

ББК
68.9
К56

КОВЧУР С.Г.
ЩИГЕЛЬСКИЙ О.А.
ПОТОЦКИЙ В.Н.

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

С.Г. Ковчур
О.А. Щигельский
В.Н. Потоцкий

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ**

Рекомендовано Редакционно-издательским Советом Учреждения образования «Витебский государственный технологический университет» в качестве пособия

Пособие по курсу «Радиационная безопасность»

Витебск
2006

УДК 614.8+502.5(075)

ББК 68.9я7

К 56

Рецензенты:

доктор технических наук, заведующий кафедрой ПНХВ УО «ВГТУ»

А.Г. Коган

кандидат химических наук, доцент, зав. кафедрой химии УО «ВГТУ»

А.П. Платонов

Рекомендовано в качестве пособия Редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 2 от 21.03.2006 г.

К 56 Радиационная безопасность : пособие / С.Г. Ковчур, [и др.] ; УО «ВГТУ». – 2-е изд. , переработ. и доп. – Витебск, 2006. – 175 с.

ISBN 985-481-036-4

Второе издание пособия написано в соответствии с разделом «Радиационная безопасность» типовой программы «Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность», утвержденной Министерством образования РБ 26 мая 1999 г. В нём даны основные представления о радиоактивности и свойствах ионизирующих излучений, их взаимодействии с веществом, дозиметрические величины радиоактивности и единицы их измерения. Существенно доработаны и дополнены следующие разделы: строение вещества; дозиметрические приборы; действие ионизирующих излучений на биологические объекты; радиоактивное загрязнение растительности Республики Беларусь; биологическое действие ионизирующих излучений.

Учебное пособие предназначено для студентов всех специальностей дневной и заочной форм обучения, изучающих курс «Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность»

УДК 614.8+502.5(075)

ББК 68.9я7

К 56

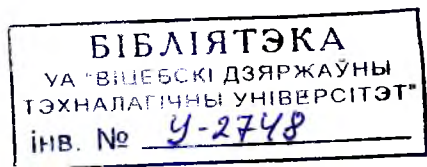
ISBN 985-481-036-4

© Ковчур С.Г.

Щигельский О.А.

Потоцкий В.Н., 2006

© УО «ВГТУ»



ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1945 г., в связи с созданием атомных, а позднее и водородных бомб, их интенсивными испытаниями, с развитием атомной энергетики и расширением сфер использования источников ионизирующего излучения в биосферу нашей планеты стало поступать большое количество радионуклидов. Попадая тем или иным способом в верхние слои атмосферы, последние быстро распространились по всему земному шару, выпадая на поверхность суши, океанов и морей.

Следствием этого явилось возрастание радиационного фона окружающей среды, который, следует отметить, на протяжении последних нескольких тысячелетий оставался относительно стабильным. Таким образом, в результате активной деятельности человека все живые организмы на планете стали подвергаться дополнительному действию радиационного излучения.

Вот почему перед человечеством неизбежно встает вопрос о проведении мероприятий по обеспечению радиационной безопасности. В связи с этим во всем мире ведутся активные поиски протекторов от воздействия как острого, так и хронического радиационного облучения, в том числе и средств ранней противолучевой терапии.

В Республике Беларусь проблема биологического действия ионизирующей радиации, особенно малых доз, и защита от нее продолжает по-прежнему оставаться одной из фундаментальных проблем в комплексе медико-биологических наук. И в настоящее время эта проблема чрезвычайно актуальна в связи с катастрофой на Чернобыльской АЭС, признанной самой значительной по своему техногенному воздействию катастрофой в мире, следствием которой явилось загрязнение значительных территорий нескольких государств.

Курс «Радиационная безопасность», необходимость введения которого вызвана проблемами, связанными с аварией на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), является обязательным для изучения всеми студентами высших учебных заведений.

Последствия аварии на ЧАЭС признаны чрезвычайной ситуацией планетарного масштаба. В мировой истории – это крупнейшая техногенная катастрофа, а комплекс возникших в связи с ней проблем и масштабов мероприятий по их решению не имеет аналогов в мире. Эти последствия сказываются на состоянии экономики, особенно лесного и сельского хозяйства, водных ресурсов, а главное, на здоровье населения Республики Беларусь.

Ликвидация последствий Чернобыльской катастрофы направлена сейчас на организацию и реализацию комплекса защитных мероприятий,

обеспечивающих безопасную жизнедеятельность населения в загрязненных радионуклидами районах.

Цель данного курса состоит в том, чтобы дать студентам основы знаний о радиации, свойствах ионизирующих излучений, дозовых характеристиках и их биологическом действии. Необходимо знать источники облучения человека и поведение радионуклидов в организме, их опасное влияние на здоровье людей.

Специалисты с высшим образованием должны уметь выполнять мероприятия по радиационной защите и радиационной безопасности в условиях радиоактивного загрязнения местности после аварии на радиационно-опасных объектах. Полученные знания могут быть в дальнейшем применены как непосредственно в хозяйственной деятельности будущих инженеров, так и должны стать основой их грамотного сознательного поведения в условиях, сложившихся в Белоруссии после аварии на ЧАЭС.

Чернобыльская авария показала, что представление о радиации не только широких слоев населения, но и отдельных ученых и руководителей весьма искажено. Основной причиной такого положения следует считать дефицит радиобиологических знаний, а также недостаточное количество литературы, в которой доступно освещался бы широкий круг радиационных проблем.

Важным является осознание того, что радиация – один из многих естественных факторов окружающей среды, а радиоактивность – неотъемлемый элемент условий нашего бытия, и дефицит знаний о ее природе создает психологическую основу для беспокойств и тревоги, возникновения стрессов.

Знание основ радиационной безопасности поможет выжить населению на радиоактивно загрязненных территориях и обеспечить охрану жизни и здоровья людей от вредного воздействия ионизирующего излучения, что будет способствовать развитию экономики и социальной сферы.

Учебное пособие составлено в соответствии с типовой программой «Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность», утвержденной Министерством образования Республики Беларусь 28 мая 1999 года.

ГЛАВА I РАДИОАКТИВНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ЯДЕР

1.1. Строение вещества и атома

Согласно физическим представлениям, существуют **вещество** и **поле**. Но прежде следует уяснить, что называется веществом. В химии, в отличие от физики, понятию «вещество» придается качественный смысл.

Веществом называется однородное тело, имеющее постоянные свойства, не связанные с его размером и приданной ему формой.

Примером наиболее широко распространенного вещества можно считать воду. Многие свойства воды хорошо известны из повседневного опыта. Вода может находиться в жидком, твердом и газообразном состояниях. Она бесцветна (при не очень большой толщине слоя), не имеет запаха и вкуса, растворяет многие другие вещества. Плотность воды 1 г/см^3 . Это лишь малая часть из множества свойств, присущих воде и вообще каждому веществу. Свойства воды не зависят от того, в какой сосуд она налита (какая форма ей придана). Снежинка, образованная замерзшей водой, имеет собственную шестилучевую форму, которая отражает внутреннюю структуру воды в твердом состоянии. Перечисленные свойства воды относятся к физическим.

Чем сложнее структура вещества, тем более разрушительное воздействие будет оказывать на него ионизирующее излучение (ИИ). Поэтому максимальное разрушительное воздействие радиация оказывает на наиболее высокоорганизованные белковые молекулы, которые образуют биологические ткани.

На неорганические вещества влияние может оказывать только мощный поток ИИ, который действует с большой дозовой нагрузкой в течение длительного времени. Примером такого воздействия является «радиационное старение» материалов, из которых изготавливается активная зона ядерных реакторов.

Поэтому, прежде чем говорить о строении атомных ядер и их превращениях, представим себе схематически строение вещества (его структурные единицы):

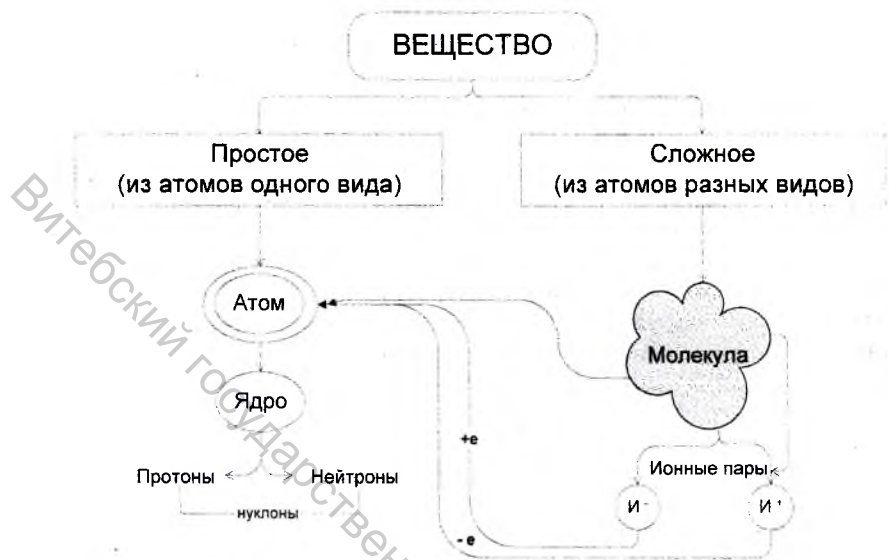


Рисунок 1.1. Структура вещества

Атом является основным структурным элементом всех веществ. **Атом** – наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его химических свойств. Химические свойства элемента определяются строением его атома.

Химический элемент – это определенный вид атомов с одинаковым положительным зарядом ядра. В настоящее время известно 108 элементов. Из них 90 существуют в природе, а около 70 содержатся в организме человека. Для обозначения химических элементов введены химические знаки или химические символы. Их обозначают начальной или начальной и одной из последующих букв латинского названия данного элемента (кислород, *Oxygenium* – O; натрий, *Natrium* – Na; цинк, *Zincum* – Zn и т.д.). Каждый элемент занимает в периодической таблице Д.И. Менделеева (ПСМ) определенное место, т.е. имеет порядковый номер.

Определенные атомы объединяются один с одним и образуют новые частицы – молекулы. **Молекула** – это наименьшая частица вещества, которая сохраняет его состав и химические свойства. В зависимости от того, состоят ли молекулы из атомов одного и того же элемента или же из атомов различных элементов, все вещества делятся на простые и сложные.

Молекулы простых веществ состоят из одного атома (*He* – гелий, *Ne* – неон, *Kr* – криптон), двух (*O₂* – кислород, *N₂* – азот, *Cl₂* – хлор) и более атомов (*S₈* – сера). Один и тот же элемент может образовывать несколько

простых веществ (так, алмаз и графит отличаются только размещением одних и тех же атомов углерода в молекуле). Возможно и различное число атомов одного и того же элемента в молекуле (O_2 – кислород, O_3 – озон). Вещества, молекулы которых состояли из атомов двух и более элементов, образуют сложные вещества (H_2O , CO_2 , H_2SO_4 , CH_3CH_2OH). Каждому элементу соответствует определенный род атома. Размеры атома чрезвычайно малые. Его диаметр составляет 10^{-8} см, на отрезке в 1 см можно уложить 100 млн. атомов. Масса самого простого и легкого атома – водорода (H) составляет $1,67 \cdot 10^{-27}$ кг. Атом урана ($^{238}_{92}U$), самый тяжелый из существующих на Земле элементов, занимающий в таблице Д.И. Менделеева 92 место, тяжелее атома водорода в 238 раз. Известны сверхтяжелые элементы, получаемые искусственным путем. Так, атом плутония ($^{244}_{94}Pu$) в 244 раза тяжелее атома водорода.

Все атомы химических элементов имеют одинаковую структуру. Они состоят из положительно заряженного ядра, где сконцентрирована практически вся масса атома (99,95%), и отрицательно заряженных электронов, образующих электронные оболочки вокруг ядра. В целом атом электрически нейтрален.

Модель строения атома предложил еще в 1911 г. английский физик Эрнст Резерфорд (это так называемая планетарная или ядерная модель). Атом, по Резерфорду, это своеобразная модель Солнечной системы – в центре находится тяжелое положительно заряженное ядро, вокруг которого, подобно планетам вокруг Солнца, вращаются отрицательно заряженные электроны. Датский ученый Нильс Бор усовершенствовал планетарную модель атома. Он высказал суждение, что электроны движутся не по любым орбитам, а по определенным. При этом, согласно Бору, электронные орбиты могут быть сгруппированы в отдельные электронные оболочки.

По современным данным, электрон в атоме не имеет траектории. Различные положения его рассматриваются как электронное облако с определенной плотностью отрицательного заряда. Максимальная плотность отвечает наибольшей вероятности нахождения электрона в данной части атомного пространства. Пространство вокруг ядра, в котором наиболее вероятно нахождение электрона, называется орбиталью (вместо существовавшего ранее термина орбита).

Орбитали атома имеют разные размеры. Электроны, которые движутся в орбиталях близкого размера, образуют электронные слои. Электронные слои называют также энергетическими уровнями. Энергетические уровни нумеруют, начиная от ядра, цифрами 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 или обозначают буквами K, L, M, N, O, P, Q . Наибольшее число электронов на энергетическом уровне равно удвоенному квадрату номера уровня – $N = 2n^2$. Целое число n , обозначающее номер уровня, называется **главным кванто-**

вым числом. В соответствии с этим уравнением на 1-м, ближайшим к ядру энергетическом уровне, может находиться не более 2-х электронов, на 2-м уровне – не более 8, на 3-м уровне – не более 18, на 4-м уровне – не более 32 электронов и т.д.

Энергетические уровни подразделяются на подуровни, число подуровней равно значению главного квантового числа, но не превышает 4-х подуровней. Подуровни обозначают латинскими буквами *s, p, d, f*.

Между ядром и электронами существуют силы притяжения. Наиболее прочная связь электронов с ядром наблюдается у электронов на К-уровне, так, энергия связи электронов углерода составляет 280 эВ, стронция – 16 КэВ, цезия – 36 КэВ, урана – 280 КэВ. Чем на более удаленном от ядра энергетическом уровне находится электрон, тем меньше энергия связи его с ядром. На внешних энергетических уровнях энергия связи электронов не превышает 1–2 эВ. Поэтому электроны внешних энергетических уровней более подвержены воздействию излучений низкой энергии.

1.2. Строение атомного ядра

Атом состоит из трех видов элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Атомное ядро – центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны имеют общее название нуклоны, в ядре они могут превращаться друг в друга. Ядро простейшего атома – атома водорода – состоит из одной элементарной частицы – протона.

Диаметр ядра атома равен примерно 10^{-13} – 10^{-12} см и составляет 0,0001 диаметра атома. Однако практически вся масса атома (99,95–99,98%) сосредоточена в ядре. Если бы удалось получить 1 см³ чистого ядерного вещества, масса его составила бы 100–200 млн.т. Масса ядра атома в несколько тысяч раз превосходит массу всех входящих в состав атома электронов.

Протон – элементарная частица, ядро атома водорода. Масса протона равна $1,6721 \cdot 10^{-27}$ кг, она в 1836 раз больше массы электрона. Электрический заряд положителен и равен $1,66 \cdot 10^{-19}$ Кл. Кулон – единица электрического заряда, равная количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника за время 1с. при неизменной силе тока 1А (ампер).

Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов. Это число постоянно для данного элемента и определяет его физические и химические свойства. От количества протонов зависит, с каким химическим элементом мы имеем дело. Например, если в ядре один про-

тон – это водород, если 26 протонов – это железо. Число протонов в атомном ядре определяет заряд ядра (зарядовое число Z) и порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д.И.Менделеева (атомный номер элемента).

Нейтрон – электрически нейтральная частица с массой $1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг, в 1839 раз больше массы электрона. Нейтрон в свободном состоянии – нестабильная частица, он самостоятельно превращается в протон с испусканием электрона и антинейтрино. Период полураспада нейтронов (время, в течение которого распадается половина первоначального количества нейтронов) равен примерно 12 мин. Однако в связанном состоянии внутри стабильных атомных ядер он стабилен. Общее число нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре называют массовым числом (атомной массой – A). Число нейтронов, входящих в состав ядра, равно разности между массовым и зарядовым числами: $N = A - Z$.

Электрон – элементарная частица, носитель наименьшей массы – $0,91095 \cdot 10^{-27}$ г и наименьшего электрического заряда – $1,6021 \cdot 10^{-19}$ Кл. Это отрицательно заряженная частица. Число электронов в атоме равно числу протонов в ядре, т.е. атом электрически нейтрален.

Позитрон – элементарная частица с положительным электрическим зарядом, античастица по отношению к электрону. Масса электрона и позитрона равна, а электрические заряды равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку.

Различные типы ядер называют **нуклидами**. Нуклид – вид атомов с данными числами протонов и нейтронов. В природе существуют атомы одного и того же элемента с разной атомной массой (массовым числом): $^{35}_{17}\text{Cl}$, $^{37}_{17}\text{Cl}$ и т.д. Ядра этих атомов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Разновидности атомов одного и того же элемента, имеющие одинаковый заряд ядер, но различное массовое число, называются **изотопами**. Обладая одинаковым количеством протонов, но различаясь числом нейтронов, изотопы имеют одинаковое строение электронных оболочек, т.е. очень близкие химические свойства, и занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов.

Изотопы обозначают символом соответствующего химического элемента с расположенным сверху слева индексом A – массовым числом, иногда слева внизу приводится также число протонов (Z). Например, радиоактивные изотопы фосфора обозначают ^{32}P , ^{33}P или $^{32}_{15}\text{P}$ и $^{33}_{15}\text{P}$ соответственно. При обозначении изотопа без указания символа элемента массовое число приводится после обозначения элемента, например, фосфор – 32, фосфор – 33.

Большинство химических элементов имеет по несколько изотопов. Кроме изотопа водорода ^1H – протия, известен тяжелый водород ^2H – дейтерий и сверхтяжелый водород ^3H – тритий. У урана 11 изотопов, в

природных соединениях их три (уран–238, уран–235, уран–233). У них по 92 протона и, соответственно, 146, 143 и 141 нейтрон.

В настоящее время известно более 1900 изотопов 108 химических элементов. Из них к естественным относятся все стабильные (их примерно 280) и естественные изотопы, входящие в состав радиоактивных семейств (их 46). Остальные относятся к искусственным, они получены искусственным путем в результате различных ядерных реакций.

Термин «изотопы» следует применять только в тех случаях, когда речь идет об атомах одного и того же элемента, например изотопы углерода (^{12}C и ^{14}C). Если подразумеваются атомы разных химических элементов, рекомендуется использовать термин «нуклиды», например радионуклиды (^{90}Sr , ^{131}I , ^{137}Cs).

1.3. Элементарные частицы: лептоны, мезоны, барионы, гипероны, резонансы

Минимальная часть вещества, сохраняющая его химические свойства, называется **структурной единицей** данного вещества. Количество структурных единиц в данном количестве вещества определяется по закону Авогадро, согласно которому в одном моле вещества содержится $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ структурных единиц.

Используя закон Авогадро, найдем общее количество ядер калия в одном килограмме оксалата калия (щавелевокислого калия) $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$.

1. Найдем молярную массу исследуемого вещества по таблице Д.И.Менделеева.

$$M_{\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4} = 39 \cdot 2 + 12 \cdot 2 + 16 \cdot 4 = 166 \text{ г.}$$

2. Найдем количество вещества в массе, равной 1 кг.

$$\nu_{\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4} = \frac{m}{M} = \frac{1000}{166} \approx 6 \text{ моль,}$$

где ν – количество вещества в молях;

M – молярная масса;

m – масса, кг.

3. Найдем количество структурных единиц в данном количестве вещества.

$$N_{K_2C_2O_4} = \nu \cdot N_A = 6 \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \approx 3,6 \cdot 10^{24} \text{ молекул.}$$

4. Найдем общее число ядер калия в данном количестве структурных единиц.

$$N_K = n \cdot N_{K_2C_2O_4} = 2 \cdot 3,6 \cdot 10^{24} = 7,2 \cdot 10^{24} \text{ ядер,}$$

где n – количество ядер калия в одной молекуле вещества.

Таким образом, все вещества независимо от состава и строения можно рассматривать как совокупность атомов с некоторыми изменениями в электронных оболочках (избыток либо недостаток электронов у ионов, общие молекулярные орбитали у молекул). Поэтому протон, нейтрон и электрон, входящие в состав атома, являются материообразующими элементарными частицами.

Частица называется **элементарной**, если не доказана возможность ее деления на составляющие.

Элементарная частица называется **фундаментальной**, если доказана невозможность ее деления на составляющие.

В составе первичного космического излучения обнаружено около 200 различных элементарных частиц. Фундаментальными из них являются только 12 частиц (6 лептонов и 6 кварков). Все элементарные частицы делятся на несколько основных видов.

1. Лептоны – самые легкие элементарные частицы. Масса покоя их считается равной нулю либо близка к нулю.

Формальный признак: $m_e < m_e$. Масса частицы меньше, чем масса электрона. К этой группе относятся ν – нейтрино, $\bar{\nu}$ – антинейтрино.

Эти частицы не имеют заряда. Масса покоя считается равной 0, распространяются в пространстве со скоростью, равной скорости света, обладают максимальной проникающей способностью и не имеют ионизирующей способности. Образуются в различных β – распадах, отличаются друг от друга поляризацией, при взаимодействии аннигилируют.

Аннигиляция – это взаимное уничтожение частицы и античастицы с выделением энергии.

${}_{-1}^0e$ – электрон;

${}_{+1}^0e$ – позитрон.

Они обладают одинаковой массой покоя, аналогичными квантомеханическими свойствами, одинаковой проникающей и ионизирующей способностью. Отличаются по заряду, образуются в различных β – распадах. При взаимодействии аннигилируют по уравнению (2 кванта γ -излучений)

$${}_{-1}^0e + {}_{+1}^0e \longrightarrow 2h\nu.$$

2. Мезоны – элементарные частицы, масса покоя которых больше, чем у электронов, но меньше, чем у протонов.

$$m_e < m_\pi < m_p.$$

К этой группе относятся все кварки:

μ – «мю» и π – «пи» – мезоны.

3. Барионы, гипероны – тяжелые элементарные частицы, масса покоя которых больше массы протона: $m_q > m_p$.

Протон и нейтрон относятся к барионам. Гипероны обозначают большими буквами греческого алфавита. Они обладают максимальной массой, максимальной энергией и максимальной ионизирующей способностью.

4. Резонансы – самые короткоживущие элементарные частицы, которые образуются при взаимном превращении других частиц и обуславливают эти превращения.

Среднее время жизни резонансов порядка 10^{-21} сек.

Среднее время жизни большинства элементарных частиц порядка 10^{-8} сек и меньше. За это время частица либо вступает во взаимодействие, либо распадается с образованием цепочки взаимных превращений элементарных частиц. Конечными продуктами в таких цепочках являются устойчивые в свободном состоянии протоны и электроны. В процессе таких превращений именно протоны и электроны преобладают в составе первичного космического излучения. Среднее время жизни нейтронов в свободном состоянии составляет порядка 10^{-3} сек, благодаря чему возможна ядерная энергетика, так как в энергетических ядерных реакторах деление ядерного топлива (урана-238, обогащенного ураном-235) происходит под действием свободных нейтронов.

В первичном космическом излучении нейтроны, как и другие неустойчивые частицы, участвуют в основных цепочках превращений (цепные реакции).

1.4. Энергия связи ядра

Энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на свободные нуклоны, не сообщая им кинетической энергии, называется **полной энергией связи ядра** (ΔE [Дж, МэВ]).

Так как энергия свободных нуклонов больше, чем энергия ядра как целого, полную энергию связи можно выразить

$$\Delta E = E_{\text{сум}} - E_{\text{я}},$$

где $E_{\text{сум}}$ – суммарная собственная энергия свободных нуклонов, на которые можно разделить ядро;
 $E_{\text{я}}$ – собственная энергия ядра как целого.

По соотношению Эйнштейна собственная энергия выражается

$$E_{\text{я}} = m_{\text{я}} \cdot c^2.$$

Определим суммарную собственную энергию нуклонов

$$E_{\text{сум}} = (M_p + M_n) \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n) \cdot c^2,$$

где $m_{\text{я}}$ – масса ядра, кг;
 Z – зарядовое число;
 M_p и M_n – суммарные массы всех протонов и нейтронов;
 A – массовое число;
 m_p и m_n – массы протонов и нейтронов.

Полная энергия связи ядра через массу выражается следующим образом:

$$\Delta E = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2,$$

где m – масса, кг;

ΔE – полная энергия связи ядра, Дж.

Экспериментально определяют не массу ядра, а массу атома и через нее выражают энергию связи:

$$M_{\text{ат}} = m_{\text{я}} + M_e = m_{\text{я}} + Z \cdot m_e,$$

где $M_{\text{ат}}$ – масса атома;
 M_e – масса электронной оболочки;
 m_e – масса одного электрона.

Выражаем массу ядра

$$m_{\text{я}} = M_{\text{ат}} - Z \cdot m_e.$$

Определяем полную энергию связи атома через массу:

$$\begin{aligned}\Delta E &= (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{am} + Z \cdot m_e) \cdot c^2 = \\ &= (Z(m_e + m_p) + (A - Z) \cdot m_n - M_{am}) \cdot c^2 = \\ &= (Z \cdot M_H + (A - Z) \cdot m_n - M_{am}) \cdot c^2,\end{aligned}$$

где $m_e + m_p = M_H$ – атом водорода.

При объединении свободных нуклонов в ядро должна выделяться энергия, равная полной энергии связи этого ядра. Поэтому энергетический эффект любой ядерной реакции рассчитывается как разность между суммарной полной энергией связи продуктов и суммарной полной энергией компонентов.

ΔE – это энергия, которую необходимо затратить, чтобы разделить ядро на нуклоны, не сообщая им кинетической энергии. Это та энергия, которая должна выделяться при объединении свободных нуклонов в ядро. Для упрощения проведения расчётов энергетического эффекта реакций, вместо полной энергии связи ΔE , часто используется дефект масс

$$\Delta = |M - A|,$$

где Δ – дефект масс;

M – масса ядра;

A – массовое число.

Дефект массы не имеет физического смысла. Косвенно характеризует величину ΔE , но значительно упрощает проведение расчётов. ΔE характеризует устойчивость ядра, но не позволяет сравнить относительную устойчивость различных ядер. Для этой цели используется удельная энергия связи.

Удельная энергия связи. Удельная энергия связи характеризует среднюю энергию связи одного нуклона с ядром. Это такая энергия, которую необходимо затратить, чтобы вырвать из ядра один нуклон, не передавая ему кинетической энергии, что следует из выражения

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{A},$$

где ε – удельная энергия связи;

A – массовое число, которое показывает количество нуклонов в ядре.

Чтобы сравнить устойчивость различных ядер, изучается зависимость удельной энергии связи от массового числа и по данным таблицы 1.1 построен рисунок 1.2.

Таблица 1.1.

A	2	15	50	60	150	238
$\epsilon, \text{МэВ}$	2,29	7,9	8,5	8,5	8,0	7,4

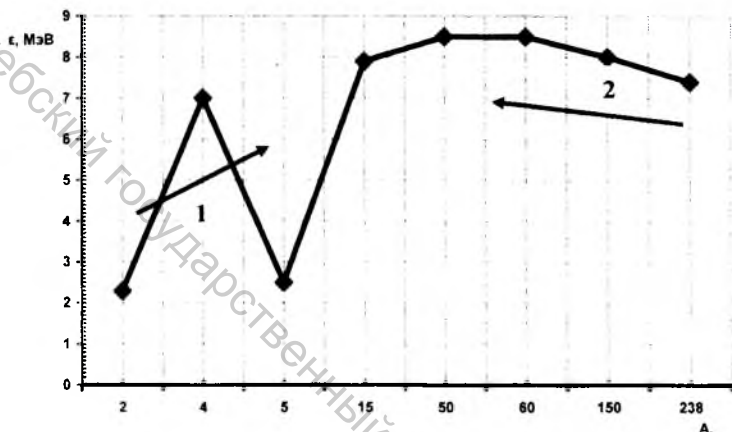


Рис. 1.2. Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Зависимость начинается с точки с массовым числом 2. Если в ядре меньше 2-х нуклонов, понятие удельной энергии связи теряет физический смысл. Из такого ядра нельзя вырвать один нуклон, не разрушив само ядро.

Изгибы кривой показывают, что наиболее легкие ядра имеют аномально низкие, относительно средних, значения удельной энергии связи ϵ и, следовательно, устойчивость. Наибольшей устойчивостью обладают ядра средней массы с массовыми числами от 50 до 60. Затем устойчивость плавно снижается до урана — ^{238}U и остаётся практически неизменной для более тяжёлых ядер. Данная зависимость справедлива для устойчивых изотопов, которые обычно указываются в периодической системе Менделеева (ПСМ). На рис. 1.2 можно выделить два участка (1, 2), на каждом из которых происходит увеличение удельной энергии связи, следовательно, каждый из них будет соответствовать процессу, в котором выделяется энергия.

Участок 1 соответствует термоядерному синтезу. В этом процессе из 2-х наиболее лёгких ядер образуется более тяжёлое, у которого при незначительном увеличении массы резко возрастает удельная энергия связи. За счёт этого увеличения выделяется огромное количество энергии (до 5 МэВ на 1 нуклон). Процессы термоядерного синтеза являются источником энергии звёзд и лежат в основе водородной бомбы. Это наиболее мощный из

известных источников энергии, но он в настоящее время является неуправляемым.

Наиболее мощный управляемый источник энергии – деление тяжёлых ядер. Этому процессу соответствует участок 2 на рис. 1.1. Удельная энергия связи продуктов $\approx$ на 1 МэВ больше, чем исходных составляющих. Поэтому в этом процессе может выделяться до 1 МэВ на 1 нуклон. Деление тяжёлых ядер является источником энергии всех действующих ядерных реакторов и лежит в основе атомной бомбы. Более тщательное изучение рассмотренной выше закономерности позволило получить ряд выводов, которые легли в основу теории ядерных сил. При более глубоком рассмотрении кривая зависимости состоит из небольших максимумов и минимумов. Максимумы устойчивости располагаются на кривой строго в определённом порядке в соответствии со следующими закономерностями:

- наибольшие максимумы устойчивости наблюдаются для «чётно-чётных» ядер, т.е. ядер, у которых чётное число протонов и чётное число нейтронов. Это указывает на то, что внутри ядра нуклоны объединяются в группы и наибольшей устойчивостью обладает группа $2n2p$. Устойчивость данной группы позволяет объяснить возможность α -распада, при котором из ядра вылетает ядро гелия (${}^4_2\text{He}$), состоящее из 2-х протонов и 2-х нейтронов;

- менее интенсивные максимумы устойчивости наблюдаются для ядер, у которых число протонов и (или) число нейтронов соответствует следующим числам: 2, 8, 20, 28, 82, 126. Эти числа называют «магическими» ядерными числами. Наличие максимумов устойчивости при строго определённых числах протонов и (или) нейтронов указывает на то, что нуклоны внутри ядра образуют оболочки, аналогичные электронным оболочкам в атоме, и наибольшая устойчивость наблюдается при полностью заполненных оболочках;

- лёгкие ядра более устойчивы, когда число нейтронов равно числу протонов. Тяжёлые ядра более устойчивы, когда число нейтронов больше, чем число протонов;

- при сравнении устойчивости нескольких ядер наиболее устойчивы будут те ядра, для которых справедливы сразу несколько из выше перечисленных закономерностей.

Все закономерности справедливы для устойчивых ядер, которые обычно указаны в ПСМ. Если изотоп имеет меньшее массовое число, чем указано в ПСМ, то велика вероятность того, что он будет β^+ -активным, т.е. протон внутри такого ядра будет стремиться превратиться в нейтрон. Если масса изотопа больше, чем указано в ПСМ, то возрастает вероятность того, что он будет β^- -активным, т.е. в таком ядре нейтрон будет стремиться превратиться в протон. В обоих случаях ядро становится неустойчивым, и его распад ведёт к восстановлению соотношения протонов и нейтронов.

Используя график и основные вышеизложенные закономерности,

сравнивается устойчивость различных ядер. На примере химических элементов азота, кислорода и углерода определим устойчивость этих элементов:

A_ZX	${}^{14}_7N$	${}^{16}_8O$	${}^{14}_6C$
Устойчивость	2	1	3

Находим все указанные в условии задачи ядра в ПСМ по их зарядовым числам. Если указанная там относительная атомная масса какого-либо элемента отличается от данного в условии массового числа, значит, указанный в условии изотоп радиоактивный и наименее устойчивый.

${}^{14}_6C$ – относительная атомная масса этого элемента отличается от указанного в ПСМ, и, следовательно, этот элемент наименее устойчив, склонен к радиоактивному распаду.

Определяем положение оставшихся ядер на графике зависимости удельной энергии связи от массового числа (рис. 1). Наиболее устойчивы ядра с массовым числом от 50 до 60. Если массовые числа меньше 50 или больше 60, а также в случае, когда все предложенные ядра имеют массовые числа от 50 до 60, к ним применяют критерии устойчивости. Количество протонов определяется по порядковому номеру элемента в периодической системе Д.И.Менделеева, а количество нейтронов определяется по разности между массовым числом, указанным в условии задачи, и количеством протонов. Если для двух ядер выполняются одинаковые критерии устойчивости, то их сравнивают между собой по положению на рис. 1.2 зависимости удельной энергии связи от массового числа.

Величина удельной энергии связи, так же как и величина полной энергии связи, используется для расчётов энергетического эффекта реакции. С целью упрощения таких расчётов вместо ε используют упаковочный коэффициент $f_{уп}$, который определяется из выражения

$$f_{уп} = \frac{\Delta}{A}.$$

Он представляет собой средний дефект массы, приходящийся на один нуклон ядра. Упаковочный коэффициент $f_{уп}$, так же как и дефект массы, не имеет физического смысла и лишь косвенно характеризует удельную энергию связи ε , а также существенно упрощает проведение расчётов.

1.5. Стабильные и радиоактивные изотопы

Если ядра атомов состоят из протонов, то как объяснить устойчивость этих ядер? Ведь одноименно заряженные протоны, согласно закону Кулона, отталкиваясь друг от друга, должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов очень прочные образования. Следовательно, кроме кулоновских сил отталкивания, в ядре действуют и силы притяжения. Эти силы называли ядерными силами. Они действуют между нуклонами, т.е. между протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном. Они значительны только на малых расстояниях, сравнимых с поперечником самих ядерных частиц (10^{-13} см). С увеличением расстояния между ядерными частицами ядерные силы быстро уменьшаются и становятся практически равными нулю. Так, если на расстоянии 10^{-15} м ядерные силы приблизительно в 100 раз превышают кулоновские силы отталкивания, то уже на расстоянии 10^{-14} м они оказываются мизерными.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, т.е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное количество протонов и нейтронов. Так как с увеличением атомного номера увеличение числа нейтронов в атоме преобладает, то вводят понятие о «разрыхляющем» действии нейтронов.

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, надо совершить работу, т.е. затратить энергию. Эта энергия называется энергией связи ядра. Энергия связи частиц в ядрах составляет несколько миллионов электрон-вольт. Например, энергия связи ядра гелия составляет 28 МэВ, дейтерия – 2,2 МэВ, азота – 104,5 МэВ, урана – 1800 МэВ. Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется удельной энергией связи, она равна 7 – 8,5 МэВ. Чтобы «взорвать» ядро, нужно приложить такую же энергию «извне». В зависимости от того, какие силы в ядре преобладают, ядро является или стабильным, или нестабильным. Наибольшую энергию связи, а следовательно, и максимальную стабильность имеют ядра, располагающиеся в середине таблицы Д.И. Менделеева. Устойчивость ядра зависит от соотношения количества протонов и нейтронов в ядре. Количество протонов в ядре всегда равно или меньше количества нейтронов. Отношение массы атома к числу протонов должно быть равно или больше 2 ($A/Z \geq 2$). Для легких элементов это отношение равно 2, для тяжелых – 2,6. Чем меньше в ядре нейтронов, тем ядро устойчивее. Если в ядре слишком много протонов или нейтронов, то такие ядра неустойчивы и претерпевают

самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых ядро атома одного элемента превращается в ядро атома другого элемента.

Ядра с четным количеством протонов имеют большую стабильность изотопов и более распространены в природе, чем ядра с нечетным количеством протонов. Наиболее устойчивыми являются ядра с четным количеством протонов и четным количеством нейтронов («четно–четные» ядра). Самыми устойчивыми являются ядра, содержащие по 2, 8, 20, 50, 82 протона и нейтрона («дважды магические ядра»): ${}^4_2\text{He}$ – гелий, ${}^{16}_8\text{O}$ – кислород, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$ – кальций.

Наименее устойчивыми являются ядра с нечетным количеством протонов и нечетным количеством нейтронов («нечетно–нечетные» ядра).

В начале и середине таблицы Д.И. Менделеева количество протонов и нейтронов в ядрах в основном равно ${}^2_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{32}_{16}\text{S}$, и поэтому ядра чаще стабильны. С увеличением атомного номера Z и увеличением количества нейтронов по сравнению с протонами все в большей степени проявляется их «разрыхляющее» действие, и ядра становятся менее устойчивыми. У элементов с атомным номером от 84 до 92 ядерные силы уже не способны обеспечивать полную устойчивость ядер. Эти элементы оказываются нестабильными: Rn 222, Ra 226, U 238 и т.д.

Стабильность понижается не только в сторону более тяжелых, но и в сторону более легких элементов: кислород 16, 17, 18 – стабильный, а кислород – 13, 14, 15, 19, 20 – не стабильный; кальций – 40, 42, 43, 44, 46, 48 – стабильный, а кальций – 37, 38, 39, 41, 45, 47, 49, 51 – не стабильный.

Таким образом, низкой стабильностью отличаются ядра с недостаточным и излишним содержанием нейтронов.

1.6. Сравнительная характеристика ядра и атома. Принцип неопределенности Гейзенберга

Ядро состоит из тяжелых протонов и нейтронов. Атом отличается от ядра наличием оболочки, которая состоит из легких электронов. Исходя из строения ядра и атома, сравним основные свойства:

- масса будет практически полностью сосредоточена в ядре атома. Масса ядра составляет 99,95% массы атома;

- линейный размер. Трудность в определении линейного размера ядра связана с тем, что нуклоны, как и другие элементарные частицы, обладают корпускулярно-волновым диапазоном и движутся по квантово-механическим законам. Им одновременно присущи свойства и частицы, и

волны.

При определении линейных размеров ядер возникают сложности, обусловленные корпускулярно–волновым дуализмом нуклонов, т.е. одновременным наличием у нуклонов свойств как частицы, так и волны.

Наличие корпускулярных свойств предполагает локализацию частицы в пространстве в любой момент времени, т.е. частица должна описываться в любой момент времени координатой и импульсом, а совокупность частиц – системой их координат и импульсов.

Наличие волновых свойств предполагает равновероятное расположение частицы в пространстве в любой момент времени и невозможность описать ее координатой и импульсом.

Одновременное наличие тех и других свойств у элементарных частиц приводит к неопределенности, которая называется **неопределенностью Гейзенберга** и формируется в **принцип неопределенности Гейзенберга**:

Нельзя одновременно и точно определить координату и импульс элементарной частицы.

Обозначим через ΔX неопределенность координаты, то есть минимальную область пространства, в котором может находиться частица в данный момент времени; через ΔP – неопределенность импульса, то есть минимальный интервал, в который может изменяться значение импульса частицы в данный момент времени.

Тогда принцип неопределенности Гейзенберга можно записать в виде

$$\Delta X \cdot \Delta P \geq \hbar,$$

где $\hbar$ – приведенная постоянная Планка, которая равна $\frac{h}{2\pi}$.

Отсюда следует, что если $\Delta X \rightarrow 0$, то $\Delta P \rightarrow \infty$. Если $\Delta P \rightarrow 0$, то $\Delta X \rightarrow \infty$. То есть, чем точнее определяется одна характеристика частицы, тем больше неопределенность другой характеристики. Следовательно, частицу нельзя описать координатой и импульсом. Ядро как совокупность частиц – системой координат и импульсом.

Ядро имеет размытые очертания, что делает невозможным непосредственное точное определение линейного размера. Поэтому, чтобы получить данные о ядерных радиусах, используют косвенные приближенные методы, основанные на изучении рассеивания различных частиц ядрами вещества. Различные методы дают разные результаты. Но порядок величин при этом сохраняется и составляет $10^{-15} - 10^{-14}$ м.

Величина 10^{-15} м = 1Ф (Ферми).

При определении линейных размеров атомов дуализм электронов не учитывается, и в качестве атомного радиуса принимается половина длины

химической связи, которую атом образует в соединении. Поэтому для каждого атома определено столько радиусов, сколько типов связи он может образовывать (ионный, ковалентный, металлический). Также методами квантовой химии по максимальной плотности электронного облака рассчитывается так называемый теоретический радиус изолированного атома. Все они отличаются друг от друга, но имеют одинаковый порядок $10^{-11} - 10^{-10}$ м. Чтобы оценить относительную вероятность ядерных столкновений по сравнению с электронными столкновениями при прохождении потока заряженных частиц через вещество, найдем, какую часть объема занимает ядро в атоме. Для упрощения считаем, что они имеют форму шара:

$$V_{\text{ш}} = \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Определим соотношения объема ядра к объему атома:

$$\frac{V_{\text{я}}}{V_{\text{ат}}} = \left(\frac{R_{\text{я}}}{R_{\text{ат}}} \right)^3 = \left(\frac{10^{-14}}{10^{-10}} \right)^3 = 10^{-12}.$$

Таким образом, объем ядра на 12 порядков меньше, чем объем электронной оболочки атома при прохождении потока частиц в веществе. Вероятность столкновения с электронами будет на 12 порядков выше, чем с ядрами. Значит, практически вся энергия падающего пучка частиц будет затрачиваться на ионизацию вещества, а не на изомерные переходы ядер.

Так как при незначительном объеме ядро сосредоточивает в себе практически всю массу атома, плотность ядерного вещества должна быть очень велика. Экспериментально установлено, что плотность ядер всех элементов одинакова и составляет 10^{14} г/см^3 или $10^{38} \text{ нукл/см}^3$.

В качестве плотности атомов можно рассмотреть плотность простых веществ в твердом состоянии, которая лежит в пределах от $0,57 \text{ г/см}^3$ для лития (Li) и до $2,5 \text{ г/см}^3$ для осмия (Os).

Одинаковая плотность всех ядер указывает на плотнейшую упаковку нуклонов в ядре, не зависимую от их зарядов. Следовательно, между нуклонами в ядре проявляются какие-то специфические взаимодействия, которые преодолевают электромагнитное расталкивание протонов.

Все изменения, которые происходят в ядрах в результате ионизации или при химических реакциях, не оказывают никакого влияния на ядра элементов.

1.7. Понятие о радиоактивности

В 1895 г. В. Рентген обнаружил лучи, которые возникали при пропускании тока высокого напряжения через стеклянную трубку с разреженным воздухом. Эти лучи обладали способностью вызывать почернение фо-

топластинки в светонепроницаемой упаковке. В 1896 г. А. Беккерель обнаружил, что соединения урана и некоторые его природные руды (соли урана) самопроизвольно излучают невидимые лучи, обладающие большой проникающей способностью и вызывающие почернение фотопластинки. А в 1898 г. Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри установили, что излучать лучи могут не только уран и его соединения, но и некоторые другие элементы – радий, торий, полоний. Явление самопроизвольного излучения было названо радиоактивностью, а вещества, излучающие лучи, радиоактивными. В дальнейшем было установлено, что эти излучения связаны с процессом самопроизвольного распада ядер атомов этих веществ. Оказалось, что радиоактивное излучение состоит из трех компонентов разной природы. В магнитном поле эти излучения делятся на три пучка:

- лучи, заряженные отрицательно (β -лучи — отклоняются в сторону севера);
- лучи, заряженные положительно, (α -лучи – отклоняются в сторону юга);
- лучи, не имеющие электрического заряда (нейтральные); γ -лучи – не отклоняются.

Радиоактивность (по современным взглядам) – это свойство ядер определенных элементов самопроизвольно (т.е. без каких-либо внешних воздействий) превращаться в ядра других элементов с испусканием особого рода излучений, которые называют радиоактивными излучениями. Само явление называется радиоактивным распадом.

Радиоактивные превращения, в отличие от химических реакций, происходят самопроизвольно и непрерывно, но всегда сопровождаются выделением энергии. На их скорость не оказывает никакого влияния ни изменение температуры и давления, ни самый лучший химический катализатор, ни электрическое и магнитное поля, ни агрегатное состояние вещества. Их нельзя ни ускорить, ни замедлить.

Радиоактивность, наблюдающаяся в ядрах, существующих в природных условиях, называют естественной радиоактивностью. Аналогичные процессы, происходящие в искусственно полученных веществах, называют искусственной радиоактивностью. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одним и тем же законам (закон сохранения энергии, электрических зарядов и др.). По закону сохранения, количество нуклонов при любом радиоактивном распаде сохраняется, причем нуклоны одного вида могут превращаться в нуклоны другого вида (нейтроны в протоны и наоборот).

