создается при радиоактивном распаде, ядерных превращениях, торможении заряженных частиц в веществе и образуется при взаимодействии со средой ионов различных знаков. По своей природе различают два вида радиоактивных излучений: корпускулярное и волновое.

Искусственная радиоактивность – возникает в результате ядерных реакций.

Искусственный радиационный фон (ИРФ) – создают источники ионизирующих излучений искусственного происхождения.

Керма (аббревиатура английских слов в переводе обозначает: «кинетическая энергия ослабления в материале») – отношение суммы первоначальных кинетических энергий всех заряженных частиц, образованных косвенно ИИ в элементарном объеме к массе вещества в этом объеме.

Коллективная эффективная эквивалентная доза – сумма индивидуальных эффективных эквивалентных доз (сумма индивидуальных эквивалентных доз), полученная группой людей за определенный период.

Комптон-эффект – это процесс при котором γ -квант, взаимодействуя с электроном, передает ему часть своей энергии и рассеивается под некоторым углом, а электрон покидает атом с кинетической энергией

равной энергии γ -кванта на входе в частицу, за вычетом энергии связи электрона на i -той оболочке и энергия γ -кванта после частицы

Косвенно ионизирующее излучение – непосредственно не участвующее в ионизации атомов и молекул (нейтроны и ЭМИ).

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

Костно-мозговой синдром – характеризуется кровоточивостью, анемией, понижением иммунитета вследствие недостатка в крови тромбоцитов, эритроцитов и лейкоцитов.

Коэффициент качества излучения ($K_{изл}$) – коэффициент, который показывает во сколько раз данный вид излучений более биологически опасен, чем рентгеновское или γ -излучение при одинаковой поглощенной дозе.

Коэффициент накопления (K_n) – количественная характеристика поступления радионуклида из почвы в растения и параметр их биогенной миграции.

Коэффициент радиационного риска (весовой коэффициент – ω) – величина, которая учитывает разную радиочувствительность органов и тканей человека при облучении. Определяет весовой вклад данного органа или ткани в риск неблагоприятных последствий.

Кратность накопления – отношение максимально накопленного количества данного элемента в организме или органе к величине ежедневного поступления. Служит для оценки суммарного содержания радионуклида в организме.

Критический орган – орган, первый выходящий из строя в данном диапазоне доз облучения.

Кюри (Ku) – внесистемная единица активности. Активность 1 Ku имеет $1\text{г } {}^{226}_{88}\text{Ra}$ ($1\text{ } Ku = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ распадов/с} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$).

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

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии. Эта специализированная организация создана при ООН в 1957 году для развития международного сотрудничества в области мирного использования атомной энергии.

Максимальная эквивалентная доза (МЭД) – наибольшее значение суммарной эквивалентной дозы в критическом органе от всех источников внешнего и внутреннего облучения.

Мембрана – оболочка, защищающая клетку от внешних воздействий. Основными компонентами мембраны биологической клетки являются липиды и белки.

Метаболическая гибель – мгновенное прекращение обменных процессов (метаболизм) и разрушение клетки.

Миграция радионуклидов – совокупность процессов, приводящих к перемещению и перераспределению радионуклидов между любыми элементами экосистем, включающих в себя как живые объекты, так и неживую природу.

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

Мутации – определяют наследуемые изменения в молекулах ДНК.

Молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) – представляет собой длинную неразветвленную цепь, образованную чередующимися фосфатными группами, азотистыми основаниями и молекулами дезоксирибозы.

Нейтроны – незаряженные ядерные частицы в свободном состоянии неустойчивы (существуют 11–16сек).

Нейтронное излучение – характеризуется испусканием нейтронов из ядер в момент ядерных реакций, например при делении ядер урана или плутония.

Нестохастические (неслучайные) эффекты – последствия действия больших доз облучения, когда неизбежно и закономерно вызывают патологические изменения, являющиеся неслучайными.

НКДАР – Научный комитет ООН по изучению действия атомной радиации. Создан Генеральной Ассамблеей ООН в 1955 году для оценки в мировом масштабе доз облучения, их эффектов и связанного с облучением риска.

НКРЗ – Национальная комиссия по радиационной защите. 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.

НРБ-2000 – Нормы радиационной безопасности, утверждены 05.01.2000 г.