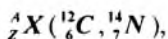
Изотопы, обладающие радиоактивностью, называют радиоактивными изотопами. Как уже отмечалось, ядра всех изотопов химических элементов называют нуклидами (т.е. радионуклиды – это радиоактивные ато-

мы с данным массовым числом и атомным номером). Вещества, содержащие в своем составе радионуклиды, называются радиоактивными веществами. Элементы, состоящие только из радиоактивных изотопов, называются радиоактивными элементами (это элементы с порядковыми номерами $Z=43, 61, 84-108$).

1.8. Типы ядерных превращений

При написании уравнений реакций заряд частицы указывается в единицах элементарного заряда слева внизу от символа. В устаревший форме записи заряд и масса указывались справа от символа, но масса – вверх; заряд – вниз. Протоны и нейтроны входят в состав ядра и определяют свойства элемента.

Ядра элементов при написании уравнений реакций записываются в виде



где X – символ элемента;

Z – зарядовое число, которое показывает число протонов в ядре и определяется как порядковый номер элемента из ПСМ;

A – массовое число, показывает число нуклонов в ядре и определяется как атомная масса элемента из ПСМ, округлённая до целого значения;

N – число нейтронов в ядре, равное $A - Z$.

Если ядра двух атомов содержат одинаковое количество протонов, но разное количество нейтронов, они обозначаются обычно одним символом, обладают одинаковыми химическими свойствами и называются изотопами (${}^{12}_6\text{C}, {}^{14}_6\text{C}$).

Изотопы различаются по физическим свойствам, следовательно, химические свойства элемента зависят от числа протонов в ядре

$$Z_1 = Z_2; \quad A_1 \neq A_2.$$

Известно около 280 устойчивых изотопов и более 1500 неустойчивых. Чем более устойчив изотоп, тем больше он распространён в природе, поэтому взятые в ПСМ массовые числа соответствуют наиболее стабильному изотопу данного элемента.

Ядра, у которых одинаковое количество нуклонов, но различное содержание протонов и нейтронов, называются изобарами

$$Z_1 \neq Z_2; \quad A_1 = A_2.$$

Изобары обозначаются различными символами, имеют различные химические и близкие физические свойства и не различимы при масс-спектрометрическом анализе. В природе изобары обычно встречаются парами. Известно около 60 устойчивых изобарных пар, в которых обычно чётные A и Z .

Два одинаковых по составу ядра, находящихся в различных энергетических состояниях, называют изомерами

$$Z_1 = Z_2; \quad A_1 = A_2; \quad E_1 \neq E_2.$$

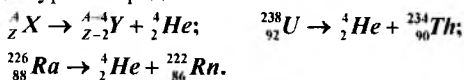
Изомерные состояния наблюдаются у всех ядер. Переход ядра из одного энергетического состояния в другое называется изомерным переходом. Изомерный переход из возбуждённого состояния в устойчивое является источником γ -излучений.

В соответствии с видами радиоактивных излучений существуют несколько видов радиоактивного распада (типов радиоактивных превращений). Радиоактивному превращению подвергаются элементы, в ядрах которых слишком много протонов или нейтронов. Рассмотрим виды радиоактивного распада.

1. Альфа-распад характерен для естественных радиоактивных элементов с большим порядковым номером (т.е. с малыми энергиями связи). Известно около 160 α -активных видов ядер, в основном порядковый номер которых более 82 ($Z > 82$).

Альфа-распад сопровождается испусканием из ядра неустойчивого элемента α -частицы, которая представляет собой ядро атома гелия He (в его составе 2 протона и 2 нейтрона). Заряд ядра уменьшается на 2, массовое число – на 4.

Приводим общее уравнение α -распада и составление уравнений распада для урана и радия:



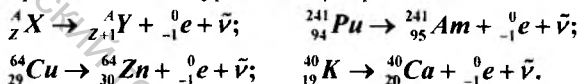
Альфа – распаду подвергается более 10% радиоактивных изотопов.

2. Бета-распад. β – распад – это самопроизвольное превращение неустойчивого ядра в более устойчивое изобарное ядро, заряд которого отличается на ± 1 . Ряд естественных и искусственных радиоактивных изотопов претерпевает распад с испусканием электронов или позитронов.

Бета-распад может быть трех видов:

а) электронный β^- -распад характерен как для естественных, так и для искусственных радионуклидов, которые имеют избышек нейтронов. Этот распад в основном характерен для тяжелых радиоактивных изотопов. Электронному β^- -распаду подвергается около 46 % всех радиоактивных изотопов. При этом один из нейтронов превращается в протон, а ядро испускает электрон и антинейтрино. Заряд ядра и, соответственно, атомный номер элемента при этом увеличиваются на единицу, а массовое число остается без изменения.

Приводим общие уравнения β^- -распада:



При испускании β^- -частиц ядра атомов могут находиться в возбужденном состоянии, когда в дочернем ядре обнаруживается избыток энергии, которая не захвачена корпускулярными частицами. Этот избышек энергии высвечивается в виде γ -квантов



б) позитронный β^+ -распад. Наблюдается у некоторых искусственных радиоактивных изотопов, у которых в ядре имеется избышек протонов. Он характерен для 11 % радиоактивных изотопов, находящихся в первой половине таблицы Д.И.Менделеева ($Z < 45$). При позитронном β^+ -распаде один из протонов превращается в нейтрон, заряд ядра и, соответственно, атомный номер уменьшаются на единицу, а массовое число остается без изменений. Ядро испускает позитрон и нейтрино.

Приводим общее уравнение β^+ -распада:

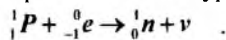


Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон–электрон», которая мгновенно превращается в два γ -кванта с энергией, эквивалентной массе частиц. Процесс превращения пары «позитрон–электрон» в два γ -кванта получил название аннигиляции (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение – аннигиляционного. В данном случае происходит превращение одной формы материи (частиц вещества) в другую – γ -фотоны;

в) электронный K-захват. Это такой вид радиоактивного превращения, когда ядро атома захватывает электрон из ближайшего к ядру энергетического K-уровня (электронный K-захват) или, реже, в 100 раз – из L-уровня. В результате один из протонов ядра нейтрализуется электроном,

превращаясь в нейтрон. Порядковый номер нового ядра становится на единицу меньше, а массовое число не изменяется. Ядро испускает антинейтрино. Освободившееся место, которое занимал в К или L-уровне захваченный электрон, заполняется электроном из более удаленных от ядра энергетических уровней. Избыток энергии, освободившийся при таком переходе, испускается атомом в виде характеристического рентгеновского излучения.

Приводим общие уравнения К-захвата:

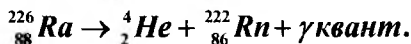
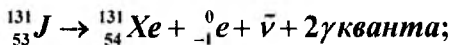


Электронный К-захват характерен для 25% всех радиоактивных ядер, но в основном для искусственных радиоактивных изотопов, расположенных в другой половине таблицы Д.И. Менделеева и имеющих излишек протонов ($Z = 45 - 105$). Только три естественных элемента претерпевают К-захват: калий-40, лантан-139, лютеций-176 (${}^{40}_{19}K$, ${}^{139}_{57}La$, ${}^{176}_{71}Lu$).

Некоторые ядра могут распадаться двумя или тремя способами: путем α и β -распада и К-захвата.

Калий-40 подвергается, как уже отмечалось, электронному распаду – 88% и К-захвату – 12%. Медь-64 (${}^{64}_{28}Cu$) превращается в никель (позитронный распад – 19%, К-захват – 42%; (электронный распад – 39%).

3. Испускание γ -излучения не является видом радиоактивного распада (при этом не происходит превращение элементов), а представляет собой поток электромагнитных волн, возникающих при α - и β -распаде ядер атомов (как естественных, так и искусственных радиоактивных изотопов), когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением (α - и β - частицей). Этот избыток мгновенно высвечивается в виде γ -квантов, что показано в нижеприведенных уравнениях:



4. Протонная радиоактивность – испускание протона из ядра в основном состоянии. Этот процесс может наблюдаться у искусственно полученных ядер с большим дефицитом нейтронов:

лютеций — 151 (${}^{151}_{71}Lu$) — в нем на 24 нейтрона меньше, чем в стабильном изотопе ${}^{176}_{71}Lu$.

Таблица 1.2

Сравнительная таблица ионизирующих излучений

Вид излучения	α -излучение	β -излучение	γ -излучение
Тип излучения	Непосредственно ионизирующее		Косвенно ионизирующее
Природа излучения	Ядра гелия	Электроны или позитроны	Жесткое электромагнитное излучение
Источники излучения	Распад тяжелых ядер при участии сильных взаимодействий	Взаимные превращения нуклонов в легких и тяжелых ядрах при участии слабых взаимодействий	Изомерный переход ядра из возбужденного состояния в основное
Энергия излучения	4 – 9 МэВ	100КэВ – 3МэВ	10КэВ – 3МэВ
Проникающая способность в воздухе	До 10 см.	До 1 м.	До 1000 м.
Проникающая способность в биологических тканях	Несколько микрон (мкм)	До 1 см.	До 1 м.

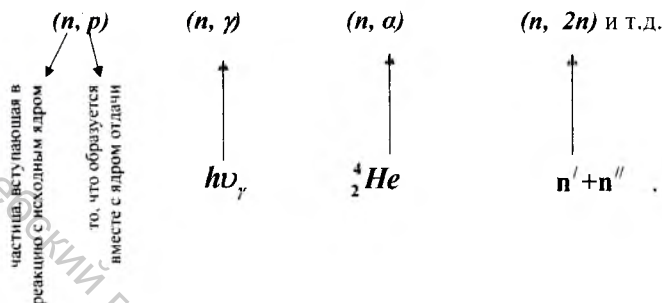
1.9. Взаимные превращения нуклонов в устойчивых ядрах

Протоны и нейтроны внутри ядра могут превращаться друг в друга. В устойчивых ядрах количество протонов и нейтронов постоянно. В неустойчивых ядрах, а также для свободных частиц возможно преобладание одного из процессов. Преобладать будет тот процесс, для которого выполняется термодинамическое условие самопроизвольного протекания. Процессы $n \rightarrow p$, $p \rightarrow n$ находятся в термодинамическом обратимом равновесии.

Это равновесие может быть смещено в любую сторону, но только при непосредственном воздействии на ядро. Непосредственное воздействие на ядро могут оказать γ -кванты и элементарные частицы.

Большинство ядерных реакций проводятся под действием потока нейтронов, которые вступают в обменное взаимодействие с нуклонами ядра при любой энергии.

В результате протекают ядерные реакции типов



Рассмотрим реакцию типа (n, p)

1. Написать уравнение реакции ${}_Z^AX_1 + {}_0^1n \rightarrow {}_{Z-1}^AX_2 + {}_{+1}^1p$.
2. Оценить устойчивость ядра отдачи.

Чтобы оценить устойчивость ядра отдачи, необходимо сравнить соотношения между протонами и нейтронами в исходном, устойчивом ядре и в ядре отдачи, что представлено на схеме

	X_1	X_2
p	Z	$Z-1$
n	$A-Z$	$(A-Z)-1$

В ядре отдачи количество протонов уменьшилось, а количество нейтронов увеличилось по сравнению с исходным устойчивым ядром, следовательно, в ядре отдачи образуется избыток нейтронов и нарушилось равновесие $n \leftrightarrow p$, стало быть, чтобы восстановить исходное равновесие, избыточный нейтрон будет стремиться превратиться в протон, поэтому ядро отдачи будет неустойчивым радиоактивным и распадается по β -механизму.

3. Написать уравнение распада:

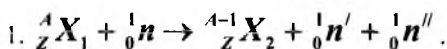
$$\beta^- : {}_{Z-1}^AX_2 \rightarrow {}_Z^AX_3 + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}.$$

Таким образом, в результате двух последовательных ядерных реакций система вернулась в исходное устойчивое состояние $X_3 = X_1$.

Первый процесс протекает практически мгновенно, поэтому лимити-

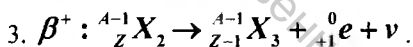
гирующей стадией является β^- -распад ядра X_2 и скорость обоих превращений обуславливается периодом полураспада этого ядра.

Рассмотрим реакцию типа $(n, 2n)$.



2. В ядре отдачи уменьшилось относительное число нейтронов, следовательно, здесь избыток протонов, и, значит, уменьшилось число нейтронов, поэтому протон стремится превратиться в нейтрон, то есть ядро отдачи неустойчиво, β^+ активно, что показано на схеме

	X_1	X_2
p	Z	Z
n	$A - Z$	$(A - Z) - 1$



Чтобы оценить устойчивость реального ядра отдачи, необходимо сравнить его массовое число с относительной атомной массой, указанной в таблице Менделеева (округленное до целого значения).

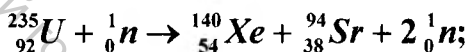
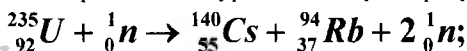
Возможны три случая:

1. $A = M$ – ядро устойчиво;
2. $A > M$ – избыток нейтронов;
3. $A < M$ – избыток протонов.

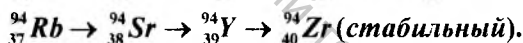
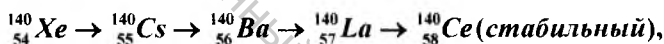
1.10. Ядерные и термоядерные реакции

Ядерные реакции – это превращение ядер атомов, вызванное воздействием на них элементарных частиц или других ядер. Так под действием нейтронов происходит **самопроизвольное** (спонтанное) **деление ядер** радиоактивных элементов с большими атомными массами (урана–235, тория–232, протактиния–231, плутония–239). Ядра урана–235 и плутония–239 делятся нейтронами любых энергий, но особенно хорошо медленными

нейтронами. Ядра урана-238 делятся только быстрыми нейтронами (с энергиями, не меньшими 1 МэВ). Деление тяжелых ядер может быть вызвано и другими частицами – протонами, дейтронами, α -частицами. При делении ядер урана-235 образуются осколки деления, которые представляют собой ядра элементов со средними массовыми числами в соотношении 2:3, а также свободные нейтроны (2–3) и γ -излучение. При этом выделяется значительная энергия (≈ 200 МэВ). Всего образуется около 80 различных осколков, которые разлетаются со скоростью, равной скорости света. Нижеприведенные уравнения характеризуют распад урана:



Полученные осколки претерпевают ядерные превращения в основном β -распаде:



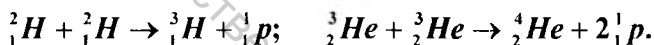
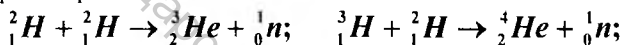
Каждый из 2–3 образовавшихся при делении ядер урана нейтронов способен вызвать новый акт деления и т.д. Количество нейтронов нарастает в геометрической прогрессии — возникает цепная реакция деления, приобретающая взрывной характер.

Цепная реакция деления может начаться и происходить, если масса урана-235 достигает определенной критической величины. Наименьшее количество вещества, в котором возможна цепная ядерная реакция деления, называется критической массой. Для урана-235 — это десятки кг, для урана-233 — 5–6 кг, для калифорния — около 1 г. На этом основано устройство атомной бомбы. Ядерный заряд такой бомбы представляет 2 куса урана-235 или плутония-239 с докритической массой. При взрыве обычного взрывчатого вещества обе части соединяются, давая сверхкритическую массу. В земной атмосфере всегда имеется некоторое количество нейтронов за счет космических лучей. Их достаточно для начала реакции деления и запуска цепной реакции взрывного характера. Всего смесь продуктов деления содержит более 200 изотопов 36 элементов (большинство из них с небольшими периодами полураспада).

При использовании цепной реакции деления в ядерных реакторах создаются такие условия, что только один из нейтронов, образующихся при делении урана, будет вызывать процесс деления. Количество делящих-

ся в каждый момент ядер будет примерно одинаковым, и количество выделяющейся энергии будет поддерживаться на каком-то определенном уровне, и выделяющееся тепло может быть использовано для получения электроэнергии (1г урана дает такое же количество энергии, как 2,5т угля). На этом основана работа атомных электростанций.

Термоядерные реакции. Кроме процесса деления тяжелых ядер, существует и другой способ получения энергии – синтез тяжелых ядер из более легких. Такие реакции протекают при очень высоких температурах (многие миллионы градусов), поэтому их называют термоядерными. При такой температуре кинетическая энергия ядер достаточна для преодоления их кулоновских сил отталкивания. В этих условиях ядра легких элементов, двигаясь с высокой кинетической энергией, будут сближаться на очень малые расстояния — порядка 10^{-15} м и объединяться в ядра более тяжелых элементов. Примером таких реакций является синтез ядер гелия из ядер дейтерия и трития:



В приведенных реакциях выделение энергии, рассчитанное на один нуклон, превышает выделение энергии при реакциях деления тяжёлых ядер.

На основе реакции синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития основано действие водородной бомбы. Необходимая для начала этой реакции температура обеспечивается взрывом атомной бомбы, которая выполняет роль своеобразного запала. В водородной бомбе термоядерная реакция носит неконтролируемый характер. Осуществить управляемую термоядерную реакцию пока не удастся.

1.11. Период полураспада радионуклидов. Закон радиоактивного распада

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов используют особую величину – период полураспада. Для каждого радиоактивного изотопа существует определенный интервал времени, в течение которого активность снижается в два раза. Этот интервал времени и носит название период полураспада.

Период полураспада ($T_{1/2}$) – это время, в течение которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Период полураспада – величина строго индивидуальная для каждого радиоизотопа. У одного и того же элемента могут быть изотопы с разными периодами полураспада. Имеются изотопы с периодом полураспада от долей секунды до

миллиардов лет (от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $5 \cdot 10^{15}$ лет). Так, для полония-214 $T_{1/2}$ равен $1,6 \cdot 10^{-4}$ с, для кадмия-113 – $9,3 \cdot 10^{15}$ лет. Радиоактивные элементы подразделяются на короткоживущие, когда период полураспада исчисляется часами и днями (радон-220 – 54,5 с, висмут-214 – 19,7 мин, иттрий-90 – 64 часа, стронций-89 – 50,5 дня) и долгоживущие, когда период полураспада исчисляется годами (радий-226 – 1600 лет, плутоний-239 – 24390 лет, рений-187 – $5 \cdot 10^{10}$ лет, калий-40 – $1,32 \cdot 10^9$ лет).

Из элементов, выброшенных при аварии на ЧАЭС, отметим периоды полураспада следующих элементов: йод-131 – 8,05 дня, цезий-137 – 30 лет, стронций-90 – 29,12 лет, плутоний-241 – 14,4 года, америций-241 – 432 года.

Для каждого радиоактивного изотопа средняя скорость распада его ядер постоянная, неизменная и характерная только для данного изотопа. Количество радиоактивных атомов какого-либо элемента, распадающихся за промежуток времени, пропорционально общему количеству имеющихся радиоактивных атомов

$$dN = -\lambda N dt,$$

где dN – количество распадающихся ядер;

dt – промежуток времени;

N – количество имеющихся ядер;

λ – коэффициент пропорциональности (постоянная радиоактивного распада).

Постоянная радиоактивного распада показывает вероятность распада атомов радиоактивного вещества в единицу времени и характеризует долю атомов данного радионуклида, распадающихся в единицу времени, т.е. постоянная радиоактивного распада характеризует относительную скорость распада ядер данного радионуклида. Знак минус показывает, что количество радиоактивных ядер убывает со временем. Постоянную радиоактивного распада выражают в обратных единицах времени: с^{-1} , мин^{-1} и т.д. Величину, обратную постоянной распада ($t = 1/\lambda$), называют средней продолжительностью жизни ядра.

Основной закон радиоактивного распада позволяет определить количество нераспавшихся и распавшихся радиоактивных ядер в любой момент времени. Этот закон имеет две формы: дифференциальную и интегральную.

Дифференциальная форма основного закона радиоактивного распада связывает количество распавшихся и количество нераспавшихся радиоактивных ядер в данный момент времени.

Интегральная форма основного закона радиоактивного распада связывает количество нераспавшихся ядер в данный момент времени и количество нераспавшихся ядер в начальный момент времени

$$-\Delta N = N_0 - N,$$

где N_0 – начальное число нераспавшихся ядер в начальный момент времени $t = 0$;

N – число нераспавшихся ядер в данный момент времени $t \neq 0$.

Постоянная радиоактивного распада λ [с^{-1}] показывает вероятность распада одного ядра за 1 с., характеризует распадающийся изотоп.

Экспериментально было установлено, что никакие внешние воздействия, включая высокую температуру и давление, электрические и магнитные поля, не оказывают влияние на природу и скорость радиоактивного распада. Следовательно, число распадающихся ядер будет пропорционально общему количеству радиоактивных ядер, вероятности распада одного ядра и интервалу времени. Отсюда получаем дифференциальную форму основного закона радиоактивного распада

$$-\Delta N = N \cdot \lambda \cdot \Delta t.$$

Получим из дифференциальной формы закона интегральную, которая гораздо чаще используется при решении практических задач:

$$-\frac{\Delta N}{N} = \lambda \cdot \Delta t.$$

Интегрируя левую и правую части уравнения получим интегральную форму основного закона радиоактивного распада

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

Установлено, что число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте. По этой формуле можно рассчитать число нераспавшихся атомов в данный момент времени. Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов на практике, вместо постоянной распада, пользуются периодом полураспада. Особенность радиоактивного распада в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время. Момент распада каждого ядра не может быть предсказан заранее. Поэтому распад любого радиоактивного элемента подчиняется статистическим закономерностям, носит вероятностный характер и может быть математически определен для большого количества радиоактивных атомов. Иными словами, распад ядер происходит неравномерно – то большими, то меньшими порциями. Из этого следует практический вывод, что при одном и том же времени измерения числа импульсов от радиоактивного элемента мы можем получить разные значения. Следовательно, для получения верных данных необходимо измерение этой и той

же пробы проводить не один, а несколько раз, и чем больше, тем точнее будут результаты.

Интегральная форма основного закона радиоактивного распада используется для определения понятия периода полураспада.

Период полураспада – это время, в течение которого число распадающихся ядер уменьшается в 2 раза. Получим выражение для периода полураспада, используя интегральную форму основного закона радиоактивного распада.

$$N = \frac{N_0}{2}; \quad t = T_{1/2};$$

$$\frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{e^{\lambda T_{1/2}}}.$$

Отсюда

$$e^{\lambda T_{1/2}} = 2;$$

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

Аналогичным образом можно получить выражения для среднего времени жизни радиоактивного ядра, которое соответствует времени, в течение которого число радиоактивных ядер уменьшается в e раз

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

Таким образом, среднее время жизни радиоактивного ядра – это величина, обратно пропорциональная постоянной радиоактивного распада. Понятие периода полураспада используется при построении кривых радиоактивного распада, которые отражают зависимость количества нераспавшихся ядер от времени. По данным таблицы 1.3 построим рисунок 1.3.

Таблица 1.3

T	θ	$T_{1/2}$	$2T_{1/2}$	$3T_{1/2}$
N	N_0	$N_0/2$	$N_0/4$	$N_0/8$



Рис. 1.3. Кривая радиоактивного распада

Кривая радиоактивного распада ни при каких значениях t не пересекает горизонтальную ось.

ГЛАВА II ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

2.1. Понятие об ионизирующих излучениях

Радиация – излучение (от radiare – испускать лучи) – распространение энергии в форме волн или частиц. Свет, ультрафиолетовые лучи, инфракрасное тепловое излучение, микроволны, радиоволны представляют собой разновидность радиации. Часть излучений получила название ионизирующих, благодаря своей способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе.

Ионизирующее излучение — излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Это поток частиц или квантов, способных прямо или косвенно вызывать ионизацию окружающей среды. Ионизирующее излучение объединяет разные по своей физической природе виды излучений. Среди них выделяются **элементарные частицы** (электроны, позитроны, протоны, нейтроны, мезоны и др.), более тяжелые **многозарядные ионы** (α -частицы, ядра бериллия, лития и других более тяжелых элементов); излучения, имеющие **электромагнитную природу** (γ -лучи, рентгеновские лучи).

Различают два типа ионизирующих излучений: корпускулярное и электромагнитное.

Корпускулярное излучение представляет собой поток частиц (корпускул), которые характеризуются определенной массой, зарядом и скоростью. Это электроны, позитроны, протоны, нейтроны, ядра атомов гелия, дейтерия и др.

Электромагнитное излучение — поток квантов или фотонов (γ -лучи, рентгеновские лучи). Оно не имеет ни массы, ни заряда.

Различают также непосредственно и косвенно ионизирующие излучения.

Непосредственно ионизирующее излучение – ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении (электрон, протон, частица и др.).

Косвенно ионизирующее излучение — ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц и фотонов, которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызвать ядерные превращения (нейтроны, рентгеновские и γ -излучения).

Основными свойствами ионизирующих излучений является способность при прохождении через любое вещество вызывать образования большого количества **свободных электронов** и положительно заряженных **ионов** (т.е. ионизирующая способность).

Частицы или квант высокой энергии выбивают обычно один из электронов атома, который уносит с собой единичный отрицательный заряд. При этом оставшаяся часть атома или молекулы, приобретя положительный заряд (из-за дефицита отрицательно заряженной частицы), становится положительно заряженным ионом. Это так называемая **первичная ионизация**.

Выбитые при первичном взаимодействии электроны, обладая определенной энергией, сами взаимодействуют со встречными атомами, преобразуют их в отрицательно заряженный ион (происходит **вторичная ионизация**). Электроны, которые потеряли в результате столкновений свою энергию, остаются свободными. Первый вариант (образование положительных ионов) происходит лучше всего с атомами, у которых на внешней оболочке имеется 1–3 электрона, а второй (образование отрицательных ионов) – с атомами, у которых на внешней оболочке имеется 5–7 электронов.

Таким образом, ионизирующий эффект – главное проявление действия радиации высоких энергий на вещество. Именно поэтому радиация и называется ионизирующей (ионизирующими излучениями). Ионизация возникает как в молекулах неорганического вещества, так и в биологических системах. Для ионизации большинства элементов, которые входят в состав биосубстратов (это значит для образования одной пары ионов), необходимо поглощение энергии в 10–12 эВ (электрон-вольт). Это так называемый **потенциал ионизации**. Потенциал ионизации воздуха равен в среднем 34 эВ. Таким образом, ионизирующие излучения характеризуются определенной энергией излучения, измеряемой в эВ. **Электрон-вольт (эВ)** – это внесистемная единица энергии, которую приобретает частица с элементарным электрическим зарядом при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов в 1 вольт.

$$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг.}$$

$$1\text{КэВ (килоэлектрон-вольт)} = 10^3 \text{ эВ.}$$

$$1\text{МэВ (мегаэлектрон-вольт)} = 10^6 \text{ эВ.}$$

Зная энергию частиц, можно подсчитать, сколько пар ионов они способны образовать на пути пробега. Длина пути – полная длина траектории частицы (какой бы сложной она ни была). Так, если частица обладает энергией в 600 КэВ, то она может образовать в воздухе около 20000 пар ионов.

В тех случаях, когда энергии частицы (фотона) недостаточно для того, чтобы электрон преодолел притяжение атомного ядра и вылетел за пределы атома (энергия излучений меньше потенциала ионизации), ионизация не происходит. Электрон, приобретя излишек энергии (так называемый **возбужденный**), на доли секунды переходит на более высокий энергетический уровень, а затем скачком возвращается на прежнее место и отдает лишнюю энергию в виде кванта свечения (ультрафиолетового или видимого). Переход электронов с внешних орбит на внутренние сопровождается рентгеновским излучением.

Однако роль **возбуждения** в воздействии радиации второстепенная в сравнении с **ионизацией** атомов, поэтому общепринято название радиации высоких энергий: **«ионизирующая»**, что подчеркивает ее главное свойство.

Второе название радиации – **«проникающая»** – характеризует способность излучений высокой энергии, прежде всего рентгеновских и γ -лучей, проникать в глубину вещества, в частности, в тело человека. Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит, с одной стороны, от природы излучения, заряда составляющих его частиц и энергии, а с другой — состава и плотности облучаемого вещества.

Ионизирующие излучения обладают определенной скоростью и энергией. Так, β -излучение и γ -излучение распространяются со скоростью, близкой к скорости света. Энергия, например α -частиц, колеблется в пределах 4–9 МэВ.

2.2. Основные свойства элементарных частиц

С точки зрения ионизирующих и проникающих способностей потока элементарных частиц, в качестве основных свойств частицы следует рассмотреть ее:

- 1) скорость;
- 2) энергию;
- 3) массу;
- 4) заряд.

1. Все элементарные частицы находятся в постоянном колебательно-вращательно-поступательном движении, скорость которого ни при каких условиях не превышает скорость света в вакууме.

Поэтому величина $c = 3 \cdot 10^8$ м/с считается предельной скоростью движения частиц

$$U_q \leq c.$$

Однако при прохождении мелких частиц, электронов и позитронов через различные вещества их скорость может превышать фазовую скорость света для данного вещества

$$U_q \leq c' \text{ (фазовая скорость).}$$

В этом случае на протяжении всего пути движения частицы наблюдается специфическое свечение, которое называется **излучением Вавилова–Черенкова**, использующееся при обнаружении β -излучений.

Чем меньше масса частицы и выше ее энергия, тем с большей скоростью данная частица будет распространяться в пространстве.

Так, нейтрино (ν) и антинейтрино ($\bar{\nu}$), масса покоя которых считается равной нулю, распространяются в пространстве с предельной скоростью – скоростью света.

Электроны и позитроны, масса которых близка к нулю, при энергии порядка 10 МэВ распространяются в пространстве со скоростью на миллионные доли процента меньше, чем скорость света.

Тяжелые протоны при той же энергии имеют скорость на 15% меньше, чем электроны, поэтому $U_n = 0,85 C$.

2. **Энергию** элементарных частиц принято выражать во внесистемных единицах: в эВ и МэВ. Один эВ – это энергия, которую приобретает электрон или другая одинаковая заряженная частица при прохождении разницы потенциалов в 1 В.

$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Энергия теплового движения молекул и атомов при температуре 20 °С составляет 1/40 эВ. Кинетическая энергия элементарных частиц обычно превышает 0,5 МэВ и определяется по формуле

$$T = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \cdot c^2,$$

где m_0 – масса покоя частицы, кг;

c – скорость света в вакууме;

v – скорость частицы.

Значение энергии от вида ионизирующего излучения следующее:

- 4–9 МэВ – энергия α -частиц, образующихся при распаде естественных и искусственных радионуклидов;
- 0,1 – 3 МэВ – энергия β -частиц, образующихся при распаде естественных и искусственных радионуклидов;
- 0,01–3 МэВ – энергия γ -излучения, образующиеся при распаде естественных и искусственных радионуклидов;
- $10^6 - 10^2$ – МэВ энергия отдельных гиперонов первичного космического излучения;
- 10^8 МэВ – максимальная энергия, полученная с помощью ускорителей элементарных частиц;
- 10 эВ – средняя энергия связи валентных электронов в атомах и молекулах;
- 8,5 МэВ – средняя энергия связи двух нуклонов (протона и нейтрона) внутри ядра.

Чтобы произошла ионизация вещества, необходимо оказать внешнее воздействие, энергия которого больше, чем энергия связи валентного электрона в атоме или молекуле (больше 10эВ). Поэтому ионизация вещества происходит под действием α , β , γ – излучений, которые возникают в результате радиоактивных распадов и изомерных переходов естественных и искусственных радионуклидов под действием потоков различных элементарных частиц, которые входят в состав первичного космического излучения (происходит ионизация верхних слоев атмосферы), а также в результате теплового движения при высокой температуре (плазма).

Чтобы происходили изменения в ядрах, необходимо либо выбить из ядра нуклон, либо вступить во взаимодействие с нуклонами ядра. Для выбивания из ядра нуклонов необходимо, чтобы энергия внешнего воздействия превышала сумму двух энергий:

- энергии связи между нуклонами;
- энергии электромагнитного воздействия.

Поэтому в естественных условиях выбивание нуклонов из ядер наблюдается только под действием гиперонов первичного космического излучения в верхних слоях атмосферы; в результате образуются новые естественные радионуклиды.

В обменное взаимодействие с нуклонами ядра могут вступать только нейтроны (1_0n), которые не имеют заряда, соответственно, не наблюдается электромагнитного расталкивания с ядром.

Нейтроны взаимодействуют с ядрами при любых энергиях. В результате такого взаимодействия образуются новые искусственные радионуклиды.

Взаимодействие нейтронов с ${}^{238}\text{U}$ и ${}^{235}\text{U}$ является источником энергии всех действующих ядерных реакторов. В результате такого взаимодействия при делении урана образуется более тридцати различных искусственных радионуклидов.

3. Масса

В зависимости от цели исследований исследуемая масса элементарной частицы может быть выражена 4-мя способами:

- 1) в килограммах;
- 2) в единицах массы электрона, (m_e);
- 3) в энергетических единицах, в качестве которых используется только МэВ;
- 4) в атомных единицах массы (а.е.м).

Килограмм (кг) – системная единица, используемая при непосредственном определении массы частиц и в расчетах, требующих единиц в системе СИ.

При сравнительном анализе различных частиц, а также для упрощения расчетов массы всех элементарных частиц выражают в единицах m_e (массы электрона), приравняв массу электрона в кг к единице:

$$1 m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг};$$

$$m_p = 1836,1 m_e;$$

$$m_n = 1838,6 m_e;$$

$$m_n > m_p \text{ на } 2,5 m_e.$$

Мегаэлектронвольт (МэВ). В ядерной физике определяемой величиной обычно является энергия, поэтому массы частиц там принято выражать в энергетических единицах, в качестве которых во всех расчетах используют только МэВ.

Выразим массу электрона (m_e) в энергетических единицах.

Возможность выражать массу в единицах энергии дает соотношение Эйнштейна

$$E = mc^2,$$

где m – масса, кг;

c – скорость света в вакууме.

Так как $c^2 = \text{const}$, между массой и энергией существует прямая пропорциональность. По сути, масса в энергетических единицах – это собственная энергия частицы, выраженная в МэВ.

Собственная энергия электрона или позитрона в системных единицах определяется по формуле

$$E_e = m_e c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} (3 \cdot 10^8)^2 \approx 8,2 \cdot 10^{-14} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 1 \text{ Дж}.$$

Чтобы получить массу, необходимо перейти к МэВ, используя, соответственно, $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$.

Собственная энергия и масса в энергетических единицах электрона и позитрона равна

$$E_e = \frac{8,2 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-13}} \approx 0,511 \text{ МэВ}.$$

В ядерной физике и радиационной химии при написании уравнений ядерных реакций массы частиц выражают так же, как и массы ядер в атомных единицах массы (а.е.м).

1 а.е.м – это масса $1/12$ части одного атома изотопа углерода ^{12}C .

Выразим 1 а.е.м в г., используя закон Авогадро:

$$1 \text{ а.е.м.} = \frac{1}{12} \cdot m_c = \frac{1}{12} \cdot \frac{M_c}{N_A} = \frac{1}{12} \frac{12}{N_A} = \frac{1}{N_A} (z),$$

где m_c – масса одного атома углерода;

M_c – молярная масса;

N_A – число Авогадро.

При решении задач масса вещества переводится в кг.

Таким образом, величина 1 а.е.м не зависит от элемента, выбранного для ее определения.

Следовательно, 1 а.е.м может быть выражена через соответствующую часть (обратно пропорциональную массовому числу) массы атома любого элемента. Значение 1 а.е.м от этого не изменится.

Однако, чтобы элемент мог использоваться в качестве определяющего (эталонного) элемента для определения а.е.м, он должен удовлетворять следующим требованиям:

- устойчивости ядра к радиоактивному распаду;
- широкой распространенностью в природе;
- доступности в химически свободном состоянии;
- технологичности, т.е. удобство для практического применения.

Первоначально в качестве определяющего элемента использовался кислород – ^{16}O .

В 50-х годах прошлого века был разработан масс-спектрометрический метод анализа, который позволяет определять элементы по их атомным массам, и в качестве эталона используется углерод – ^{12}C .

В результате широкого распространения данного метода углерод стал технологичнее кислорода и в настоящее время является общепризнанным определяющим элементом.

$$m_e \approx 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.},$$

$$m_p = m_n = 1 \text{ а.е.м.}$$

В уравнениях реакций массы элементарных частиц указываются в а.е.м. (атомных единицах массы) в округленном до целого виде слева вверху от символа частиц (0e , 1p , 1n).

4. Заряд элементарной частицы характеризует ее отношение к электромагнитному полю и способность потока частиц к непосредственной ионизации вещества. Заряд может быть выражен двумя способами:

- в системных единицах — Кл (кулонах);
- в несистемных единицах элементарного заряда (электрона) по модулю

$$q = |e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Элементарным называется минимальный известный заряд.

Заряды элементарных частиц приведены по следующей схеме:

Частицы	Кл	q
Электрона ${}_{-1}^0e$	$-1,6 \cdot 10^{-19}$	-1
Нейтрона ${}_0^1n$	0	0
Протона ${}_{+1}^1p$	$+1,6 \cdot 10^{-19}$	+1

В уравнениях реакций заряды элементарных частиц указываются в единицах элементарного заряда слева внизу от символа частицы ${}_{-1}^0e$, ${}_0^1n$.

${}_{+1}^1p$.

Одной из важных особенностей биологического воздействия ионизирующей радиации является невидимость, неосязаемость. В этом и заключается их опасность, человек ни визуальным, ни органолептическим способом не может обнаружить воздействие излучений. В отличие от лучей оптического диапазона и даже радиоволн, которые вызывают в определенных дозах нагревание тканей и ощущение тепла, ионизирующие излучения даже в смертельных дозах нашими органами чувств не фиксируются. Правда, у космонавтов наблюдались косвенные проявления действия ионизирующей радиации — ощущение вспрыска при закрытых глазах — за счет массивной ионизации в сетчатке глаза. Таким образом, ионизация и возбуждение — основные процессы, в которых тратится энергия излучений, поглощаемая в облучаемом объекте.

Реакции с участием ионов и возбужденных атомов имеют важное значение. Они лежат в основе многих химических процессов, в том числе и биологически важных. С ходом этих реакций связываются отрицательные результаты воздействия радиации на организм человека.

2.3. Характеристика отдельных видов излучений

Альфа-излучение — поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия ${}_2^4He$), который движется со скоростью около 20000 км/с. Они образуются при радиоактивном распаде ядер элементов с большими порядковыми номерами и при ядерных реакциях, превращениях. Энергия их колеблется в пределах 4–9 (2–11) МэВ. Пролет α -частиц в веществе зависит от их энергии и от природы вещества, в котором они движутся. В

среднем в воздухе пробег составляет 2–10 см, в биологической ткани – несколько микрон. Так как α -частицы массивны и обладают относительно большой энергией, путь их в веществе **прямолинейный**, они вызывают сильно выраженный эффект ионизации. Удельная ионизация составляет примерно 40000 пар ионов на 1 см пробега в воздухе (на всей длине пробега может создаваться до 250 тысяч пар ионов). В биологической ткани на пути в 1–2 микрона также создается до 40000 пар ионов. Вся энергия передается клеткам организма, нанося ему огромный вред.

Альфа-частицы задерживаются листом бумаги и практически не могут проникать через внешний (наружный) слой кожи, они поглощаются роговым слоем кожи. Поэтому α -излучение не представляет опасности до той поры, пока радиоактивные вещества, излучающие α -частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или вдыхаемым воздухом – тогда они становятся **чрезвычайно опасными**.

Бета-излучение – поток β -частиц, состоящий из электронов (отрицательно заряженных частиц) и позитронов (положительно заряженных частиц), испускаемых атомными ядрами при их β -распаде. Масса β -частиц в абсолютном выражении равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г. β -частицы несут один элементарный электрический заряд и распространяются в среде со скоростью от 100 тыс. км/с до 300 тыс. км/с (т.е. до скорости света) в зависимости от энергии излучения. Энергия β -частиц колеблется в значительных пределах. Это объясняется тем, что при каждом β -распаде радиоактивных ядер образующаяся энергия распределяется между дочерним ядром, β -частицами и нейтрино в разных соотношениях, причем энергия β -частиц может колебаться от нуля до какого-то максимального значения. Максимальная энергия лежит в пределах от 0,015–0,05 МэВ (мягкое излучение) до 3–13,5 МэВ (жесткое излучение).

Так как β -частицы имеют заряд, то под действием электрического и магнитного полей они отклоняются от прямолинейного направления. Обладая очень малой массой, β -частицы при столкновении с атомами и молекулами также легко отклоняются от своего первоначального направления (т.е. происходит сильное рассеяние их). Поэтому определить длину пути β -частиц очень трудно – этот путь слишком извилистый. Пробег β -частиц в связи с тем, что они обладают различным запасом энергии, также подвергается колебаниям. Длина пробега в воздухе может достигать 25 см, а иногда и нескольких метров. В биологических тканях пробег частиц составляет до 1 см. На путь пробега влияет также плотность среды.

Ионизирующая способность β -частиц значительно ниже, чем α -частиц. Степень ионизации зависит от скорости: меньше скорость – больше ионизация. На 1 см пути пробега в воздухе β -частица образует 50–100 пар ионов (1000–25000 пар ионов на всем пути в воздухе). β -частицы больших энергий, пролетая мимо ядра слишком быстро, не успевают вызывать такой же сильный ионизирующий эффект, как медленные β -частицы.

При потере энергии электрон захватывается либо положительным ионом с образованием нейтрального атома, либо атомом с образованием отрицательного иона,

Нейтронное излучение — излучение, состоящее из нейтронов, т.е. нейтральных частиц. Нейтроны образуются при ядерных реакциях (цепной реакции деления ядер тяжелых радиоактивных элементов, при реакциях синтеза более тяжелых элементов из ядер водорода). Нейтронное излучение является косвенно ионизируемым; образование ионов происходит не под действием самих нейтронов, а под действием вторичных тяжелых заряженных частиц и γ -квантов, которым нейтроны передают свою энергию. Нейтронное излучение чрезвычайно опасно вследствие своей высокой проникающей способности (пробег в воздухе может достигать нескольких тысяч метров). Кроме того, нейтроны могут вызвать наведенную радиоактивность (в том числе и в живых организмах), превращая атомы стабильных элементов в их радиоактивные изотопы. От нейтронного облучения хорошо защищают водородсодержащие материалы (графит, парафин, вода и т.д.).

В зависимости от энергии различают следующие нейтроны:

- сверхбыстрые нейтроны с энергией в 10–50 МэВ. Они образуются при ядерных взрывах и работе ядерных реакторов;
- быстрые нейтроны, энергия их превышает 100 КэВ;
- промежуточные нейтроны – энергия их от 100 КэВ до 1 КэВ;
- медленные и тепловые нейтроны. Энергия медленных нейтронов не превышает 1 КэВ. Энергия тепловых нейтронов достигает 0,025 эВ.

Нейтронное излучение используют для нейтронной терапии в медицине, определения содержания отдельных элементов и их изотопов в биологических средах и т.д. В медицинской радиологии используются, главным образом, быстрые и тепловые нейтроны, в основном используют калифорний-252, распадающийся с выбросом нейтронов со средней энергией в 2,3 МэВ.

Электромагнитные излучения различаются по своему происхождению, энергии, а также по длине волны. К электромагнитным излучениям относятся рентгеновское излучение, γ -излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение, возникающее при прохождении через вещество сильно ускоренных заряженных частиц. Видимый свет и радиоволны – тоже электромагнитные излучения, но они не ионизируют вещество, ибо характеризуются большой длиной волны (меньшей жесткостью). Энергия электромагнитного поля излучается не непрерывно, а отдельными порциями – квантами (фотонами). Поэтому электромагнитные излучения – это поток квантов или фотонов.

Рентгеновские излучения – это квантовые электромагнитные излучения с длиной волн 0,001–10 нм. Излучение с длиной волны, превышающей 0,2 нм, условно называют «мягким» рентгеновским излучением, а до

0,2 нм — «жестким». Длина волны — расстояние, на которое излучение распространяется за один период колебания. Рентгеновское излучение, как и всякое электромагнитное излучение, распространяется со скоростью света — 300000 км/с. Энергия рентгеновского излучения обычно не превышает 500 КэВ.

Различают тормозное и характеристическое рентгеновское излучение. Тормозное излучение возникает при торможении быстрых электронов в электростатическом поле ядра атомов (т.е. при взаимодействии электронов с ядрами атомов). При прохождении электрона больших энергий вблизи ядра наблюдается рассеяние (торможение) электрона. Скорость электрона снижается, и часть его энергии испускается в виде фотона тормозного рентгеновского излучения.

Характеристическое рентгеновское излучение возникает, когда быстрые электроны проникают в глубь атома и выбивают электрон из внутренних уровней (K , L и даже M). Атом возбуждается, а затем возвращается в основное состояние. При этом электроны из внешних уровней заполняют освободившиеся места во внутренних уровнях, и при этом излучаются фотоны характеристического излучения с энергией, равной разности энергии атома в возбужденном и основном состоянии (не превышающем 250 КэВ).

Характеристическое излучение возникает при перестроении электронных оболочек атомов. При различных переходах атомов из возбужденного состояния в невозбужденное избыток энергии может также испускаться в виде видимого света, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей. Так как рентгеновские лучи обладают малой длиной волн и меньше поглощаются в веществе, то они обладают большей проникающей способностью.

Гамма-излучение — это излучение ядерного происхождения. Оно испускается ядрами атомов при α - и β распаде природных искусственных радионуклидов в тех случаях, когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением α - и β -частицей. Этот избыток энергии мгновенно высвечивается в виде γ -квантов.

Гамма-излучение — это поток электромагнитных волн (квантов), который излучается в процессе радиоактивного распада при изменении энергетического состояния ядер. Кроме того, γ -кванты образуются при аннигиляции позитрона и электрона. По свойствам γ -излучение близко к рентгеновскому излучению, но обладает большей скоростью и энергией. Скорость распространения в вакууме равняется скорости света — 300000 км/с. Так как γ -лучи не имеют заряда, то в электрическом и магнитном полях не отклоняются, распространяясь прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Энергия γ -излучения колеблется от десятков тысяч до миллионов электрон-вольт (2–3 МэВ), редко достигает 5–6 МэВ (так, средняя энергия γ -лучей, образующихся при распаде кобальта-60, равна 1,25 МэВ). В состав потока γ -излучений входят кванты различных энергий. При рас-

паде λ высвечивается пять групп квантов с различными энергиями, а ^{82}Br излучает 11 групп γ -квантов. Примером моноэнергетического γ -излучения служит ^{137}Cs . При его распаде высвечивается один квант с энергией в 0,661 МэВ. Путь пробега γ -лучей в воздухе превышает 100 м, т.е. они обладают большой проникающей способностью и свободно проходят через тело человека. Чтобы снизить в 2 раза γ -излучение радиоактивного кобальта ($^{60}_{27}\text{Co}$), наиболее часто используемого в медицине для лучевой терапии, необходимо применять защитный слой свинца в 1,6 см или слой бетона в 10 см. Ионизирующая способность γ -излучения значительно меньше, чем у α - и β -частиц.

2.4. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом

Все виды ядерных излучений могут быть обнаружены только по их взаимодействию с веществом. При прохождении через вещество радиоактивные излучения взаимодействуют с атомами среды, т.е. с электронами и ядрами. Обнаружение и регистрация излучений, выбор материала для защиты, оценка биологического действия излучений основаны на эффектах, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом. Механизм прохождения через вещество каждого вида излучений разный.

Взаимодействие рентгеновских и γ -излучений осуществляется тремя основными механизмами (способами): при помощи фотоэлектрического поглощения (фотоэффекта), комптоновского рассеяния (Комптон-эффекта), образования электронно-позитронных пар, но может происходить и деление ядер.

Фотоэффект. Фотоэффектом называется процесс поглощения γ -кванта атомным электроном, при котором электрон покидает пределы атома.

Фотоэффект возможен только в атоме, но не в свободном электроне. При фотоэлектрическом эффекте энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате чего появляется свободный электрон, обладающий определенной кинетической энергией, величина которой равна энергии кванта излучения, за вычетом работы выхода данного электрона из атома (электрон покидает границы атома). Вероятность фотоэффекта увеличивается с ростом энергии связи электронов в атоме. Обычно выбивается электрон из K -слоя (в 80% случаев). Свободный электрон, ассоциируясь с одним из нейтральных атомов, порождает отрицательный ион. Атом, потерявший электрон, становится возбужденным. «Вакантное» место K -электрона, выбитого из атома, заполняется электроном из предыдущего слоя, а на L -слой переходит электрон из M -слоя и т.д. При этом высвечивается один или несколько квантов характеристического **рентге-**

новского излучения. Характеристическое излучение – фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома. Энергия рентгеновских квантов, образовавшихся при фотоэффекте, достигает 0,1 МэВ. Однако энергия, излучаемая легкими атомами вторичных фотонов, малая. Такие фотоны сразу же поглощаются веществом. Фотоэффект характерен только для длинноволнового рентгеновского излучения. Фотоэлектрическое поглощение преобладает тогда, когда энергия γ -кванта не превышает 0,05 МэВ. Фотоэффект идет интенсивней в более тяжелых ядрах (железо, медь, свинец и т.д.). Фотоэффект невозможен на слабо связанных и свободных электронах (не связанных с атомами), так как они не могут поглощать γ -кванты. В воздухе, воде и биологических тканях фотоэлектрическое поглощение составляет 50% при энергии γ -квантов порядка 60 КэВ. Установлено, что фотоэффект является главным процессом поглощения при относительно малых энергиях ионизирующих излучений, когда часть энергии первичных фотонов превращается в кинетическую энергию электронов, а часть в энергию характеристического излучения.

Эффект Комптона. Для излучений с энергией, значительно превышающей внутриатомные энергии связи (более 1 МэВ), главную роль в ионизации приобретает эффект Комптона (обычно от 200 КэВ до 2 МэВ). При Комpton-эффекте происходит упругое рассеяние падающих фотонов излучения на электронах внешних слоев атомов облучаемого вещества, которые можно считать несвязанными (свободными), так как чем дальше удален электронный слой от ядра, тем меньше энергия связи ее электронов с ядром, поскольку γ -квант, сталкиваясь с электронами, передает им не всю свою энергию, а только часть ее и после соударения изменяет свое направление, т.е. рассеивается. Вследствие соударения с γ -квантами, электроны (электроны отдачи) приобретают значительную кинетическую энергию и расходуют ее на ионизацию вещества (вторичную ионизацию). Оставшуюся часть энергии выносит новый фотон (вторичный, который образовался в результате взаимодействия первичного фотона с веществом). Вторичные фотоны имеют меньшую энергию, большую длину волны и другое направление. В дальнейшем вторичный фотон может вновь претерпевать Комpton-эффект и т.д. Комптоновское рассеяние возможно на свободных электронах.

Энергия электронов отдачи, образующихся при эффекте Комптона, изменяется в широких пределах. Средняя их энергия возрастает с увеличением энергии падающего излучения.

Образование электронно-позитронных пар. Третий вид взаимодействия излучений с веществом – превращение γ -кванта больших энергий (свыше 1 МэВ) в пару заряженных частиц – эффект образования пары электрон-позитрон.

Гамма-кванты, проходя через вещество, превращаются под действи-

ем сильного электрического поля вблизи ядра атома в пару частица–античастица: «электрон–позитрон». При этом одна форма материи – γ -излучение – преобразуется в другую – в частицы вещества. Вероятность образования пары «электрон–позитрон» для тяжелых элементов больше, чем для легких.

Образовавшаяся электронно–позитронная пара в дальнейшем исчезает (аннигилирует), превращаясь в два вторичных γ -кванта с энергией, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц позитрона и электрона (0,511 МэВ). Вторичные γ -кванты способны вызвать лишь Комптон–эффект и, в конечном счете, фотоэффект, т.е. терять энергию только при соударении с электронами. Процесс образования пар увеличивается с возрастанием энергии γ -квантов и плотности поглотителя.

Таким образом, в зависимости от энергии падающего электромагнитного излучения преобладает тот или иной вид его взаимодействия с веществом. В большинстве случаев при облучении биологических объектов энергия используемого электромагнитного излучения находится в диапазоне 0,2–2 МэВ, поэтому наиболее вероятен эффект Комптона.

В результате каждого из трех процессов взаимодействия излучения с веществом в облученной среде возникает большое количество быстро движущихся электронов. Значительная часть их обладает энергией, достаточной для ионизации вещества.

Электромагнитные излучения ионизацию непосредственно не вызывают, но при взаимодействии с веществом образуют фотон и комптоновские электроны, которые, в свою очередь, ионизируют среду, поэтому их называют косвенно ионизирующим излучением.

Взаимодействие заряженных частиц с веществом. Механизм передачи энергии заряженными частицами облучаемому веществу один и тот же. При прохождении через вещество заряженная частица теряет свою энергию, вызывая ионизацию и возбуждение атомов до тех пор, пока общий запас энергии уменьшается настолько, что частица утратит ионизирующую способность.

В зависимости от знака заряда при пробеге частицы в веществе она, испытывая **электростатическое взаимодействие**, притягивается или отталкивается от положительно заряженных ядер. Чем больше масса летящей частицы, тем меньше она отклоняется от первоначального направления. Поэтому траектория протонов и более тяжелых ядерных частиц практически прямолинейна, а траектория электронов сильно изломана вследствие рассеяния (отклонения) на орбитальных электронах и ядрах атомов. Этот вид взаимодействия легких частиц (электронов), при котором практически меняется лишь направление их движения, а не энергия, называют **упругим рассеянием**. При этом взаимодействии электрон передает лишь небольшую часть своей энергии ядру и меняется первоначальное направление движения. При прохождении электрона очень высокой энергии

вблизи ядра наблюдается **неупругое рассеяние** (торможение). При этом скорость летящего электрона снижается и часть его энергии испускается в виде **фотона тормозного излучения**. Тормозное излучение – это фотонное излучение, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженной частицы. При неупругом рассеянии наблюдается также взаимодействие частиц с электронами облучаемого вещества, вызывающее ионизацию или возбуждение атомов.

Траектория электрона в веществе имеет сложный вид, связанный с характером взаимодействия. На начальном участке траектория электрона рассеивается под небольшими углами, и траектория его мало отличается от прямой линии. С уменьшением энергии электрона (а она колеблется от 20 кэВ до 13,5 МэВ) угол рассеяния увеличивается, и электрон начинает двигаться по извилистой кривой. Таким образом, основными процессами взаимодействия электронов высокой энергии с веществом являются следующие:

- при неупругих столкновениях энергия затрачивается на ионизацию и возбуждение атомов среды, частично на преобразование в тормозное излучение;
- при упругих столкновениях энергия преобразуется непосредственно в тепловое движение;
- в легких веществах ($Z < 13$) тормозное излучение становится заметным при энергиях электрона больших, чем 10 МэВ. При меньших энергиях преобладают потери энергии на ионизацию;
- первичные электроны создают положительные ионы и вторичные электроны, последние могут обладать энергией, достаточной для ионизации. На долю вторичных ионизации приходится до 70 % общей ионизации. При замедлении вторичные электроны могут создавать отрицательные ионы;
- траектория электронов при больших энергиях близка к линейной. При уменьшении энергии электрон из-за рассеяния начинает двигаться по извилистой кривой;
- глубина проникновения электронов в вещество прямо пропорциональна их энергии и обратно пропорциональна плотности вещества.

Тяжелые заряженные частицы – протоны, дейтроны, α -частицы, осколки деления, аналогично электронам, затрачивают большую часть своей энергии на ионизацию, возбуждение атомов, а также на взаимодействие с кулоновским полем ядра и электронов (тормозное излучение). В значительной степени эти процессы вызваны электронами, которые образовались в процессе первичной ионизации.

Отличительной чертой тяжелых частиц в сравнении с быстрыми электронами той же энергии является их более медленное движение из-за большой массы. При энергии в несколько МэВ ионизационные потери для

α -частиц в 1000 раз большие, чем для электронов. В результате этого путь электронов в веществе (глубина проникновения) значительно больше, чем путь α -частиц.

Как известно, величина энергии, которая излучается какой-либо частицей, прямо пропорциональна квадрату ее ускорения и обратно пропорциональна массе частицы. Из этого вытекает, что радиационные потери тяжелых заряженных частиц (т.е. потери на тормозное излучение) небольшие.

Столкновение тяжелой частицы с легким электроном не может вызвать значительного отклонения ее от первоначального направления движения, поэтому их путь в веществе прямолинейный.

Тяжелые частицы, как и электроны, передают энергию порциями. Максимальная энергия вторичных электронов определяется энергией падающих частиц. Так, при столкновении α -частицы энергией в 5 МэВ с электроном последний приобретает энергию около 2700эВ. Этой энергии достаточно для осуществления вторичной ионизации (потенциал ионизации в воздухе равен 34 эВ). Основными результатами взаимодействия тяжелых заряженных частиц с веществом являются следующие:

1. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество сопровождается образованием ионов, возбуждением атомов.
2. Ионизационные потери намного больше, чем при облучении электронами, соответственно, пробег тяжелых частиц в веществе намного меньше пробега электронов.
3. Траектория движения из-за большой массы частицы мало отличается от линейной. Скорость тяжелых заряженных частиц существенно меньше скорости движения электронов.
4. Потери энергии частиц на тормозное излучение незначительны.
5. Максимальная энергия передается веществу вблизи конца пробега частицы.

Взаимодействие атомов деления с веществом. Осколки деления представляют собой многозарядные (заряд достигает 20) ионы с массовым числом 72–166, которые возникают при делении ядер тяжелых изотопов: ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu .

В процессе деления возникает около 80 первичных продуктов деления, из них только шесть стабильные. Массовые числа осколков легких изотопов находятся в области $A = 72\text{--}116$ (*Br, Kr, Zn, Y, Mo, Ru*), тяжелых изотопов – в области $A = 117\text{--}166$ (*Te, J, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sb*).

Энергия осколков составляет от 40 до 120 МэВ. Эта энергия в основном затрачивается на ионизацию и возбуждение атомов и молекул. Важную роль играют также столкновения осколков с ядрами.

Отличительной чертой процесса замедления осколков в веществе является постепенное уменьшение заряда по всей длине пробега. В противоположность ионизационному эффекту, вызываемому α -частицами, плот-

ность ионизации понижается к концу пробега. С уменьшением заряда уменьшаются потери на ионизацию и возбуждение и увеличиваются потери на упругое столкновение с ядрами.

Взаимодействие нейтронов с веществом. Характер взаимодействия нейтронов с веществом зависит от их энергии. В отличие от заряженных частиц, нейтроны не несут электрического заряда, что позволяет им беспрепятственно проникать в глубь атомов. Сверхбыстрые нейтроны с энергией в 10–50 МэВ при взаимодействии с тяжелыми элементами вызывают деление их ядер (ядро делится на 2–3 осколка). При этом высвобождается колоссальная энергия (около 200 МэВ) и образуется 2–3 свободных нейтрона, которые способны вызвать деление других ядер. Так возникает цепной процесс деления ядер. Наибольшее значение имеют быстрые нейтроны. Достигая ядер, они либо поглощаются ими, либо рассеиваются на них. Основным видом взаимодействия нейтронов с веществом является взаимодействие с атомными ядрами. В этих взаимодействиях нейтроны могут претерпевать упругое и неупругое рассеивание, порождать заряженные частицы и γ -кванты, вызывать деление некоторых ядер и т.д. Достигая ядер вещества, быстрые нейтроны тратят энергию крупными порциями, расходуя ее на возбуждение ядер или их расщепление. В результате одного или нескольких столкновений с ядрами энергия нейтрона становится меньше минимальной энергии возбуждения (от десятков КэВ до нескольких МэВ). После этого рассеяние нейтрона ядром становится упругим. При упругом рассеивании нейтрон передает часть своей энергии ядру, с которым он столкнулся. При этом он замедляется и изменяет направление движения. После ряда столкновений замедленный нейтрон захватывается ядром. При упругом рассеянии на ядрах углерода, азота, кислорода и других элементов нейтрон теряет лишь 10–15% энергии, а при столкновении с почти равными с ним по массе ядрами водорода – протонами – энергия нейтронов уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону. При этом образуется нейтрон с меньшей энергией. Поэтому вещества, содержащие большое количество атомов водорода (вода, бериллий, графит, парафин), используются для защиты от нейтронного излучения: в них нейтроны быстро растрачивают свою энергию и замедляются. В результате упругого рассеяния нейтронов образуются сильно ионизирующие протоны.

Ядро, захватившее нейтрон, становится возбужденным. Переход из возбужденного в основное состояние возможен разными путями:

- ядро может излучить нейтрон меньшей энергии и один или несколько γ -квантов, но заряд ядра не меняется;

- в процессе распада могут образовываться ядра меньшего или большего заряда и излучаться заряженные частицы – электрон, позитрон, α -частица, протон и др.;

– захват нейтрона может сопровождаться делением некоторых ядер.

Образовавшиеся γ -кванты и частицы также способны производить ионизацию. При таких ядерных реакциях могут образовываться радиоактивные изотопы элементов и возникать наведенная радиоактивность, в свою очередь тоже вызывающая ионизацию. Ионизируют вещества и сами ядра отдачи, возникающие при ядерных превращениях.

Медленные нейтроны сразу захватываются ядрами атомов, в результате чего образуются новые стабильные или радиоактивные изотопы. В водородосодержащих веществах ядра водорода захватывают медленные нейтроны и превращаются в ядра тяжелого водорода – дейтерия. Захват нейтронов сопровождается испусканием γ -квантов с энергией в 2,18 МэВ



Таким образом, и при нейтронном облучении конечный биологический эффект связан с ионизацией, проводимой опосредованно вторичными частицами или фотонами.

ГЛАВА III ОСНОВНЫЕ ДОЗОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

3.1. Понятие о дозиметрии

Дозиметрия – измерение рассеяния и поглощения энергии ионизирующего излучения в определенном материале. Доза излучения строго зависит от энергии и вида падающего излучения, а также от природы поглощающего материала.

Мера воздействия ионизирующего излучения на вещество не поддается простому определению из-за сложности и многообразия происходящих при этом процессов. Изменения, возникающие в окружающей среде (нарушения структуры вещества) и в живых объектах (биологические нарушения и даже гибель), называются *радиационными эффектами*. Основными величинами, которые дают количественную оценку возбуждаемому в веществе радиационному эффекту, являются поглощенная доза, эквивалентная доза, экспозиционная доза. Первичным процессом, который дает начало физико-химическим изменениям в облучаемом веществе и приводит к наблюдаемому радиационному эффекту, является энергия ионизирующего излучения, поглощенная веществом.

3.2. Активность радионуклида. Единицы активности

Активность вещества определяется интенсивностью или скоростью распада его ядер. Активность пропорциональна числу радиоактивных атомов, содержащихся в данном веществе, т.е. возрастает с увеличением количества данного вещества. **Активность** – это мера количества радиоактивного вещества, которая выражается числом радиоактивных превращений (распадов ядер) в единицу времени.

Активность характеризует не отдельно взятое радиоактивное ядро, а данный радиоактивный образец, который представляет собой совокупность ядер, и каждое ядро может распасться с определённой вероятностью в каждую секунду. Для определения активности существуют несколько формул:

$$1) A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \text{ – по определению;}$$

$$2) A = \lambda \cdot N \text{ – через постоянную радиоактивного распада;}$$

$$3) A_0 = \lambda \cdot N_0 \text{ – начальная активность.}$$

Основная расчётная формула для активности получается из инте-

гальной формы основного закона радиоактивного распада.

Из формулы 2, 3 выражаем N , N_0 и подставляем в основной закон.

Отсюда получаем

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}.$$

В качестве примера рассмотрим следующую задачу.

Найти количество распадающихся ядер в 1 г радия (${}^{226}_{88}\text{Ra}$) за 1 сек.

$$m = 1 \text{ г}; t = 1 \text{ с}; T_{1/2} = 1590 \text{ лет}.$$

Количество распадающихся ядер находим из дифференциального закона

$$-\Delta N = N \cdot \lambda \cdot \Delta t,$$

$$-\Delta N = N \cdot \lambda \cdot (\Delta t = 1 \text{ с}),$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \quad \text{т.к.} \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

Число нераспавшихся ядер определяем из интегральной формы основного закона радиоактивного распада

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

так как $t = 1 \text{ сек}$, то

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda}.$$

Начальное число радиоактивных ядер находим по закону Авогадро при условии, что все ядра образца радиоактивны.

$$N_0 = \frac{m}{M} \cdot N_A;$$

таким образом,

$$-\Delta N = \frac{m}{M} \cdot N_A \cdot e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}} \cdot \frac{\ln 2}{T_{1/2}},$$

$$-\Delta N = 3,7 \cdot 10^{10}.$$

Несистемная единица активности 1 Ки соответствует числу распадов в 1 г *Ra* за 1 с.

Удельная активность радиоактивного углерода $^{14}_6\text{C}$, определяемого в ископаемых останках растений и животных, позволяет определить их возраст путём радиоуглеродного анализа. Количество $^{14}_6\text{C}$ в живых биологических объектах постоянно за счёт обмена веществ. Когда обмен веществ прекращается, количество $^{14}_6\text{C}$ снижается за счёт распада. Сравнив активность ископаемого образца и активность современного аналогичного по химическому составу вещества, определяют возраст по зависимости $Am(t)$, которая по виду аналогична кривой радиоактивного распада.

Так как скорость распада радиоактивных изотопов различна, то одинаковые по массе радионуклиды имеют различную активность. Чем больше ядер распадается в единицу времени, тем выше активность. Активность измеряется обычно в распадах в секунду. За единицу активности в Международной системе единиц (СИ) принят один распад в секунду. Эта единица названа в честь Анри Беккереля, открывшего впервые явление естественной радиоактивности в 1896 году, беккерелем (Бк). 1 Бк – такое количество радионуклида, в котором за одну секунду происходит один распад. Так как беккерель очень малая величина, то используют кратные величины: кБк – килобеккерель (10^3 Бк), МБк – мегабеккерель (10^6 Бк), ГБк – гигабеккерель (10^9 Бк).

Внесистемной единицей активности является кюри (Ки). Кюри – это такая активность, когда число радиоактивных распадов в секунду равно $3,7 \cdot 10^{10}$ (37 млрд. расп/с). Кюри соответствует активности 1 г радия. Так как кюри очень большая величина, то обычно употребляют производные величины:

мКи – милликюри (тысячная доля кюри) – $3,7 \cdot 10^7$ расп/с;

мкКи – микрокюри (миллионная доля кюри) – $3,7 \cdot 10^4$ расп/с;

нКи – нанокюри (миллиардная доля кюри) – 37 расп/с.

Зная активность в беккерелях, нетрудно перейти к активности в кюри и наоборот:

1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк = 37 гигабеккерель;

1 мКи = $3,7 \cdot 10^7$ Бк = 37 мегабеккерель;

1 мкКи = $3,7 \cdot 10^4$ Бк = 37 килобеккерель;

1 Бк = 1 расп/с = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки.

На практике часто пользуются числом распадов в минуту.

1 Ки = $2,22 \cdot 10^{12}$ расп/мин;

1 мКи = $2,22 \cdot 10^9$ расп/мин;

1 мкКи = $2,22 \cdot 10^6$ расп/мин.

Для количественной характеристики радиоактивности образцов оп-

ределяют различные виды активности: объёмную, удельную, поверхностную, линейную и т.п.

Удельная активность – это активность, приходящаяся на единицу массы вещества (активность, отнесенная к единице массы) – Бк/кг, Ки/кг.

Объёмная активность – это активность, приходящаяся на единицу объема – Бк/л, Ки/л, Бк/м³, Ки/м³. В случае распределения радионуклидов на поверхности активность называется **поверхностной** (отношение активности радионуклида, на которой находится радионуклид) – Бк/м², Ки/м². Для характеристики загрязнения территории применяется величина Ки/км². Естественная радиоактивность калия–40 в почве соответствует 5мКи/км² (200 Бк/м²). При загрязнении местности в 40 Ки/км² по цезию–137 на 1м² поверхности размещается 2000000 млрд. ядер, или 0,455 микрограмма цезия–137. **Линейная активность** радионуклида – это отношение активности радионуклида, содержащегося на длине отрезка, к его длине.

Массу в граммах при известной активности (например 1Ки) радионуклида определяют по формуле

$$m = \kappa \cdot A \cdot T_{1/2} \cdot a,$$

где m – масса в граммах;

A – атомная масса;

$T_{1/2}$ – период полураспада;

a – активность в кюри или беккерелях;

κ – константа, зависящая от единиц, в которых дан период полураспада и активность.

Если период полураспада дан в секундах, то при активности в беккерелях константа равна $2,4 \cdot 10^{-24}$, при активности кюри – $8,86 \cdot 10^{-14}$. Если период полураспада дан в других единицах, то его переводят в секунды.

Подсчитаем массу ^{131}J с периодом полураспада 8,05 дней для создания активности в 1 кюри.

$$M = 8,86 \cdot 10^{-14} \cdot 131 \cdot 8,05 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1 = 0,000008 \text{ г.}$$

Для стронция–90 масса равна 0,0073 г, плутония–239 – 16,3 г, урана–238 – 3 т. Возможно вычислить активность в беккерелях или кюри радионуклида при известной его массе

$$A_0 = \frac{I \cdot m}{A \cdot T_{1/2}},$$

где I – параметр, обратный константе « κ ». При $T_{1/2}$ измеренных в секундах, а активности – в беккерелях, $I = 4,17 \cdot 10^{-23}$, при активности в Ки $I = 1,13 \cdot 10^{-13}$.

Так, активность 32,6 г плутония–239 равна

$$A_0 = 1,13 \cdot 10^{13} \cdot 32,6 (239 \cdot 24300 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) = 2 \text{ Ки},$$

$$A_0 = 4,17 \cdot 10^{23} \cdot 32,6 (239 \cdot 24300 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600) = 7,4 \cdot 10^{10} \text{ Бк}.$$

Биологическое действие радиации обусловлено ионизацией облучаемой биологической среды. На процесс ионизации излучение растрчивает свою энергию, в результате взаимодействия излучения с биологической средой живому организму передается определенная величина энергии. Часть излучения, которая пронизывает облучаемый объект (без поглощения), действия на него не оказывает. Радиационный эффект зависит от многих факторов: количества радиоактивности снаружи и внутри организма, пути ее поступления, вида и энергии излучения при распаде ядер, биологической роли облучаемых органов и тканей т.д. Объективным показателем, учитывающим все эти разнообразные факторы, является количество *поглощенной энергии* излучения от ионизации, которую эта энергия производит в массе вещества.

Чтобы предсказать величину радиационного эффекта, нужно научиться измерять интенсивность воздействия ионизирующего излучения. Это можно сделать, измерив поглощенную в объекте энергию или суммарный заряд образовавшихся при ионизации ионов. Эта величина поглощенной энергии получила название дозы.

3.3. Экспозиционная доза

Измерить число пар ионов непосредственно в глубине тканей живого организма сложно. В связи с этим для количественной характеристики рентгеновского и γ -излучения, действующего на объект, определяют сначала экспозиционную дозу в воздухе, а затем расчетным путем определяют поглощенную дозу для тканей и органов организма. Экспозиционную дозу определяют по ионизирующему действию излучения в определенной массе воздуха и только при значениях энергии рентгеновского и γ -излучения в диапазоне от десятков килоэлектрон-вольт до трех мегаэлектрон-вольт.

Экспозиционная доза рассчитывается только для рентгеновского и γ -излучения, т.к. только кванты этих излучений достаточно долгопробежные и могут создавать равномерное наружное облучение, а α - и β -излучения короткопробежные, большая их часть поглощается одеждой и кожей, и они не представляют большой опасности для внутренних органов.

Экспозиционная доза – это количественная характеристика рентгеновского и γ -излучения, основанная на их ионизирующем действии и выраженная суммарным электрическим зарядом ионов одного знака, образованных в элементарном объеме воздуха в условиях электронного равновесия. За единицу экспозиционной дозы в Международной системе единиц

(СИ) принят один кулон электрического заряда в одном килограмме облучаемого воздуха.

Кл/кг – это такая экспозиционная доза рентгеновских и γ -лучей, под действием которой в 1 кг сухого воздуха образуется число пар ионов, суммарный заряд каждого знака которых равен одному кулону. Это число составляет $6,24 \cdot 10^{18}$ пар ионов.

На практике до сих пор применяют внесистемную единицу экспозиционной дозы – рентген. Рентген (Р) – единица экспозиционной дозы, при которой в 1 см³ воздуха (0,001293 г) при нормальных условиях образуется $2,082 \cdot 10^9$ пар ионов. Обычно используют производные рентгена – дробные доли: миллирентген – мР (тысячные доли рентгена), микрорентген – мкР (миллионные доли рентгена) – (мкР = 10^{-6} Р, мР = 10^{-3} Р).

При определении действия радиации на какую-либо среду (особенно при облучении живого организма) необходимо учитывать не только общую дозу, но и время, за которое она получена. Поэтому вводится понятие мощность дозы. **Мощность** экспозиционной дозы (уровень радиации) – это доза, отнесенная к единице времени: Р/ч, мР/ч, мкР/ч. В Международной системе единиц мощность экспозиционной дозы выражается в А/кг (ампер на кг). Взаимосвязь между единицами экспозиционной дозы следующая: $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$, $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Поскольку на образование одной пары ионов в воздухе в среднем затрачивается 34 эВ, то энергетический эквивалент рентгена в 1 см³ воздуха составляет

$$2,08 \cdot 10^9 \cdot 34 = 7,08 \cdot 10^4 \text{ МэВ} = 0,114 \text{ эрг/см}^3$$

или в 1 г воздуха – 88 эрг, ($0,114 : 0,001293 = 88$).

3.4. Поглощенная доза

Поглощенная доза излучения – это величина энергии, поглощенной в единице объема (или массы) облучаемого вещества.

Поглощенная доза в системе СИ измеряется в греях (Гр), что соответствует джоуль на килограмм (Дж/кг), т.е. это такая доза, при которой в 1 кг массы облучаемого вещества поглощается 1 Дж энергии излучения. Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад (radiation absorbed dose), она в 100 раз меньше Гр. Рад – единица поглощенной дозы ионизирующего излучения, при которой веществом массой 1 г поглощается энергия излучения, равная 100 эрг.

$$1 \text{ рад} \approx 100 \text{ эрг/г} \approx 10^{-2} \text{ Дж/кг}. 1 \text{ Гр} \approx \text{Дж/кг} \approx 100 \text{ рад}.$$

Применяют такие производные величины от Гр и рад:

м Гр – миллигрей (10^{-3} Гр),

мк Гр – микрогрей (10^{-6} Гр).

Мощность поглощенной дозы – это поглощенная доза, отнесенная к единице времени. За единицу мощности в СИ принят ватт/кг (Вт/кг); ватт равен мощности, при которой работа в 1 Дж проводится за 1 с.

Внесистемные единицы: рад в час (рад/ч), рад в мин (рад/мин), грей в секунду (Гр/с), рад в секунду (рад/с).

Если в воздухе экспозиционная доза в 1 Р энергетически эквивалентна 88 эрг/г, то поглощенная доза для этой среды составляет 0,88 рад (88:100), так как 1 рад = 100 эрг/г. Таким образом, экспозиционная доза в 1 Р соответствует поглощенной дозе в 0,88 рада. Для различных биологических тканей используют переходные коэффициенты (их определяют опытным путем). Для мягких тканей он составляет 0,93, для костной ткани – 2–5.

3.5. Эквивалентная доза

При одной и той же поглощенной дозе различные виды излучений (α -, β -, γ -излучения и др.) оказывают различные биологические эффекты. Объясняется это различной ионизирующей способностью. Для количественной оценки качества излучения, т. е. для сравнения различных видов излучения, введено понятие *относительной биологической эффективности* (ОБЭ).

ОБЭ оценивают сравнением дозы излучения, вызывающего определенный биологический эффект, с дозой стандартного излучения, обуславливающего тот же эффект. ОБЭ указывает, во сколько раз биологический эффект при воздействии данного вида излучения сильнее действия стандартного облучения на биологический объект (клетку, организм в целом).

Регламентированные значения ОБЭ, установленные для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении, называют коэффициентом качества (КК) излучения. Коэффициент качества показывает, во сколько раз данный вид излучения более биологически опасен, чем рентгеновское и γ -излучение при одинаковой поглощенной дозе. Для рентгеновского излучения, γ -излучения, электронов и позитронов КК равен 1,0; для нейтронов с энергией меньше 20 кэВ – 3; для протонов с энергией меньше 10 МэВ – 10; для нейтронов с энергией 0,1–10 МэВ – 10; для α -излучений и тяжелых ядер отдачи – 20. Это означает, что α -излучение, которое попадает внутрь организма, в 20 раз более опасно, чем γ -излучение. С учетом различия в повреждающем воздействии разных ионизирующих излучений на организм человека применяется понятие экви-

валентной дозы. При ее помощи оцениваются вредные эффекты биологического воздействия любого типа ионизирующих излучений.

Эквивалентная доза – это произведение поглощенной дозы излучения в биологической ткани на коэффициент качества этого излучения в данной биологической ткани. Единицей эквивалентной дозы в СИ является **зиверт** (Зв). $1 \text{ Зв} = \text{Дж/кг}$, т.е. зиверт равен эквивалентной дозе, при которой произведение поглощенной дозы в биологической ткани стандартного состава на средний коэффициент качества равно 1 Дж/кг . Используются также производные единицы: мЗв – миллизиверт (в тысячу раз меньше Зв); мкЗв – микрозиверт (в миллион раз меньше Зв).

Эквивалентная доза ионизирующего излучения является основной величиной, определяющей уровень радиационной опасности при хроническом облучении человека в малых дозах. Понятие эквивалентной дозы и коэффициента качества применяют только при дозах в 10 ПДД (предельно допустимых доз). При больших дозах используют поглощенную дозу и соответствующие коэффициенты ОБЭ (КОБЭ). КОБЭ – отношение доз стандартного излучения (γ -излучения ^{60}Co) и исследуемого ионизирующего излучения, необходимых для получения одинакового биологического эффекта. КОБЭ для быстрых нейтронов равен 0,7–0,8; α -излучения – 0,55–1,3; нейтронов деления – 1,6–4,42.

Внесистемной единицей эквивалентной дозы является **бэр** (биологический эквивалент рентгена). **Бэр** – это поглощенная доза любого вида ионизирующего излучения, которая имеет такую же биологическую эффективность, как и один рад.

Соотношение между дозами:

$$1 \text{ Зв} \approx 1 \text{ Дж/кг};$$

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр};$$

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв} \approx 0,01 \text{ Дж/кг}.$$

Мощность эквивалентной дозы – отношение эквивалентной дозы к единице времени – Зв/с, мкЗв/ч. Допустимая среднегодовая мощность эквивалентной дозы при облучении всего тела работающих при 36-часовой рабочей неделе равна 28 мкЗв/ч, естественный фон создает мощность эквивалентной дозы в пределах 0,05–0,2 мкЗв/ч (по данным МКРЕ – Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям).

Поскольку коэффициент качества равен единице или больше, то и эквивалентная доза больше поглощенной (или равна ей). Например, для β -излучения $\text{КК} = 1$ и эквивалентной дозе в 1 Зв соответствует поглощенная доза в 1 Гр. Для α -излучения $\text{КК} = 20$, поэтому эквивалентной дозе в 1 Зв соответствует поглощенная доза в 0,05 Гр (1:20).

3.6. Эффективная эквивалентная доза

По отношению к ионизирующим излучениям органы и биологические ткани имеют разную радиочувствительность. Сильнее всего поражается красный костный мозг, половые железы, меньше — нервная ткань. Учет радиочувствительности производят с помощью коэффициентов радиационного риска — КР, которые позволяют провести сопоставление последствий неравномерного облучения отдельных органов с такими же последствиями равномерного облучения всего тела. В случаях неравномерного облучения разных органов или тканей тела человека вводится понятие эффективной эквивалентной дозы.

Эффективная эквивалентная доза — это эквивалентная доза, умноженная на коэффициент радиационного риска, учитывающий разную чувствительность различных тканей к облучению. Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) приняты следующие коэффициенты радиационного риска для различных тканей или органов человека (приложение 4).

С учетом этих коэффициентов, например, облучение щитовидной железы дозой в 1 Зв (100 бэр) приводит к такому же поражению организма, как и облучение всего организма дозой в $1 \text{ Зв} \cdot 0,03 = 0,03 \text{ Зв}$ (3 бэра). Допустимая доза на щитовидную железу составляет 33 Зв ($1 \text{ Зв} : 0,03 = 33 \text{ Зв}$), так как допустимая доза на весь организм составляет 1 Зв.

Определение эффективной эквивалентной дозы очень важно при избирательном накоплении радионуклидов, например йода-131 в щитовидной железе, стронция-90 в костях (облучение красного костного мозга). Таким образом, эффективная эквивалентная доза является основным показателем для оценки радиационного воздействия излучений на человека.

Единицей измерения эффективной эквивалентной дозы является Зиверт (Зв) и бэр.

3.7. Другие дозовые величины

Ожидаемая эффективная эквивалентная доза предполагает определение дозовой нагрузки за некоторый период времени (например за 70 лет, т.е. «доза за жизнь», или же за 10, 20 и т.д. лет). Эта доза позволяет оценить вероятность последствий и принять соответствующие защитные меры. Расчет дозы очень сложен. Он учитывает периоды полураспада отдельных радионуклидов, их долю в общей радиоактивности, способность накапливаться в организме и выводиться из организма, особенности рациона питания и загрязненность продуктов, долю внешнего облучения и множество других факторов. Измеряется ожидаемая эффективная эквивалентная доза в Зв (зивертах).

Коллективная эффективная эквивалентная доза — это эффективная эквивалентная доза, полученная группой людей от какого-либо источника радиации (иначе, это сумма индивидуальных эффективных эквивалентных доз). Измеряется доза в человеко-Зивертах (чел.-Зв), (чел.-бэр). Коллективную дозу можно рассчитать для отдельного поселка, города, области и т.д. Таким образом, коллективная доза — это объективная оценка масштаба радиационного поражения.

Например, расчеты после аварии на ЧАЭС показали, что дозовая нагрузка только от радионуклида цезия-137 на население Скандинавских стран и стран центральной Европы в течение первого года после аварии составила $8 \cdot 10^4$ чел.-Зв. Доза, полученная населением республик бывшего СССР, проживающим на загрязненной территории в течение года, составила $2,5 \cdot 10^5$ чел.-Зв. Коллективная доза позволяет вычислить количество не только явных, но и отдаленных последствий облучения (количество раковых и других заболеваний).

Ожидаемая коллективная эффективная эквивалентная доза — это доза, рассчитанная на определенный предстоящий период времени при условии, если какая-то группа (количество) людей продолжает жить в условиях длительного хронического (постоянного) облучения и известны закономерности изменения радиационного воздействия. Этот показатель позволяет прогнозировать риск заболеваний в такой группе людей, среднюю продолжительность жизни и т.д. Например, ожидаемая коллективная доза в результате аварии на ЧАЭС оценивается в $6,2 \cdot 10^5$ чел.-Зв (52% ее приходится на Европейские страны, 37% — на страны бывшего СССР, 10% — на Азию, 1% — на Африку, 0,3% — на Америку).

Снижению ожидаемой коллективной дозы содействует отселение из потерпевших районов, исключение из сельскохозяйственного оборота земель, на которых по пищевым цепочкам распространяется радиоактивность, дезактивация местности, контроль продуктов питания, соблюдение индивидуальных мер защиты и т.д.

3.8. Переходные коэффициенты

При проживании на загрязненной территории получаемая доза обусловлена как внешним, так и внутренним облучением. Разработаны экспериментальным путем для каждого вида радионуклидов переходные коэффициенты, связывающие активность, мощность экспозиционной дозы, эффективную дозу.

Например, для цезия установлены следующие переходные коэффициенты:

$$1 \text{ Бк} / \text{м}^2 \approx 0,0004 \text{ мкР/ч или } 1 \text{ Ки} / \text{км}^2 \approx 14,8 \text{ мкР/ч,}$$

$$1 \text{ Бк} / \text{м}^2 \approx 0,022 \text{ мкЗв/год или } 1 \text{ Ки} / \text{км}^2 \approx 0,80 \text{ мЗв/год.}$$

Каждый мкР/час создает дозу в 0,05 мЗв/год.

Таким образом, при загрязнении цезием-137 в 5 Ки/км² (185 кБк/м²) мощность экспозиционной дозы приблизительно составляет 75 мкР/ч, а за год это примерно соответствует эквивалентной дозе 4мЗв.

Доза внутреннего облучения зависит от рациона питания, типа почв, растительности. Для внутреннего облучения устанавливаются также соответствующие переходные коэффициенты. При потреблении в год 332 кг молока, 133 кг хлеба и круп, 37 кг овощей, 118 кг корнеплодов и фруктов, 63 кг мяса при загрязнении местности цезием-137 в 5 Ки/км² внутреннее облучение составляет 3,35 мЗв/год.

Если до аварии активность цезия-137 в молоке составляла 0,03–0,3 Бк/л, то в мае месяце 1986 г. на юге Гомельской области составляла 330000 Бк/л.

Подсчитаем, какую эквивалентную дозу получил ребенок, выпив 2 л молока с активностью йода-131 4 кБк/л. Масса щитовидной железы 5 г. Средняя энергия поглощающего излучения на каждый акт распада составляет 500 кэВ. В щитовидной железе накапливается 45% поступившего йода.

1. Активность, поступившая в организм, равна $2\text{ л} \cdot 4\text{ кБк/л} = 8\text{ кБк}$.
2. Активность, накопившаяся в щитовидной железе, $8\text{ кБк} \cdot 0,45 = 3600\text{ Бк}$.
3. Удельная активность в щитовидной железе
 $3600 / 0,005 = 7,2 \cdot 10^5\text{ Бк/кг}$.
4. За сутки в щитовидной железе происходит $7,2 \cdot 10^5 \cdot 8,64 \cdot 10^4\text{ с} = 6,22 \cdot 10^{10}\text{ расп/с}$.
5. Щитовидная железа поглощает $6,2 \cdot 10^{10} \cdot 5 \cdot 10^5\text{ эВ} = 31,1 \cdot 10^{15}\text{ эВ} = 5 \cdot 10^{-3}\text{ Дж/кг} = 5 \cdot 10^{-3}\text{ Гр}$.
6. Эквивалентная доза на щитовидную железу составляет $5 \cdot 10^{-3}\text{ Гр} = 5\text{ мЗв}$ (коэффициент качества для β -излучений равен 1,0).
7. Эквивалентная доза на все тело составляет при коэффициенте радиационного риска для щитовидной железы $5\text{ мЗв} \cdot 0,05 = 0,25\text{ мЗв}$ (0,025 бэр).

Годовая эквивалентная доза не должна превышать 0,1 бэр. Доза, полученная ликвидаторами, составляет

- 0,05 – 0,1 Зв (5 – 10 бэр) – у 30% ликвидаторов;
- 0,1 – 0,25 Зв (10 – 25 бэр) – у 47% ликвидаторов;
- 0,25 – 0,5 Зв (25 – 50 бэр) – у 7,3% ликвидаторов.

ГЛАВА IV МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

4.1. Общие сведения

Работа дозиметрических приборов основана на способности излучений ионизировать вещество среды, в которой распространяется излучение. Ионизация, в свою очередь, является причиной некоторых физических и химических изменений в веществе, которые могут быть обнаружены и измерены. К таким изменениям относятся увеличение электропроводимости (газов, жидкостей, твердых материалов), люминесценция (свечение), засвечивание светочувствительных материалов (фотопленок), изменение окраски, прозрачности некоторых химических растворов и др.

В зависимости от природы регистрируемого физико-химического явления, происходящего в среде под влиянием ионизирующих излучений, различают ионизационный, сцинтилляционный, химический, фотографический и другие методы обнаружения и измерения ионизирующих излучений.

Важнейшим элементом большинства приборов, предназначенных для измерения ионизирующих излучений, является детектор. Детектор — это часть (элемент) прибора, применяемого для обнаружения ионизирующих излучений, измерения их энергии. К детекторам относятся ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики, счетчики Гейгера-Мюллера, фотопластинки и др.

4.2. Методы дозиметрического контроля

Ионизационный метод основан на ионизации атомов и молекул, которая происходит под влиянием ионизирующих излучений в среде (газовом объеме), в результате чего электропроводимость среды увеличивается, что может быть зафиксировано соответствующими электронно-техническими приспособлениями.

В качестве детектора наиболее часто применяется *ионизационная камера*. Она состоит из двух электродов, между которыми находится газовая среда (воздух или другой газ), которые подключены к источнику питания для создания электрического поля. При отсутствии ионизирующих излучений ток в электрической цепи камеры протекать не будет, так как в ней нет свободных электронов и сопротивление ее бесконечно большое.

Под действием ионизирующих излучений в газовой среде камеры образуются ионы и электроны, которые в результате разности потенциалов на электродах приобретают направленное движение к соответствующим

электродам (аноду или катоду). В электрической цепи начинает протекать ток, который регистрируется измерительным приспособлением. Величина ионизационного тока пропорциональна величине излучений. Ионизационные камеры могут иметь различные форму и конструкцию. Наиболее часто применяются цилиндрические камеры (рентгенметр ДП–3Б) и плоские. В некоторых камерах используется конденсатор (конденсаторные камеры) – комплекты дозиметров ДП–24, ДП–23А, ДК–02, КИД–2 и др.

Ионизационные камеры используются для измерения всех видов ядерных излучений. Малая проникающая способность α -частиц вынуждает использовать для их регистрации камеры с очень тонкими окнами.