Нуклид – это ядро атома с определенным количеством протонов и нейтронов, которое характеризуется массовым числом и порядковым атомным номером.

Нуклоны – общее название протонов и нейтронов.

Ожидаемая (полная) доза – это коллективная эффективная эквивалентная доза, которую получают многие поколения людей от какого-либо радиоактивного источника за все время его дальнейшего существования.

Остеотропные радионуклиды – накапливаются в костях.

ОСП-2002 – основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности, утверждены 22.02.2002г.

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) – указывает во сколько раз биологический эффект при воздействии этого вида излучения мощнее чем действие стандартного излучения на живой объект.

Педотронные радионуклиды – преимущественно накапливающиеся в водном грунте.

Период полураспада ($T_{1/2}$) – время, за которое распадается половина первоначального количества ядер данного вида.

Плотность потока частиц (ϕ) – выражается числом частиц (гамма-квантов), падающих на единицу поверхности в единицу времени. Поверхность расположена нормально к направлению движения частиц. Единица измерения – *частица/м²с*.

Поглощенная доза (ПД) – это количество средней энергии любого вида излучений, поглощенное единицей массы вещества.

Постоянная распада (радиоактивная постоянная – λ) – коэффициент пропорциональности, входящий в закон радиоактивного распада. Так как распад относится к статистическим процессам, то λ – вероятность распада, характеризующая скорость распада.

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 (для лиц категории Б).

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 (для лиц категории А).

Проникающая способность ИИ – определяется по проникновению в массу (на глубину) вещества и может быть выражена длиной пробега.

Протоны – ядерные частицы, принадлежат к классу устойчивых и являются положительно заряженными.

Прямой механизм действия радиации – это такие изменения, которые возникают при непосредственном поглощении молекулами энергии излучения.

Радиационный фон – уровень дозы, создаваемый совокупностью всех ионизирующих излучений от различных источников естественного и искусственного происхождения.

Радиоактивность – самопроизвольное преобразование радионуклидов в другие нуклиды, которое сопровождается ионизирующим излучением вместе с переносом энергии.

Радиолиз воды – превращение молекулы воды под действием ИИ в ион с образованием высокоэнергетического электрона.

Радионуклиды – это неустойчивые нуклиды, способные к самопроизвольным ядерным реакциям. Иначе радионуклид, это нуклид, обладающий радиоактивностью.

Радиопротекторы – химические и биологические вещества, которые при вводе в организм человека стимулируют процессы восстановления клеток и молекул ДНК.

Рентген (R) – такая доза ИИ при которой в 1 см^3 воздуха ($m=0,001293 \text{ г}$ при н.у. 0°C , 1 атм) образуется $2,08 \cdot 10^9$ (2 млрд.) пар ионов.

Рентгеновское излучение (р.и.) – это квантовое ЭМИ с длиной волн 10^{-9} – 10^{-12} м. Излучение с длиной волны больше $0,2 \cdot 10^{-9}$ м – условно называют «мягким» р.и., а с длиной волны меньше $0,2 \cdot 10^{-9}$ м – «жестким» р.и.

Репродуктивная гибель – клетка теряет способность к неограниченному делению, даже при сохранении своих функций.

Республиканские допустимые уровни (РДУ) – регламентируют содержание радионуклидов цезия и стронция в продуктах питания и воде (утв. 26.04.1999 г.).

Рождение позитрон-электронной пары – это процесс при котором γ -квант вблизи ядра превращается в пару частиц (электрон и позитрон), которые приобретают соответствующие кинетические энергии.

Свободный радикал – это электрически нейтральный атом или молекула с непарным электроном на внешней орбите.

Стохастические (вероятностные) эффекты – эффекты, вероятность которых возрастает пропорционально дозе облучения.

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент.

Техногенно измененный естественный радиационный фон (ТИЕРФ) – измененный в результате деятельности человека ЕРФ.

Типичный липид – состоит из молекулы глицерина, три гидроокисильные группы которого соединены с жирными кислотами.

Тормозное излучение – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц. Возникает при прохождении через вещество заряженных частиц.

Удельная ионизация – это количество пар ионов, которые возникают на 1 см пути пробега радиоактивной частицы.

Удельная массовая активность – характеризующая активность единицы массы радиоактивного вещества.

Удельная объемная активность – характеризующая активность единицы объема радиоактивного вещества.