Пропорциональные счетчики. Под действием излучения происходит ионизация. Сила ионизационного тока начинает возрастать, поскольку ионы, образованные излучением, и особенно электроны, приобретают при движении к электродам ускорения, достаточные для того, чтобы самим производить ионизацию вследствие соударений с атомами газовой среды детектора. Между числом первично образованных ионов и общей суммой ионов, участвующих в создании ионизационного тока, имеется строгая пропорциональность. Наличие пропорционального усиления в счетчиках позволяет определить энергию ядерных частиц и измерить их структуру. Пропорциональные счетчики в большинстве случаев используются для регистрации α -частиц (счетчики САТ–7, САТ–8). Счетчики наполняются смесью иона с аргоном.

Газоразрядные счетчики. Ионизационные детекторы, в которых используется принцип газового усиления, называются газоразрядными счетчиками. Усиление ионизационного тока происходит за счет явления ударной ионизации. Сущность ударной ионизации заключается в следующем. На электрон, образующийся в пространстве между электродами, к которым приложена большая разность потенциалов, действует сила, равная $F = eE$ (E – напряженность электрического поля). Под действием этой силы скорость электрона увеличивается, а следовательно, увеличивается его кинетическая энергия. На пути своего движения он сталкивается с нейтральными атомами и передает им приобретенную энергию, вызывая тем самым ионизацию. Происходит умножение начального числа ионов (лавинοοбразная вторичная ионизация). Движение положительных ионов электронов к соответствующим электродам вызывает импульс тока в цепи счетчика и, соответственно, импульс напряжения в его электродах. Для гашения разряда внутри счетчика вводятся специальные гасящие примеси (самогасящиеся счетчики). Обычно применяют пары многоатомных спиртов. После гашения разряда процесс повторяется, в счетчик проникает вторая частица ионизирующего излучения, и процесс газового усиления повторяется.

Счетчик Гейгера–Мюллера. Относится к газоразрядным счетчикам. Внутренний объем счетчика наполнен инертным газом при пониженном давлении. При попадании хотя бы одной ядерной частицы в счетчик про-

исходит первичная ионизация газовой среды. Образовавшиеся положительные ионы движутся к катоду — стенке счетчика, а электроны движутся к аноду — нити. Малая площадь анода создает в области нити большую плотность силовых линий, поэтому здесь напряженность электрического поля достигает больших величин. Под влиянием высокой разности потенциалов между электродами и пониженного давления в счетчике электроны, движущиеся к аноду, приобретают большие ускорения и производят ударную вторичную ионизацию. Новые образовавшиеся ионы, в свою очередь, приобретают скорость, при которой они способны вызвать ионизацию. Коэффициент газового усиления может достигать $10^8 - 10^{10}$.

Если во время быстро нарастающей ионизации в счетчик проникает следующая ядерная частица, то она не будет регистрироваться счетчиком, поскольку произведенная ею ионизация уже не изменит имеющейся картины.

Для обнаружения второй ядерной частицы необходимо «погасить» процесс ионизации. В несамогасящихся счетчиках (а к ним относятся и счетчик Гейгера–Мюллера) для гашения используют радиотехническую схему (производят выбор соответствующего внешнего сопротивления, которое намного превышает внутреннее сопротивление счетчика). Такой способ гашения разряда медленный, поэтому счетчик готов к регистрации следующей частицы через время, большее нескольких миллисекунд.

Время, в течение которого счетчик не может зарегистрировать попавшую в него частицу, называется мертвым временем счетчика. Мертвое время газоразрядных счетчиков составляет 10^{-4} с. Время, в течение которого счетчик способен регистрировать частицы (кванты) раздельно, характеризует его разрешающую способность. Самогасящиеся счетчики способны раздельно регистрировать до 10^4 имп/с.

Счетчики Гейгера–Мюллера применяются для регистрации всех видов излучений, но чаще для регистрации электронов, γ -кванты, ввиду их малой ионизирующей способности, обычно не регистрируются (регистрируется один из 100). Для регистрации β -частиц применяются счетчики СТС-5, АС-1 и др; α - и β - частиц – счетчики МТС-17, СБТ-7 и др.

Сцинтилляционный метод. Основан на явлении люминесценции (холодного свечения вещества), которая вызвана ионизацией и возбуждением атомов, когда входящие в их состав электроны переходят на более высокие энергетические уровни и через некоторое время возвращаются в основное состояние.

По составу сцинтилляторы делят на неорганические и органические, а по агрегатному состоянию — на твердые, пластические, жидкие и газовые. Из неорганических сцинтилляторов для регистрации β - и γ -излучений используют йодистый натрий (калий), активированный таллием — $NaJ(Tl)$, $KJ(Tl)$; для регистрации α -излучений — сернистый цинк, активированный

серебром – ZnS (Ag); для регистрации γ -излучений – йодистый цезий, активированный таллием – CsJ (Tl), сернистый кадмий, активированный серебром – CdS (Ag). Применяют также в качестве сцинтилляторов йодистый литий – LiJ , вольфрамат кадмия – $CdWO_4$, а также инертные газы: аргон (Ar), ксенон (Xe), криптон (Kr).

Из органических веществ наибольшее распространение получили такие вещества, как антрацен ($C_{14}H_{10}$), нафталин ($C_{10}H_8$), стильбен ($C_{14}H_{12}$), пластмассы и др.

Сцинтилляционные счетчики обладают большой эффективностью счета – до 100%. С помощью сцинтилляционных счетчиков можно по числу импульсов, возникающих в них в единицу времени, определить активность источника, а по величине тока в электрической цепи – мощность доз излучения. На этом принципе основано действие индивидуальных измерителей доз – ИД-11.

Люминесцентный метод, сущность которого заключается в том, что в твердом теле – люминофоре – под действием ионизирующих излучений происходит накопление поглощенной энергии, которая может быть затем освобождена при дополнительном возбуждении. В зависимости от дополнительного возбуждения различают радиофотолюминесценцию и радиотермолюминесценцию.

Химический метод основан на способности некоторых веществ в результате воздействия излучений распадаться, образуя новые химические соединения. Возбужденные атомы и молекулы диссоциируют, образуя свободные радикалы. Образованные ионы и свободные радикалы вступают в реакции между собой или с другими атомами и молекулами, образуя новые вещества, появление и количество которых позволяет судить о наличии и количестве ионизирующих излучений.

Так, хлороформ в воде при облучении распадается с образованием хлороводородной кислоты, которая дает цветную реакцию с красителем (бромкрезолом пурпурным), добавленным к хлороформу. По интенсивности окрашивания судят о поглощенной дозе излучения. На этом принципе построен химический γ -дозиметр ДП-70М.

Фотографические методы основаны на свойстве ионизирующих излучений воздействовать на чувствительный слой фотоматериалов аналогично видимому свету. Для детектирования обычно применяют рентгеновские пленки, представляющие собой чувствительную эмульсию, нанесенную с одной или с двух сторон на целлулоидную подложку. В состав эмульсии входит бромистое или хлористое серебро, равномерно распределенное в слое желатина.

Под действием ионизирующих излучений бромид серебра распадается на бром и серебро. Образовавшиеся наимельчайшие кристаллы серебра при проявлении фотопластинки вызывают ее почернение. Плотность

почернения пропорциональна поглощенной энергии излучения (поглощенной дозе). Сравнивая плотность почернения с эталоном, определяют дозу излучения (экспозиционную или поглощенную). Плотность почернения фотослоя измеряют с помощью специальных приборов – фотометров или денсиметров.

К числу достоинств этих детекторов можно отнести возможность массового применения для индивидуального контроля доз, возможность совместной и раздельной регистрации дозы от β - и γ -излучений. Недостатки – малая чувствительность пленок, низкая точность, трудоемкость обработки пленок, невозможность повторного использования облученных пленок.

4.3. Дозиметрические приборы

Классификация дозиметрических приборов осуществляется по их назначению, типу датчиков, измерению вида излучения, характеру электрических сигналов, преобразуемых схемой прибора. Почти все современные дозиметрические приборы работают на основе ионизационного метода. Основными узлами приборов являются детекторы излучений, служащие для обнаружения излучений; электрический преобразователь импульсов; измерительные или регистрирующие устройства; источники тока.

В соответствии с функциональным назначением приборы для радиационного контроля можно классифицировать по группам: *дозиметрические, радиометрические, спектрометрические, сигнализаторы, многоцелевые приборы, блоки детектирования, устройства детектирования*. В последние годы появилось еще одно понятие: *функциональные и бытовые приборы*.

Индикаторы – простейшие приборы радиационной разведки, при помощи которых решается задача обнаружения излучения и предварительной оценки мощности дозы (например, РМГЗ-01, СПСС-02, ДП-6У, ИРГ-01, ИМД-21, СЗБ-04, ДРГ-1М и т.п.).

Дозиметры – приборы, измеряющие экспозиционную или поглощенную дозу излучения, или мощность этих доз, интенсивность излучения, перенос энергии и т.п.

Дозиметрические приборы можно подразделить на *индивидуальные дозиметры* (КИД-02, ДКП-50А (в комплектах ДП-22В, ДП-24), ИФКУ-02, ИД-01, ИД-11, химические измерители дозы ДП-70М, ДП-70МП (совместно с полевым калориметром ПК-56М) и т.п.), *дозиметры для измерения дозы* (ДП-22В, ДП-24, ДК-02, ДЭГ-02 и т.п.), *дозиметры для измерения мощности дозы* рентгеновского и гамма-излучения («Кактус», ДРГЗ-02, «Кура», ДРГ-05, ДКС-04, ДП-5В, ДП-3Б, ИМД-1Р, ИМД-21Б, ПМР-01,

«Карагач», ДКС-АТ1121, ДКС-АТ1123 и т.п.). Можно также выделить большую группу *бытовых дозиметрических приборов* для оценки характеристик ионизирующего излучения (РКСБ-04, АНРИ-01, «Сосна», «Рось», «Припять», «Белла» и т.п.).

Все отечественные приборы индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) можно разделить на два вида: *прямопоказывающие* (величина дозы снимается непосредственно со шкалы прибора) и *без шкалы индикации*, показания с которых снимают на специальных устройствах.

По функциональному назначению выделяют следующие группы ИДК: *аварийные* – КДТ, ДК-50, ДКП-50, ИД-11 и т.п.; *технологические* – ДК-02, КИД, ИФК, ИФКУ и т.п.; *для измерения малых доз излучения* – КИД-02, ДК-02, КИД-6 и т.п.

В 1989 году была разработана «Концепция создания и функционирования системы радиационного контроля, осуществляемого населением» (СРКН), в которой признано целесообразным организовать контроль радиационной обстановки самим населением в местах проживания или нахождения. Первыми бытовыми отечественными дозиметрами и радиометрами являются:

- *дозиметр «Рось»* - малогабаритный портативный индикатор гамма-излучения, предназначенный для первичной оценки гамма-фона. Имеет пять уровней световой индикации (0-1,5 мР/ч);

- *радиометр «Припять»* - портативный радиометр, предназначенный для измерения гамма-фона и радиоактивного загрязнения бета-частицами. Может служить индикатором загрязнения продуктов. Соответственно имеет три режима работы;

- *«Десна»* - контроль за гамма-фоном и бета-загрязнением территории. Диапазон измерений от 10 мкР/ч до 2000 Р/ч;

- *дозиметр-радиометр «Белла»* - универсальный бытовой прибор, позволяющий измерять гамма-фон, загрязненность поверхностей и продуктов. Диапазон измерений от 0,2 до 100 мкЗв/ч.

Среди *радиометров* (измерителей радиоактивности) – приборов, с помощью которых получают информацию об активности радионуклида в источнике, потоке ионизирующих частиц или квантов, радиоактивном загрязнении поверхностей (РЖС-05, УСИТ-1Б, РУБ001, РКС-08П, РКБ2-01, РКГ-05П, РИГ2-03, МКС-01Р-01, РКГ-02А/1, РКГ-01А и т.п.).

Спектрометры – приборы, для измерения распределения ионизирующих излучений по энергиям частиц или фотонов (чаще всего использующие блоки детектирования типа БДБСЗ-1еМ, БДЭГ2-22).

Универсальные приборы – совмещают функции дозиметра и радиометра (РМ-1402, СРП-68-01, МКС-01Р-01, РКСБ-104-01 и т.п.), радиометра и спектрометра и т.д.

4.4. Дозиметрический контроль

Дозиметрический контроль – это система мероприятий, организуемых для контроля радиоактивного облучения населения и определения степени радиоактивного загрязнения техники, производственного оборудования, продовольствия, воды и т.д.

Дозиметрический контроль включает контроль облучения и контроль радиоактивного загрязнения.

Контроль облучения проводится с целью своевременного получения данных о поглощенных дозах населения при проведении спасательных работ. По данным контроля устанавливается факт внешнего воздействия ионизирующих излучений, оценивается работоспособность людей и определяются их радиационные поражения с целью определения необходимости лечения в медицинских учреждениях. Контроль облучения, в свою очередь, подразделяется на групповой и индивидуальный.

Индивидуальный контроль проводится с целью получения данных о дозах облучения каждого человека (с помощью индивидуального дозиметра ИД-11), определения степени внутреннего радиоактивного загрязнения. Каждому выдается индивидуальный дозиметр.

Групповой контроль проводится с целью получения данных о средних дозах облучения групп населения, находящихся в одинаковых условиях, и определения их категорий трудоспособности. В этом случае 1–2 дозиметра выдаются на группу в 14–20 чел. В зависимости от полученной дозы и продолжительности облучения устанавливаются следующие категории трудоспособности: трудоспособность полная, трудоспособность сохранена, трудоспособность ограничена, трудоспособность существенно ограничена.

Учет полученных доз ведется в индивидуальной карточке учета доз облучения и в журнале контроля облучения (дозы записываются нарастающим итогом).

Контроль радиоактивного загрязнения проводится для определения степени радиоактивного загрязнения людей (кожных покровов и одежды), а также техники, транспорта, оборудования и других материальных средств. Этот контроль проводится, как правило, при выходе людей из загрязненных районов и при проведении полной специальной обработки.

ГЛАВА V ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

5.1. Понятие о радиационном фоне

Под радиационным фоном принято понимать ионизирующие излучения от природных (естественных) источников космического и земного происхождения, а также от искусственных радионуклидов, рассеянных в биосфере в результате деятельности человека. Радиационный фон обусловлен факторами окружающей среды и не включает облучение лиц, которые работают с источниками ионизирующего излучения, а также излучение, применяемое с диагностическими и лечебными целями.

Различают естественный радиационный фон, искусственный радиационный фон, технологически измененный (повышенный) радиационный фон. Все источники радиационного фона делятся на две основные группы: естественные и искусственные.

Естественный радиационный фон (ЕРФ) является основным компонентом радиационного фона. Источниками ЕРФ являются ионизирующие излучения, которые действуют на человека на поверхности Земли от внешних естественных источников неземного происхождения (космических излучений), внешних естественных источников земного происхождения (присутствующих в земной коре, воде, воздухе), а также от внутренних источников (т.е. радионуклидов естественного происхождения, которые содержатся в организме человека). Большинство естественных источников такое, что избежать облучения от них совсем невозможно. От естественных источников радиации мы получаем 78% облучения.

Человек подвергается облучению двумя способами:

1. Внешнее облучение – облучение от источников радиоактивного излучения, находящегося вне организма. Оно может производиться всеми видами излучения, но практическое значение имеют лишь γ - и рентгеновское излучение, быстрые и медленные нейтроны, β - излучение, α - излучение, ввиду ничтожной проникающей способности, практического значения не имеют.

2. Внутреннее облучение – облучение организма, происходящее от источника радиоактивного облучения (радиоактивного вещества), находящегося внутри организма. Оно продолжается непрерывно до тех пор, пока находящееся в организме радиоактивное вещество не распадется или же не будет выведено из организма. Внутреннее облучение в значительной степени зависит от распределения радиоактивного вещества в организме, от характера излучения (α , β , γ – излучателя), энергии излучения, периода полураспада и периода полувыведения.

Естественный радиационный фон является неотъемлемым фактором внешней среды. В Беларуси он составляет 10 – 20 мкР/ч.

Эволюционное развитие показывает, что в условиях естественного радиационного фона обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности растений, животных и человека.

Естественный радиационный фон на поверхности Земли не является строго постоянной величиной. Его изменения связаны как с глобальными, так и с локальными аномалиями. Они обусловлены циклическими колебаниями космического фона и аналогичных процессов, которые приобрели характер глобальных катастроф.

Там, где близко к поверхности залегают радиоактивные породы, уровень радиации (радиационный фон) значительно выше средних величин, в других местах может быть, соответственно, ниже средних величин.

5.2. Космическое излучение

Это ионизирующее излучение, непрерывно падающее на поверхность Земли из мирового пространства и образующееся в земной атмосфере в результате взаимодействия излучения с атомами воздуха.

Различают первичное и вторичное космическое излучение. Первичное космическое излучение представляет собой поток элементарных частиц, которые приходят на земную поверхность из всемирного пространства. Оно образуется вследствие извержения и испарения материи с поверхности звезд и туманностей космического пространства. Оно состоит из протонов (92%), α -частиц (7%), ядер атомов лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода и др. (1%). Первичное космическое излучение отличается большой проникающей способностью. Космические излучения подразделяются по происхождению на внегалактические, галактические и солнечные.

Большая часть первичного космического излучения возникает в пределах нашей Галактики, энергия их чрезвычайно высокая – до 10^{19} эВ. Солнечное излучение возникает, в основном, при вспышках на Солнце, которые происходят с характерным 11-летним циклом. Энергия их не превышает 40 МэВ. Оно не приводит к заметному увеличению дозы излучения на поверхности Земли. Средняя энергия космических лучей 10^{10} эВ, поэтому они губительны для всего живого. Атмосфера служит своеобразным щитом, предохраняющим биологические объекты от воздействия космических частиц, поэтому лишь немногие частицы достигают поверхности Земли.

При взаимодействии космических частиц с атомами элементов, находящихся в атмосфере, возникает *вторичное космическое излучение*. Оно состоит из мезонов, электронов, позитронов, протонов, нейтронов, γ -квантов, т.е. из практически всех известных в настоящее время частиц.

Первичные космические лучи, врываясь в атмосферу, постепенно те-

ряют свою энергию, растрачивая ее на многочисленные столкновения с ядрами атомов воздуха. Получаемые осколки, приобретая часть энергии первичной частицы, сами становятся факторами ионизации, разрушают и ионизируют другие атомы газов воздуха, т.е. превращаются в частицы вторичного космического излучения.

Вторичное космическое излучение возникает в результате электронно-фотонных и электронно-ядерных взаимодействий. При электронно-фотонном процессе заряженная частица взаимодействует с полем ядра атома, рождая фотоны, которые образуют пары электронов и позитронов. Эти частицы, в свою очередь, вызывают возникновение новых фотонов. Электронно-ядерный процесс обусловлен взаимодействием первичных частиц, энергия которых не менее $3 \cdot 10^9$ эВ, с ядрами атомов воздушной среды. При этом взаимодействии возникает ряд новых частиц — мезонов, протонов, нейтронов. Вторичное космическое излучение увеличивается по мере удаления от земной поверхности.

Интенсивность космического излучения зависит от географической широты и высоты над уровнем моря. Так как космические лучи, в основном, являются заряженными частицами, то в районе над экватором отклоняются в магнитном поле и собираются в виде воронок в районах полюсов. В приполярных областях поверхности Земли достигают и частицы со сравнительно невысокой энергией, а поэтому интенсивность космических излучений на полюсах возрастает за счет этих лучей. В экваториальной области поверхности Земли достигают лишь частицы с максимальными энергиями, способными преодолеть отклоняющее влияние магнитного поля. Средняя мощность дозы космического излучения жителей Земли приблизительно равна 0,3 мЗв/год, а на уровне Лондон–Москва–Нью-Йорк достигает 0,5 мЗв/год.

Вокруг Земли есть области (слои), в которых магнитное поле задерживает огромное количество заряженных частиц и заставляет их двигаться от полюса к полюсу в разных направлениях по замкнутым траекториям. Это так называемые радиационные пояса, или пояса Ван-Аллена. Различают два пояса: внешний и внутренний. Внутренний имеет максимальную плотность частиц, преимущественно протонов, над экватором на высоте около 3500 км, внешний слой — электронный — на высоте около 22000 км. Радиационные пояса Земли являются источником радиационной опасности при космических полетах. Мощность космического излучения зависит также и от высоты над уровнем моря. На больших высотах она выше по причине разряджения атмосферы, т.к. воздух играет роль защитного экрана. Обитаемые области земли, расположенные на высоте 4500 м, испытывают дозу космического излучения до 3 мЗв/год, а на вершине Эвереста (8848 м над уровнем моря) эквивалентная доза достигает 8 мЗв/год.

В среднем интенсивность космических лучей за пределами атмосферы составляет около 2-х частиц на 1см^2 в секунду. Эта величина почти не

зависит от времени года, сезона, суток, т.е. интенсивность их постоянна и не связана с движением Земли вокруг Солнца, вокруг оси, а значит, основная часть космических лучей внесолнечного – галактического происхождения. Но в период максимальной солнечной активности поток космических излучений нарастает. Волновые излучения, возникающие во время вспышек на Солнце, достигают поверхности Земли через 8–15 мин после того, как вспышка на поверхности Солнца становится видимой. Корпускулярные излучения, главным образом протоны и электроны, движутся со скоростью 500–700 км/с и достигают Земли приблизительно через сутки. Каждая вспышка на Солнце влияет на человека, нервные окончания реагируют даже на ничтожные изменения энергии, причем колебания магнитного поля сильно действуют на больных.

5.3. Внешние источники радиации земного происхождения

Внешними источниками излучений являются более 60 естественных радионуклидов, находящихся в биосфере Земли. Естественные радиоактивные элементы содержатся в относительно небольшом количестве во всех оболочках и ядре Земли. Особое значение для человека имеют радиоактивные элементы биосферы, т.е. той части оболочки Земли (лито-, гидро- и атмосфере), где находятся микроорганизмы, растения, животные и человек.

На Земле сохранились, главным образом, элементы с полураспадом, измеряемым миллиардами лет, а также относительно короткоживущие вторичные продукты радиоактивного распада, образующие последовательные цепочки преобразований, так называемые семейства радиоактивных элементов. В земной коре естественные радионуклиды могут быть более или менее равномерно рассеяны или сконцентрированы в виде месторождений.

Все естественные радионуклиды в зависимости от их происхождения можно разделить на 2 категории: радионуклиды земного происхождения и космогенные радионуклиды. **Радионуклиды земного происхождения**, в свою очередь, делятся на 2 группы.

К первой группе относятся элементы, образующие три радиоактивных семейства, – урана, тория, актиноурана и продукты их распада. К ним относятся 32 радионуклида урана – радиевого и ториевого рядов.

Наиболее распространены в земной коре уран и торий. Природный уран, рассеянный в горных породах, относительно редко образует крупные месторождения, но общее его количество на Земле значительно большее, чем серебра или ртути. Природный уран представляет собой смесь трех изотопов: урана–238 (99,28%), урана–235 (0,71%) и урана–233 (0,006 %).

Распадаясь, каждое из названных тяжелых ядер рождает множество промежуточных, также радиоактивных ядер, так что образуется соответствующее семейство. Важнейшими из образованных 45 радионуклидов являются: уран–234, актиний–228, торий–230, радий–226, радон–222, полоний–210 и др. Эти промежуточные продукты, в основном, короткоживущие, встречаются в виде примесей в месторождениях природных радиоактивных элементов. Период их полураспада колеблется от $3 \cdot 10^{-7}$ с ($^{212}_{84}\text{Po}$) до $2,5 \cdot 10^5$ лет ($^{234}_{92}\text{U}$). Конечными продуктами трех семейств являются стабильные изотопы свинца.

Уран и торий в горных породах часто присутствуют вместе, концентрируясь преимущественно в гранитах. Следует заметить, что торий не образует растворимых соединений, а уран образует растворимые в сернокислых водах соединения. Торий и уран представляют собой перспективный материал для атомной промышленности.

Запасы тория во много раз больше, чем урана–235.

Ко второй группе естественных радионуклидов земного происхождения принадлежат радионуклиды, не входящие в радиоактивные семейства, 11 долгоживущих радионуклидов: калий–40 с периодом полураспада $1,31 \cdot 10^9$ лет, кальций–48 – $2 \cdot 10^{16}$ лет, рубидий–87 – $6,15 \cdot 10^{10}$ лет и др. Наиболее распространенным является рубидий–87. Он составляет 27,8% природного элемента, но энергия его излучений небольшая (β -частиц – 0,394 МэВ). Рубидий – антагонист калия. В некоторых растениях он накапливается в значительном количестве, например, 1л виноградного сока содержит 1 мг рубидия.

Калий является очень распространенным в литосфере – земной коре толщиной 15–70 км и в биосфере. Он является типичным биологическим элементом. Природный калий состоит из трех изотопов (^{39}K , ^{40}K , ^{41}K), из которых только калий–40 радиоактивен. В земной коре содержится 2,6% калия. В свободном виде не встречается, так как очень химически активен. Калий–40 вносит значительный вклад в радиационный фон. Эквивалентная доза за счет калия–40 составляет 0,3 мЗв/год, от внешнего облучения – 0,12 мЗв/год, а внутреннего – 0,18 мЗв/год).

Космогенные радионуклиды образуются в результате ядерных реакций протонов и нейтронов, входящих в состав первичного и вторичного космического излучения, с ядрами элементов воздуха (N , O , Ar и др.). К космогенным радионуклидам относятся 14 изотопов – тритий, дейтерий, бериллий–7, углерод–14, углерод–13, натрий–22, фосфор–32, фосфор–33, хлор–35 и др.

Нижеприведенные примеры свидетельствуют об этом.



Полученные углерод-14 и тритий являются космогенными радионуклидами, поступаая в организм, они являются источниками внутреннего облучения. Бериллий-7, натрий-22,24 относятся к источникам внешнего облучения.

5.4. Искусственная радиоактивность

Ядра стабильных элементов можно бомбардировать также нейтронами. В настоящее время известно свыше 900 радионуклидов, получаемых искусственным путем. Особенно много искусственных радионуклидов получают в ядерных реакторах, в т.ч. и реакторах АЭС. Большинство из них являются α -излучателями и имеют большие периоды полураспада.

Искусственные радионуклиды появились в связи с деятельностью человека. Они подразделяются на три группы.

К первой группе относятся радиоактивные продукты ядерного деления. Они возникают при реакциях деления ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и т.д., которые происходят в результате действия на них нейтронов. Источники этой группы радионуклидов в атмосфере – испытания ядерного оружия, работа предприятий ядерного топливного цикла и атомной промышленности – ядерно-энергетические установки, радиохимические заводы и т. д. При ядерных взрывах образуется около 250 изотопов 35 элементов. К радиоактивным продуктам деления (РПД) относятся ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{133}Xe и многие другие. Период полураспада РПД от нескольких секунд до нескольких десятков лет.

Большинство образующихся радионуклидов являются β - и γ -излучателями ^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba , остальные испускают или только β -частицы – ^{90}Sr , ^{135}Cs , или α -частицы – ^{144}Nd , ^{147}Sm .

Вторую группу составляют радиоактивные трансурановые элементы, возникающие в ядерно-энергетических установках и при ядерных взрывах в результате последовательных ядерных реакций с ядрами атомов делящегося вещества и последующего радиоактивного распада образующихся сверхтяжелых ядер. К этим радионуклидам относятся ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{243}Cm и др. В основном они α -активны, характеризуются очень большим периодом полураспада, отсутствием стабильных изотопов.

К третьей группе относятся продукты наведенной радиоактивности, образующиеся в результате ядерных реакций элементарных частиц. Нейтроны, образующиеся при цепной реакции деления урана или плутония, воздействуют на ядра стабильных элементов окружающей среды, превращая их в радиоактивные (реакция активации). К этим радионуклидам относятся ^{45}Ca , ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{29}Al , ^{31}Si , ^{65}Zn , ^{54}Fe и др. Большая часть их распадается с испусканием β -частиц и γ -излучения.

Основными компонентами, составляющими **искусственный радиационный фон** (ИРФ), являются:

1. Глобальные выпадения искусственных радионуклидов, связанные с испытанием ядерного оружия. В мире было проведено более 400 ядерных испытаний. Это привело к глобальному повышению облучения населения Земли. Большая часть радионуклидов попадает в стратосферу, где они остаются на многие месяцы, и даже годы, медленно опускаясь и рассеиваясь по всей поверхности земного шара. Это приводит к изменению радиационного фона в различных точках земного шара, удаленных на десятки тысяч км от места взрыва. При ядерных взрывах в окружающую среду поступают радионуклиды деления, неразделившаяся часть ядерного заряда, нейтроны. Образуется также наведенная радиоактивность.

Воздействие на человека радиоактивных выпадений включает β - и γ -облучение за счет радионуклидов, присутствующих в приземном воздухе и выпавших на поверхность земли; за счет загрязнения радионуклидами кожных покровов и одежды; за счет внутреннего облучения от попавших в организм радионуклидов с вдыхаемым воздухом, пищей, водой.

2. Загрязнения локального, регионального и глобального характера, обусловленные неаварийными выбросами АЭС и радиоактивными отходами, и особенно при авариях на АЭС. При работе ядерных реакторов, как и при ядерных взрывах, образуется большое количество радионуклидов – продукты деления ^{235}U , ^{239}Pu . Основная масса продуктов деления задерживается и остается непосредственно в топливной композиции. Радиоактивные отходы могут быть в виде газов, аэрозолей, жидкостей и в твердом виде. Для задержки газоаэрозольного выброса АЭС устанавливаются фильтры, используются камеры выдержки, радиохроматографические системы. Газоаэрозольный выброс – поступление радиоактивных веществ в вытяжную трубу высотой 100–150 м. Рассеиваясь в атмосфере, они образуют облако выброса. При движении облака в атмосфере происходит облучение людей β - и γ -излучением. Аэрозольные частицы, выпадая из облака, оседают на местности и мигрируют в окружающей среде. Часть радионуклидов, поступивших с пищей, обуславливает внутреннее облучение. Если в оболочке тепловыводящих элементов (ТВЭЛов) образуются дефекты, то продукты деления могут поступать в теплоноситель. Жидкие отходы могут попасть в реки и озера.

При работе предприятий урановой промышленности возможно загрязнение окружающей среды радионуклидами на каждом из этапов производства – добыча, переработка, обогащение урана, приготовление ядерного топлива. На рудниках окружающая среда загрязняется радионуклидами семейства урана–235, в основном радоном и продуктами его распада. Отвалы бедных руд вблизи обогатительных фабрик также являются источником эмиссии в атмосферу радона и продуктов его распада. При регенерации ядерного топлива на радиохимических заводах в выбросах могут

быть ^3H , ^{14}C , ^{137}Cs и др.

3. Использование открытых источников ионизирующих излучений в промышленном производстве, сельском хозяйстве, в научно-исследовательских учреждениях, медицине и т.д. Радиоактивные изотопы широко применяются в промышленности.

Широкое применение нашли радионуклиды в медицине. С их помощью диагностируют состояние отдельных органов – печени, легких, щитовидной железы и т.д. с применением ^{32}P , ^{57}Ce , ^{131}I , ^{133}Xe и др. Их используют для диагностики и лечения опухолей. С этой целью в организм вводят ^{131}I , так как обмен веществ в опухоли происходит быстрее, чем в здоровых тканях, радионуклид йода быстрее накапливается в опухоли.

Нашли применение радионуклиды и в сельском хозяйстве. Облучение семян повышает их всхожесть и урожайность. Применяют излучения также для дезинсекции зерна, консервации сельхозпродуктов. Радиоактивные вещества применяются и в археологии, геологии, геохимии и в др. отраслях.

5.5. Характеристика основных естественных и искусственных радионуклидов

Уран. Природный уран состоит из смеси трех изотопов: урана–234, урана–235, урана–238. Искусственные радиоактивные изотопы – с массовыми числами 227–240. Период полураспада урана–235 – $7 \cdot 10^8$ лет, урана–238 – $4,5 \cdot 10^9$ лет. При распаде урана и дочерних радионуклидов испускаются α -и β -излучения, а также γ -кванты. Проникает уран в организм разными путями, в том числе и через кожу. Растворимые соединения быстро всасываются в кровь и разносятся по органам и тканям, накапливаясь в почках, костях, печени, селезенке. Биологический период полувыведения из легких – 118–150 суток, из скелета – 450 суток. За счет урана и продуктов его распада годовая эквивалентная доза составляет 1,34 мЗв.

Торий. Торий–232 – инертный газ. Продукты его распада – твердые радиоактивные вещества. Период полураспада – $1,4 \cdot 10^{10}$ лет. При превращениях тория и продуктов его распада выделяются α - и β -частицы, а также γ -кванты. В минерале ториянит содержится до 45–88% тория. Из сплава тория с обогащенным ураном изготавливаются ТВЭЛы. В организм поступает через легкие, желудочно-кишечный тракт, кожу. Накапливается в костном мозге, селезенке. Биологический период полувыведения из большинства органов – 700 суток, из скелета – 68 лет.

Радий. Радий–226 является важнейшим радиоактивным продуктом распада урана–238. Период полураспада 1622 года. Это серебристо-белый металл. Широко применяется в медицине в качестве источника α -частиц для лучевой терапии. Поступает в организм через органы дыхания, желу-

дочно-кишечный тракт и кожу. Большинство поступившего радия депонируется в скелете. Биологический период полувыведения из костей около 17 лет, из легких – 180 дней, из других органов выводится в первые двое суток. При попадании в организм человека вызывает повреждение костной ткани, красного костного мозга, что приводит к нарушению состава крови, переломам, образованию и развитию опухолей. В течение одних суток 1 г радия дает при распаде 1 мм³ радона.

Радон. Радон-222 – бесцветный газ без запаха. Период полураспада 3,83 суток. Продукт распада радия-226. Радон – α – излучатель. Он образуется в месторождениях урана, в радиоактивных рудах, содержится в газе, грунтовых водах и т.д. Может выходить и по трещинам горных пород, в плоховентилируемых шахтах, рудниках его концентрация может достигать больших величин. Радон встречается во многих строительных материалах. В атмосферу поступает также при вулканической деятельности, при производстве фосфатов, работе геотермальных энергетических станций.

В лечебных целях применяется в виде радоновых ванн при лечении заболеваний суставов, костей, периферической нервной системы, хронических гинекологических заболеваний и др. Применяется также в виде ингаляций, орошений, приема внутрь воды, содержащей радон. В организм поступает, в основном, через органы дыхания. Период полувыведения из организма в пределах суток. Радон дает $\frac{3}{4}$ годовой эквивалентной дозы земных источников облучения и около $\frac{1}{2}$ дозы от всех естественных источников радиации.

Калий. Калий-40 – серебристо-белый металл, в свободном виде не встречается, так как очень химически активен. Период полураспада $1,32 \cdot 10^9$ лет. При распаде излучает β – частицы. Является типичным биологическим элементом. Потребность человека в калии — 2–3 мг на кг веса в сутки. Много калия содержится в картофеле, свекле, помидорах. В организме всасывается 100% поступившего калия, распределяется равномерно по всем органам, относительно больше его в печени, селезенке. Период полувыведения около 60 суток.

Йод. Йод-131 образуется в реакциях деления урана и плутония, а также при облучении теллура нейтронами. Период полураспада 8,05 дней. Поступает в организм через органы дыхания, желудочно-кишечный тракт (всасывается 100% поступившего йода), кожу. Накапливается, в основном, в щитовидной железе, концентрация его в железе в 200 раз выше, чем в других тканях. Распадаясь, йод выделяет β –частицу и 2 γ –кванта. Период полувыведения из щитовидной железы 138 дней, из других органов 10–15 суток.

Цезий. Цезий-137 – щелочной металл серебристо-белого цвета, мягкий, тягучий. В воздухе мгновенно воспламеняется. В почвах, бедных калием, он закрепляется прочно, а в почвах, богатых органикой, хорошо усваивается корневой системой, легко распространяется в самих растениях.

Накапливается в организме человека и животных. Цезия много в зерне, стеблях картофеля, зелени и других растениях. В организм человека поступает через желудочно-кишечный тракт и свободно циркулирует по всему телу. Основная часть этого элемента накапливается в мышцах (около 80%). Период биологического выведения из организма взрослого человека до 3-х месяцев, у детей – от 20 до 50 суток. Цезий-137 – бета-излучатель. Период полураспада 30,2 года. распадается с испусканием двухкомпонентного бета-спектра, максимальная энергия которого составляет $E = 0,5 \text{ МэВ}$. Этому излучению сопутствует гамма-излучение, испускаемое дочерним радиоактивным барием с энергией $E = 660 \text{ КэВ}$, а также рентгеновские лучи с энергией $E = 36 \text{ КэВ}$.

При попадании в организм приводит к заболеваниям органов дыхания и нервной системы, вызывает подавление системы кроветворения, приводит к заболеваниям сердечно-сосудистой и костно-мышечной системы, а также органов пищеварения и эндокринной системы. Иногда может привести к злокачественным новообразованиям.

Стронций. Стронций-90 – серебристо-белый металл, лёгкий, ковкий, пластичный. Является бета-излучающим элементом с периодом полураспада 28,1 года. Стронция много в зерне, молоке, зелени и других растениях. Основная часть этого элемента накапливается в костях, в большей степени откладывается в молодых. Период биологического полувыведения составляет около 20 лет. Вследствие этого стронций-90 является более опасным радионуклидом по сравнению с цезием-137 и приводит к различным видам заболеваний.

Плутоний. Плутоний-239 является α -излучателем. Металл серого цвета. Период полураспада 24 400 лет. Обладает также и слабым гамма-излучением. Особенно опасен при попадании в органы дыхания, желудочно-кишечный тракт и на кожу. При дефиците кальция избирательно накапливается в костях. При попадании в кровеносное русло задерживается в печени. Как и стронций-90, очень трудно выводится из организма. Плутоний-239 выпал только в Брагинском, Светлогорском и Рогачёвском районах. Вследствие того, что плутоний-239 является альфа-излучателем, он при попадании в организм человека вызывает лейкемию, рак печени, молочной железы и т.д.

Америций. Америций-241 – продукт распада плутония-241 (период полураспада ^{241}Pu составляет – 14,4 года). Период полураспада америция-241 составляет 432,2 года, при распаде выделяется α - частица. Америций растворяется в воде значительно лучше плутония, а поэтому отличается большей миграционной способностью. Накапливается до 99% на поверхностных слоях почвы, 10% америция находится в растворенной форме и легко усваивается растениями. Концентрируется у человека в скелете, печени, почках. Период полувыведения из скелета – до 30 лет, из печени – до 5 лет.

ГЛАВА VI РАДИОИЗОТОПЫ И БИОСФЕРА

6.1. Поведение радионуклидов в почве

Радиоактивные вещества, находящиеся в верхних слоях атмосферы, многократно огибают землю, постепенно концентрируются между тридцатым и пятидесятым градусами широты в северном и южном полушариях независимо от географического положения места их образования. Газообразные легкие радионуклиды дольше находятся в атмосфере – один–два года и более. Большинство радионуклидов концентрируются в нижних слоях атмосферы и находятся в аэрозольном и газообразном состоянии.

Решающую роль в очищении атмосферы выполняют осадки. Оседание радионуклидов на растительный покров происходит и без осадков в результате турбулентного движения воздушных потоков в атмосфере. Возможно поступление радионуклидов в почву после их сброса в гидрографическую сеть с паводковыми водами, при орошении полей и т.д.

Попадая на поверхность земли, радиоактивные изотопы участвуют в биологическом круговороте в системе почва – растения – животные – человек. Под **миграцией радионуклидов** в почве понимается совокупность процессов, приводящих к перемещению радионуклидов в почве и перераспределению их по глубине.

Миграция радиоактивных веществ при их попадании в почву зависит от ряда условий: физико–химических свойств изотопов; физико–химических свойств почвы (типа почвы); характера движения грунтовых вод; кислотности среды; климатических условий; времени нахождения радионуклидов в почве и т.д. К движущим силам, приводящим к миграции радионуклидов в почвах, относятся:

- конвективный перенос (фильтрация атмосферных осадков в глубь почвы, капиллярный подток влаги к поверхности в результате испарения, термоперенос влаги под действием градиента температуры);
- диффузия свободных и адсорбированных ионов;
- перенос по корневым системам растений;
- перенос на мигрирующих коллоидных частицах (лессиваж);
- роющая деятельность почвенных животных;
- хозяйственная деятельность человека;
- ветровая эрозия почвы.

Попадая на поверхность почвенного покрова, радионуклиды поглощаются почвами. Поглощение радионуклидов определяется процессами распределения между двумя основными фазами почвы – твердой и жидкой (почвенным раствором) и осуществляется, в основном, за счет процессов сорбции–десорбции радионуклидов, осаждения–растворения труднорастворимых соединений и коагуляции коллоидов.

Различные почвы обладают разной емкостью поглощения радионуклидов. Высокой емкостью поглощения обладают черноземы, глинистые почвы, сорбционная способность которых обусловлена наличием гумуса. Поглощительная способность дерново-подзолистых, песчаных почв значительно меньшая. Некоторые изотопы, например стронций и цезий, могут переходить из обменной формы в необменную благодаря включению их в кристаллическую решетку почвенных минералов и солей: фосфатов, сульфатов и других малорастворимых соединений.

Миграция радионуклидов в глубь почвы протекает крайне медленно. Основная масса радионуклидов до сих пор находится в 10-сантиметровом слое почвы, а на пашне – в пахотном горизонте. В ближайшие 20–25 лет самоочищения почв в результате миграции радионуклидов в нижележащие горизонты не произойдет.

6.2. Нуклиды и растительный мир

Накопление радионуклидов растениями из почвы зависит от комплекса факторов: физико-химических свойств радионуклидов; агрохимической характеристики почвы; биологических особенностей растений; агротехники возделывания культур; климатических условий.

Радиоактивные изотопы, находящиеся в почве, как правило, переходят в корневую систему растений аналогично стабильным изотопам тех же элементов. Из песчаных легких почв радионуклиды поступают в растения значительно легче, чем из тяжелых глинистых почв. Чем сильнее радионуклид фиксируется в почве, тем меньшее его количество попадает в растения. Так, например, овес, выращенный на песке, накапливает стронция-90 в несколько раз больше, чем овес, выращенный на суглинке. При этом из глинистого песка поступает 8–10%, а из тяжелых суглинков – всего 1% от всего стронция-90, попавшего в почву. Растения могут накапливать различные изотопы из почвы, например: стронций, йод, барий, цезий, рубидий, церий, цирконий, плутоний. При одинаковой плотности загрязнения почвы стронцием и цезием концентрация стронция в грубых кормах в 40–50 раз выше, чем цезия. Такие изотопы, как стронций и цезий, легко проникают через корневую систему во все органы растений. Другие же радионуклиды – церий, цирконий, плутоний – накапливаются, в основном, в корневой системе растений.

Многолетние луговые травы могут накапливать большее количество радиоактивных веществ по сравнению с однолетними сельскохозяйственными культурами. В лесной зоне наибольшей способностью задерживать радиоактивные вещества обладают хвойные породы деревьев, что связано с медленной сменой игл. Имеются так называемые растения —

концентраторы: лишайники, мхи, грибы, бобовые, злаки, которые способны интенсивно захватывать радиоактивные вещества, усваивая их с большой площади. Стронций-90 в 2–6 раз интенсивнее поглощается бобовыми культурами, чем злаковыми. Наиболее интенсивно идет накопление радионуклидов в листьях и стеблях и значительно слабее в генеративных органах растений. Например, в созревших растениях фасоли стронций-90 распределяется следующим образом: в листьях 53–68%, в стеблях 15–28%, створках бобов 12–15%, в зерне 7–14%. Озимые культуры накапливают радионуклиды в меньших количествах, чем яровые. По количеству цезия-137 от меньшего к большему растения можно расположить в ряд: пшеница < ячмень < горох < гречка < овес < фасоль < картофель < морковь < свекла < бобы. Грибы накапливают радионуклиды на 1–2 порядка больше, чем их концентрация в почве. По накоплению цезия-137 в плодовых телах грибы делятся на 4 группы:

- слабонакапливающие (опенок осенний, строчок);
- средненакапливающие (подберезовик, белый гриб, лисичка, шампиньон, рядовка);
- сильнонакапливающие (груздь черный, рыжик, сыроежки всех видов);
- аккумуляторы (гриб июльский, масленок, волнушка, козляк, моховик).

В шляпках грибов накапливается цезия-137 в 1,5–3 раза больше, чем в ножках.

Из дикорастущих ягод сильнее всего концентрируют радионуклиды клюква, малина, черника, земляника (самая «чистая»). По накоплению цезия-137 ягоды располагаются в убывающем порядке: черника, голубика, брусника, клюква, земляника. Содержание радионуклидов на приусадебном участке в ягодах меньше, чем в лесу. Красная и черная смородина накапливает радионуклиды, крыжовник является наиболее «чистым».

Повышенное содержание стронция и цезия характерно для ароматической столовой зелени: в укропе, петрушке, шпинате и особенно в шавеле. Лук, капуста, свекла накапливают радионуклидов меньше, чем огурцы, томаты, морковь.

По накоплению стронция-90 древесными растениями установлен следующий убывающий ряд: осина, береза, ольха, ель, сосна, дуб. Береза поглощает из почвы цезия-137 в 2–18 раз, а стронция-90 – в 13 раз больше, чем сосна.

При отмирании травянистой и древесной растительности, а также с пожнивными остатками радионуклиды возвращаются в процессы миграции.

6.3. Аэрозольное загрязнение растений

Радиоактивное загрязнение растений происходит при оседании на их надземной части компонентов аэрозольных и газообразных выбросов.

Оседание радионуклидов на растительный покров происходит под влиянием гравитационных сил, а также под действием метеорологических факторов (дождей, тумана, снега). Кроме того, оседание радионуклидов происходит и при турбулентном движении воздушных масс в атмосфере. Значительную роль в аэральном загрязнении растений играют подъем и вторичное загрязнение растений радиоактивными частицами, осевшими на почву, или частицами загрязненной почвы. Наиболее важными факторами, влияющими на ветровую эрозию почв, являются скорость движения воздуха у поверхности почвы, турбулентность (хаотическое движение), плотность, температура, давление, влажность и вязкость воздуха; структура, плотность и влажность почвы и т.д.

Оседа на наземных частях растений, одни радионуклиды прочно сорбируются, другие смываются дождем, сдуваются ветром, третьи проникают в растения и участвуют в обмене веществ в процессе их роста и развития. Задержание растениями радиоактивных веществ, выпадающих из атмосферы, зависит от физических свойств осадков в виде частиц, паров, росы, тумана, дождей, дисперсности выпавшего материала и скорости роста растений. Задерживание радионуклидов при попадании на посевы в растворимой форме колеблется от 8 до 90%. Осевшие из воздуха и задержанные на поверхности листьев и стеблей радионуклиды могут находиться как в свободном, так и в сорбированном виде. На сорбцию задержанных растениями радионуклидов оказывают влияние температура и влажность воздуха, особенности строения поверхности листьев, солевой состав и pH раствора, содержащего радионуклиды, наличие или отсутствие защитной поверхности слоя.

Передвижение радионуклидов в органы, не подвергшиеся прямому загрязнению, определяется как физико-химическими свойствами радионуклидов, так и биологическими особенностями растений. Стронций-90, рубидий-106, церий-144 передвигаются из листьев в другие органы растений в 100 раз медленнее, чем цезий-137. Сначала радионуклиды проникают во внутреннюю структуру в месте соприкосновения, а затем перемещаются в другие органы растений. Перенос радионуклидов в продуктивные части растений зависит от их возраста и физиологического состояния тканей, на которые они попали. Передвижение радионуклидов из старых листьев идет интенсивнее, чем из молодых.

6.4. Поступление радионуклидов в организм гидробионтов

При поступлении радиоактивных веществ в воду открытых водоемов в первую очередь отмечается их разбавление, поглощение дном и тканями обитателей водной среды (гидробионтов). Эффективность процесса разбавления в реках и закрытых водоемах неодинаковая (в реках большая).

Накопление радионуклидов гидробионтами происходит в результате адсорбции и диффузии, поступления радионуклидов через органы дыхания и пищеварения. Среди обитателей водоемов существуют организмы-концентраторы, которые активно поглощают радионуклиды. Некоторые гидробионты концентрируют их в десятки тысяч раз больше в сравнении с содержанием радионуклидов в воде. Это водоросли, планктон, моллюски, ракообразные и другие донные организмы. Большая удельная поверхность тела у планктона, губок и некоторых других гидробионтов создает условия для адсорбции ими значительного количества радионуклидов. Например, дафния накапливает 50–60% от предельного накопления радиоактивного стронция в течение всего лишь 5 мин. В последующем накоплении принимают участие и обменные процессы. Время, необходимое для максимального накопления радиоактивных веществ зоопланктоном, составляет несколько часов. У водных растений процесс накопления более медленный. Предельное накопление в водорослях происходит в течение 7–30 суток.

У рыб основным путем поступления радионуклидов является поступление через органы пищеварения. Поэтому в данном случае существенное значение имеют уровни загрязнения низших организмов, являющихся кормом для рыб. Радиоактивные изотопы проникают в организм рыб также через жабры. Время предельного накопления радиоизотопов в теле рыб колеблется от 10 до 120 дней. У хищных рыб накапливается радионуклидов меньше, чем у питающихся планктоном.

При снижении удельной активности воды имеет место выведение накопленных радионуклидов из организма гидробионтов. В среднем на протяжении 10 дней нахождения в чистой воде планктон и водоросли теряют 95–97% от общего количества накопленных радионуклидов. Выведение радионуклидов из тканей рыб происходит с меньшей скоростью. Например, стронций—90 даже через 3 месяца пребывания рыбы в чистой воде находится в ее мышцах до 10% накопленного количества, а в костях — до 50% первоначального уровня.

6.5. Действие излучений на растения

В зависимости от дозы облучения и фазы развития растений в момент воздействия излучений у вегетирующих растений наблюдается значительная вариация изменений обменных процессов. Реакция растительных объектов на действие γ - и рентгеновского излучения проявляется в виде активации или подавления ростовых процессов, что вызывает изменение темпов клеточного деления.

У злаковых культур, подвергшихся облучению дозами 20–30 Гр, наблюдается торможение роста главного побега в высоту, а затем, вследствие активации покоящихся центров, начинается рост боковых побегов, что выражается в мощном кущении. Причем кустистость пшеницы может повыситься в 3 раза. Хроническое облучение может привести к увеличению вегетативной массы к моменту уборки почти в 6 раз.

При действии повреждающих доз излучений в растениях возникают различные морфологические аномалии. Так, в листьях происходит увеличение или уменьшение количества и размеров, изменение формы, скручиваемость, ассиметричность, утолщение листовой пластинки, опухоли, появление некротических пятен. При поражении стеблей наблюдается замедление или ускорение их роста, нарушается порядок расположения листьев, изменяется цвет, появляются опухоли и воздушные корни. Наблюдается также угнетение или ускорение роста корня, расщепление главного корня, отсутствие боковых корней, появление вторичного главного корня, опухоли. Происходит также изменение цветков, плодов, семян – ускорение или задержка цветения, увеличение или уменьшение количества цветков, изменение цвета, размеров и формы цветков; увеличение или уменьшение количества плодов и семян, изменение их цвета и формы и т.д.

В ряде случаев действие больших доз облучения на растения повышает темпы развития вследствие активации процессов старения — растение быстрее зацветает и созревает. Разнообразны и генетические повреждения. В результате мутаций, например у пшеницы, встречаются высокорослые, низкорослые, карликовые формы, растения с ветвящимися или стелющимся стеблями. При больших дозах возможна гибель растений.

При действии излучений в невысоких дозах, порядка 5–10 Гр для семян и 1–5 Гр для вегетирующих растений, наблюдается так называемая радиостимуляция – ускорение темпов роста и развития растений. Стимуляция наблюдается при действии γ -, β - и рентгеновских излучений, но при действии α - излучений стимуляции не наблюдается.

При действии больших доз уменьшается не только количество зерна в урожае, но заметно изменяется и его качество – обычно зерно оказывается шуплым.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что реакция растений на действие излучений сложна и разнообразна. Процессы, происходящие на молекулярном и клеточном уровне, в целом сходны у всех живых организмов. На более высоких уровнях организации проявляются только характерные для растений изменения, зависящие от особенностей структуры и функций различных тканей и органов растительного мира.

6.6. Действие излучений на животных

Интенсивность и величина всасывания радионуклидов в желудочно-кишечный тракт (ЖКТ) зависят от химической формы соединения, в котором находится радионуклид, и его физико-химических свойств. Коэффициент всасывания различных радионуклидов отличается у разных животных. Такие радионуклиды, как йод-131, цезий-137, тритий, всасываются в ЖКТ полностью, стронций-90 всасывается на 6–16%. Всасывание зависит от возраста животных, но у молодых особей всасывание в несколько раз больше.

Радионуклиды, всосавшиеся в ЖКТ, поступают в кровь, распределяются в компонентах ее сыворотки и форменных элементов. Распределение радионуклидов в органах и тканях животных определяется их видом, возрастом, длительностью поступления радиоактивных веществ в организм и другими факторами. Существует несколько основных типов распределения радионуклидов в организме: равномерный – ^3H , ^7Li , ^{23}Na , ^{40}K , ^{85}Rb , ^{137}Cs ; скелетный – ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{226}Ra ; печеночный – ^{238}U , ^{125}Sb , ^{76}As , ^{75}Se ; тиреотропный – ^{131}I , ^{221}At .

Выводятся радионуклиды из организма животных с характерным для каждого изотопа периодом полувыведения. Наиболее быстро выделяются радионуклиды из мягких тканей. Период полувыведения цезия-137 составляет от 3 до 46 суток, а период полувыведения стронция-90 из скелета животных составляет более 3000 суток. Биологические эффекты действия радиации на животный мир изучены недостаточно. Известно, что очень высокие дозы приводят к гибели млекопитающих, а малые – к заболеваниям, генетическим изменениям, половым расстройствам, неспособности к воспроизведению, выкидышам. Биологические эффекты, происходящие в клетках, подразделяются на 2 группы: стохастические и нестохастические.

Стохастические эффекты признаются беспороговыми и могут наблюдаться в клетках животных после минимальных доз облучения. К ним относятся репродуктивная гибель клетки, возникновение генных мутаций, появление хромосомных aberrаций, злокачественная трансформация клетки.

Нестохастические эффекты имеют пороговую дозу, ниже которой изменения отсутствуют. К нестохастическим реакциям относятся ра-

диационная задержка и стимуляция деления клеток, снижение синтеза ряда веществ, пострadiационное разрушение ДНК, изменение проницаемости биологических мембран, нарушение обмена кальция и функционирования ферментативных систем.

Негативное влияние γ -излучений на воспроизводительную функцию сельскохозяйственных животных и качество потомства определяется, в основном, поражением эмбриона в период дифференцировки органов, а также семяродного эпителия яичек и яичников родителей.

По клиническому проявлению, характеру течения и исходу заболевания при общем облучении различают острую и хроническую лучевую болезнь. При облучении в больших дозах развивается острая лучевая болезнь (ОЛБ). Различают три основные формы ОЛБ: церебральную, кишечную и костномозговую. В развитии и течении ОЛБ выделяют четыре периода: начальный, или период первичных реакций; латентный, или скрытый – период кажущегося благополучия; период выраженных клинических признаков или период разгара болезни; период восстановления с полным или частичным выздоровлением.

В течении хронической лучевой болезни (ХЛБ) выделяют три степени тяжести: легкую, среднюю и тяжелую. Легкая степень характеризуется функциональными нарушениями органов и систем, т.е. функция может быть повышена или понижена. При средней степени отмечают признаки морфологического повреждения наиболее радиочувствительных тканей. При тяжелой степени наблюдаются выраженная гипоплазия костного мозга, резкая лейко- и тромбоцитопения, анемия, дистрофические изменения в органах и инфекционные осложнения. ХЛБ развивается у крупного рогатого скота после однократного введения йода-131 в концентрации $(0,9-2) \cdot 10^9$ Бк/кг массы животного, перорального введения в течение 8 лет стронция-90 в концентрации $7,4 \cdot 10^6$ Бк/кг массы животного. Из местных поражений возможно радиоактивное загрязнение кожного покрова с развитием β -ожогов кожи. По тяжести поражения различают четыре степени: легкую, среднюю, тяжелую и крайне тяжелую.

ГЛАВА VII БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

7.1. Действие ионизирующих излучений на биологические объекты

Все виды ионизирующих излучений обладают *биологическим действием*, т.е. вызывают изменения в клетках, тканях, органах и организме в целом. *Физическое действие* радиации начало изучаться только в конце XIX столетия, а ее биологические эффекты – в середине XX века. Первые же месяцы работы с ионизирующими излучениями привели к радиационным поражениям. Уже в 1895 году помощник Рентгена В.Груббе получил радиационный ожог – эритему. Повреждающее действие излучения радия на кожу испытали А.Беккерель и П.Кюри. По-видимому, так зарождалось новое научное направление – *радиобиология*. Биологические эффекты влияния радиации на организм человека обусловлены взаимодействием энергии излучения с биологической тканью. Энергию, непосредственно передаваемую атомам и молекулам биотканей, называют *прямым действием радиации*. Кроме прямого ионизирующего облучения, выделяют также *косвенное* или *непрямое действие*, связанное с радиолизом воды и образованием свободных радикалов.

Основным признаком свободных радикалов являются избыточные или неспаренные электроны. Такие электроны легко смещаются со своих орбит и могут активно участвовать в химических реакциях. Важно то, что весьма незначительные внешние изменения могут привести к существенным изменениям биохимических свойств клеток. К примеру, если обычная молекула кислорода захватит свободный электрон, то она превращается в высокоактивный свободный радикал – супероксид. Таким образом, биологическое действие ионизирующего излучения условно можно подразделить на:

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

Считается, что в основе первичных радиационно-химических изменений молекул могут лежать два механизма: *прямого* и *косвенного* воздействия радиации. При прямом воздействии молекула испытывает изменения (ионизация, возбуждение и т.п.) непосредственно при взаимодействии с излучением. Этот факт был положен в основу общей теории биологического действия излучений, так называемой «теории мишени». При этом предполагалось, что в клетке существуют особо чувствительные к излучению структуры, так называемые «мишени». Попадание ионизирующих частиц в

«мишень» приводит к гибели клетки. Первоначально понятие «мишени» не связывалось с конкретными структурными образованиями клеток. Мишенью считали определенный объем вещества, удар по которому ведет к гибели объекта.

При косвенном воздействии молекула непосредственно не поглощает энергию ионизирующего излучения, а получает ее путем передачи от другой молекулы. Сущность теории косвенного воздействия ионизирующего излучения сводится к тому, что под действием излучения в организме образуются *радикалы* и *окислители*, вступающие в реакцию с молекулами белка, ферментов и других жизненно важных веществ. При этом образуются радиотоксины, нарушающие нормальный цикл биохимических реакций и вызывающие поражающее действие. При косвенном воздействии наиболее существенным является процесс радиолиза воды, т.к. 60–70% массы тела составляет вода, а в плазме крови ее содержится до 95%.

Поскольку основными структурными элементами организма являются клетки, то в них процесс облучения протекает значительно сложнее, чем, например, в воде, так как поглощающим веществом здесь служат крупные органические молекулы, повреждаемые прямым действием радиации либо продуктами радиолиза воды. Разрушение структуры даже одной из клеток может привести к далеко идущим последствиям. Однако даже самый простой многоклеточный организм не есть лишь простая совокупность клеток. Его составляющие клетки могут быть различны по своей форме и функциям. Они собраны в ткани и органы, имеющие, в свою очередь, определенное назначение в целом организме.

Метаболические (обменные) процессы и каталитические (ферментативные) реакции обычно происходят на клеточном и молекулярном уровнях. Именно с молекулярного уровня начинается взаимодействие радиации с организмом, поэтому прямое воздействие ионизирующего излучения является специфичным.

На более высоких уровнях организации – тканевом, системном, популяционном – в свои права вступают новые закономерности и ограничения в действии радиации. Воздействие ионизирующих излучений даже на небольших участках тела вызывает реакцию всего организма как единого целого. Человеческий организм оснащен специальной защитной системой, обеспечивающий восстановление (ремонт) поврежденных радиацией клеточных элементов и устранение трансформированных клеток. Организм человека вырабатывает особые вещества, которые являются своего рода «чистильщиками». Эти вещества (ферменты) способны захватывать свободные электроны, не превращаясь при этом в свободные радикалы. Обычно в нормальном состоянии в организме поддерживается баланс между появлением свободных радикалов и ферментами. Действие ионизирующих излучений нарушает это равновесие и стимулирует процессы облучивания свободных радикалов, что приводит к различным негативным

последствиям. Можно активизировать процессы поглощения свободных радикалов, включая в рацион питания различные антиоксиданты (витамины А, Е, С, препараты, содержащие селен), которые обезвреживают свободные радикалы, поглощая их в больших количествах.

Правильное представление о механизмах биологического действия ионизирующих излучений невозможно без адекватного представления о самой клетке. Клетка – это элементарная живая система, которая лежит в основе строения, развития и функционирования различных организмов.

Наряду с этим клетка является весьма сложным образованием, построенным из миллиардов молекул. Так, например, в одноклеточных организмах (амебы, бактерии, инфузории) клетка функционирует как единое целое.

Человеческое тело содержит около 30 биллионов клеток и 25 биллионов красных кровяных телец – *эритроцитов*. Размеры человеческих клеток примерно в 10^5 раз больше, чем размеры атомов. Однако при всем многообразии клеток у них есть много общих признаков в строении. То, что у всех клеток, независимо от их специфических функций, во многом сходно осуществляются основные физиологические процессы, а именно, обмен веществ, размножение, передача наследственных признаков и др. Кроме того, у всех клеток имеется клеточная оболочка (клеточная мембрана), цитоплазма, включающая различные органоиды и ядро. Относительно постоянный химический состав клетки поддерживается, в основном, благодаря особенностям строения клеточной оболочки. Значение их достаточно велико, т.к. с клеточными оболочками тесно связаны *фагоцитоз* (поглощение твердых веществ) и *пиноцитоз* (поглощение жидкостей). Явление фагоцитоза у высших организмов обеспечивает им выполнение различных защитных функций. Образование лейкоцитов, клеток костного мозга, лимфатических узлов, печени, селезенки также связано с целым рядом защитных функций организма.

Живая клетка представляет собой довольно сложную систему, состоящую из *цитоплазмы*, *ядра* и *органовидов*, объединенных в *протоплазме*. Цитоплазма имеет также сложное строение, она не смешивается с водой, а гомогенные вещества в ней могут быть в различных состояниях: жидком, вязком и твердом. Примерно третья часть веса клетки приходится на ядро. Это постоянный и обязательный компонент как растительных, так и животных клеток. Некоторые клетки (костного мозга, печени) могут быть многоядерными. В ядре имеется одно или два *ядрышка*, в состав которых входит *рибонуклеиновая кислота (РНК)* и *белки*. Именно в ядрышках происходит формирование *рибосом*, важнейшей функцией которых является синтез белков в клетках. Основная часть клеточного ядра содержит *хроматин*. Это вещество хорошо окрашивается основными красителями. *Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК)* и белок содержатся в хромативном веществе. В момент деления клетки все хромативное вещество кле-

точного ядра распадается на строго определенное для каждого вида количество участков, называемых *хромосомами* (греч. *chromo* – цвет + *soma* – тело).

Хромосомы являются структурными элементами ядер клеток, содержащих ДНК, в которой заключена наследственная информация организма. Для человека, например, характерно 46 хромосом, курицы – 70, ржи – 14 и т.д.

Для каждого вида животных и растений строго определены размеры и формы хромосом, в которых в линейном порядке расположены *гены* (греч. *genos* – род, происхождение) – *единицы наследственного материала*, отвечающие за формирование каких-либо элементарных признаков.

В ядрах клеток находится ДНК, являющаяся основным веществом хромосом. Молекулы ДНК состоят из длинных, закруженных молекул в виде двойных спиралей, которые связаны *водородными связями*: А→Т→Ц→Г (Аденин → Тимин → Цитозин → Гуанин). Их функции заключаются в обеспечении синтеза большинства белковых молекул, из которых состоят *аминокислоты*. Цепочки молекул ДНК состоят из отдельных участков, кодируемых специальными белками и образующих так называемый *ген человека*. При подготовке клеток к делению проявляется важнейшее свойство ДНК – способность к самоудвоению (редупликации).

Белки воспринимают любое неблагоприятное воздействие и отвечают на него изменением внутриклеточных химических реакций. Они являются *катализаторами* биохимических процессов, происходящих в клетке (ферментами). Они же – строительный материал для клеток и всего организма. Способность к биосинтезу белков – одно из наиболее важных свойств клетки. Причем только способность к синтезу строго определенных белков передается от материнских клеток дочерним, сохраняясь в течение жизни клеток. *Защитные* функции выполняются особыми белками – *антителами*, которые вырабатываются в организме, когда требуется обезвредить чужеродные вещества. *Транспортная* функция свойственна *гемоглобину*. Белок крови – гемоглобин синтезируется клетками печени; белок инсулин – клетками поджелудочной железы.

Любая клетка имеет строго видовой (характерный для каждого вида) ограниченный рост, после чего наступает ее деление. Весь материал делящейся (материнской) клетки строго распределяется между двумя новыми (дочерними) клетками. Кстати, для одноклеточных организмов клеточное деление является и способом размножения. У многоклеточных организмов делению клеток предшествует их дифференциация по выполняемым функциям. Основным способом деления ядер является *митоз* (непрямое деление). Значение митоза состоит в точном распределении вещества хромосом между дочерними клетками – в этом и есть его главное биологическое значение. Митотический цикл состоит из *митоза* и *интерфазы* – промежутка между делениями, во время которого происходят процессы синтеза, обес-

печивающие процесс деления, а после завершения процессов биохимической подготовки к делению начинается митоз. У млекопитающих клетки делятся от 45 минут до одного часа, у растений – несколько часов, а у бактерий всего 10 минут.

В 1901 году Анри Беккерель обнаружил, что длительное воздействие лучей радия тормозит прорастание семян горчицы. Через пять лет французские ученые Бергонье и Трибондо сформулировали правило:

Чувствительность клеток к излучению прямо пропорциональна их способности к делению и обратно пропорциональна их уровню дифференциации.

Например, быстроразмножающиеся клетки эмбрионального типа особо чувствительны к облучению, а строго специализированные клетки менее чувствительны. Для развития и обоснования рентгено- и радиотерапии злокачественных опухолей правило Бергонье–Трибондо послужило теоретической основой.

Опухолевые клетки относят к частоделящимся, поэтому во многих случаях они более чувствительны к облучению, чем нормальные, окружающие их ткани. Исключением из правила являются первичные клетки. Эти клетки не делятся, но тем не менее чувствительны к облучению. Такой же высокой чувствительностью к облучению обладают и белые кровяные тельца – *лимфоциты*, хотя они и не делятся.

Универсальной реакцией клеток на воздействие разных доз ионизирующего излучения является задержка митоза, т.е. временная остановка деления. Причем длительность задержки строго пропорциональна дозе радиации – примерно 1ч. на каждый 1Гр. – и проявляется у всех клеток облученной популяции независимо от того, выживет ли клетка в дальнейшем или погибнет.

Обычно различают две основные формы гибели клеток: *интерфазную* и *репродуктивную* (гибель при попытке разделиться). Интерфазная форма наблюдается при самых разнообразных воздействиях на клетку, а репродуктивная – является типичной для ионизирующей радиации. Следует отметить, что наиболее опасны воздействия ионизирующих излучений в фазе митоза, т.к. процессы внутриклеточного восстановления к началу этой фазы прекращаются, а все повреждения ДНК во время митоза сохраняются в наследственном механизме либо приводят к гибели клеток. Клетки частично восстанавливают поврежденные хромосомы, однако их дезорганизация иногда заканчивается гибелью клеток или служит причиной нарушения генетической информации. Нередко у потомков облученных клеток закрепляются различные функциональные связи, что и приводит к их гибели. Иногда возможно возникновение лучевого рака, лейкозов и других злокачественных новообразований. Генные мутации и хромосомные аберрации проявляются в виде наследственных болезней. В репродуктивной гибели решающее значение имеет лучевое повреждение хроматина и, пре-

жде всего, ДНК. Действие ионизирующих излучений вызывает разрывы в молекулах ДНК, нарушая пространственную структуру хроматина и считывание наследственной информации.

Например, при дозе радиации 1 Гр. в каждой клетке человека возникает до 1000 одиночных и 10–100 двойных разрывов, причем каждый из последних может стать причиной поломки хромосомы.

Задержка деления имеет важное значение, так как создает благоприятные условия для репарации (восстановления) ферментных систем и для полного устранения возникших повреждений до наступления критического момента – митоза. Даже самые простые из ныне существующих организмов – синезеленые водоросли – обладают мощной системой защиты наследственности. Для защиты ДНК от любых мутагенных влияний была выработана целая система внутриклеточных механизмов восстановления повреждений ДНК. Такой «ремонт на ходу» осуществляется с помощью специальных ферментных систем. Если возникают повреждения, ферментные системы начинают производить ремонт: ферментный комплекс осуществляет застройку бреши и сшивание нити. Но если доза облучения продолжает расти, то восстановительных ферментов может не хватить. Иногда усложняется и сама задача: обломки могут расходиться. Как правило, гибель нескольких и даже многих клеток не опасна для организма. Дело обстоит сложнее в тех случаях, когда часть поврежденной ДНК остается не устраненной и это повреждение закрепляется в наследственной информации. Вот здесь и оказывается очень важной работа еще одной защитной системы – иммунной.

Как стало известно в последнее время, иммунная система защищает наш организм не только от проникновения микробов, вирусов и т.п., но и от проникновения любой чужой генетической информации, в том числе и от пересаженных из другого организма клеток, а также от видоизменений в собственном организме. Особые клетки – *T-лимфоциты* (киллеры) – отыскивают единичные трансформированные клетки и убивают их. Пока иммунная система человека активна, ему не опасны отдельные трансформированные клетки.

Радиочувствительность цитоплазмы клетки заслуживает особого внимания. Многочисленные исследования ученых-радиобиологов убедительно доказали, что радиочувствительность клеточного ядра значительно выше, чем цитоплазмы, что и обуславливает решающую роль ядра в поражении клетки при облучении. Однако более правильно будет сказать так: *клетка реагирует на излучение как единое целое. Отдельные структурные образования в ней могут быть более чувствительны к облучению, другие менее, но выявляется эта разница только при действии излучения на всю клетку.*

Наиболее опасны повреждения ядра, в котором заложена информация о самой клетке и всем организме. Повреждение ядра приводит к на-

следственным изменениям – *мутациям* (лат. mutation – изменение, перемена). Мутагенное воздействие ионизирующие излучения впервые установили советские ученые Г.А.Надсон и Г.С.Филипков в 1925 году в опытах на дрожжевых клетках.

7.2. Пищевые цепочки

Пути миграции радионуклидов в организм человека различны и осуществляются, в основном, по следующим пищевым цепочкам:

- *атмосфера – почва – растения – человек*. В этом случае в организм человека радионуклиды поступают с овощами, ягодами, злаками, грибами и т.д.;
- *атмосфера – почва – растения – травоядные животные – молоко и мясные продукты – человек*. Из почвы радионуклиды поступают в корневую систему растений, а затем в вегетативные органы. Имеет место и поступление радионуклидов в организм животных с пищей; так, корова слизывает за год до 600 кг земли, в т.ч. и загрязненной;
- *атмосфера – растения – животные – молоко и мясные продукты – человек*. В этом случае радионуклиды в растения поступают аэральным путем, а затем уже в организм животных;
- *атмосфера – вода открытых водоемов – фито- и зоопланктон и другие обитатели водоемов – рыбы – человек*. Ракообразные, моллюски, водоросли и вообще придонные животные загрязняются более сильно из-за сорбции радиоактивных веществ. В организм рыб поступают радионуклиды с пищей и через жабры;
- *атмосфера – вода – человек*. С водой поступает до 5% активности. Питьевая вода очищается довольно быстро, так как радиоактивные частицы оседают на дно водоемов.

Мясомолочные продукты – основные поставщики радиоактивности в организм человека. Если до аварии на ЧАЭС активность цезия-137 в молоке не превышала 0,3 Бк/л, то в мае 1986 г. на юге Гомельской области она составляла 330000 Бк/л. Загрязнение молока осенью 1986 г. в Гомельской области составило 3577 Бк/кг, а из-за глобальных выпадений при испытаниях ядерного оружия на Новой Земле оленеводы приполярной тундры получили дозы в 100–1000 раз больше, чем остальное население, т.к. основной корм оленей – ягель – является концентратором радиоактивных веществ.

7.3. Пути поступления радионуклидов в организм человека

Радиоактивные вещества могут попадать в организм человека тремя путями: через органы дыхания при вдыхании загрязненного радиоактивными аэрозолями воздуха, через желудочно-кишечный тракт с продуктами питания и водой, через кожу – резорбция через кожу. С воздухом в организм человека поступает несколько более 1% радиоактивности. Примерно 5% попадает с питьевой водой. Основной опасностью является поступление радионуклидов с пищей.

Наиболее важным и потенциально опасным является **ингаляционное поступление** радионуклидов. Этому содействует большая дыхательная поверхность альвеол, площадь которых достигает 100 м^2 и более. Кроме того, этот путь опасен и из-за более высокого коэффициента захвата и усвоения изотопов из воздуха.

Обмен радиоактивных элементов при поступлении их в легкие с вдыхаемым воздухом определяют три параметра:

- размер или дисперсность вдыхаемых частиц;
- склонность радионуклидов к гидролизу и комплексообразованию, от которых зависит путь и скорость их выведения из легких;
- период полураспада радионуклида.

При вдыхании воздуха, содержащего радиоактивные вещества, частицы радиоактивной пыли задерживаются на всем протяжении дыхательных путей от носоглотки, полости рта до глубоких альвеолярных отделов легких.

Чем меньше диаметр частиц, тем относительно меньше их задерживается в верхних дыхательных путях, бронхах и тем больше их проникает в альвеолярные отделы легких, т.е. в те области, где отсутствуют механизмы, которые способны выводить попавшие частицы через бронхи и трахею наружу.

Дальнейшая судьба радионуклидов, отложившихся в дыхательных путях, также связана с размерами радиоактивных частиц, их физико-химическими свойствами и транспортабельностью в организме. Вещества, хорошо растворяющиеся, за несколько десятков минут всасываются в кровеносное русло, так как этому содействует широкое развитие сети капилляров, через которые происходит обмен газов в легких. Затем они в процессе обмена веществ откладываются в определенных органах и системах или выводятся из организма.

Вещества, слабо растворяющиеся и нерастворяющиеся, оседают в верхних дыхательных путях и выделяются вместе со слизью, после чего попадают в ЖКТ, где всасываются кишечной стенкой.

Частицы, которые осели в альвеолярной части легочной ткани, или удаляются, либо мигрируют в лимфатические узлы легких, трахеи и выво-

дятся из них в течение нескольких месяцев или лет.

Второй по значимости путь – **поступление радионуклидов с пищей и водой**. В организм поступает только некоторая часть радионуклидов, попавших в кишечник, большая часть их проходит «транзитом» и удаляется из кишечника. Коэффициент всасывания — это доля вещества, которая поступает из ЖКТ в кровь. Например, соответственно для трития, натрия, криптона, йода, цезия, ксенона – 1,0; стронция – 0,3; теллура – 0,25; урана, радия – 0,2; бария, полония – 0,1; церия, висмута – 0,25; плутония – 0,0005. Радиоактивные вещества, которые в ЖКТ всасываются в количестве менее 1% с коэффициентом всасывания менее 0,01, очень быстро удаляются с калом в течение 1–4 суток. Так как продолжительность контакта таких веществ с организмом небольшая и осуществляется только в период транзита, то значительные дозы излучения не успевают образоваться. Характерно, что пробег α - и β -частиц в биологических тканях небольшой – для α -частиц – десятки микрометров, для β -частиц – несколько миллиметров. Поэтому поглощение излучения происходит, в основном, в содержимом ЖКТ и значительно меньше в слизистой оболочке толстой кишки, но γ -кванты достигают и других внутренних органов, которые размещаются в брюшной полости и грудной клетке.

Часть радиоактивных элементов – лантаноиды, актиноиды, все элементы 3 группы и часть 4 и 5 групп ПСМ – способны образовывать коллоиды и плохо растворимые гидрооксиды, которые препятствуют всасыванию элементов в ЖКТ. Некоторые элементы этой группы связываются с внутренними органами и очень прочно удерживаются в тканях. Скорость их выведения из внутренних органов, в основном, обусловлена радиоактивным распадом.

Очевидно, что в случае поступления радионуклидов в организм с продуктами питания и водой, когда отдельные участки кишечника поглощают значительную часть энергии излучаемых частиц, ЖКТ становится критическим органом.

Поступление радионуклидов через кожу. До недавнего времени считалось, что неповрежденная кожа является эффективным барьером для радионуклидов. Резорбция через неповрежденную кожу в 200–300 меньше, чем из ЖКТ. Сейчас известен целый ряд радионуклидов, которые проникают через кожу в составе жидких или газообразных соединений, особенно через порезы, царапины, ссадины.

Проницаемость кожи резко увеличивается при воздействии многих химически активных веществ. Например бензина, обезжиривающих растворителей и др. При повреждении рогового слоя кожи, играющего главную роль в барьерной функции кожи. Значительное влияние на интенсивность поглощения радионуклидов кожей оказывают температура и влажность воздуха.

Проникая в потовые, жировые железы, а также волосяные луковицы, радиоактивные вещества могут оставаться там достаточно долго. При проникновении в собственно кожу радиоактивные вещества либо задерживаются в ней на длительное время, либо достигают кровеносных и лимфатических сосудов и течением лимфы и крови разносятся по всему организму, т.е. создают опасность облучения самой кожи и внутренних органов.

7.4. Распределение радионуклидов в организме человека

Существуют основные типы распределения радионуклидов в организме человека: скелетный, диффузный (равномерный). В основу положены принципы максимального или преимущественного содержания радионуклида в органе. Распределение считается скелетным, если более половины радионуклидов сконцентрировано в скелете. Распределение считается равномерным, если более половины радионуклидов, обнаруженных в организме, распределяются равномерно.

Процесс перехода радионуклидов из межклеточной жидкости в органы завершается в течение непродолжительного времени. Так, плазма крови очищается от стронция и кальция за 4–10 часов, которые затем переходят в скелет. Полный переход йода из крови в щитовидную железу заканчивается в течение 10–15 часов. Уран выводится из крови в ткани за 12 часов.

Наиболее важным и потенциально опасным является **скелетный тип**. Он характерен для щелочноземельных металлов, кальция, стронция, бария, радия, а также иттрия, циркония, цитратов плутония. Эти радионуклиды накапливаются в скелете и концентрируются по соседству с красным костным мозгом, который является самым радиочувствительным органом человеческого тела. При этом поражается кроветворная система, страдает иммунитет и могут развиваться злокачественные перерождения крови.

Равномерное (диффузное) распределение характерно для химических элементов – лития, калия, натрия, трития, азота, углерода, полония и некоторых других элементов. Такие радионуклиды, как цезий, рубидий, накапливаются преимущественно в мышечной ткани.

Для изотопов германия, висмута, урана, кадмия, мышьяка, платины, рутения и других характерен **почечный тип** распределения радионуклидов. **По печеночному** типу распределяются радионуклиды лантана, церия, прометия и нитраты плутония. В печени накапливается до 60% этих радионуклидов.

Известны случаи высокой избирательности накопления радионуклидов. В щитовидной железе накапливается йод. Концентрация его в железе в 100–200 раз больше, чем в других тканях. При облучении в больших дозах происходит деграция, т.е. потеря функции щитовидной железы и

склероз ее сосудов. В дальнейшем увеличивается количество доброкачественных и злокачественных опухолей железы.

Указанные типы распределения в организме касаются только той части радионуклидов, которые поступают в кровь. Совсем другой тип распределения в организме радионуклидов наблюдается при их ингаляционном поступлении. В этом случае концентрация радионуклидов максимальна в легких. Это объясняется тем, что поступившие в организм радионуклиды медленно удаляются из легких, а при всасывании задерживаются в лимфатических узлах.

Следствием большой неоднородности накопления радионуклидов в тканях является специфическое формирование патологических процессов, например цирроз печени, очаги склероза в легких и изменения в костной ткани.

7.5. Выведение радионуклидов из организма человека

Основное количество радиоактивных веществ выводится через желудочно-кишечный тракт и почки, в меньшей степени – через легкие и кожу. У кормящих матерей часть радионуклидов выделяется с молоком (йод-131). Скорость выведения радионуклидов зависит от их природы, возраста, функционального состояния организма, особенностей поступления и распределения их в организме. Наиболее быстро выводятся радионуклиды, накопленные в тканях, т.к. скорость обмена веществ высокая.

Различны также пути их выведения. При хроническом поступлении большая часть йода-131 и цезия-137 выводится через почки, а стронция-90, бария-140, кобальта-60, рутения-106 – через желудочно-кишечный тракт.

Скорость выведения радионуклидов характеризуется *периодом полувыведения*. Период полувыведения – это время, за которое из организма человека выводится половина радионуклидов, поступивших в организм. Кроме биологического полувыведения, на скорость освобождения организма от радионуклидов, а следовательно, и на продолжительность облучения организма влияет и период полураспада. Учитывая оба этих фактора, пользуются *эффективным периодом полувыведения*. Эффективный период полувыведения – это время, в течение которого исходное количество радионуклидов уменьшается вдвое.

$$T_{\text{эф}} = \frac{T_{\phi} \cdot T_{\delta}}{T_{\phi} + T_{\delta}},$$

где $T_{эф}$ – эффективный период полувыведения,
 $T_{ф}$ – период полураспада,
 $T_{б}$ – период биологического полувыведения.

Эффективный период полувыведения долгоживущих изотопов определяется, в основном, биологическим периодом полувыведения, а короткоживущих – периодом полураспада. Биологический период полувыведения разнообразен – от нескольких часов для криптона, ксенона, радона до нескольких лет для скандия, иттрия, циркония, актиния. Эффективный период полувыведения колеблется от нескольких часов для натрия–24, меди–64 и суток для йода–131, фосфора–23, серы–35 до десятков лет для радия–226, стронция–90.

Биологический период полувыведения йода–131 из всего организма 138 суток, щитовидной железы – 138, печени – 7, селезенки – 7, скелета – 12 суток. Биологический период полувыведения для цезия–137 из организма примерно 90 суток, из мышц, легких и скелета – 140 суток.

7.6. Основные этапы действия ионизирующих излучений на биологические объекты

Ионизирующие излучения обладают высокой биологической активностью. Они способны вызывать ионизацию любых химических соединений биосубстратов, образование активных радикалов и этим инициировать длительно протекающие реакции в живых тканях. Ионизирующее излучение вызывает в организме человека цепочку обратимых и необратимых изменений в клетках, тканях, органах и организме в целом. Результатом биологического действия радиации является нарушение нормальных биохимических процессов с последующими изменениями в клетках и тканях организма.

Воздействие ионизирующих излучений на биологические объекты подразделяют на 5 этапов:

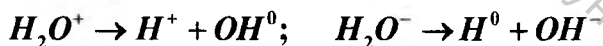
1. Физический этап. Первичным моментом, инициирующим многообразные процессы, происходящие в организме, является ионизация и возбуждение атомов и молекул. Это заключается в передаче энергии фотона или частицы одному из электронов атома. Ионам и возбужденным атомам свойственна повышенная химическая активность. Они способны вступать в такие реакции, которые невозможны для обычных атомов и длительность этапа составляет $10^{-12} - 10^{-8}$ с.

2. Физико–химический этап взаимодействия излучения с веществом протекает в зависимости от состава и строения облучаемого вещества. Принципиальное значение имеет наличие в облучаемой ткани воды и кислорода. В основе первичных радиационно–химических изменений молекул лежат 2 механизма, обозначаемых как прямое и косвенное действие радиации.

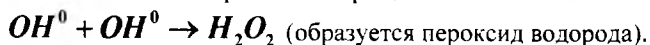
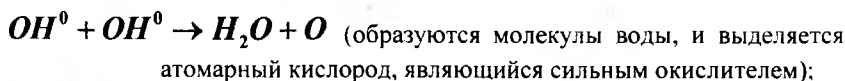
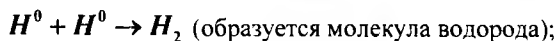
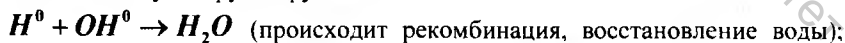
Под прямым действием радиации понимают передачу энергии излучения непосредственно молекуле, которая испытывает превращения. Ионизирующие излучения, а точнее – электроны, образовавшиеся в момент облучения, взаимодействуют непосредственно с биомолекулами, в результате чего происходит перенос части кинетической энергии на биомолекулы. Это приводит их в ионизованное или возбужденное состояние. Прямое воздействие радиации может вызвать расщепление молекулы белка, разрыв наименее прочных связей, отрыв радикалов и другие явления. В первую очередь разрушаются ферменты и гормоны.

Под косвенным действием понимают изменение молекул клеток и тканей, обусловленное продуктами радиационного разложения воды и растворенных в ней веществ, а не энергией излучения, поглощенной самими молекулами. В организме косвенное действие осуществляется через продукты радиолиза воды, которая в живой клетке составляет 60–70 и даже до 90% ее массы. Именно в воде растворены белки, нуклеиновые кислоты, ферменты, гормоны и другие жизненно важные вещества, являющиеся основными компонентами клетки, которым легко может быть передана энергия, первоначально поглощённая водой.

При радиолизе воды под действием излучения из молекулы воды выбивается электрон и образуется положительно заряженный ион воды. При этом электрон присоединяется к нейтральной молекуле воды и образует отрицательный ион воды: $e^- + H_2O \rightarrow H_2O^-$, которые, в свою очередь, распадаются с образованием свободных радикалов водорода и гидроксида ($H^\bullet$ $OH^\bullet$):



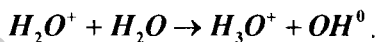
Свободные радикалы обладают большой химической активностью и взаимодействуют друг с другом:



При наличии в среде растворенного кислорода возможна реакция образования гидропероксидного радикала $HO_2^0 (H^0 + O_2 \rightarrow HO_2^0)$.

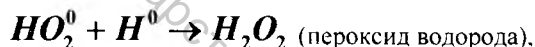
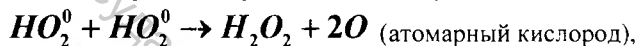
Эта реакция указывает на роль кислорода в повреждающем эффекте ионизирующего излучения при воздействии на организм человека.

Ионизированная молекула воды может реагировать с другой нейтральной молекулой воды, с образованием высокоактивного радикала гидроксида по схеме



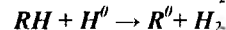
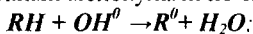
Гидропероксиды могут взаимодействовать между собой, образуя пероксиды водорода и высшие пероксиды, которые обладают высокой токсичностью, но они быстро разлагаются в организме на воду и кислород.

Указанные реакции протекают по следующим схемам:



Пероксидные вещества обладают сильными окислительными и токсическими свойствами. Они вступают в химические реакции с органическими веществами и прежде всего с молекулами, которые получили высокую химическую активность в результате ионизации или возбуждения, они вызывают значительные химические изменения в клетках и тканях, такие, как деполимеризации нуклеиновых кислот, нарушение проницаемости клеточных мембран, повышение проницаемости стенок кровеносных сосудов, сопровождающиеся кровотечениями и кровоизлияниями.

Свободные радикалы OH^0 и H^0 вступают также в реакции с органическими молекулами по следующим схемам:



Это приводит к образованию новых радикалов, которые могут вступать в реакцию с биологическими молекулами и приводить впоследствии к радиобиологическому поражению клеточных структур.

Свободные радикалы и окислители обладают высокой химической активностью и вступают в химические реакции с молекулами белка, ферментов и других структурных элементов биологической ткани, окисляют и разрушают их, что приводит к изменению биохимических процессов в организме. В результате нарушаются обменные процессы, подавляется активность ферментных систем, замедляется и прекращается рост тканей, возникают новые химические соединения, не свойственные организму, так называемые токсины. Это приводит к нарушению жизнедеятельности отдельных функций или систем организма человека в целом.

Второй этап радиационного воздействия длится от 10^{-7} с до нескольких часов. Время жизни свободных радикалов $H^{\bullet}$, $OH^{\bullet}$ не более 10^{-9} с. За это время они либо рекомбинируют друг с другом, либо реагируют с растворенным субстратом.

3. Этап бимолекулярных повреждений. В результате прямого и косвенного действия излучений происходят изменения белков, липидов и углеводов. При этом поражаются липиды клеточных мембран и нарушается их проницаемость. Кроме того, повреждаются микромолекулы ферментов, нарушается синтез РНК, тормозится синтез ДНК, наблюдаются однонитчатые и двунитчатые разрывы, приводящие к хромосомным изменениям. Имеют место генные мутации, а их появление в клетках означает, что клетка содержит генетический материал, отличный от генетического материала, содержащегося в исходных клетках. Поражение ядра клетки приводит к синтезу изменённых белков в результате нарушения РНК, что впоследствии даёт предпосылки к образованию злокачественных опухолей, вторичных радиотоксинов, вызывающих старение и лучевую болезнь.

4. Этап ранних биологических и физиологических эффектов. На процесс радиационного поражения влияет ряд факторов: доза и вид облучения, время экспозиции, мощность поглощенной дозы и др. Очень большие дозы вызывают гибель клеток в результате огромных нарушений всех субклеточных структур и невозможности их восстановления. При маленьких дозах разрушение клеток не происходит, но снижается репродуктивная способность.