Удельная поверхностная активность – характеризующая активность единицы поверхности.

Флюенс частиц (Φ) – характеризует полное число частиц, прошедших через единичную поверхность за все время облучения.

Фотоэффект – это процесс взаимодействия с веществом ЭМИ с малой энергией при котором атом полностью поглощает γ -квант и испускает электрон с кинетической энергией равной энергии γ -кванта за вычетом энергии связи электрона на i -той оболочке.

Характеристическое излучение – фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атома.

Хромосомные aberrации – мутации, затрагивающие структуру хромосом.

Церебральный синдром – симптомы 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.

ЦРКМ – Республиканский центр радиационного контроля и мониторинга природной среды.

ЧАЭС – Чернобыльская атомная электростанция.

Эквивалентная доза ($E_{эквД}$) – поглощенная доза, умноженная на коэффициент качества излучения.

Электрон–вольт (эВ) – единица измерения энергии И.И. в СИ. 1 эВ – соответствует энергии, которую приобретает электрон при движении в электрическом поле между потенциалами с напряжением 1 В на пути в 1 см.

Экспозиционная доза (ЭД) – количество зарядов всех ионов одного знака (количество пар ионов), образованных на единицу массы воздуха, заключенной в этой единице объема.

Эффективная эквивалентная доза (Эфф.ЭквД) – отражает суммарный эффект облучения для организма.

Эффективный период ($T_{эфф}$) – время, в течение которого активность изотопа уменьшается вдвое.

Ядерная энергия – внутренняя энергия ядер, которая освобождается при ядерных реакциях.

ЯТЦ – ядерный топливный цикл.

α -излучение – возникает при самопроизвольной ядерной реакции. В результате этой реакции от атомного ядра отщепляется частица ядерного вещества, которая состоит из двух протонов и двух нейтронов (ядро гелия).

β -излучение – является потоком электронов β^- или позитронов β^+ . Электроны и позитроны не входят в состав ядра, а образуются при распаде ядра.

γ -излучение – является потоком электромагнитных волн (ЭМВ) – квантов, которые излучаются в процессе радиоактивного распада при изменении энергетического состояния атомных ядер.

ЛИТЕРАТУРА

Основная:

1. Алексахин Р.М. Сельскохозяйственная радиоэкология / Р.М. Алексахин и др. М.: Экология, 1992. – 400 с.
2. Ильенко А.И., Криволицкий Д.А. Радиоэкология. – М.: Знание, 1999. – 41 с.
3. Криволицкий Д.А. Радиоэкология сообществ наземных животных. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 96 с.
4. Куликов Н.В., Чеботина М.Я. Радиоэкология пресноводных биосистем. Свердловск: Наука, 1986 – 120 с.
5. Лисовский Л.А. Радиационная экология и радиационная безопасность. Минск: Выш. школа, 1997. – 142 с.
6. Пивоваров Ю.П. Радиационная экология: уч. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю.П. Пивоваров, В.П. Михалев. – М.: Изд. центр «Академия», 2004. – 240 с.
7. Симонова Т.П. Основы радиоэкологии: учеб. пособие. – Пермь: Пермский ун-т, 2001. – 155 с.

Дополнительная:

8. Алексахин Р.М. Ядерная энергетика и биосфера. – М.: Энергоиздат, 1982. – 81 с.
9. Дорожко С.В. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность: уч. пособие в 3-х частях. Ч.3. Радиационная безопасность / С.В. Дорожко, В.П. Бубнов, В.Т. Пустовит. – Мн.: УП «Технопринт», 2003. – 209 с.
10. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерение: уч. пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.
11. Природная среда Беларуси: Монография/под ред. В.Ф. Логинова., Минск: НОООО «БИП-С», 2002. – 424 с.
12. Савченко В.К. Экология Чернобыльской катастрофы: Научные основы Международной программы исследований / В.К. Савченко. Минск: Беларуская навука, 1997. – 224 с.
13. Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2020г. Минск.: Юнипак, 2004. – 200 с.
14. Прогноз изменения окружающей природной среды Беларуси на 2010–2020 гг. / Под. ред. В.Ф. Логинова. – Минск: Минсктиппроект, 2004. – 180 с.
15. Радиационная безопасность: учеб. пособие / С.Г. Ковчур, О.А. Щигельский, В.Н. Потоцкий. – Витебск: УО «ВГТУ», 2006. – 175 с.
16. Радиобиология / А.Д. Белов, В.А. Киршин, Н.П. Лысенко, В.В. Пак и др.; под ред. А.Д. Белова. – М.: Колос, 1999. – 384 с.
17. Чернобыль: шанс выжить / А.М. Люцко, И.В. Ролевич, В.И. Тернов. – Минск: Польша, 1996. – 181 с.
18. Ярошенко С.П. Радиобиология человека и животных. – М.: Высш. шк., 1984. – 375 с.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Группы элементов										
	a I б	a II б	a III б	a IV б	a V б	a VI б	a VII б	a VIII б			
1	H ¹ 1,00794 ВОДОРОД							He ² 4,002602 ГЕЛИЙ			
2	Li ³ 6,941 ЛИТИЙ	Be ⁴ 9,01218 БЕРИЛЛИЙ	B ⁵ 10,811 БОР	C ⁶ 12,011 УГЛЕРОД	N ⁷ 14,0067 АЗОТ	O ⁸ 15,9994 КИСЛОРОД	F ⁹ 18,998403 ФТОР	Ne ¹⁰ 20,179 НЕОН			
3	Na ¹¹ 22,98977 НАТРИЙ	Mg ¹² 24,305 МАГНИЙ	Al ¹³ 26,98154 АЛЮМИНИЙ	Si ¹⁴ 28,0855 КРЕМНИЙ	P ¹⁵ 30,97376 ФОСФОР	S ¹⁶ 32,066 СЕРА	Cl ¹⁷ 35,453 ХЛОР	Ar ¹⁸ 39,948 АРГОН			
4	K ¹⁹ 39,0983 КАЛИЙ	Ca ²⁰ 40,078 КАЛЬЦИЙ	Sc ²¹ 44,95591 СКАНДИЙ	Ti ²² 47,88 ТИТАН	V ²³ 50,9415 ВАНАДИЙ	Cr ²⁴ 51,9961 ХРОМ	Mn ²⁵ 54,9380 МАРГАНЕЦ	Fe ²⁶ 55,847 ЖЕЛЕЗО	Co ²⁷ 58,9332 КОБАЛЬТ	Ni ²⁸ 58,69 НИКЕЛЬ	
	Cu ²⁹ 63,546 МЕДЬ	Zn ³⁰ 65,39 ЦИНК	Ga ³¹ 69,723 ГАЛИЙ	Ge ³² 72,59 германий	As ³³ 74,9216 мышьяк	Se ³⁴ 78,96 СЕЛЕН	Br ³⁵ 79,904 БРОМ	Kr ³⁶ 83,80 КРИПТОН			
5	Rb ³⁷ 85,4678 РУБИДИЙ	Sr ³⁸ 87,62 СТРОНЦИЙ	Y ³⁹ 88,9059 ИТТРИЙ	Zr ⁴⁰ 91,224 ЦИРКОНИЙ	Nb ⁴¹ 92,9054 НИОБИЙ	Mo ⁴² 95,94 МОЛИБДЕН	Tc ⁴³ 97,9072 ТЕХНЕЦИЙ	Ru ⁴⁴ 101,07 РУТЕНИЙ	Rh ⁴⁵ 102,9055 РОДИЙ	Pd ⁴⁶ 106,42 ПАЛЛАДИЙ	
	Ag ⁴⁷ 107,8682 СЕРЕБРО	Cd ⁴⁸ 112,41 КАДМИЙ	In ⁴⁹ 114,82 ИНДИЙ	Sn ⁵⁰ 118,710 ОЛОВО	Sb ⁵¹ 121,75 СУРЬМА	Te ⁵² 127,60 ТЕЛЛУР	I ⁵³ 126,9045 ЙОД	Xe ⁵⁴ 131,29 КСЕНОН			
6	Cs ⁵⁵ 132,9054 ЦЕЗИЙ	Ba ⁵⁶ 137,33 БАРИЙ	La ⁵⁷ * 138,9055 ЛАНТАН	Hf ⁷² 178,49 ГАФНИЙ	Ta ⁷³ 180,9479 ТАНТАЛ	W ⁷⁴ 183,85 ВОЛЬФРАМ	Re ⁷⁵ 186,207 РЕНИЙ	Os ⁷⁶ 190,2 ОСМИЙ	Ir ⁷⁷ 192,22 ИРИДИЙ	Pt ⁷⁸ 195,08 ПЛАТИНА	
	Au ⁷⁹ 196,9665 ЗОЛОТО	Hg ⁸⁰ 200,59 РТУТЬ	Tl ⁸¹ 204,383 ТАЛЛИЙ	Pb ⁸² 207,2 СВИНЕЦ	Bi ⁸³ 208,9804 ВИСМУТ	Po ⁸⁴ 208,9824 ПОЛОНИЙ	At ⁸⁵ 209,9871 АСТАТ	Rn ⁸⁶ 222,0176 РАДОН			
7	Fr ⁸⁷ 223,0197 ФРАНЦИЙ	Ra ⁸⁸ 226,0254 РАДИЙ	Ac ⁸⁹ ** 227,0278 АКТИНИЙ	Rf ¹⁰⁴ 261,108 РЕЗЕРФОРДИЙ	Db ¹⁰⁵ 262,113 ДУБНИЙ	Sg ¹⁰⁶ 263,118 СИБОРГИЙ	Bh ¹⁰⁷ [264] БОРИЙ	Hs ¹⁰⁸ [265] ХАССИЙ	Mt ¹⁰⁹ [266] МЕЙТНЕРИЙ	Ds ¹¹⁰ [271] ДАРМШТАДИЙ	