Различные клетки обладают разной радиочувствительностью. Наибольшей радиочувствительностью обладают делящиеся клетки. Это кроветворные клетки костного мозга, зародышевые клетки семенников и яичников, клетки тонкого кишечника. Сюда же относят и лимфоциты, которые, несмотря на их дифференциацию и неспособность к делению, обладают высокой радиочувствительностью. Средней радиочувствительностью обладают клетки зародышевого слоя кожи и слизистых оболочек, сальных желез, волосяных фолликулов, потовых желез, хрусталика глаза, сосудов, хрящевые клетки. Третью группу составляют клетки, обладающие высокой устойчивостью к облучению. Это клетки печени, почек, нервные клетки, мышечные клетки, клетки соединительной ткани. На клеточном уровне её восстановление длится до нескольких часов, но могут наблюдаться остановки деления, приводящие к гибели клеток, трансформации клеток в злокачественные.

Группы клеток образуют ткани, из которых состоят органы и системы органов. Ткань – это не просто сумма клеток, а система, имеющая свои функции. Более подвержены радиации ткани, клетки которых активно делятся. Поэтому быстрее повреждается красный костный мозг, желудочно-кишечный тракт. Характерно, что нервная ткань принадлежит к достаточ-

но устойчивым структурам, хотя в функциональном отношении центральная нервная система радиочувствительна, так как самые ранние реакции организма на общее облучение проявляются в расстройстве подвижности и уравниваемости процессов возбуждения и торможения нервной системы.

Гибель отдельных органов может наступить в результате развития злокачественных новообразований в виде опухолей щитовидной железы, молочной железы, лёгких и т.д.

5. Этап отдаленных биологических эффектов. К ним относятся стойкие нарушения функций отдельных органов и систем, сокращение продолжительности жизни, соматические эффекты, такие, как лейкозы, злокачественные новообразования, катаракта и др. Особенно опасно накопление мутаций в генофонде, в результате чего генофонд будет не в состоянии обеспечить воспроизводство нации.

Радиационное повреждение биологической системы может проходить на следующих уровнях:

- на молекулярном уровне повреждаются микромолекулы ферментов, нарушается синтез РНК, тормозится синтез ДНК, возникают одностранные и двустранные разрывы нитей ДНК, нарушение обмена веществ;

- на субклеточном уровне повреждаются клеточные мембраны, что приводит к нарушению функционирования клеток; повреждаются все структурные элементы клеток – ядра, хромосомы, лизосомы, митохондрии, нарушается синтез АТФ, что ведет к нарушению энергетики клетки;

- на клеточном уровне происходит остановка деления и гибель клеток, трансформация клеток в злокачественные;

- на тканевом и органном уровне происходит повреждение красного костного мозга, желудочно-кишечного тракта, центральной нервной системы. В результате нарушения образования лейкоцитов снижается иммунная защита, падает сопротивляемость организма к различным инфекциям. Возникают анемии различного типа, атрофические эффекты и гипопластические состояния ЖКТ, стерильность. Усиливаются некротические процессы – циррозы печени, нефросклерозы, пневмосклерозы, атеросклероз и т.д. Возникают различные дисгормональные состояния.

- на организменном и популяционном уровнях происходит сокращение продолжительности жизни или смерть; изменение генетической характеристики в результате мутаций. Сюда же можно отнести и лейкозы. Эта болезнь характеризуется избыточным содержанием в крови неопластических белых кровяных клеток. Белые клетки сами по себе не делятся. Они образуются в результате активного деления стволовых клеток костного мозга и лимфатических узлов. Изменение в одной или более стволовых клетках буквально наводняет неполноценными белыми клетками весь организм, что, собственно, и представляет собой лейкоз (белокровие), или рак крови.

7.7. Внешнее и внутреннее облучение

Существуют два различных пути, по которым излучения достигают ткани организма и воздействуют на них.

Первый путь – **внешнее облучение** от источника, расположенного вне организма. Оно вызывается γ -излучением, рентгеновским и нейтронным излучениями, которые глубоко проникают в организм, а также β -лучами с высокой энергией, способными проникать в поверхностные слои кожи. Основным источником фонового внешнего облучения являются космическое излучение и излучение от радионуклидов, которые содержатся в породах, почве, строительных материалах.

Доза внешнего облучения, полученная β -частицами естественных радионуклидов, содержащихся в почве и воздухе, составляет $7 \text{ мкЗв/год} = 0,007 \text{ мЗв/год}$.

Второй путь – **внутреннее облучение** от ионизирующих излучений радиоактивных веществ, находящихся внутри организма. В организм человека попадают как естественные, так и искусственные радиоизотопы.

Существует ряд особенностей, которые делают **внутреннее облучение** во много раз более опасным, чем внешнее:

- при внутреннем облучении увеличивается время облучения тканей организма, так как при этом время облучения совпадает со временем нахождения РВ в организме;
- доза внутреннего облучения резко возрастает из-за практически бесконечно малого расстояния до тканей, которые подвергаются ионизирующему воздействию при контактном облучении;
- при внутреннем облучении наибольшую опасность представляют α -частицы;
- в основном, радиоактивные вещества (РВ) распределяются в тканях организма неравномерно, а выборочно концентрируются в отдельных органах, что ещё более усиливает их облучение;
- в случае внутреннего облучения невозможно применять методы защиты, которые используются от внешнего облучения.

Степень радиационной опасности при внутреннем облучении человека определяет ряд параметров:

- путь поступления РВ в организм человека через органы дыхания, ЖКТ, кожу;
- вид излучения и место локализации РВ в организме;
- продолжительность поступления РВ в организм человека;
- время нахождения РВ в организме в зависимости от периода полураспада и периода полувыведения;
- энергия, излучаемая радионуклидами;
- масса облучаемой ткани;
- отношение массы облучаемой ткани к массе тела человека;

– активность радионуклидов в организме человека.

Разнообразие вышеперечисленных параметров и их сочетание характеризует общий показатель – предельно-допустимая поглощённая доза.

7.8. Факторы, влияющие на степень тяжести лучевых поражений

Отношение организма к ионизирующему излучению характеризует радиочувствительность и радиоустойчивость.

Радиочувствительность – это способность организма реагировать на малые дозы радиации. Радиоустойчивость – это способность организма переносить высокие уровни облучения. Для обозначения радиочувствительности используются термины летальная и полумлетальная дозы. Летальная доза LD_{100} ($LD_{100\ 30}$) – это минимальная доза облучения, вызывающая смерть 100% облучённых организмов в течение 30 дней. Полумлетальная доза LD_{50} ($LD_{50\ 30}$) – минимальная доза облучения, вызывающая смерть 50% облучённых организмов в течение 30 дней. Принято считать, что при кратковременном облучении всего тела LD_{50} составляет 3,5 Зв, а LD_{100} – 6 Зв.

Действие ионизирующих излучений на организм человека зависит от следующих факторов:

1. Величина дозы. Предельно допустимой дозой при однократном облучении в течение 3–4 суток является поглощённая доза, равная 0,5 Гр, а при многократном, за 10–30 суток – до 1 Гр. При больших дозах возникает острое лучевое поражение, степень тяжести которого увеличивается с увеличением дозы.

2. Время облучения. Чем больше продолжительность времени, в течение которого получена одна и та же доза облучения, тем легче протекает лучевое поражение.

3. Возраст облучаемых. Наиболее чувствительны к облучению дети и пожилые люди, более устойчивы – люди среднего возраста. У детей еще не выработались защитные функции против неблагоприятных факторов внешней среды, в том числе и радиации, а у пожилых людей они уже истощились. Как уже отмечалось, наиболее подвержены действию радиации клетки, которые активно делятся, а наибольшее деление клеток происходит в растущем организме. Поэтому воздействие радиации на детский организм наиболее опасно. Особенно опасна 8–15 недели беременности, когда происходит закладка органов плода.

4. Виды ионизирующих излучений. Биологическое действие излучений, в основном, определяется их ионизирующей способностью. Для сравнения биологического действия разных видов ионизирующих излуче-

ний в радиобиологии введено понятие «относительной биологической эффективности» (ОБЭ). Для количественной оценки ОБЭ разных видов ионизирующего излучения используют коэффициенты биологической эффективности или коэффициенты качества излучений, приведенные в приложении 3.

На состояние организма большое влияние оказывают перегревание, острая кровопотеря, шок, беременность у женщин содействует более тяжелому течению лучевых поражений.

5. Индивидуальная радиочувствительность и состояние организма в момент облучения. Разные люди обладают различной индивидуальной чувствительностью к неблагоприятным факторам внешней среды, в том числе и к радиационным воздействиям. Это подтверждается различной степенью лучевых поражений ликвидаторов, находившихся в одинаковых условиях, а следовательно, и получивших одинаковые дозы радиации.

6. Половые различия. Замечено, что женщины более устойчивы к радиационному воздействию, чем мужчины. Это относится и к животным, самцы более чувствительны к действию радиации.

7. Распределение поглощенной дозы в организме. При поступлении в организм человека радионуклиды накапливаются в определенных органах. Так, радиоактивный йод, являясь тиреотропным элементом, концентрация которого в щитовидной железе в 200 раз выше, чем в других тканях, дает большую дозу облучения щитовидной железы, при этом происходит ее дегенерация, потеря функции, склероз сосудов, а в дальнейшем увеличивается количество доброкачественных и злокачественных опухолей железы. Стронций-90, в основном, откладывается в скелете. Это приводит к облучению не только костей и костного мозга, но и других тканей. Основные симптомы заболеваний наблюдаются со стороны красного костного мозга – лейкопения, эритроцитопения, лимфопения и т.д. К отдаленным последствиям относятся лейкозы и опухоли костей и других органов.

8. Радиочувствительность тканей, органов и систем организма. Основные проявления лучевого повреждения связаны с поглощенной дозой в критических органах. Критические органы – органы, ткани, части тела, облучение которых причиняет наибольший ущерб здоровью человека, т.е. они первыми в большей степени повреждаются. При равномерном облучении всего тела критическими органами являются те органы и ткани, которые наиболее радиочувствительны. По степени уменьшения радиочувствительности органы и системы можно разместить в следующем порядке: кроветворная ткань, кишечный эпителий, половые органы, эпителий кожи, мышцы, печень, почки, костная ткань.

Наиболее чувствительной к действию радиации является система кроветворения, а именно, красный костный мозг, основным предназначением которого является выработка зрелых клеток крови. В результате об-

лучения происходит быстрое опустошение костного мозга, так как происходит резкое торможение клеточного деления. Уменьшается количество форменных элементов в периферической крови. В результате снижения количества эритроцитов развивается анемия (малокровие), замедляются процессы восстановления и наблюдается дефицит кислорода. Уменьшается количество лейкоцитов, что приводит к лейкопении и к подавлению иммунологических реакций. Снижение количества тромбоцитов ведет к развитию кровотечений и кровоизлияний.

Другой системой с высокой радиочувствительностью является тонкий кишечник и желудок. В результате облучения происходит опустошение ворсинок кишечника и их оголение.

Поражение красного костного мозга и тонкого кишечника является очень чувствительным для организма. Оно сопровождается общими нарушениями: в большей или меньшей степени разлагается согласованность структур и деятельность всего организма. Кроме того, поражение костного мозга ведет к уменьшению количества циркулирующих в крови лейкоцитов, а это, в свою очередь, ослабляет иммунную систему. Поражение слизистой оболочки кишечника приводит к увеличению ее проницаемости, потере белков, солей, жидкости, т.е. нарушению баланса жидкости и электролитов, проникновению микробов в кровь, развитию воспалительных процессов, вплоть до общего заражения крови – сепсиса. Микробы и их токсины еще более ослабляют организм, усиливают результаты лучевого поражения.

7.9. Лучевые поражения организма человека

Лучевое поражение – это обусловленные лучевым воздействием патологические изменения тканей, органов и их функций. Различают острое и хроническое поражение. Острое поражение возникает при больших дозах, а хроническое – при малых.

Последствия облучения могут быть ближайшими и отдаленными, соматическими и генетическими, общими и местными. Ближайшие последствия – это первичная реакция и поражение организма, наступившие в течение нескольких недель после острого облучения. Отдаленные последствия – изменения в организме, возникающие в отдаленные сроки через несколько лет после облучения, что может привести к возникновению опухолей, лейкозов и т.д. Соматические последствия – это вызванные облучением изменения в самом облучаемом организме, а генетические последствия могут привести к изменениям в организме его потомства. К соматическим относятся острая и хроническая лучевая болезнь, локальные лучевые поражения, поражения кожи, нарушения репродуктивной функции и т.д. К генетическим относятся доминантные и рецессивные генные мутации, хромосомные aberrации.

Острая лучевая болезнь (ОЛБ) – это общее заболевание, для которого характерны стадийность и разнообразие признаков. Развернутый симптомокомплекс ОЛБ человека возникает при облучении его в дозах, превышающих 1Гр. При дозах менее 1Гр отмечаются временные реакции со стороны отдельных систем организма, которые выражаются в разной степени, или же клинические проявления вообще отсутствуют. Лучевая болезнь может возникать как при наружном, так и при внутреннем облучении.

Формы ОЛБ. В зависимости от тяжести клинических проявлений (а это значит, в зависимости от величины поглощенной дозы излучения) различаются следующие формы ОЛБ: костно-мозговая, переходная, кишечная, токсическая, мозговая.

Костно-мозговая форма ОЛБ возникает при облучении дозами в 1–6 Зв. Ведущую роль в клинической картине играет поражение кроветворной функции костного мозга. Эта форма по тяжести течения подразделяется на степени:

- I степень (легкая) возникает при дозе 1–2 Зв (100–200 Р);
- II степень (средняя) – 2–4 Зв (200–400 Р);
- III степень (тяжелая) – 4–6 Зв (400–600 Р).

Переходная форма ОЛБ возникает при дозе облучения в 6–10 Зв. Для нее характерны поражения кроветворной системы и кишечника, и ее оценивают по тяжести течения как IV степень (крайне тяжелую).

Кишечная форма ОЛБ развивается при облучении в дозе 10–20 Зв (1000–2000 Р). При этом преобладает поражение тонкого кишечника, наблюдается денатурация слизистой оболочки тонкого кишечника, потеря жидкости, белков, солей. Картина осложняется микробной инфекцией. Желудок, толстый кишечник, прямая кишка подвергаются таким же изменениям, но в меньшей степени. Как правило, исход смертельный (через 8–16 суток).

Токсическая (токсемическая) форма ОЛБ развивается при облучении дозой в 20–30 Зв. При этом наблюдается тяжелая интоксикация, почечная недостаточность (азотемия, олигурия), нарушение сердечной деятельности, падение артериального давления. Смерть наступает в первые 5–7 суток при явлениях отека мозга.

Церебральная (нервная) форма ОЛБ наблюдается при дозе свыше 80 Зв. В результате прямого повреждающего действия облучения на ЦНС приводит к повреждению нервных клеток и сосудов мозга, наблюдается отек мозга, нарушение функций жизненно важных центров дыхания и кровообращения, развивается коллапс, судороги. Смерть наступает на 1–2 сутки после облучения.

Клиническая характеристика периодов костно-мозговой формы ОЛБ.

Костно-мозговая форма ОЛБ имеет явно выраженную клиническую картину, которая состоит из ряда симптомов, развивающихся последовательно и характеризующихся определенной периодичностью течения. Различают следующие четыре периода ОЛБ:

1. Период первичной общей реакции на облучение (начальный).

Начинается в ближайшие часы после облучения. Длится от нескольких часов (при легкой степени) до нескольких суток. Происходят нарушения нервно-рефлекторной регуляции со стороны ЦНС и появляются симптомы прямого повреждающего действия излучения на лимфоидную ткань и костный мозг. Характерными клиническими симптомами являются тошнота, рвота, головная боль, головокружение, потеря аппетита, слабость, сонливость, шаткая неуверенная походка, повышение температуры, покраснение лица, потливость. Со стороны сердечно-сосудистой системы – тахикардия, аритмия, нестабильность артериального давления с тенденцией к снижению, вплоть до коллапса. В тяжелых случаях – понос, что является признаком повреждающего лучевого действия на эпителий кишечника. Со стороны почек – полиурия, белок и сахар в моче. В крови – лимфопения.

2. Скрытый период или период мнимого благополучия. Он длится от 10–15 дней, а при тяжелой форме до 4–5 недель. При больших дозах он может отсутствовать. Симптомы первичной реакции, обусловленные нервно-регуляторными нарушениями, ослабевают и даже исчезают. Может оставаться лабильность пульса и артериального давления, утомляемость, потливость. В это же время нарушения в организме нарастают: опустошается костный мозг, повреждается эпителий кишечника, подавляется сперматогенез, развиваются поражения кожи, появляются отеки, краснота, иногда пузыри, начинается выпадение волос. Прогрессирует лимфопения. Развивается тромбоцитопения.

3. Период разгара болезни, или выраженных клинических проявлений. Продолжительность этого периода от одной до 2–3 недель. В этом случае ухудшается самочувствие, повышается температура, появляются головные боли, головокружение, бессонница, развивается резкая слабость. Расстройство функции кишечника – рвота, исчезает аппетит, развивается понос с кровянистыми выделениями, масса тела снижается на 25–30%. Нарушается проницаемость сосудов и свертываемость крови, что сопровождается кровотечениями и кровоизлияниями в кожу, слизистые оболочки и в другие жизненно-важные органы. Продолжается выпадение волос, наступает облысение. Количество лимфоцитов и тромбоцитов в крови снижается до их полного исчезновения из русла крови, уменьшается количество лейкоцитов. Глубокое поражение кроветворной и иммунной систем приводит к развитию инфекционных осложнений, приводящих к гибели организма.

4. Период восстановления. При благоприятном исходе начинается на 2–5 месяцах после облучения и длится от 3 до 6 месяцев, а при легкой степени до 1–3 лет. Самочувствие улучшается, падает температура. Уменьшаются нарушения нервно-регуляторного порядка, головные боли, и улучшается сон. Восстанавливается функция ЖКТ, прекращаются рвота и понос, заживают изъязвленные участки слизистых, исчезают геморрагические признаки, медленно восстанавливаются функции кроветворения. На местах облысения через 2–6 месяцев после облучения начинается рост волос. Может сохраниться на длительное время нервная истощаемость, эндокринные расстройства, недостаточность функции кроветворения.

Хроническая лучевая болезнь (ХЛБ) – самостоятельная нозологическая (нозология — учение о болезнях) форма лучевого поражения, развивающаяся в результате продолжительного облучения организма малыми дозами в 1–5 мЗв в сутки после достижения суммарной дозы в 0,7–1 Зв. Облучение может быть общим либо местным, внешним или внутренним. ХЛБ, как и ОЛБ, характеризуется фазностью течения, особенностями проявления, связанными с неравномерностью облучения, и имеет отдаленные последствия.

ХЛБ при внешнем облучении представляет собой сложный клинический синдром или совокупность симптомов с вовлечением большинства органов и систем, характеризующийся периодичностью течения. Для заболевания характерно постепенное развитие и продолжительный период нарастания нарушений функций организма. Обычно ХЛБ развивается через 2–3 года от начала лучевого действия. Механизм развития ХЛБ приблизительно такой же, как и при ОЛБ, при этом поражается весь организм, но, прежде всего наблюдается угнетение кроветворения.

Для ХЛБ характерны:

- астенический синдром, т.е. вялость, потеря аппетита, быстрая утомляемость, бессонница, снижение трудоспособности;
- нарушение гемопоэза, т.е. умеренно выраженные лейкопения, тромбоцитопения, анемия;
- периодически обостряющийся геморрагический синдром;
- упадок питания и т.д.

В течении ХЛБ выделяют 4 нечетко разграниченных периода: начальные функциональные нарушения, собственно заболевание, восстановление и последствия.

Строго разграничить заболевание по степени тяжести трудно, однако условно выделяют ХЛБ легкой (I), средней (II), тяжелой (III) и крайне тяжелой (IV) степеней. Последние три степени наблюдаются крайне редко.

Легкая степень ХЛБ характеризуется сравнительно небольшими функциональными изменениями со стороны системы крови, а также сердечно-сосудистой системы.

Длительное и систематическое воздействие ионизирующего излучения приводит к общей слабости – состоянию бессилия и др.

Отмечается волнообразность симптомов, они то увеличиваются, то уменьшаются. Трудоспособность длительное время не нарушается. После 7–8-недельного лечения может наступить полное выздоровление. При легкой степени ХЛБ доза облучения не превышает 1,5 Зв.

Средняя степень ХЛБ, помимо более выраженных функциональных нарушений, характерных для легкой степени, т.е. сильной головной боли, увеличением утомляемости и т.д., характеризуется отчетливыми деструктивными изменениями в организме, преимущественно в органах кроветворения, что проявляется кровоточивостью десен, слизистой оболочки носа и т.д. Явления астенизации прогрессируют, наблюдается потеря веса, снижается аппетит, развивается потливость, акроцианоз. Нередко отмечается стойкая сосудистая гипотония, тенденция к учащению сердцебиения, циркуляторные нарушения. Иногда появляются трофические изменения кожных покровов и ногтей. Снижается сопротивляемость к инфекциям гриппа, ангины и т.д. Наступает длительная и полная потеря трудоспособности. Доза облучения в пределах 2–2,5 Зв. характерна для средней степени ХЛБ.

Тяжелая степень ХЛБ характеризуется тяжелым состоянием больных. Отмечаются выраженные деструктивные изменения, и больным необходим постельный режим. Ткани утрачивают способность к нормальной регенерации, выявляются глубокие обменно-трофические нарушения в различных органах, в частности, глубокое подавление гемопоэза. Вследствие ослабления иммунобиологической реактивности организма возможны инфекционно-септические осложнения. Температура тела повышается, усиливаются кровотечения из носа, кишечные, из полости рта. Заболевание может закончиться смертью по причине гематологических или инфекционных осложнений. Доза более 2,5 Зв. характеризует тяжелую степень ХЛБ.

Крайне тяжелая степень ХЛБ характеризуется более глубоким характером всех изменений в организме. В этом случае заболевание, как правило, оканчивается смертью.

Локальные лучевые повреждения включают лучевые ожоги кожи, помутнение хрусталика (лучевую катаракту), выпадение волос (эпиляцию), стерилизацию и др. Кожа отличается относительно высокой радиопоражаемостью. Наибольшей чувствительностью к радиационному воздействию обладают клетки волосяных фолликулов. После облучения дозой 3–4 Гр волосы начинают редеть и выпадают в течение 1–3 недель. Затем рост волос может возобновиться. Однако при облучении дозой порядка 7 Гр происходит полная потеря волос. Затем в убывающем порядке располагаются эпидермис, сальные железы, подкожная соединительная ткань, эндотелий капилляров.

Радикация влияет также и на зрение. Наиболее уязвимой для радиации частью глаза является хрусталик. Считается, что поражение хрусталика происходит вследствие прямого действия излучения на его эпителий. Помутневшие участки могут образоваться при дозах облучения 2 Гр и менее. Более тяжелая форма поражения глаза – прогрессирующая катаракта – наблюдается при дозе 5 Гр и выше. Особенно чувствительна к действию ионизирующего излучения периферическая часть хрусталика. Центральная часть хрусталика в два раза менее чувствительна. Помутнение хрусталика при общем облучении носит тот же характер, что и при местном. Катаракта образуется при воздействии всех видов ионизирующего излучения.

Клетки половых желез высокочувствительны к ионизирующему излучению. Яичники женщин содержат овоциты, которые гибнут при дозе в 4 Гр, что вызывает стойкое бесплодие. При однократном воздействии доз 1–2 Гр может развиваться временное бесплодие и прекращение менструального цикла на 1–3 года.

При облучении мужчин дозой 0,1 Гр наблюдается снижение количества сперматозоидов в течение 1 года. Доза в 2,5 Гр вызывает стерилизацию в течение 2–3 лет, а при дозе 4–6 Гр наступает абсолютная стерильность. В результате действия излучений подавляется митоз сперматогоний, в результате чего уменьшается количество сперматозоидов вплоть до азооспермии.

7.10. Отдаленные последствия облучения человека

Особенностью заболеваний, относящихся к отдаленным последствиям, является то, что они возникают как после местного, так и после общего облучения. Различают соматические и генетические отдаленные последствия. Основными *соматическими* последствиями облучения являются сокращение продолжительности жизни, возникновение лейкозов, злокачественных опухолей, катаракты, стерильности.

Различают неопухолевые и опухолевые формы отдаленных последствий. **Неопухолевые формы** включают три вида патологических процессов:

1. **Гипопластические состояния.** Эти нарушения возникают при накоплении высоких доз излучения в 3–10 Гр как при внешнем γ -облучении, так и поражении инкорпорированными (внедренными) радионуклидами. Основными нарушениями являются гипо- или гиперхромные анемии, лейкопения, атрофия слизистой оболочки желудка, кишечника, гипо- или анацидный гастрит, атрофия половых желез и бесплодие.

2. **Склеротические процессы.** Основные нарушения: цирроз печени, нефросклероз, пневмосклероз, атеросклероз, лучевые дерматиты, лучевые катаракты, некрозы костной ткани, поражения нервной системы.

3. **Дисгормональные состояния.** К проявлениям таких состояний относятся ожирение, истощение, несахарный диабет, патологические сдвиги в половых циклах, что может привести к развитию опухолей, поражению щитовидной железы (гипотиреодизм, новообразования), сахарному диабету и др.

Опухолевые формы. К ним относятся опухоли, развивающиеся по прямому механизму, т.е. возникают чаще при облучении инкорпорированным α -излучателем – опухоли костей, печени, почек, легких, кожи. Другой разновидностью являются дисгормональные опухоли вследствие нарушения равновесия в функции эндокринных желез – опухоли матки, яичников, предстательной железы, самих желез внутренней секреции. И наконец, имеются опухоли сложного генеза, возникающие в результате сочетания прямого и дисгормонального механизмов – лейкозы, опухоль молочных желез.

Рассмотрим основные соматические отдаленные последствия. Самым общим из отдаленных эффектов является **сокращение продолжительности жизни**. Выявлена прямая пропорциональная зависимость между дозой радиации и продолжительностью жизненного цикла. Экспериментально доказано, что у человека при однократном облучении сокращение продолжительности жизни составляет 0,1–1,5 суток на каждый миллизверт. Если радиация действует на протяжении всей жизни, непрерывно, то сокращение жизни удается зарегистрировать, начиная с суммарных недельных доз в 10 рад γ -излучения или 1 рад нейтронного облучения.

Злокачественные новообразования под влиянием облучения могут возникать практически во всех органах. Наиболее часто наблюдаются лейкозы, развитие которых происходит через 5–25 лет после облучения. Частота лейкозов у облученных по сравнению с необлученными возрастает в несколько раз. В диапазоне 3–15 Гр каждому Гр соответствует увеличение заболеваемости на 50 случаев на 1 млн. человек в год.

Возникновение **катаракты (помутнения) хрусталика** – типичное отдаленное последствие тотального облучения организма или местного облучения глаза и хрусталика. Особенно часто катаракты появляются при длительном нейтронном облучении.

К отдаленным последствиям облучения относится также **нефро-склероз**, развивающийся в результате повреждения почечной ткани и замещения ее соединительной тканью.

Радиобиологические эффекты облучения живого организма делятся на пороговые (нестохастические) и беспороговые (стохастические). Такие нарушения, как опухоли различной локализации, лейкозы, генетические эффекты, умственная отсталость, уродства, носят стохастический беспороговый характер. Вероятность возникновения этих поражений существует при самых минимальных дозах облучения.

Генетические повреждения – это передаваемые по наследству повреждения генетического кода в половых клетках.

По химической характеристике ген представляет собой участок молекулы ДНК. Порядок сочетания в гене азотистых оснований определяет его специфичность и код. При помощи кода ген передает строго определенную информацию для развития той или иной функции или структуры клетки и организма в целом. Гены заложены в структуре хромосом. В процессе оплодотворения половые клетки сливаются в одну, ядро которой уже имеет два набора хромосом. При последующем делении каждая хромосома образует свою точную копию. Поэтому дочерние клетки имеют совершенно одинаковое количество и структуру хромосом и генов, т.е. дочерние клетки являются копиями материнских. Это повторяется в громадном числе поколений.

Установлено, что под действием радиации молекулярная структура хромосомы или гена изменяется, в результате образуется ген с новыми признаками. Он уже не может являться абсолютным подобием старому, т.е. произойдет мутация.

Организм, в котором проявляются признаки мутированного гена, принято называть мутантом. Если же мутация произошла в половой клетке, то развивающийся организм будет иметь новые наследственные признаки.

Различают генные, хромосомные и геномные мутации. Генные мутации — это мутации, возникающие в результате изменения лишь одного гена (их называют еще точковыми). Хромосомные мутации – это изменения в структуре хромосом. Все виды хромосомных мутаций, связанных с нарушением структуры хромосом, называют хромосомными абберациями (отклонениями). Геномные мутации, или мутации кариотипа, это мутации, связанные с изменением числа хромосом.

В результате мутаций могут появляться доминантные (господствующие) и рецессивные (подавленные) гены. Если ген доминантный, то соответствующий признак, носителем которого он является, будет проявляться у потомства первого поколения независимо от того, присутствует ли данный ген у половой клетки одного или обоих родителей. Если ген рецессивный, то соответствующий признак, несущийся этим геном, передаваясь из поколения в поколение, может проявиться первый раз только у правнуков и то в том случае, когда он имеется в половых клетках и отца, и матери. Одно из проявлений соматических мутаций – злокачественный рост клеток.

Генетические последствия облучения иногда могут наблюдаться и при малых дозах. Трудно установить дозовый порог, ниже которого излучение не вызывает мутаций.

Мутации приводят к наследственным заболеваниям. Около 10% новорожденных имеют те или иные наследственные отклонения. Мутации

могут привести к различным порокам развития и уродствам: гетерохромии (разной окраске радужной оболочки глаз), порокам сердца, дальтонизму, многопалости, «заячьей губе», «волчьей пасти». Мутации могут быть причиной задержки физического и умственного развития. Некоторые относят болезнь Дауна к заболеваниям, вызванным радиацией.

Генные мутации и хромосомные aberrации могут привести к самопроизвольным выкидышам.

По мнению специалистов, хроническое облучение при дозе в 1 Гр приводит к появлению 2000 случаев серьезных генетических заболеваний на миллион новорожденных.

Битовский государственный технологический университет

ГЛАВА VIII АВАРИЯ НА ЧАЭС И ЕЁ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

8.1. Причины аварии на ЧАЭС

В ночь с 25 на 26 апреля 1986 года на Чернобыльской АЭС произошла крупнейшая в истории человечества экологическая катастрофа, последствия которой ещё долгие годы будут сказываться на жизни населения Беларуси и других стран.

Непосредственными причинами аварии явились грубейшие ошибки персонала, обслуживающего реактор, и нарушение норм и правил при строительстве реактора РБМК – 1000.

Возникновению аварии способствовал ряд обстоятельств. Планировалась остановка четвёртого блока ЧАЭС для очередного обслуживания и планового ремонта. В процессе остановки энергоблока было намечено провести эксперимент, заключающийся в том, что один из двух турбогенераторов после прекращения подачи пара на турбину должен был, продолжая вращаться по инерции, при этом вырабатывать электроэнергию для запитывания циркуляционных насосов, предназначенную для аварийного охлаждения реактора. Планировалось проверить возможность поддержания жизнеспособности турбогенератора за счёт запаса энергии вращающегося ротора турбины в случае аварийной ситуации, когда прекращается подача пара на турбины и отключаются внешние источники электропитания системы аварийного охлаждения реактора.

Программой эксперимента предусматривалось при снижении мощности до 1600 МВт отключить один из турбогенераторов, при этом питание энергоблока переключить полностью от второго турбогенератора и при понижении мощности до 700–1000 МВт прекратить подачу пара на второй генератор и начать опыт. Этот эксперимент не был согласован со специалистами, отвечающими за безопасность АЭС. Анализ этой программы специалистами позволил бы им указать на грубейшие ошибки её авторов. Эти ошибки явились следствием пренебрежения нормами ядерной безопасности, показали безграмотность и некомпетентность.

Недостатки программы эксперимента также усугубились ошибками персонала и отступлением в процессе её реализации, что и стало одной из главных причин трагедии.

В час ночи 25 апреля началось снижение мощности реактора. К середине этого же дня мощность была снижена наполовину и был отключён один турбогенератор. Вследствие просьбы диспетчера «Киевэнерго» пришлось поработать некоторое время на половине номинальной мощности. Это привело к задержке проведения эксперимента. При снижении мощности из-за ошибки оператора не удалось удержать мощность реактора на за-

планированной отметке 700–1000 МВт, и она снизилась до 30 МВт. При таком резком падении мощности нарушилось равновесие между выгоранием и образованием ксенона в активной зоне, обусловленное уменьшением потока нейтронов. По правилам эксплуатации в таком случае необходимо было немедленно заглушить реактор, но вместо этого персонал пытался поднять его мощность. К часу ночи 26 апреля мощность повысилась до 200 МВт. Поднять мощность до запланированной для опыта величины не удалось из-за сильного поглощения нейтронов ксеноном, даже несмотря на то, что стержни ручного регулирования были подняты оператором, а стержней автоматического регулирования было использовано только 6–8. В условиях эксплуатации для сохранения контроля над реактором постоянно должно быть опущено как минимум 30 контрольных стержней. Несмотря на это, было принято решение продолжить программу испытания.

При проведении эксперимента к реактору были подключены дополнительные циркуляционные насосы. Поток воды, охлаждающий активную зону, увеличился, что привело к дополнительному снижению парообразования в каналах реактора и снижению уровня воды в барабанах-сепараторах и других системах реактора. Это потребовало от персонала заблокировать сигналы аварийной остановки реактора по недостаточному уровню воды и давлению пара и вывести из активной зоны практически все остающиеся контрольные стержни. Работа энергоблока стала крайне неустойчивой.

Особенность реактора РБМК–1000 заключается в том, что он откликается на перемещение стержней регулирования только тогда, когда их концы близки к центру активной зоны. Поэтому при полностью поднятых стержнях заглушить реакцию быстро не удаётся, так как высота активной зоны реактора семь метров, а следовательно, определённое количество стержней в активной зоне необходимо оставлять. Операторам приходилось каждые несколько секунд делать корректировки, позволяющие сохранять постоянную мощность. Они сократили поток охлаждающей воды для того, чтобы сохранить давление пара. Одновременно с этим насосы, которые в это время еще питала замедляющая своё движение турбина, стали снижать обороты и, соответственно, на реактор подавали меньший объём воды. Потеря охлаждающей воды усугубила нестабильное состояние реактора и увеличила производство пара в каналах охлаждения. Сепараторы уже не успевали охлаждать реактор, а диспетчеры не смогли стабилизировать реакцию. Мощность последовавшей цепной реакции в 100 раз превысила номинальную. За доли секунды ТВЭЛы разрушились, давление пара в каналах многократно возросло. В 1 час 23 мин. 44 с. произошёл первый взрыв. Давление пара разрушило часть каналов, и вода поступила к графитовой кладке. Начались химические реакции. Из-за бурного выделения газов давление вновь возросло. Металлическая тысячетонная плита приподнялась, и воздух, попадая в активную зону реактора, привел к образованию

смеси водорода и окисла углерода с кислородом. Второй взрыв произошёл через 2 секунды и разрушил перекрытия и крышу реакторного зала. Четверть топлива была выброшена наружу. Радиоактивное облако, состоящее из дыма, радиоактивных продуктов деления, частиц топлива, поднялось и воздух на высоту около 1 км и распространилось в северо-западном направлении от станции. На развалинах 4-го энергоблока начался пожар, который перешёл на крышу соседнего турбинного зала. Пожар был локализован к 5 часам того же дня, но продолжал гореть графит, который ещё больше разогрел разрушенный реактор.

8.2. Радиоактивное загрязнение после аварии на ЧАЭС

Самые лёгкие радиоактивные частицы и газы поднялись в верхние слои атмосферы. Они осаждались медленно, от нескольких месяцев до года, успев за это время несколько раз обогнуть земной шар. Меняющиеся метеорологические условия, ветры переменных направлений и непрерывные выбросы в течение десяти дней привели к крайне сложной картине площадей загрязнения, что показано в приложении 5.

Наиболее мощная струя газообразных и аэрозольных радиоактивных продуктов наблюдалась в течение первых 2–3 суток после аварии. Радиоактивное облако распространялось в северо-западном, северном и северо-восточном направлениях. Более летучие радиоизотопы, такие, как различные соединения йода и определённое количество цезия, затронули практически все европейские страны и частично западную и восточную Азию и Северную Америку. Тяжёлые частицы из радиоактивного облака осели вблизи АЭС, а более тяжёлые аэрозоли рассеивались в приземном слое воздуха, постепенно осаждаясь на земную поверхность. Дождь эффективно вымывал радионуклиды из атмосферы. Там, где прошли апрельско-майские дожди, образовались радиоактивные пятна. Радиоактивные вещества после аварии на ЧАЭС в основном выпали крупными пятнами и примерно распределились следующим образом: Беларусь – 34 %; Украина – 20%; западные области России – 24 %; Европа – 22 %.

Для локализации очага аварии, предотвращения концентрирования расплавленного топлива, поглощения тепла и снижения количества выбрасываемых радиоактивных частиц в первые же дни после аварии с вертолётов сбрасывали доломит, песок, глину, соединения бора, свинец. В результате принятых мер мощность выброса снизилась. Однако после 2 мая выброс увеличился. Это было обусловлено разогревом ядерного топлива в условиях отсутствия отвода тепла. Резкое уменьшение выбросов через десять дней после аварии объясняется быстрым охлаждением топлива по мере того, как остатки топлива прошли через нижний уровень защиты и

вступили во взаимодействие с другими веществами в реакторе. После 6 мая выбросы практически прекратились.

Газообразные элементы криптон и ксенон практически полностью оказались выброшены в атмосферу. Всего было выброшено около 60 % йода из реактора в атмосферу. Основной вклад в радиоактивное загрязнение территории Республики Беларусь в первые дни после аварии внесли йод-131, 132, 133; теллур-132 и другие короткоживущие радионуклиды. Наиболее сильному загрязнению подверглись Гомельская, Могилёвская, Минская, Брестская и Гродненская области. В Минске фоновое значение повысилось в 9000 раз, в Бресте – в 6000 раз, в Гомеле – в 130 000 раз.

Больше всего в радиоактивное заражение территории Республики Беларусь внесли цезий-137, 134, стронций-90, плутоний-239. Всего на территории республики выпало более 27 радионуклидов, основные из которых приведены в приложении 5. Поверхностная активность по цезию-137 в отдельных местах составила от 1 до 200 Ки/км². Процентное соотношение основных выпавших радионуклидов следующее:

- цезий-137. Загрязнено территории республики 23 %;
- стронций-90. Загрязнено территории республики 10 %;
- плутоний-239. Загрязнено территории республики 2 %.

Не менее опасным является Америций-241 и «горячие частицы» различных радионуклидов. В загрязнённых районах они представляют большую угрозу здоровью населения.

8.3. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси

После аварии на Чернобыльской АЭС почти вся территория Беларуси была загрязнена радиоактивными изотопами. Значительная часть радионуклидов (с малым периодом полураспада) к настоящему времени прекратила свое существование. Зона загрязнения локализовалась в основном на юго-востоке страны, захватив $\frac{1}{5}$ часть ее территории, т.е. 40 тыс. км² (юго-восток Брестской, юг и восток Гомельской, юг Могилевской областей). Отдельные пятна повышенной радиации обнаружены в Толочинском районе Витебской области.

Особенно сильно пострадали природно-растительные комплексы – лесные и лугово-болотные. Аэрозольные радионуклиды оседали на кронах и стволах деревьев, кустарниках, растительном надпочвенном покрове, лесной подстилке. В таких местах невозможно провести дезактивацию и применить агротехнические приемы, используемые на сельскохозяйственных землях для снижения уровней и темпов поступления радионуклидов в растения. В природно-растительных комплексах, как известно, радионуклиды содержатся в самых верхних слоях почвы. В течение многих лет они являются источниками радиоактивной опасности для людей и животных.

Следует не забывать, что радиоактивное загрязнение территории нашей республики – это не кратковременное явление. На протяжении многих десятилетий нескольким поколениям придется жить в условиях повышенной радиации и остерегаться ее. Значит, надо больше знать и разумно использовать эти знания для своей же безопасности.

Радиоактивное загрязнение почв и растений в первые дни после аварии было обусловлено в основном следующими радиоактивными изотопами: йодом–131, стронцием–90, плутонием–238, –239, –240, цезием–134, 137 и др. Все названные радионуклиды как раз и являются долгоживущими (за исключением йода–131). Исследования пространственного распределения долгоживущих радионуклидов стронция–90, цезия–137 и изотопов плутония в природно-растительных комплексах Беларуси показало, что изотопы цезия повсеместно распространены, т.к. они оказались более «летучими».

Наибольшему радиоактивному загрязнению подверглись лесные фитоценозы, играющие роль природных фильтров на пути ветровых аэрозольных потоков радионуклидов. Особенно загрязнены хвойные леса. На лугах и пашнях плотность загрязнений почв радионуклидами, как правило, в 3–5 раз меньше. Радионуклиды, выпавшие в лесных фитоценозах, осели на кронах, стволах деревьев и в почве. Учеными был рассчитан период полужизни древостоя от поверхностных загрязнений. Он равен 240–330 дней. Выпавшие на почву радионуклиды в естественных сообществах сосредоточены в слое почвы 0–5 см: в лесах – в подстилке и почве, на лугах – в дернине. Так как верхний слой почвенного профиля является наиболее биогенной частью почвы, дикорастущие растения отличаются повышенной радиоактивностью по сравнению с сельскохозяйственными. Последние выращиваются на пашнях и полях, где почва, вследствие агрообработки, перемешивается, значит, и концентрация радионуклидов уменьшается.

В лесных сообществах наибольшими аккумуляторами (концентраторами) радионуклидов являются мхи, грибы и лишайники. Концентрация радионуклидов в них на единицу сухой массы превосходит таковую в почве на 1–2 порядка. Второе место по концентрации радионуклидов занимает надпочвенный покров, состоящий из различных сосудистых растений.

С течением времени удельная гамма-активность растительности живого надпочвенного покрова снижается. Это происходит в основном за счет распада короткоживущих изотопов, а также вследствие уменьшения биологической доступности цезия–137 из почвы. Было отмечено, что дольше снижение аккумуляции радиоцезия наблюдалось в лиственных фитоценозах. Установлено, что аккумуляция стронция–90 растениями с течением времени возрастает в связи с увеличением подвижности его в почвах. По содержанию стронция–90 кустарниковая и травянистая растительность распределяется следующим образом: папоротники → зверобойные → розоцветные → мхи → лилейные → кипрейные → брусничные.

По степени аккумуляции цезия-137 растения различных семейств располагаются в следующей последовательности: фиалковые → маковые → колокольчиковые → вересковые → крапивные → кипрейные → сложноцветные → губоцветные → зверобойные → норичниковые → брусничные → злаковые → лилейные → розоцветные → коноплевые.

Наибольшей аккумуляцией гамма-излучающих радионуклидов отличаются рябина, лещина, крушина. Значительно более низкую радиоактивность имеют растения подроста, нежели растения подлеска. Большое количество стронция накапливают малина, крушина, рябина и лещина. Значительное содержание цезия-137 наблюдается у растений крушины, малины, рябины (до 10^{-7} Ки/кг). Большое влияние на величину аккумуляции радионуклидов у растений подроста и подлеска оказывают уровень загрязнения радионуклидами почвы и лесорастительные условия, а также их видовая принадлежность.

Лесообразующие породы (древесные растения верхнего яруса) аккумулируют в ассимилирующих органах значительно меньшие количества радионуклидов, чем растения нижних ярусов. По коэффициентам накопления изучаемые породы располагались в следующей последовательности (в порядке убывания): береза повислая, осина, дуб черенчатый, ольха черная, сосна обыкновенная. Радиоактивность стволовой древесины уменьшается от наружных слоев к сердцевине. Молодняки сосны накапливают изотопов на 10–15% больше, чем приспевающие древостои.

Как показал радиологический мониторинг, сосна обыкновенная наиболее чувствительна к ионизирующим излучениям. Так, при уровнях радиационного фона (1986г.) 100–500 мР/ч наблюдалось массовое пожелтение и опадение хвои, а также усыхание деревьев. Этот факт дает основание использовать для лесовосстановительных работ в 10-километровой зоне отчуждения в основном лиственные породы как наиболее радиочувствительные и менее пожароопасные.

Самый высокий уровень накопления радионуклидов среди сельскохозяйственных культур характерен для представителей семейства бобовых. Злаковые яровые и озимые сельскохозяйственные культуры накапливают их в 5–8 раз меньше.

Радиозэкологический мониторинг природных популяций растений показал, что ионизирующее излучение вызывает повышение уровня мутационной изменчивости, а также разнообразные морфологические и физиологические отклонения. Характерной особенностью наблюдаемых мутагенных эффектов явились множественные поражения хромосомного аппарата.