*ЛАНТАНОИДЫ

Ce ⁵⁸ 140,12 ЦЕРИЙ	Pr ⁵⁹ 140,9077 ПРАЗЕОДИМ	Nd ⁶⁰ 144,24 НЕОДИМ	Pm ⁶¹ 144,9128 ПРОМЕТИЙ	Sm ⁶² 150,36 САМАРИЙ	Eu ⁶³ 151,96 ЕВРОПИЙ	Gd ⁶⁴ 157,25 ГАДОЛИНИЙ	Tb ⁶⁵ 158,9254 ТЕРБИЙ	Dy ⁶⁶ 162,50 ДИСПРОЗИЙ	Ho ⁶⁷ 164,9304 ГОЛЬМИЙ	Er ⁶⁸ 167,26 ЭРБИЙ	Tm ⁶⁹ 168,9342 ТУЛИЙ	Yb ⁷⁰ 173,04 ИТТЕРБИЙ	Lu ⁷¹ 174,967 ЛЮТЕЦИЙ
--	--	---	---	--	--	--	---	--	--	--	--	---	---

*АКТИНОИДЫ

Th ⁹⁰ 232,0381 ТОРИЙ	Pa ⁹¹ 231,0359 ПРО-АКТИНИЙ	U ⁹² 238,0289 УРАН	Np ⁹³ 237,0482 НЕПТУНИЙ	Pu ⁹⁴ 244,0642 ПЛУТОНИЙ	Am ⁹⁵ 243,0614 АМЕРИЦИЙ	Cm ⁹⁶ 247,0703 КЮРИЙ	Bk ⁹⁷ 247,0703 БЕРКЛИЙ	Cf ⁹⁸ 251,0796 КАЛИФОРНИЙ	Es ⁹⁹ 252,0828 ЭЙНШТЕЙНИЙ	Fm ¹⁰⁰ 257,0951 ФЕРМИЙ	Md ¹⁰¹ 258,0986 МЕНДЕЛЕВИЙ	No ¹⁰² 259,1009 НОБЕЛИЙ	Lr ¹⁰³ 260, 1054 ЛОУРЕНСИЙ
--	--	--	---	---	---	--	--	---	---	--	--	---	--

Учебное издание

**РАДИАЦИОННАЯ
ЭКОЛОГИЯ**

Курс лекций

Составитель

ЛАКОТКО Анатолий Аркадьевич

Технический редактор

Г.В. Разбоева

Компьютерный дизайн

Л.В. Рудницкая

Подписано в печать 30.10.2023. Формат 60x84^{1/16}. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 6,40. Уч.-изд. л. 6,22. Тираж 35 экз. Заказ 113.

Издатель и полиграфическое исполнение – учреждение образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

Свидетельство о государственной регистрации в качестве издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий

№ 1/255 от 31.03.2014.

Отпечатано на ризографе учреждения образования
«Витебский государственный университет имени П.М. Машерова».

210038, г. Витебск, Московский проспект, 33.