Установлена устойчивая тенденция к положительной зависимости между мощностью дозы и вызываемым ею эффектом. Чаще всего при повышении дозовых нагрузок возрастает количество различных нарушений и спектр их расширяется. Вместе с тем в ряде случаев повышенный уровень аномалий наблюдался и при невысоких экспозиционных дозах – 1 и менее мР/ч (по состоянию на 1986г.).

Вариабельность радиочувствительности растений в значительной мере видоспецифична.

В результате многочисленных научных исследований был составлен ряд рекомендаций различным производствам по использованию растительных ресурсов в зонах радиоактивных загрязнений. Промышленная заготовка леса на технические нужды возможна при загрязнении почвы цезием—137 с поверхностной активностью не свыше 15 Ки/км^2 , на топливо до 5 Ки/км^2 . Использование листвы и хвои древесных пород для производства хвойно-витаминной муки разрешается при плотности загрязнения почв в насаждениях не более 2 Ки/км^2 . Заготовка грибов, ягод и дикорастущего лекарственного сырья ограничивается при $1\text{--}2 \text{ Ки/км}^2$.

Посадка лесонасаждений рекомендуется на землях, склонных к облысению, с плотностью загрязнения почв до 40 Ки/км^2 . Территории с более высокой плотностью загрязнения оставляются для естественного лесозарастивания. Это в первую очередь относится к эрозионно-опасным землям и другим площадям, неблагополучным в экологическом отношении. Подбирая породы для лесовосстановления в таких зонах, следует отдавать предпочтение лиственным древесным растениям. Используют крупномерный посадочный материал, чтобы выдержать конкуренцию с сорной травянистой растительностью и снизить дозу внешнего облучения саженцев радионуклидами почвы. При создании лесных насаждений предпочтение отдают смешанным насаждениям, так как они наиболее устойчивы к неблагоприятным воздействиям внешней среды, в том числе и к радиационным загрязнениям.

Природно-растительные комплексы занимают около 50% всей территории Беларуси, из них на долю лесных ландшафтов и фитоценозов приходится 32%, лугово-болотных — 17,4%. Это источники сырья для промышленности и кормов для животноводства. Наконец, это зона рекреации, активного отдыха и туризма, т.е. познавательная зона нашей Беларуси. К таким зонам следует относиться бережно, по-хозяйски.

Радиоэкологические исследования показали, что радиоактивность почв и растений природно-растительных комплексов весьма динамична. Это связано с естественным распадом радионуклидов, их миграцией в почве, изменением усваиваемости радиоизотопов растительностью по времени, а также с климатическими особенностями года. Установлено также, что последствия действия ионизирующей радиации сказываются и на последующих генерациях растений.

Из вышесказанного следует, что радиоэкологический мониторинг в Республике Беларусь имеет большое значение. В природно-растительных комплексах это значение недооценимо, следовательно, радиоэкологический мониторинг необходимо проводить постоянно и систематически.

8.4. Последствия аварии на ЧАЭС для Республики Беларусь

По оценке специалистов, общие экономические потери Республики Беларусь от Чернобыльской катастрофы составляют до 240 млрд. долларов США. При этом потери постоянно растут в отраслях хозяйственной деятельности и социальной сфере. Больше всего пострадали агропромышленный комплекс, лесное и жилищно-коммунальное хозяйства, минерально-сырьевая база и водные ресурсы. Значительные затраты связаны с реализацией законов о социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС.

Из сельскохозяйственного оборота выведено 2,64 тыс. км² сельскохозяйственных угодий. Ликвидировано 54 колхоза и совхоза, 9 предприятий агропромышленного комплекса, прекратили хозяйственную деятельность ещё около 300 других хозяйственных комплексов, закрыто свыше 600 школ и детских садов, свыше 500 предприятий торговли и общественного питания, около 100 больниц.

Статистика утверждает, что после аварии на ЧАЭС состояние здоровья населения Республики Беларусь продолжает ухудшаться, особенно населения заражённой местности. Онкологические заболевания в среднем по республике увеличились в 7 раз, заболевания раком щитовидной железы по данным на январь 2000 года – в 13 раз. В отдельных районах Гомельской области эти заболевания возросли в 40 раз. Рост числа генетических последствий по Республике Беларусь увеличился в среднем на 18 %, на загрязнённой территории – на 30 %. Число врождённых пороков развития у детей, проживающих на территориях с высоким уровнем радиации, в 5 раз. Преждевременные роды и выкидыши в Гомельской области возросли на 75%, а по республике в целом – на 60 %. Наблюдается рост числа заболеваний органов дыхания в 2 раза; желудочно-кишечного тракта в 2,6 раза; эндокринной системы в 4,5 раза; нервной системы в 3,5 раза; мочеполовой системы в 3,7 раза, а также значительный рост числа заболеваний костно-мышечной системы и туберкулёза. Замечено, что, наряду с радиацией, действуют и другие негативные факторы. При воздействии на население малых доз облучение в сочетании с курением, канцерогенными веществами, пестицидами число заболеваний, вызванных радиацией, значительно возрастает.

ГЛАВА IX ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

9.1. Международная деятельность в области радиационной защиты

В основе критериев радиационной безопасности лиц, имеющих дело с радиоактивными веществами и источниками радиоактивных излучений по роду своей профессии, взяты в основу сведения о биологическом действии радиационных факторов.

Проблема защиты населения от действия ионизирующих излучений носит глобальный характер, а поэтому соответствующие мероприятия разрабатываются в международном масштабе. В 1928 г. на 2-м Международном радиологическом конгрессе в Стокгольме был создан специальный Комитет по защите от рентгеновских лучей и радия, который в 1950 г. был реорганизован в Международную комиссию по радиационной защите (МКРЗ). Комиссия анализирует и обобщает все достижения в области защиты от ионизирующих излучений и разрабатывает соответствующие рекомендации.

Сотрудничество также налажено с Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). В 1955 г. Генеральной Ассамблеей ООН основан Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР), осуществляющий сбор и анализ международной информации о различных аспектах действия ионизирующих излучений на живые организмы. Среди других международных организаций, занимающихся вопросами действия ионизирующих излучений на живые организмы, следует отметить Международную Ассоциацию по радиационной защите (МАРЗ). Все эти международные организации разрабатывают лишь рекомендации по основным принципам регламентирования действия радиации. Эти рекомендации не являются обязательными для принятия в законодательные акты и документы отдельных стран.

Функционирует Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), созданное в 1955 г. в соответствии с решением ООН. В ее состав входит более 100 стран. Ежегодно МАГАТЭ представляет Генеральной Ассамблее ООН доклад о своей деятельности. МАГАТЭ курирует вопросы, связанные с радиационной безопасностью, на всех этапах работ по мирному использованию атомной энергии. Все страны – члены МАГАТЭ – обязаны выполнять утвержденные нормы и правила обращения с источниками ионизирующих излучений.

В 1934 г. НКДАР рекомендовал национальным правительствам в качестве толерантной (переносимой) дозы 200 мР/сутки или 2 мЗв/сутки. В 1936 г. значение этой дозы снижено до 100 мР/сутки. В дальнейшем толе-

рантная доза была заменена предельно допустимой дозой (ПДД). В 1948 г. МКРЗ снизила ПДД до 50 мР/сутки или 0,5 мЗв/сутки.

Сначала было сформулировано понятие о ПДД как о «такой дозе, которая, как можно полагать в свете современных знаний, не должна вызывать значительного повреждения человеческого организма в любой момент времени на протяжении его жизни». «Значительное повреждение организма – всякое повреждение или влияние, которое человек считает нежелательным или авторитетные медицинские специалисты рассматривают как вредное для здоровья и благополучия человека».

Накопленные экспериментальные материалы исследований в области радиационной генетики позволили прийти к заключению об отсутствии порогового действия ионизирующих излучений. Какой бы предел ни устанавливался для ионизирующих излучений, определенный риск будет всегда; лишь при отсутствии радиационного облучения риск может быть устранен совсем.

В 1958 г МКРЗ приняла решение об утверждении новых предельно допустимых уровней облучения. Профессиональное облучение не должно превышать 50 мЗв/год (5 бэр/год).

9.2. Нормирование радиационного воздействия

Основными документами, регламентирующими действие ионизирующих излучений, являются: Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» от 5.01.1998 г.; «Нормы радиационной безопасности» (НРБ–2000), принятые 25.01.2000 г.; «Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП 72/87). В этих документах представлены санитарно–гигиенические нормативы, регламентирующие радиационную безопасность человека. В них излагаются основные требования по обеспечению радиационной безопасности, которые распространяются на все предприятия, учреждения и другие организации, которые производят, обрабатывают, применяют, хранят или транспортируют естественные и искусственные радиоактивные вещества, а также перерабатывают или обезвреживают радиоактивные отходы.

Закон «О радиационной безопасности населения» определяет основы правового регулирования в области обеспечения радиационной безопасности населения, направлен на создание условий, обеспечивающих охрану жизни и здоровья людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.

В соответствии с Законом и нормами основными принципами обеспечения радиационной безопасности являются:

– принцип нормирования – непревышения допустимых пределов индивидуальных доз граждан от всех источников ионизирующего излучения;

– принцип обоснования — запрещение всех видов деятельности по использованию источников ионизирующего излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного превышающим естественный радиационный фон облучением;

– принцип оптимизации – поддержание на достижимо низком уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника ионизирующего излучения.

К мероприятиям по обеспечению радиационной безопасности относятся:

– проведение комплекса мер правового, организационного, инженерно-технического, санитарно-гигиенического, медико-профилактического, агротехнического, воспитательного и образовательного характера;

– осуществление органами государственной власти и управления, общественными объединениями, другими юридическими лицами и гражданами мероприятий по соблюдению норм и нормативов в области радиационной безопасности;

– информирование населения о радиационной обстановке и мерах по обеспечению радиационной безопасности;

– обучение населения в области обеспечения радиационной безопасности.

В Законе рассматриваются также вопросы государственного нормирования в области обеспечения радиационной безопасности. Государственное нормирование осуществляется путем установления санитарных правил, норм, гигиенических нормативов, правил радиационной безопасности, государственных стандартов, строительных норм и правил, правил охраны труда, распорядительных, методических и иных документов по радиационной безопасности, которые не должны противоречить положению Закона «О радиационной безопасности населения».

Устанавливаются основные гигиенические нормативы (допустимые пределы доз) облучения на территории Республики Беларусь в результате воздействия источников ионизирующего излучения. Значения их приведены в нормах радиационной безопасности НРБ–2000.

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

В Законе также определены функции государства, государственное управление в области обеспечения радиационной безопасности, государственный надзор и контроль, а также права и обязанности граждан и общественных объединений в области обеспечения радиационной безопасности, определена их ответственность за невыполнение или нарушение требований по обеспечению радиационной безопасности.

9.3. Нормы радиационной безопасности (НРБ–2000)

НРБ–2000 применяются для обеспечения безопасности человека во всех условиях воздействия на него ионизирующего излучения искусственного или природного происхождения. Требования и нормативы, установленные НРБ–2000, являются обязательными для всех юридических лиц, независимо от их подчиненности и формы собственности, в результате деятельности которых возможно облучение людей, а также для местных распорядительных и исполнительных органов, граждан, проживающих на территории Республики Беларусь. Основополагающим документом являются НРБ–2000, регламентирующие требования Закона Республики Беларусь «О радиационной безопасности населения» в форме основных пределов доз, допустимых уровней воздействия ионизирующего излучения и других требований по ограничению облучения человека. Никакие другие нормативные и методические документы не должны противоречить требованиям этих норм.

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья населения, включая персонал, от вредного воздействия ионизирующего излучения путем соблюдения основных принципов и норм радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности при использовании излучения в различных областях хозяйства, в науке и медицине. Принципами радиационной безопасности являются принцип нормирования, принцип обоснованности, принцип оптимизации, которые изложены в Законе «О радиационной безопасности населения».

НРБ–2000 устанавливают следующие две категории облучаемых лиц:

- персонал (профессиональные работники), непосредственно работающие с источниками ионизирующих излучений, или лица, которые по роду своей деятельности могут подвергаться облучению;
- население – все население страны, включая лиц из персонала вне сферы и условий их деятельности.

Для категорий облучаемых лиц устанавливаются три класса нормативов:

- основные пределы доз (ПД);
- допустимые уровни монофакторного воздействия (для одного радионук-

лида, пути поступления или одного вида внешнего облучения), являющиеся производными от основных пределов доз: пределы годового поступления (ПГП), допустимые среднегодовые объемные активности (ДОА), среднегодовые допустимые удельные активности (ДУА) и др.;

– контрольные уровни (дозы, уровни, активности, плотности потоков и др.).

Предел дозы (ПД) – величина эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Основные пределы доз облучения (эффективная доза): для персонала 20 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв в год; для населения – 1 мЗв в год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв в год.

Эффективная доза для персонала не должна превышать за период трудовой деятельности (50 лет) 1 Зв, а для населения за период жизни (70 лет) – 70 мЗв. Основные пределы доз не включают в себя дозы от природного и медицинского облучения, а также дозы вследствие радиационных аварий.

В НРБ–2000 приведены взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (т.е. множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов), которые приведены в приложении 3.

В НРБ–2000 приведены также взвешивающие коэффициенты для тканей и органов при расчете эффективной дозы (т.е. множители эквивалентной дозы в органах и тканях, используемые в радиационной защите для учета различной чувствительности разных органов и тканей). Они показаны в приложении 4.

9.4. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами

Санитарные правила работы с радиоактивными веществами изложены в «Основных санитарных правилах работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений» (ОСП 72/87). В этих правилах содержатся требования по обеспечению радиационной безопасности персонала и населения, по охране окружающей среды от загрязнения радиоактивными веществами, требования к размещению учреждений и предприятий для работы с радиоактивными источниками, к организации работы с ними, к вентиляции, водоснабжению и канализации, к обезвреживанию радиоактивных отходов и дезактивации и радиационному контролю. Кроме того, в ОСП–72/87 изложены санитарно–законодательные положения, регулирующие обеспечение радиационной безопасности, с учетом следующих правил:

- распространения государственного санитарного надзора на все виды работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений;
- обеспечения их учета и сохранности;
- ответственности администрации за обеспечение радиационной безопасности на объекте;
- обязательного оповещения о радиационной опасности;
- обязательного применения средств защиты от лучевого воздействия;
- изолированного расположения радиоактивных объектов;
- ограниченного доступа к работе с радиоактивными веществами;
- обязательного осуществления радиационного контроля;
- строгого соблюдения норм и правил по охране труда и пожарной безопасности.

Как уже отмечалось, на АЭС может произойти выброс радионуклидов в атмосферу, а поэтому возможны следующие виды радиационного воздействия на население:

- внешнее облучение при прохождении радиоактивного облака;
- внутреннее облучение при вдыхании радиоактивных продуктов деления;
- контактное облучение из-за радиоактивного загрязнения кожи;
- внешнее облучение, обусловленное радиоактивным загрязнением поверхности земли, зданий и т.д.;
- внутреннее облучение при употреблении загрязненных продуктов и воды.

В зависимости от обстановки для защиты населения могут быть приняты следующие меры:

- ограничение пребывания на открытой местности;
- герметизация жилых и служебных помещений на время формирования радиоактивного загрязнения территории;
- применение лекарственных препаратов, препятствующих накоплению радионуклидов в организме;
- временная эвакуация населения;
- санитарная обработка кожных покровов и одежды;
- простейшая обработка продуктов питания (обмыв, удаление поверхностного слоя и др.);
- исключение или ограничение употребления в пищу загрязненных продуктов.

Другие нормативные документы. Авария на ЧАЭС является самой крупной экологической катастрофой современности. Республика Беларусь объявлена зоной национального экологического бедствия. После аварии были приняты решения о дополнительных мерах по усилению охраны здоровья и улучшению материального положения населения; отселению жителей наиболее пострадавших населенных пунктов. В 1989 г. Правительст-

вом Республики Беларусь разработана и принята «Государственная программа преодоления последствий на ЧАЭС на 1990–1995 гг. и на период до 2000 г.». Целью программы являлось создание благоприятных для здоровья человека условий жизнедеятельности в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению, повышение условий жизни населения этих районов.

К мероприятиям программы относятся:

- отселение жителей из населенных пунктов, в которых не может быть обеспечена радиационная безопасность проживания и размещение их на новом месте жительства;
- улучшение уровня медицинского обслуживания и оздоровления населения, особенно детей;
- реализация рекомендаций по проведению технологии сельскохозяйственного производства и перерабатывающей промышленности в соответствии с новыми требованиями;
- повышение уровня торговли, образования, культурного, коммунально-бытового и транспортного обслуживания населения в загрязненных районах;
- обеспечение населения чистыми продуктами;
- повышение эффективности проводимых мер по дезактивации местности и стабилизации радиационной обстановки;
- научное обеспечение проблем, связанных с жизнедеятельностью в загрязненных районах;
- организация систематической информации о проводимой работе по ликвидации последствий аварии.

Правительством Республики Беларусь была также разработана «Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на ЧАЭС на 2001–2005 гг. и на период до 2010 г.», в которой утверждены мероприятия в конкретных, новых условиях.

В 1991 г. был принят Закон «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС». Закон направлен на защиту прав и интересов граждан, пострадавших от аварии. В нем отмечалось, что основным показателем оценки территории, где условия проживания и трудовая деятельность не требуют каких-либо ограничений, является эффективная эквивалентная доза, не превышающая 1 мЗв/год (0,1 бэр/год). При превышении этой дозы над уровнем естественного и техногенного радиационного фона проводятся защитные мероприятия, вплоть до отселения населения. Указаны ограничения на въезд на загрязненные территории и порядок эвакуации населения; ограничения по производству продуктов питания и сырья на загрязненных территориях. Определен также статус граждан, пострадавших от катастрофы, перечислены льготы участникам ликвидации последствий катастрофы, определен порядок оплаты труда граждан, работающих на территории радиоактивного загрязнения, пенсионного обеспе-

чения граждан, пострадавших от катастрофы и др.

В 1991 г. принят также Закон «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС». Этот закон устанавливает правовой режим территорий Республики Беларусь, подвергшихся радиоактивному загрязнению, направлен на снижение радиоактивного воздействия на население и различные экологические системы, на проведение природно-восстановительных и защитных мероприятий, на рациональное использование природных, хозяйственных возможностей и научного потенциала этих территорий.

При классификации территорий и зон радиоактивного загрязнения приняты следующие критерии:

- условия проживания населения характеризуются величиной эффективной эквивалентной дозы облучения и поверхностной активностью радионуклидов;

- возможность получения экологически чистой продукции и сырья.

Территории радиоактивного загрязнения — это часть земель, на которых в результате катастрофы возникло продолжительное загрязнение окружающей среды радиоактивными веществами с плотностью загрязнения радионуклидами цезия-137, стронция-90, плутония-241 соответственно 1,0–0,15–0,01 Ки/км² и более, а также другие территории, на которых средняя эффективная эквивалентная доза облучения населения может превышать 1 мЗв/год, и земли, на которых невозможно получение чистой продукции.

В зависимости от плотности загрязнения почв радионуклидами и степени воздействия на человека территории относятся к следующим зонам:

- зона первоочередного отселения, зона отчуждения — территория с плотностью загрязнения почв цезием-137 от 40 Ки/км² и выше;
- зона дальнейшего отселения — территория с плотностью загрязнения почв цезием-137 от 15 до 40 Ки/км², на которых среднегодовая эффективная доза облучения человека может превысить 5 мЗв/год (0,5 бэр в год);
- зона с правом на отселение — территория с плотностью загрязнения почв цезием-137 от 5 до 15 Ки/км², на которых среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения составляет 1 мЗв/год (0,1 бэр в год);
- зона проживания с периодическим радиационным контролем — территория с плотностью загрязнения почв цезием-137 от 1 до 5 Ки/км², где среднегодовая эффективная эквивалентная доза облучения не превышает 1 мЗв/год (0,1 бэр в год).

В других разделах и статьях Закона дан правовой режим территорий радиоактивного загрязнения, изложены требования по использованию территорий радиоактивного загрязнения, т.е. перечислены виды деятельности в каждой зоне; установлены регламенты захоронения радиоактивных отходов; определен порядок радиационного контроля на территориях радиоактивного загрязнения.

ГЛАВА X ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

10.1. Мероприятия радиационной безопасности

Установление дозовых границ необходимо для планирования мер защиты в тех случаях, когда надфоновое облучение неизбежно.

К основным мероприятиям радиационной безопасности относятся:

- меры по минимизации внешнего облучения;
- меры по уменьшению поступления радионуклидов в организм человека и ускорению их выведения из организма;
- меры по уменьшению радиоактивного загрязнения объектов и окружающей среды.

10.2. Пути снижения внешнего облучения

Для снижения внешнего облучения используются различные физические и химические методы. Основными способами защиты от внешнего облучения являются:

- защита временем;
- защита расстоянием;
- применение защитных экранов;
- фармакохимическая защита.

Защита временем – это определение допустимой продолжительности работы в поле излучения. Так как доза накапливается со временем, необходимо так продумать работу, чтобы время контакта с источником облучения было бы минимальным. Для снижения внешнего облучения ограничивают **время пребывания** в зоне повышенной радиации. Например, при дезактивации крыши машинного участка 4-го энергоблока ЧАЭС время пребывания людей на крыше ограничивалось 60–90 с.

Защита расстоянием предполагает увеличение расстояния до источника радиации. Излучение точечного источника распространяется во все стороны. Интенсивность облучения снижается с увеличением расстояния до источника по закону обратных квадратов, т.е. интенсивность облучения убывает пропорционально квадрату расстояния до источника. При увеличении расстояния до источника в 2 или 3 раза интенсивность излучения уменьшается, соответственно, в 4 и 9 раз. Для увеличения расстояния от источника до оператора на атомных предприятиях широко используют дистанционные манипуляторы.

Эффективным способом защиты является **экранирование**. Использование защитных экранов позволяет человеку находиться и даже длительно работать вблизи источника радиации, оставаясь в безопасности. Используют поглотители такой толщины, которые позволяют ослабить излучение до безопасного уровня. Защитные свойства материалов определяются коэффициентом ослабления. Слой половинного ослабления, т.е. толщина вещества, которое ослабляет радиацию в 2 раза, для фотонов с энергией 1МэВ составляет для свинца 1,3 см, для бетона — 13 см. Активная зона реактора на АЭС для защиты от γ -излучения окружена бетонной стеной необходимой толщины, чтобы в рабочих помещениях радиационный фон не превышал допустимую величину. В конце работы реактора РБМК в нем содержится 1500 МКи продуктов распада ядерного горючего. Источник радиации активностью в 1Ки на расстоянии 1м создает мощность экспозиционной дозы в 1Р/ч.

При аварии на ЧАЭС была выброшена смесь летучих продуктов деления ядерного топлива с мощным γ -излучением. Для защиты от радиоактивного облака обычно используются защитные свойства зданий. Внешнее γ -излучение в деревянных домах снижается в 3–4раза, в кирпичных в 7–10 раз, в подвалах домов, соответственно, в 30– 100 раз.

Установлено, что ни свинец, ни бетон, ни барит не могут полностью поглотить жесткие γ - и рентгеновские лучи. Серьезные трудности существуют в защите от потока нейтронов, т.к. бетонная и свинцовая защита в этом случае малоэффективна. Наиболее целесообразно использовать богатые водородом материалы – воду, парафин, пластики и т.п.

Фармакохимическая защита – это способность химических соединений снижать лучевое поражение молекулярных и других систем организма. В настоящее время известно около 1500 радиозащитных препаратов. Наиболее эффективными из них являются цистамин, гистамин, триптамин, серотонин, норадреналин, тиомочевина и др. Большинство радиозащитных веществ (радиопротекторов) приводят к положительному результату только в случае, если они были введены в организм незадолго до облучения.

В основе защитных механизмов радиопротекторов лежат следующие процессы:

- передача энергии от макромолекул организма к макромолекулам радиопротектора;
- конкуренция радиопротектора за основные частицы радиолиза воды и обрыв возможных цепных реакций;
- поглощение энергии вторичного излучения, которое возбуждает макромолекулы;
- создание защитных связей с молекулами ферментов и белков;
- предупреждение нарушения возбудительных и тормозных процессов в ЦНС;

– стимулирование ускоренного выведения из организма токсических продуктов радиолитиза воды и др.

Реакции организма на облучение очень сложны. Универсального механизма защиты не существует. Для любого радиопротектора существует порог дозы, выше за который его применение неэффективно. Концентрация серотонина и мексамина не должна превышать 10–60 мг/кг, цистамина – 120–180 мг/кг, цистифоса – 300–400 мг/кг и т.д.

Защита от внутреннего облучения очень сложная. Радионуклиды, накапливаясь в отдельных органах, длительно излучают фотоны и частицы. Поэтому предварительное применение радиопротекторов, даже наиболее длительно действующих, неэффективно. Химическая профилактика в этих условиях преследует цель недопущения всасывания радионуклида внутрь организма.

Ряд веществ содействует мобилизации защитных функций организма в отношении неблагоприятных факторов внешней среды (так называемые вещества – адаптогены). К ним относятся препараты элеутерококка, женьшеня, китайского лимонника, аралии маньчжурской, родиолы розовой и других растений. Они эффективны как при остром, так и при пролонгированном и фракционированном облучении, хотя и при дозах радиации ниже абсолютно смертельных.

К группе веществ природного происхождения, обладающих противолучевой активностью, относятся многие продукты нормального обмена веществ: витамины и их биологически активные формы – коферменты, нуклеиновые кислоты и их производные, многие растительные фенольные соединения, аминокислоты, некоторые углеводы и липиды. Хорошие результаты дает использование аминокислотных комплексов, АТФ, мелантинполипептида из пчелиного яда, состоящего из 26 аминокислотных остатков. Довольно часто говорят о защитном действии алкоголя. Действительно, молекулы спирта легко окисляются и способны эффективно захватывать свободные радикалы, которые образуются при радиолитизе воды, но защитное действие не проявляется при хроническом облучении организма. То есть в данном случае алкоголь может принести только вред. Определенное защитное действие оказывает красное вино, в котором присутствуют фенольные соединения (антоцианы, катехины). Они обладают антиокислительной активностью и могут создавать нерастворимые комплексы с ионами металлов, в том числе и радиоактивными (стронцием-90, цезием-137 и др.). Связывание металлов в комплексы предотвращает проникновение радионуклидов из пищевода в кровь и ускоряет их выведение вместе с экскрементами. Однако такой эффект может наблюдаться при однократном поступлении радионуклидов и при условии приема вина не позднее 1–1,5 часа после поступления радионуклидов в организм.

Для защиты щитовидной железы человека от радиоактивного йода эффективным методом является йодная профилактика. Коллегия министерства здравоохранения постановлением №6 от 28.04.93 г. возложила ответственность за своевременное проведение йодной профилактики в случае аварии на АЭС на начальников областных управлений здравоохранения и на главных врачей медико-территориальных учреждений.

Своевременное проведение йодной профилактики обеспечивает снижение дозы облучения щитовидной железы на 97–99% и в десятки раз всего организма. Прием йодистого калия через 1 час после попадания в организм радиоактивного йода с вдыхаемым воздухом или пищевыми продуктами уменьшает дозу облучения щитовидной железы на 90 %, через 2 часа – на 85 %, через 3 часа – на 60 %, а через 6 часов – на 50 %.

Информация о повышении радиационного фона на 20 мкР/ч для данной местности используется как критерий для начала проведения йодной профилактики. При этом ограничивается пребывание людей на открытой местности, осуществляется герметизация помещений.

Для защиты щитовидной железы от накопления радиоактивных изотопов йода самым эффективным препаратом является йодистый калий. Защитный эффект однократного применения йодистого калия длится 24 часа. Однократный прием йодистого калия в сутки 125мг для взрослого человека и 65 мг для детей старше 3 лет, в течение 10 суток. Детям до 3 лет необходимо применять йодистого калия по 60–65мг в сутки в течение 2 суток, беременным и кормящим женщинам по 125мг в течение 2 суток.

Если отсутствует йодистый калий, можно использовать 5% раствор йодной настойки и проводить йодную профилактику под контролем медиков.

При проведении йодной профилактики прием йодистого калия должен быть не более 1250мг – для взрослых; 600–650мг – для детей свыше 3 лет; 120–130мг – для детей до 3 лет; 250мг – для беременных и кормящих женщин.

10.3. Пути снижения внутреннего облучения

В условиях проживания на загрязненной радионуклидами территории следует учитывать основные принципы снижения внутреннего облучения:

- уменьшение поступления радионуклидов в организм;
- усиление выведения радионуклидов из организма;
- использование радиопротекторных свойств пищи;
- обогащение рациона минеральными солями с целью замещения радионуклидов в организме и восполнения дефицита микроэлементов.

Поступление радионуклидов в организм происходит через органы

дыхания, желудочно–кишечный тракт (с водой и пищей).

Для защиты от внутреннего облучения при вдыхании радиоактивных аэрозолей применяются следующие мероприятия:

- сократить до минимума пребывание на загрязненной радионуклидами (аэрозолями) территории;
- обязательно использовать средства защиты органов дыхания и кожи;
- укрыться в защитных сооружениях или в жилых домах во время рассеивания радиоактивных веществ;
- принять меры защиты от проникновения радионуклидов в жилые дома (закрывать форточки, уплотнить рамы и дверные проемы);
- поддерживать чистоту помещения, ежедневно производить влажную уборку;
- следить за чистотой одежды и обуви, при входе в помещение менять обувь;
- строго соблюдать правила личной гигиены.

Для защиты органов дыхания можно использовать подручные средства. Так, платок, сложенный в 4 слоя, защищает органы дыхания от аэрозолей в 3 раза.

Для уменьшения поступления радионуклидов с пищей следует соблюдать следующие гигиенические требования:

- не пить воду из открытых источников, воду хранить в закрытых емкостях;
- пищу применять в закрытых помещениях, а хранить ее в герметической таре;
- ограничить употребление местных продуктов, особенно содержащих большое количество радионуклидов (продукты «концентраторы» – грибы, особенно маслята, моховики, говорушки, горькуши, бобовые (фасоль, горох);
- не употреблять овощи, которые росли в открытом грунте;
- не употреблять коровье молоко в летний период;
- полнее очищать корнеплоды и овощи, тщательно их мыть;
- снимать кожуру овощей и фруктов;
- овощи предварительно замачивать в воде на несколько часов;
- приготавливать «вторичные» бульоны: мясо вымачивают в течение 2–4 часов в холодной воде в 10% растворе поваренной соли; воду сливают, заливают новую порцию и доводят до кипения, после чего воду опять сливают и варку ведут в третьей порции воды;
- широко использовать засолку и маринование овощей, фруктов, грибов, но рассол и маринад в пищу не употреблять. Содержание радионуклидов снижается при этом в 1,5–2 раза;
- исключить из меню мясокостные бульоны, особенно кислые, так как стронций преимущественно переходит в бульон в кислой среде; исключить из меню холодец;

- проводить рациональную кулинарную обработку пищевых продуктов, т.е. приготавливать отварные, а не жареные или тушеные продукты;
- употреблять общеукрепляющие средства и витамины как в виде натуральных продуктов – овощей, фруктов, ягод, так и в виде медицинских препаратов;
- увеличить употребление таких минеральных веществ, как калий, кальций, фосфор. Наличие их в достаточном количестве в продуктах приводит к уменьшению накопления в организме человека радионуклидов: цезия, стронция и др.

Богаты калием фасоль, горох, картофель, шавель, томаты, крупа овсяная и пшеничная, капуста, редис, черная смородина. Кальций содержится в молочных продуктах, фасоли, горохе, крупе овсяной, гречневой, перловой, моркови, капусте. Фосфором богаты яйца, крупа гречневая, овсяная, перловая, горох, фасоль, хлеб ржаной;

- не рекомендуется употреблять вареные яйца, так как в скорлупе накапливается стронций-90, переходящий в белок яиц при их варке;
- проводить техническую кулинарную обработку продуктов. Творог содержит цезий-137 в 4–6 раз, сыр – в 10 раз, масло – в 50 раз меньше, чем молоко, из которого они произведены. Отварная рыба содержит цезий-137 в 10 раз меньше, картофель отварной – в 1,7 раза меньше, чем до варки.

10.4. Мероприятия по ускорению выведения радионуклидов из организма

При отсутствии поступления извне радионуклиды удаляются из мышечной и нервной ткани за 5–30 дней, из печени, почек, селезенки – за 1–2 месяца, из лимфатических узлов – за 2–3 года. Выведение радиоактивных веществ из организма можно усилить регулярным дополнительным введением жидкости в виде различных напитков. Рекомендуется применять настои трав и плодов, обладающих слабым мочегонным действием, например ромашки, зверобоя, бессмертника, тысячелистника, мяты, шиповника, укропа, тмина, зеленого чая. Для регулярного опорожнения кишечника используют продукты, содержащие клетчатку, т.е. хлеб грубого помола, пшено, гречку, перловку, овсянку, капусту, свеклу, морковь. Можно принимать отвары льна, крапивы, ревеня.

Особенно нужно отметить роль пектинов в выведении радионуклидов. Пектины – полисахариды растительного происхождения, они способны связывать и выводить из организма металлы, в том числе стронций, цезий и др. Пектины содержатся в соках с мякотью, яблоках, персиках, крыжовнике, клюкве, абрикосах, сливе, черноплодной смородине, вишне, черешне, клубнике, дыне, зефире, джемах, мармеладе и др. Пектиносодер-

жащие продукты улучшают перистальтику кишечника, которая ускоряет выведение ненужных веществ из организма.

Способствуют выведению радионуклидов из организма катехины – дубильные вещества, антоцианы – красящие вещества, Их много в чае, соках и спелых фруктах.

Уникальными радиопротекторными свойствами обладает грецкий орех. Ядра ореха снижают пероксидное окисление липидов. В их состав входит калий, кальций, магний, фосфор, железо, марганец, медь, цинк и другие микроэлементы. Они богаты витаминами Е, В₁, В₆, фолатином, дубильными веществами. Толченые ядра с медом увеличивают мочеотделение и обладают желчегонным действием, способствуют выведению радионуклидов (особенно цезия).

При радиационном поражении особая роль отводится режиму питания. При избыточном потреблении пищи в организм попадает и большее количество радионуклидов. В условиях действия малых доз радиации в результате пероксидного окисления липидов в организме образуются ядовитые вещества. При действии радиации необходимо обеспечить организм достаточным количеством белков. Белки обладают радиопротекторными свойствами, они повышают устойчивость к хроническому внутреннему облучению, снижают всасывание радионуклидов, повышают устойчивость организма к инфекции. Радиозащитным действием обладают также продукты, богатые полинасыщенными жирными кислотами и регулирующими процессы пероксидного окисления липидов, т.е. растительные масла, рыба, орехи, семена тыквы, подсолнечника.

К веществам, снижающим радиационное воздействие на организм, принадлежат витамины. Особенно большая роль отводится витамину А. Недостаток его сказывается на нервной и иммунной системах. Витамин А и витамин Е способствуют нормализации метаболических процессов и уменьшению пероксидного окисления липидов, стабилизации клеточных мембран. Витамин С способствует усилению окислительно-восстановительных способностей клетки, улучшает тканевое дыхание. Витамины групп В улучшают метаболизм, антиоксидескую функцию печени. Недостаток витаминов и белков отражается на функции защиты организма от вредных факторов внешней среды.

10.5. Пути снижения содержания радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства

Основные дозовые нагрузки на население обусловлены потреблением сельскохозяйственных продуктов, производимых на загрязненных территориях. Чтобы сократить поступление радионуклидов в организм человека, необходимо снижать интенсивность их поступления в растения.

Накопление радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур можно снизить путем использования различных агрохимических и агротехнических приемов:

- традиционных мероприятий в агропромышленном производстве, направленных на сохранение и увеличение плодородия почвы, рост урожайности и одновременно способствующих уменьшению перехода радиоактивных веществ из почвы в растение;
- специальных приемов, уменьшающих поступление радионуклидов в растения, но уменьшающих урожайность растений и ухудшающих плодородие почвы.

Основным агрохимическим способом уменьшения поступления радионуклидов в растения является химизация земледелия. В первую очередь – это внесение удобрений и различных химических мелиорантов, улучшающих физико-химические свойства почвы и увеличивающих ее плодородие. Вносятся органические удобрения, минеральные удобрения, проводятся известкование почвы и другие агрохимические приемы. Фосфорные и калийные удобрения уменьшают переход радионуклидов в растения в 2 и более раз. Известкование почвы уменьшает поступление их в продукцию растениеводства в 1,5–3 раза.

Снижение концентрации радионуклидов в урожае при внесении удобрений обусловлено рядом причин, основными из которых являются:

- улучшение условий питания растений, а отсюда и увеличение биомассы, что приводит к «разбавлению» радионуклидов в урожае;
- усиление антагонизма между ионами радионуклидов и ионами солей вносимых удобрений (цезий – калий, стронций – кальций);
- образование плохо растворимых соединений радионуклидов с удобрениями.

Применение микроэлементов бора, молибдена, марганца и др. снижает переход радионуклидов в растения. Обычно используют некорневую подкормку микроэлементами. Основным агротехническим приемом для ограничения перехода радионуклидов в растение является пахота почв, что приводит к перераспределению радионуклидов в корнеобитаемом слое почвы. Радионуклиды перемещаются в глубину, а большинство растений обладают мелкой корневой системой.

К специальным приемам относятся следующие:

- механическое удаление верхнего загрязненного слоя почвы;
- глубокая вспашка с захоронением загрязненного верхнего слоя почвы;
- фитомелиорация загрязненных почв;
- внесение в почву специальных мелиораторов, связывающих радионуклиды в труднодоступные для растений формы;
- специальный подбор растений, т.е. сельскохозяйственных культур и их сортов для выращивания на загрязненных территориях.

Механическое удаление верхнего загрязненного слоя почвы – трудоемкий и дорогостоящий способ, который можно использовать на ограниченных площадях с высоким содержанием радионуклидов.

Наиболее эффективным приемом считается двухъярусная глубокая вспашка, когда верхний слой толщиной в 4–6 см укладывается на глубину 50–80 см, что снижает поступление радионуклидов в растения в 5–10 раз.

В результате аккумуляции радионуклидов растениями концентрация их в фитомассе может быть больше, чем в почве. Этот прием очищения почвы называется фитомелиорацией почв.

Одним из способов, ограничивающих аккумуляцию растениями радионуклидов, является перевод последних в трудноусваиваемые формы путем внесения в почву химических реагентов.

Особое место отводится подбору культур. Концентрация цезия-137 в сельскохозяйственных культурах распределяется по степени убывания следующим образом:

- зерновые, бобовые и зернобобовые: люпин – овес – гречка – горох – ячмень – просо – соя – фасоль;
- овощные и картофель: капуста – картофель – свекла – морковь – огурцы – томаты;
- травы: овсяница – костер – клевер – тимopheвка.

По концентрации стронция-90 овощные культуры располагаются в следующем порядке: свекла – огурцы – морковь – капуста – томаты – картофель; травы располагаются таким образом: разнотравье – осоки – ежа сборная – мятлик.

Озимые культуры накапливают радионуклидов меньше, чем яровые. По аккумуляции цезия и стронция зерновые и бобовые культуры разделяются на группы:

- слабонакапливающие: ячмень – пшеница – овес;
- средненакапливающие: крупяные: просо – чумиза – гречка;
- сильдонакапливающие: зернобобовые: фасоль – горох – бобы.

Из технологических приемов следует использовать переработку растениеводческой продукции: получение растительного масла из подсолнечника и сои, крахмала и спирта из картофеля, сахара из сахарной свеклы.

Концентрация радионуклидов уменьшается при консервировании продукции, засолке и других видах обработки. При переработке зерна в

муку много радионуклидов удаляется вместе с оболочками. Дезактивацию растительного сырья можно проводить и путем различного рода промывок.

Мероприятия по уменьшению содержания радионуклидов в продукции животноводства можно разделить на 4 группы:

- приемы, используемые при содержании животных на лугах и пастбищах;
- изменения в режиме кормления животных;
- перепрофилирование отраслей животноводства;
- технологическая переработка продуктов животноводства.

Корм — основной источник поступления радионуклидов в организм животных. В лугопастбищной растительности накапливается радионуклидов больше, чем в кормах искусственных сенокосов. Радионуклиды в организм животных поступают также с почвой.

Для защиты организма животных используют временное прекращение их выпаса. Животных переводят на стойловое содержание. Этот прием эффективен в отношении короткоживущих радионуклидов, например йода-131. Количество цезия-137 в молоке при этом снижается в 3–5 раз, в мясе — в 2–3 раза. При отсутствии запаса «чистых» кормов возможно 4–8-дневное голодание животных. В дальнейшем можно преобразовывать естественные сенокосы в искусственные, применять подбор возделываемых трав и специальную агротехнику их воздействия, проводить мелиорацию лугов и пастбищ. Применение всех этих мер может снизить содержание радионуклидов в молоке и мясе соответственно в 10 и 20 раз.

Изменение рациона кормления животных включает переход на использование «чистых» кормов; подбор кормов с минимальным содержанием радионуклидов — злаковые; обогащение рациона кормовыми добавками, которые избирательно связывают радионуклиды цезия и способствуют их удалению из организма. Таким качеством обладает аммониево-железо-гексацианоферрат, соли лития и др.; насыщение рациона минеральными веществами, особенно с содержанием кальция и калия, микроэлементами, белково-витаминными препаратами.

Учитывая то, что наиболее «чистое» мясо производится в свиноводстве и птицеводстве, необходимо перепрофилировать животноводство с крупного рогатого скота на свино- и птицеводство. При относительно высоких плотностях радиоактивного загрязнения целесообразно организовывать звероводческие хозяйства. При загрязнении почвы цезием-137 с плотностью в 5–15 Кз/км², где невозможно получение «чистого» молока, проводят переспециализацию с молочного на мясное производство.

Технологические приемы по снижению радионуклидов в животноводческой продукции делятся на обычные и специальные. Технологическая переработка молока на сливки, творог, сыр, масло сопровождается переходом радионуклидов в обрат, сыворотку, пахту со снижением радионуклидов в конечном продукте в 10–50 раз. Используют также переработку молока и сливок на гущенные и сухие. Практически не остается радио-

нуклидов в топленом масле. Для лучшей очистки молока от стронция-90 добавляют лимонную, уксусную и соляную кислоты, которые образуют со стронцием-90 растворимые в воде соли и нерастворимые, выпадающие в осадок.

Для уменьшения концентрации радионуклидов в мясе вываривают его в воде и удаляют бульон, в который переходит до 80% цезия-137. Мясо вымачивают в воде с последующим посолом. При этом содержание радионуклидов снижается на 80–90%.

Среди специальных приемов очистки молока применяют ионообменные смолы – пирофосфат и циалит, которые хорошо поглощают ионы цезия и стронция, а 80–90% их удаляется вместе со смолами при тонкой фильтрации молока. Такой же эффект дает сепарирование молока. Иногда применяют также электродиализ.

Технологическая переработка продуктов с целью уменьшения содержания радионуклидов экономически менее выгодна, чем использование приемов по ограничению накопления радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства.

В заключение необходимо отметить, что вышеприведенные мероприятия полностью согласуются с принятыми Государственными Программами по преодолению последствий катастрофы на ЧАЭС.

ГЛАВА XI НЕКОТОРЫЕ ПРАВОВЫЕ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

11.1. Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС

(утверждена Главным государственным санитарным врачом Беларуси В. П. Филоновым 28 мая 1993г.)

В приграничных районах сопредельных с республикой государств (Россия, Украина, Литва, Польша) функционируют, в частности, Смоленская, Чернобыльская, Ровенская, Игналинская АЭС. По опыту Чернобыльской катастрофы, аварии на них могут привести к масштабному загрязнению территории Беларуси и дополнительному облучению населения, что требует разработки превентивных мер защиты.

Настоящая концепция содержит основные принципы защиты населения. Она разработана с учетом рекомендаций международных организаций, опыта ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС и сложившейся в республике послеаварийной радиоэкологической ситуации. Ее положения основаны на современных представлениях о действии ионизирующего излучения на организм человека и на международных стандартах в области радиационной защиты.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При радиационной аварии на АЭС рассматриваются следующие основные факторы радиационного воздействия:

- внешнее гамма-излучение от радиоактивного облака;
- поступление радиоактивных веществ через органы дыхания;
- радиоактивное загрязнение кожных покровов и одежды;
- внешнее гамма-излучение от радиоактивных веществ, осевших на поверхность земли и местные объекты (здания, сооружения и т.п.);
- поступление радиоактивных веществ в организм в результате потребления населением пищевых продуктов и воды.

Концепция предусматривает защитные мероприятия на период первых 10-дней от аварии. Последующие мероприятия по защите населения регламентируются законами РБ «О правовом режиме территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате катастрофы на ЧАЭС /1991г./», «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС /1991г./», а также другими нормативными документами.

Критерии для принятия решений о мерах защиты.

Основным критерием для принятия решения о мерах защиты является-

ся индивидуальная доза облучения, прогнозируемая от начала аварии до момента завершения формирования радиоактивного следа, составляющего в среднем 10 суток.

При мощности экспозиционной дозы, превышающей ее значение для данной местности на 20 мкР/час, ограничивается пребывание людей на открытой местности, осуществляется герметизация жилых и служебных помещений (уплотнение дверей и окон, отключение вентсистем при отсутствии фильтров), начинается йодная профилактика и вводится запрещение употребления молока и листовых овощей.

При мощности экспозиционной дозы, равной 2,5 мР/час, мероприятия по защите населения заключаются в исключении пребывания на открытой местности, прекращении работы детских дошкольных учреждений (ДДУ), школ и учебных заведений, прекращении всех видов деятельности, кроме необходимой для жизнеобеспечения населения.

При необходимости пребывания вне помещения – защита кожных покровов и органов дыхания.

Эвакуация детей и беременных женщин осуществляется при ожидаемой эквивалентной дозе за 10 суток, равной 10 мЗв. Решение об эвакуации принимается, если мощность экспозиционной дозы (МЭД) составляет 5 мР/час. Эвакуация остального населения осуществляется при ожидаемой дозе за 10 суток после аварии, равной 50 мЗв, или если МЭД составляет 25 мР/час. Эвакуация детей и беременных женщин осуществляется при ожидаемой эквивалентной дозе на щитовидную железу, равной 200 мЗв, а эвакуация остального населения при ожидаемой дозе на щитовидную железу, равной 500 мЗв.

Зонирование территорий, прилегающих к действующей АЭС.

На территории Беларуси устанавливаются две зоны первоочередных защитных мероприятий.

Первая в радиусе 30 км. от Игналинской и Чернобыльской АЭС – зона возможной эвакуации. В случае аварии на этих АЭС в 30-километровых зонах незамедлительно вводится режим чрезвычайного положения.

Вторая – в радиусе 100 км. от АЭС – зона профилактических мероприятий. По опыту аварии на ЧАЭС, на границах этой зоны дозу облучения щитовидной железы, превышающую 200 мЗв, получили более 50% детей.

Концепция рекомендована и утверждена Национальной комиссией по радиационной защите населения Республики Беларусь 30 марта 1993 года, протокол №12; одобрена решением коллегии Министерства Здравоохранения от 26 апреля (протокол №6).

11.2. Некоторые социальные аспекты

После аварии на Чернобыльской атомной электростанции в Беларуси сложилась неблагоприятная экологическая обстановка, вызванная загрязнением больших территорий различными радионуклидами. Несмотря на уже сделанные многочисленные оценки и прогнозы, последние нельзя считать окончательными.

Таблица 11.1 – Прогнозируемый ущерб народному хозяйству Беларуси (1986 – 2015 г.г.) в результате Чернобыльской катастрофы (выплаты в млрд. долларов США)

Статьи ущерба	1986 – 1995	1996 – 2015	1986 – 2015
Ухудшение состояния здоровья	0,98	0,89	1,87
Промышленная продукция	0,19	0,44	0,63
Социальная сфера (просвещение, обучение)	7,77	6,47	14,24
Строительная промышленность	1,40	1,23	2,63
Транспорт и коммуникации	2,13	1,26	3,39
Общественные учреждения	0,52	2,94	3,46
Сельское хозяйство	38,31	33,7	72,01
Лесное хозяйство	1,26	2,85	4,11
Переселение	4,36	0,72	5,08
Законодательная помощь, пенсии и т.п.	15,48	70,84	86,32
Заражение воды и минеральных веществ	2,12	0,55	2,67
Системы наблюдения	4,23	32,6	36,83
Наблюдательные работы	0,26	1,46	1,72
Итого	79,01	155,95	234,96

В результате аварии на ЧАЭС возникла необходимость отселения из загрязненных районов с очень высокими уровнями радиации около 25 тысяч жителей из 107 населенных пунктов, что явилось сильнейшим социальным потрясением для людей, вынужденных покинуть свои родные места.

11.3. Состояние здоровья населения

После аварии на Чернобыльской АЭС здоровье населения нашей республики стало резко ухудшаться. Причин здесь много, но влияние радиации и радиофобии несомненно. Как считают специалисты, в целом на состояние здоровья влияют: плохое питание, отравление нитратами и нитритами, пестицидами, солями тяжелых металлов, неудовлетворительное состояние питьевой воды, недостаточное медицинское обеспечение, загрязнение территории радионуклидами и др.

Последний фактор, коррелирующий с дозовыми нагрузками, по мнению специалистов, вызывает ряд негативных последствий в состоянии здоровья населения. Это:

- увеличение количества онкологических заболеваний;
- ослабление иммунной системы;
- рост числа генетических отклонений;
- преждевременное старение организма и сокращение срока жизни;
- усиление тяжести заболеваний и их длительности;
- обострение хронических заболеваний (всего 34 болезни);
- уменьшение чувствительности организма к действию лекарственных препаратов;
- медленное выздоровление после болезней и медленное заживление травм и хирургических ран;
- преждевременные роды;
- увеличение количества заболеваний катарактой глаз с последующей потерей зрения (в основном у людей пожилого возраста);
- увеличение количества аллергических реакций;
- рост количества случаев отклонений в психике (задержка психического развития у детей, а у взрослых – в виде апатии, депрессии, безразличия к работе, жизни, близким и т.п.);
- возникновение диспропорционального развития и медленное увеличение веса ребенка;
- рост количества заболеваний органов дыхания;
- увеличение заболеваний желудочно-кишечного тракта;
- рост заболеваний системы кровообращения, крови;
- увеличение заболеваний эндокринной системы;
- рост заболеваний сердечно-сосудистой системы;
- увеличение заболеваний нервной системы (в среднем по республике также увеличилось в 3,5 раза);
- рост заболеваний костно-мышечной системы;
- увеличение заболеваний мочеполовой системы;
- рост заболеваний туберкулезом, который продолжает расти.

Наряду с радиацией действуют и другие негативные факторы. Явление *синергизма*, т.е. усиления действия, особенно заметно при длительном воздействии на население малых доз облучения – хронической лучевой болезни (ХЛБ) в сочетании с курением, канцерогенными веществами, пестицидами, нитратами и др.

Алкоголь усиливает воздействие.

Нередко от «бывших ликвидаторов» можно услышать о защитном действии алкоголя. Действительно, молекулы спирта легко окисляются и способны эффективно захватывать свободные радикалы, которые образуются при радиолизе воды, но защитное действие не проявляется при хроническом облучении организма. То есть в данном случае алкоголь может принести только вред.

Определенное защитное действие оказывает натуральное красное вино, в котором присутствуют фенольные соединения (антоцианы, катехи-

ны). Они обладают антиокислительной активностью и могут создавать нерастворимые комплексы с ионами металлов, в том числе и радиоактивными (стронцием-90, цезием-137 и др.). Связывание металлов в комплексы предотвращает проникновение радионуклидов из пищеводов в кровь и ускоряет их выведение вместе с экскрементами. Однако такой эффект может наблюдаться при однократном поступлении радионуклидов и при условии приема вина не позднее 1-1,5 часа после поступления радионуклидов в организм.

За последнее время значительно изменилась структура онкологических заболеваний. Если пик заболеваемости раком щитовидной железы, лейкозом и раком молочной железы приходится на 1989 – 1991 годы, то за последнее время растет количество опухолей легких, желудка, мочевого пузыря, почек, печени, костных тканей. Это происходит наряду с ростом неонкологических заболеваний этих органов и систем.

Пока нет единого мнения среди специалистов о роли радиации в росте количества таких заболеваний, как церебральный паралич, олигофрения, эпилепсия, шизофрения и некоторых других. Эти заболевания не носят массовый характер. Несмотря на одинаковый уровень загрязненности определенных областей, люди, проживающие в таких местах, получают разные дозы облучения (по ряду индивидуальных для них причин).

Особую тревогу вызывает прогрессирующий рост различных генетических последствий.

Такая конкретно сложившаяся чрезвычайная ситуация породила целый комплекс правительственных мероприятий по выживанию населения в условиях радиоактивного загрязнения территории Республики Беларусь. К этим государственным мероприятиям в первую очередь относятся мероприятия по радиационной защите и обеспечению радиационной безопасности населения всей Республики Беларусь, а также отдельных ее регионов, в особенности с повышенными уровнями радиации.

Фактически речь идет о Концепции защиты населения Республики Беларусь.

Многочисленные исследования радиационного воздействия на организм человека убедительно показывают, насколько опасно влияние радиации. В условиях проживания на загрязненной радионуклидами территории для сохранения здоровья необходимо выполнять не только ряд концептуальных правил защиты от радиационной опасности, но и четко представлять себе эту опасность в свете современных научных представлений, в свете медико-биологической направленности.

Как известно, химические элементы в периодической системе Д.И.Менделеева разделены на группы, определяемые числом электронов на внешней оболочке атомов, входящих в группу. Элементы внутри группы («семейства») ведут себя в химических реакциях одинаково. И это свойство их оказывается очень значимо для человека. Вместо определен-

ного необходимого элемента организм может поглощать «схожий» элемент из той же группы. Таким образом, стронций - 90 схож по структуре с кальцием и поэтому он участвует в тех же химических обменных реакциях, что и кальций. Однако, к счастью, организм человека действует избирательно, отдавая предпочтение нерадиоактивным элементам. После попадания внутрь радиоактивные элементы накапливаются в различных органах и тканях: стронций-90 – в костях и зубах. Цезий-137 относится к той же группе, что и калий. При недостатке калия поглощенный цезий концентрируется в мышцах и органах воспроизведения, в частности в яичниках. Организм необходимо обеспечивать микроэлементами и минеральными солями йода, кобальта, магния, фосфора, железа, калия, кальция и др. Среди макроэлементов, поступающих с продуктами питания в организм, особое место отводится кальцию и калию, аналогам столь опасных стронция и цезия.

Считаем целесообразным напомнить медико-биологическую характеристику некоторых из них, как физиологически важных элементов.

Кальция в организме человека содержится около одного килограмма. 90% его сосредоточено в костях, что придает особую прочность скелету. Кальций повышает возбудимость нервно-мышечного аппарата, способствует свертываемости крови, уменьшает проницаемость стенок сосудов, принимает участие в работе мышцы сердца, печени, ферментов. Усвоению кальция способствует богатая белками пища: молоко и молочные продукты, икра, бобовые культуры, яйца. Дефицит кальция приводит к снижению умственной и физической работоспособности организма, у детей тормозится образование костей, у взрослых рассасывается костная ткань.

Организм может уменьшить поступление радионуклидов, создавая резервы жизненно важных для него веществ (эффект блокировки). Молоко и молочные продукты являются основным поставщиком в организм солей кальция. При недостатке кальция в рационе повышается всасывание до 70% радиоактивного аналога кальция – стронция-90. Поскольку стронций откладывается с костной ткани и облучает костный мозг, то следует всячески ограничивать его всасывание в желудочно-кишечном тракте. Одним из методов такого ограничения является обеспечение организма полноценным белком и кальцием, который также содержится в зеленых листовых овощах, капусте, фасоли, луке.

Калий является составным элементом крови, цитоплазмы клеток растений и животных. Калий участвует в обмене белков и углеводов, обеспечивает сокращение мышц, включая сердечную; способствует выведению жидкости из организма; благодаря ионам натрия, калия и кальция в организме осуществляется передача нервных импульсов; ионы калия в растениях активизируют образование органических соединений, особенно углеводов.

Сегодня основным «аварийным» источником облучения населения, проживающего в зонах, пострадавших от чернобыльского выброса, является цезий-137, который определяет 90-95% суммарной дозы. Значительную роль в выведении радиоактивного цезия из организма играют мочегонные средства и калиевая диета. Важными поставщиками калия являются овощи и фрукты. При недостатке калия в рационе происходит повышенное накопление в организме его аналога – радиоактивного цезия. Так, если у взрослого человека период полувыведения цезия-137 из организма составляет примерно 70-90 дней, то при недостатке калия – 140-170 дней; следовательно, доза облучения увеличивается. Большую часть калия наш организм получает с растительной пищей. Калий присутствует в овощах, особенно в свекле, фасоли, горохе и других бобовых культурах, ягодах, кофе, какао. Богаты им курага, урюк, изюм, чернослив. Много его в пшенице, ржи, крупе, картофеле, лимоне. Содержат калий и продукты животного происхождения – свинина, икра, сливочное масло.

Фосфор академик А.Е.Ферсман назвал элементом жизни и мысли. В организме человека его около 1 кг. Большая часть приходится на долю скелета, меньше содержится в мышцах и нервной системе, в том числе в головном мозге. Он необходим для обмена углеводов, сокращения мышц. Даже незначительный дефицит фосфора в организме приводит к рассасыванию костной ткани, снижению умственных и физических возможностей человека. Избыток фосфора тормозит всасывание кальция и угнетает образование витамина D, нарушает функции парашитовидных желез, что в свою очередь влияет на обмен кальция, который в этих случаях откладывается в почках, мышцах, сосудах. Источником фосфора являются крупы (гречневая, овсяная, пшено), рыба, молоко, яйца.

Натрий нужен организму для нормальной жизнедеятельности. Содержится он в основном во внеклеточной жидкости, которая именно благодаря натрию удерживается в организме. Выведение натрия влечет за собой удаление воды из организма. Натрий способствует проникновению в клетки аминокислот и углеводов; стимулирует активность пищеварительных ферментов; вместе с калием участвует в процессе прохождения импульса по нервному волокну. Нашему организму необходимо 3-5г. натрия в сутки. Натрий, как и калий, аналогичен по свойствам цезию. При засолке овощей и мяса натрий вытесняет цезий из продуктов питания. На этом и основан способ извлечения цезия из мяса при вымачивании его в 10%-м растворе соли.

Существенную роль в защитных функциях организма человека играют *микроэлементы*, которые служат естественным барьером для поступления радионуклидов. Микроэлементы важны также для стимуляции иммунной системы человека, обменных процессов, что способствует выводу радионуклидов из организма.

Йод – один из важнейших микроэлементов, содержание которого в организме незначительно – до 25 мг. Йод потребляется щитовидной железой (до 50%) при образовании определенных гормонов. По существу, эти гормоны контролируют деятельность всех систем организма, интенсивность обмена веществ, включая обмен белков, жиров, углеводов и т.п. Йод повышает устойчивость организма к инфекциям, активизирует фагоциты (белые кровяные тельца), очищающие кровь от возбудителей болезней и иных чужеродных элементов. Йод губительно действует на вирусы, бактерии, поэтому кровь, протекающая через щитовидную железу, освобождается от проникших в нее микроорганизмов.

Недостаток йода приводит к биологическому вырождению – уродствам и недоразвитию организма. У взрослых нарушается обмен веществ, увеличивается масса тела за счет отложения избытка жира и задержки воды в организме. У таких больных изменяется психика, снижается работоспособность, развивается ранний склероз, появляется зоб (увеличение щитовидной железы). У детей дефицит йода приводит к задержке умственного и физического развития. Избыток йода также неблагоприятно сказывается на функциях организма: возникает повышенная раздражительность, учащается сердцебиение, происходит усиленный обмен веществ, что ведет к исхуданию.

Радиоактивный йод выводят из организма все органы, но основное количество его выводится через почки. Около 90% йода поступает в организм с пищей. Йод содержится в основном в рыбе, водорослях (морских), фасоли, салате, свекле, молоке, яйцах, говядине и т.п. Основные «поставщики» йода – это морепродукты. Поваренная соль Беларуси йодирована. При приготовлении пищи солить надо в конце варки, крышка должна быть закрыта, иначе йод улетучивается.

Железо также является важным микроэлементом. Суточная потребность человека в железе 15 – 30 мг. Оно входит в состав дыхательных ферментов и усиливает их действие. Железо необходимо для образования эритроцитов. Содержится в мясных продуктах (почках, говяжьей и свиной печени), луке, салате, укропе, шавеле, капусте, бобовых культурах, крупах (овсяной, гречневой), горохе, фруктах (сливах, яблоках, абрикосах, персиках).

Магний содержится в организме человека около 0,05%. Этот микроэлемент действует успокаивающе на нервную систему, стимулирует выделение желчи из желчного пузыря, усиливает перистальтику кишечника, нормализует работу сердца, способствует обменным процессам. Содержится в луке, салате, шпинате, гречке, горохе, орехах. Ежегодная потребность в магнии 300 – 350 мг.

Селен обладает радиозащитными свойствами. Селен восстанавливает иммунную систему, противодействует свободным радикалам, тем самым снижая частоту образования опухолей молочной и щитовидной же-

лез. Содержится в зерне, хлебе из муки грубого помола, чесноке, мясопродуктах, овощах, рыбе.

Таким образом, из вышесказанного о значении макро- и микроэлементов для организма человека следует важный вывод, что для сохранения крепкого здоровья необходимо полноценное, сбалансированное и строго регулируемое самим индивидом поступление этих важных биотических элементов в организм.

11.4. Наиболее реальный путь оздоровления населения

Наша жизнь в современных условиях, значит, и реалии нашего бытия, и наше здоровье во многом зависят от образа жизни, создаваемого самим человеком. Решение современных проблем экологии, здорового образа жизни при активном участии общественности немыслимо без повышения общей культуры, овладения широкими слоями населения знаниями о причинах и источниках опасностей в окружающей среде. Здесь главное – образ жизни людей, самовоспитание чувства причастности и личной ответственности каждого за свое здоровье и за среду обитания.

Ежегодно увеличивается уровень смертности, обусловленной потреблением алкоголя. В 2002 году был зарегистрирован 2901 случай смерти, или 29,2 на 100 тыс. населения (2001г. – 25,4), из них почти 80% приходится на мужское население. Наряду с ростом потребления спиртных напитков отмечается рост наркоманий. В 2002 году на учете в диспансерах состояло 5833 больных наркоманией. С 1991 года контингент больных увеличился в 10,9 раза: с 5,4 до 58,9 на 100 тыс. населения.

С наркоманией неразрывно связана проблема ВИЧ-инфекции и СПИДа. До 1995 года Беларусь относилась к странам с низким уровнем выявления ВИЧ-инфекции. В 2002 году новые случаи инфекции выявлены у 915 человек (2001г. – 578). На 1 января 2003 года в республике было официально зарегистрировано 4772 ВИЧ-инфицированных, в том числе 1357 женщин, 31 ребенок в возрасте до 15 лет и 723 подростка (15–19 лет). Из числа инфицированных у 47 установлен клинический диагноз СПИДа. В течение 1987 – 2002 годов в республике умерло от ВИЧ-инфекции 270 человек.

Несмотря на успехи борьбы с инфекционными болезнями, заболеваемость многими из них остается пока высокой в большинстве стран мира. В нашей республике эта проблема также имеет место.

Особого внимания заслуживают инфекции, обусловленные социально, в первую очередь туберкулез и инфекции, передающиеся половым путем.

Таким образом, многие проблемы здоровья населения Беларуси имеют глубокие социальные корни. Несмотря на некоторую стабилизацию

и даже улучшение ситуации, остается высоким уровень заболеваемости социально обусловленными болезнями (туберкулез ИПП, хронический алкоголизм и наркомания). Продолжается рост неинфекционных хронических болезней (сердечно-сосудистой и онкологической патологии). Большой экономический ущерб обществу наносят потери в результате травматизма и несчастных случаев, а также инвалидности и смертности.

Вот почему основным направлением государственной внутренней политики для оздоровления всего населения Республики Беларусь является приобщение народных масс к здоровому образу жизни. Проблема здорового образа жизни (ЗОЖ) весьма многогранна и практически неисчерпаема. Формирование ЗОЖ – это проблема оздоровления нации и один из самых реальных путей для решения этой проблемы. Очевидно, что установка на ЗОЖ оправдывает себя и приносит свои положительные результаты каждой конкретной личности, а в целом – всему белорусскому народу.

Ведь именно на период после 2000 года приходится массовый взлет физкультурно-оздоровительного движения в республике. Это не только строительство по всем областям Республики Беларусь ледовых дворцов спорта и других различных оздоровительных спорткомплексов, в том числе открывшегося недавно на Лагойшине (в Силичах) горнолыжного спортивного комплекса (январь 2005 года).

Заниматься активным образом жизни и проводить каждому свой ЗОЖ никогда не поздно. Ведь понятие «образ жизни человека» охватывает труд, быт, формы использования свободного времени, удовлетворение материальных и духовных потребностей, участие в общественной и политической жизни, нормы и правила поведения, умение и навыки по укреплению своего здоровья. Современная концепция ЗОЖ определяет его как осознанное в своей необходимости постоянное выполнение гигиенических правил укрепления и сохранения индивидуального и общественного здоровья.

Сидячий образ жизни – это одна из ведущих 10 причин смерти и инвалидности во всем мире. Дефицит физической активности – гиподинамия – это причина 2-х миллионов смертей в год. Доля взрослых, которые ведут в основном сидячий образ жизни, составляет от 60 до 85%. Лишь у менее 30% молодежи образ жизни достаточно активен для того, чтобы в будущем они сохранили свое здоровье на долгие годы.

По выражению академика Н.М.Амосова, «...чтобы быть здоровым, нужны собственные усилия, постоянные и значительные. Заменить их нельзя ничем». Когда каждый осознает, что только он ответственен за себя, тогда ЗОЖ станет реальностью. Здоровье народонаселения нашей планеты всегда оставалось самым приоритетным фактором бытия. При любых исторических, политических и социально-экономических катаклизмах так было, так есть и так будет всегда, везде и повсюду при любых правительствах и президентах.

Однако планетарная чернобыльская катастрофа обострила эту общечеловеческую установку, особенно в Республике Беларусь. Наряду со старением народонаселения в нашей республике, сокращением рождаемости и увеличением смертности появилось много других проблем, вызывающих и ускоряющих эти негативные явления. Выживать нам становится все труднее, поэтому общегосударственная установка на здоровый образ жизни всего народонаселения Беларуси, особенно студенческой молодежи и всего подрастающего поколения, является единственно правильной. Другого пути просто нет. Это же органически сочетается и с основными принципами оздоровления всего населения.

Витебский государственный технологический университет

Приложение 1

Соотношение между единицами СИ и внесистемными единицами в области ионизирующих излучений

Величина, символ	Название и обозначение единицы		Соотношение единиц
	Единица СИ	Внесистемная единица	
Активность (A)	Беккерель (Бк, Bq)	Кюри (Ки, Ci)	$1\text{Бк} = 1\text{расп/с} = 2,7 \cdot 10^{-11}\text{Ки}$ $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{Бк}$
Поглощенная доза (D)	Грей (Гр, Gy)	Рад (рад, rad)	$1\text{Гр} = 1\text{Дж/кг} = 100\text{рад}$ $1\text{рад} = 0,01\text{Гр}$
Эквивалентная доза (H)	Зиверт (Зв, Sv)	Бэр (бэр, rem)	$1\text{бэр} = 0,01\text{Зв}$ $1\text{Зв} = 100\text{бэр}$
Эффективная эквивалентная доза (E)	Зиверт (Зв, Sv)	Бэр (бэр, rem)	$1\text{бэр} = 0,01\text{Зв}$ $1\text{Зв} = 100\text{бэр}$
Экспозиционная доза (X)	Кулон/кг. (Кл/кг, C/kg)	Рентген (Р, R)	$1\text{кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3\text{Р}$ $1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4}\text{Кл/кг}$

Приложение 2

Множители и приставки

Множитель	Приставка	Обозначение приставки
10^{12}	тера	Т
10^9	гига	Г
10^6	мега	М
10^3	кило	к
10^{-3}	мили	м
10^{-6}	микро	мк
10^{-9}	нано	н
10^{-12}	пико	п

Приложение 3

Некоторые параметры элементарных частиц

Частица	Масса покоя		Заряд	
	m, кг	m / m _e	q, Кл	q / e
Электрон	$9,1091 \cdot 10^{-31}$	1	$1,6021 \cdot 10^{-19}$	-1
Протон	$1,67252 \cdot 10^{-27}$	1836,10	$1,6021 \cdot 10^{-19}$	+1
Нейтрон	$1,67482 \cdot 10^{-27}$	1836,62	0	0

Приложение 4

Эффективные эквивалентные дозы облучения от различных источников излучения

Вид облучения	Доза
Просмотр кинофильма по цветному телевизору на расстоянии от экрана около 2 м.	0,01 мкЗв
Ежедневный в течение года трехчасовой просмотр цветных телепрограмм	5–7 мкЗв
Облучение за счет радиоактивных выбросов АЭС в районе расположения станции	0,2–1 мкЗв
Облучение за счет дымовых выбросов с естественными радионуклидами ТЭЦ на угле	2–5 мкЗв
Прием радоновой ванны	0,01–1 мЗв
Флюорография	0,1–0,5 мЗв
Рентгеноскопия грудной клетки	0,1–1 мЗв
Рентгеноскопия зубов	0,03–3 мЗв
Рентгенодиагностика при раке легких	0,05 Зв
Рентгеноскопия желудка, кишечника	0,1–0,25 Зв
Лучевая гамма-терапия после операции	0,2–0,5 Зв

Приложение 5

Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (Бк/кг, Бк/л)

№ п/п	Наименование продуктов	1992 РДУ-92	1999 РДУ-99
<i>Для радионуклидов цезия-137</i>			
1.	Вода питьевая	18,5	10
2.	Молоко и цельномолочная продукция	111	100
3.	Молоко сгущенное и концентрированное	111	200
4.	Творог и творожные изделия	111	50
5.	Сыры сычужные и плавленые	111	50
6.	Масло коровье	111	100
7.	Говядина, баранина и продукты из них	600	500
8.	Свинина, птица и продукты из них	600	180
9.	Картофель	370	80
10.	Хлеб и хлебобулочные изделия	185	40
11.	Мука, крупы, сахар	370	60
12.	Жиры растительные	185	40
13.	Жиры животные и маргарин	185	100
14.	Фрукты	185	40
15.	Садовые ягоды	185	70
16.	Овощи и корнеплоды	185	100
17.	Консервированные продукты овощей, фруктов и ягод садовых		74
18.	Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	3700	185
19.	Грибы свежие		370
20.	Грибы сушеные	3700	2500
21.	Продукты детского питания	37	37
22.	Прочие продукты питания	370	370
<i>Для радионуклидов стронция-90</i>			
1.	Вода питьевая	0,37	0,37
2.	Молоко и цельномолочная продукция	3,7	3,7
3.	Картофель	3,7	3,7
4.	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7	3,7
5.	Специализированные продукты детского питания в готовом для употребления виде	1,85	1,85

Приложение 6

Коэффициенты качества излучения

Вид излучения и диапазон энергии	Коэффициенты качества К
Фотоны всех энергий	1
Электроны всех энергий	1
Альфа-частицы	20
Нейтроны с энергией	
<10 кэВ	5
от 10 кэВ до 100 кэВ	10
от 100 кэВ до 2 МэВ	20
от 2 МэВ до 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2МэВ, кроме протонов отдачи	5
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20
Примечание. Все значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения – испускаемому при ядерном превращении	

Приложение 7

Среднестатистические параметры человека

Орган	Масса, г	%
Мышцы	28000	43
Кожа	6100	8,7
Скелет	7000	10
Кровь	5400	7,7
Печень	1700	2,1
Почки	300	0,43
Легкие	1000	1,4
Желудочно-кишечный тракт	2000	2,9
Сердце	300	0,43
Красный костный мозг	1300	2,1
Все тело	70000	100

Приложение 8

Взвешивающие коэффициенты W_i

Ткань или орган	коэффициенты W_i
Половые железы	0,20
Красный костный мозг	0,12
Толстый кишечник	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Мочевой пузырь	0,05
Молочные железы	0,05
Печень	0,05
Пищевод	0,05
Щитовидная железа	0,05
Кожа, клетки костных поверхностей	0,01
Остальные органы	0,05

Примечание. При расчетах учитывать, что «остальные органы» включают надпочечники, головной мозг, экстраторакальный отдел органов дыхания, тонкий кишечник, почки, мышечную ткань, поджелудочную железу, селезенку, вилочковую железу и матку.

**Изотопы, попавшие в выброс с результате
Чернобыльской аварии**

Радиоактивные вещества в активной зоне реактора на 26 апреля 1986 года			Общий объем выбросов за аварию	
Нуклиды	Полураспад	Активность, пБк	Процент со- держания ра- диоактивных веществ	Активность, пБк
Ксенон-33	5,3 суток	6500	100	6500
Йод-131	8,0 суток	3200	50-60	1700
Цезий-134	2,0 г	180	20-40	54
Цезий-137	30 лет	280	20-40	85
Теллур-132	78 ч.	2700	25-60	1150
Стронций-89	52 суток	2300	4-6	115
Стронций-90	28 лет	200	4-6	10
Барий-140	12,8 суток	4800	4-6	240
Цирконий-95	1,4ч	5600	более 3,5	более 3,5
Рутений-103	39,6 суток	4800	более 3,5	более 3,5
Рутений-106	1 г	21001	более 3,5	более 3,5
Церий-141	33,0 суток	5600	3,5	196
Церий-144	285 суток	3300	3,5	116
Нептуний-239	2,4 г	27000	3,5	945
Плутоний-238	86 лет	1	3,5	0,035
Плутоний-239	24400 лет	0,85	3,5	0,03
Плутоний-240	6580 лет	1,2	3,5	0,042
Плутоний-241	13,2 г	170	3,5	6
Кюрий-242	163 суток	26	3,5	0,9

Приложение 10

**Толщина слоев половинного ослабления ионизирующих
излучений для различных материалов**

Материал	Плотность, ρ , г/см ³	Толщина слоя, см		
		Гамма-излучение прони- кающей радиации	Гамма-излучение радиоак- тивного заражения	Нейтроны
Вода	1	23	13	2,7
Древесина	0,7	33	18,5	9,7
Грунт	1,6	14,4	8,1	12,0
Кирпич	1,6	14,4	8,1	9,1
Бетон	2,3	10	5,7	12,0
Кладка кирпичная	1,5	15	8,7	10,0
Глина утрамбованная	2,06	11	6,3	8,3
Известняк	2,7	8,5	4,8	6,1
Полиэтилен	0,95	24,0	14,0	2,7
Стеклопластик	1,7	12,0	8,0	4,0
Сталь, железо	7,8	3	1,7	11,5
Свинец	11,3	2	1,2	12

Примеры решения задач по курсу «радиационная безопасность»

1. Рассчитать долю распадающихся за 1 секунду ядер калия-40 в исследуемом веществе.

⇒ определить количество распадающихся за 1 секунду ядер калия-40 в 1 литре исследуемого вещества:

$$A_1 \left[\frac{Bk}{л} \right] = A_1 \cdot \left[\frac{Ки}{л} \right] \cdot 3,7 \cdot 10^{10};$$

⇒ определить количество распадающихся за 1 секунду ядер калия-40 в 1 кг исследуемого вещества, используя значение плотности этого вещества (плотности различных соединений калия приведены в таблице 1):

$$A_m \left[\frac{Bk}{кг} \right] = \frac{A_1 \cdot \left[\frac{Bk}{л} \right]}{\rho},$$

где ρ - плотность вещества, г/см³.

⇒ определить молярную массу исследуемого вещества по таблице Менделеева;

⇒ найти общее количество всех изотопов калия в 1 кг исследуемого вещества, используя число Авогадро:

$$N_K = n \cdot N_A \cdot \left(\frac{m}{M} \right),$$

где n - количество ядер калия в одной молекуле исследуемого вещества.

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ — число Авогадро;

m - масса навески исследуемого вещества, г;

M - молярная масса исследуемого вещества;

⇒ найти долю распадающихся за 1 секунду ядер калия, разделив число распадающихся за 1 секунду ядер калия A_m на общее число ядер калия N_K .

Таблица 1

Плотности соединений калия

Вещество	KCl	K ₂ SO ₄	KNO ₃	K ₂ C ₂ O ₄	K ₃ PO ₄	KMnO ₄	KOH
Плотность ρ , г/см ³	1.98	2.66	2.109	2.127	2.564	2.703	2.044

2. Сравнение устойчивости различных ядер.

Чтобы сравнить устойчивость нескольких ядер необходимо:

1. Найти все указанные в условии задачи ядра в таблице Менделеева по их зарядовым числам, которые соответствуют порядковому номеру элемента. Если указанная в таблице относительная атомная масса какого-либо элемента отличается от данного в условии задачи массового числа, значит, указанный в условии изотоп радиоактивный и наименее устойчивый по сравнению с остальными ядрами.

2. Определить положение оставшихся ядер на графике зависимости удельной энергии связи от массового числа (см. рис. 1). Из графика видно, что наиболее устойчивы ядра с массовым числом от 50 до 60. Если массовые числа предложенных в задаче ядер меньше 50 или больше 60, а также в случае, когда все они имеют массовые числа от 50 до 60, к ним применяют критерии устойчивости.

3. Критерии устойчивости:

3.1. Наиболее интенсивные максимумы устойчивости наблюдаются для ядер, у которых четное количество протонов и нейтронов (четно-четных ядер).

Количество протонов определяется по порядковому номеру элемента в таблице Менделеева, а количество нейтронов - по разности между массовым числом, указанным в условии задачи, и количеством протонов.

3.2. Менее интенсивные максимумы устойчивости наблюдаются, если количество протонов или нейтронов соответствует так называемым «магическим ядерным числам»: 2, 8, 20, 50, 82, 126.

3.3. Для легких ядер (в таблице Менделеева они находятся до серы включительно) устойчивость возрастает при равенстве количества протонов и нейтронов, а для остальных, если количество нейтронов больше, чем протонов.

3.4. Если для ядра одновременно выполняется несколько критериев, то его устойчивость возрастает.

3.5. Если для ядра не выполняется ни один из критериев, то оно находится в локальном минимуме и его устойчивость минимальна относительно других ядер.

4. Если для двух ядер выполняются одинаковые критерии устойчивости, то их сравнивают между собой по положению на графике зависимости удельной энергии связи от массового числа.

Пример: сравнить устойчивость трех ядер: бор-11, кислород-18, фтор-19

Таблица 2

Сравнение устойчивости ядер

Пояснение	бор-11	кислород-18	фтор-19
1. Таблица Менделеева	+	---	+
2. Абсолютный максимум графика за-	---	---	---
3.1. Четно-четность	---	---	---
3.2. «Магические числа»	---	---	---
3.3. Соотношение протонов и нейтро-	---	---	---
Относительная устойчивость	2	3	1

Пояснение! Если проверяемое условие или критерий выполняется, то в таблицу 2 ставится «+», а если не выполняется – то «—».

Кислород в таблице Менделеева имеет массовое число 16, значит, кислород-18 радиоактивный и самый неустойчивый из предложенных ядер. Бор и фтор имеют массовые числа, соответствующие указанным в таблице Менделеева, значит, они стабильны.

Определяем положение бора и фтора на графике зависимости удельной энергии связи от массового числа. Они находятся на участке графика с массовым числом до 50.

Применяем к ним критерии устойчивости. Ни один из критериев не выполняется, значит, оба ядра находятся в локальных минимумах устойчивости.

Сравниваем относительную устойчивость бора и фтора по графику зависимости удельной энергии связи от массового числа, т.к. оба ядра находятся на восходящей ветви графика, то более устойчиво ядро с большим массовым числом, т.е. фтор.

Таблица 3

Исходные данные для построения графика
зависимости удельной энергии связи от массового числа

A, а.е.м.	2	15	50	60	150	238
ϵ , МэВ	2,12	7,7	8,5	8,5	8,0	7,4

Зависимость удельной энергии связи от массового числа

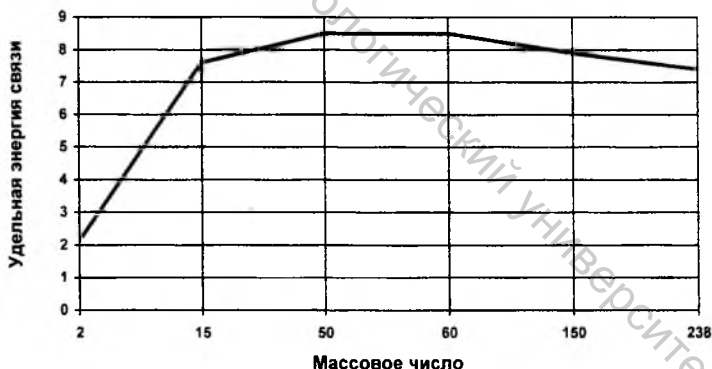


Рис. 1. График зависимости удельной энергии связи от массового числа

3. Выразить массу элементарной частицы всеми возможными способами, если известна ее масса в килограммах.

Пример. Элементарная частица весит $4.5 \cdot 10^{-29}$ кг. К какому виду частиц она относится? Выразить массу этой частицы всеми возможными способами.

Пояснения.

Масса любой элементарной частицы может быть выражена в единицах массы электрона m_e ($1 m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг), в энергетических единицах — МэВ, в атомных единицах массы — а.е.м. (ME) $1 \text{ а.е.м.} = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг.

В зависимости от массы элементарные частицы делятся на следующие виды:

1. Лептоны — самые легкие элементарные частицы, масса покоя которых близка к нулю или считается равной нулю. Формально к лептонам относятся частицы, массы покоя которых меньше, либо равны, массе покоя электрона ($m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг).

2. Мезоны — частицы, у которых масса больше, чем масса электрона, но меньше, чем масса протона (масса протона составляет $1836.1 m_e$).

3. Барионы и гипероны — тяжелые частицы, массы покоя которых больше либо равны, массе протона.

Решение:

Т.к. масса частицы больше, чем масса электрона, но меньше, чем масса протона, она является **мезоном**.

Выразим массу данной в условии частицы всеми возможными способами:

1) в единицах массы электрона m_e :

$$M = 4.5 \cdot 10^{-29} / 9.1 \cdot 10^{-31} = 49.45 m_e;$$

2) В энергетических единицах — МэВ:

по соотношению Эйнштейна

$$E = mc^2 = 4.5 \cdot 10^{-29} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4.5 \cdot 9 \cdot 10^{-13} = 4.05 \cdot 10^{-12} \text{ (Дж)};$$

Переводим Дж в МэВ: $M = 4.05 \cdot 10^{-12} / 1.6 \cdot 10^{-13} = 25.31 \text{ МэВ}$

3) в атомных единицах массы — а.е.м. (ME):

$$M = 4.5 \cdot 10^{-29} / 1.67 \cdot 10^{-27} = 2.695 \cdot 10^{-2} \text{ а.е.м.}$$

4. Основные правила составления уравнений ядерных реакций.

1. Элементарные частицы и ядра элементов записываются в виде

${}^A_Z X$, где X — символ элемента или частицы, A — массовое число ядра или масса покоя частицы в а.е.м., Z — зарядовое число ядра или заряд частицы в единицах элементарного заряда. Зарядовое число ядра определяется по порядковому номеру элемента в таблице Менделеева. Массовое число ядра, либо указывается в условии задачи, либо определяется как атомная масса элемента из таблицы Менделеева, округленная до целого значения.

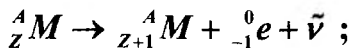
2. Сумма зарядов и сумма массовых чисел в левой и правой частях уравнения должны быть одинаковы.

3. Запрещено использовать вычитание частиц или ядер в обеих частях уравнения.

4. В результате любой ядерной реакции должно сохраняться лептоновое число, которое для электрона ${}^0_{-1}e$ и нейтрино $\bar{\nu}$ равно «+1», для позитрона ${}^0_{+1}e$ и антинейтрино $\bar{\nu}$ равно «-1», а для всех остальных частиц и ядер равно «0».

Пример. Какое уравнение описывает распад, приводящий к образованию ядра изобарного ядру цезия 137?

Пояснение: Изобарные ядра могут образовываться в результате β^- или β^+ — распадов:



Более вероятным для данного ядра является тот вид бета-распада, в котором образующееся ядро отдачи имеет массовое число, более близкое к относительной атомной массе, указанной в таблице Менделеева для данного элемента. У естественных радиоизотопов наблюдается только β^- распад.

Решение. Так как цезий-137 искусственный изотоп, для него возможны и β^- и β^+ распады. При β^- — распаде заряд ядра увеличивается на 1, массовое число не изменяется, а при β^+ распаде заряд ядра уменьшается на 1, массовое число также не изменяется. Определяем по таблице Менделеева, какой из возможных продуктов имеет массовое число, более близкое к табличному, это барий-137. Следовательно, цезий - 137 является β^- — активным и распадается согласно уравнению

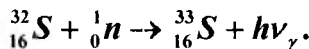


где ${}^{137}_{56}\text{Ba}$ - ядро бария.

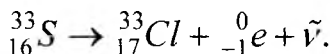
Период полураспада, т.е. время, в течение которого количество имеющихся радиоактивных ядер уменьшается в два раза, для цезия-137 - 30,174 года.

Пример 2. Написать уравнение ядерной реакции (п.у) для ядра серы -32. Оценить устойчивость ядра отдачи и написать уравнение возможного распада этого ядра.

Решение:



Так как образовавшееся ядро отдачи серы-33 имеет массовое число больше, чем указанное в таблице Менделеева, то в нем наблюдается избыток нейтронов. Избыточный нейтрон будет стремиться превратиться в протон, следовательно, ядро отдачи будет неустойчивым, радиоактивным и распадается по β^- механизму:



5. Определение постоянной радиоактивного распада, количества радиоактивных ядер и активности.

Пример. Найти постоянную радиоактивного распада, начальное число радиоактивных ядер, число оставшихся радиоактивных ядер, начальную и конечную активность образца, содержащего 1 грамм стронция-90, если время распада 40 лет, период полураспада 28,6 лет.

Решение:

1. Найдем постоянную радиоактивного распада:

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

где $T_{1/2}$ — период полураспада данного изотопа, выраженный в секундах.

$$T_{1/2} = 28,6 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 9,019 \cdot 10^8 \text{ (сек.)};$$

$$\lambda = 0,693 / 9,019 \cdot 10^8 = 7,685 \cdot 10^{-10} \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

2. Найдем начальное число радиоактивных ядер по закону Авогадро, при условии, что все ядра образца радиоактивны:

$$N_0 = N_A \cdot \frac{m}{M},$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро,

m — масса навески образца, г;

M — массовое число данного элемента;

$$N_0 = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot (1 / 90) = 6,69 \cdot 10^{21} \text{ (ядер)}.$$

3. Найдем число оставшихся радиоактивных ядер, используя интегральную форму основного закона радиоактивного распада. Интегральная форма основного закона радиоактивного распада

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

где: N_0 — начальное число радиоактивных ядер,

λ — постоянная радиоактивного распада, t — время распада, в секундах.

$$N = 6,69 \cdot 10^{21} \cdot \exp(-7,685 \cdot 10^{-10} \cdot 40 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60) = 2,537 \cdot 10^{21} \text{ (ядер)}.$$

4. Найдем начальную и конечную активности образца по формулам

$$A_0 = N_0 \cdot \lambda;$$

$$A = N \cdot \lambda.$$

$$A_0 = 6,69 \cdot 10^{21} \cdot 7,685 \cdot 10^{-10} = 5,14 \cdot 10^{12} \text{ (Бк)};$$

$$A = 2,537 \cdot 10^{21} \cdot 7,685 \cdot 10^{-10} = 1,95 \cdot 10^{12} \text{ (Бк)}.$$

5. Число оставшихся радиоактивных ядер и конечную активность можно найти графически. Для этого необходимо построить кривую радиоактивного распада для данного элемента (см. рисунок 2), отметить на горизонтальной оси время распада, найти соответствующую этому времени точку на графике и опре-

делить на вертикальной оси число радиоактивных ядер и активность в данной точке.

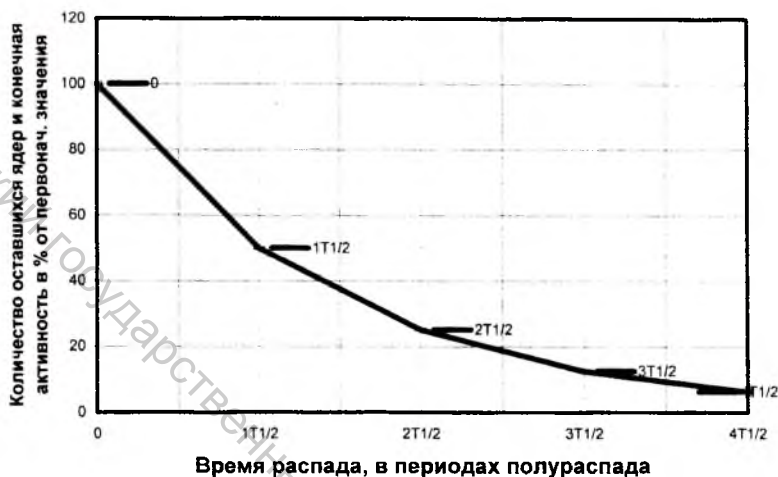


Рис. 2. Кривая радиоактивного распада

Графическое решение целесообразно использовать в 2-х крайних случаях:

1. Время распада гораздо больше, чем период полураспада $t \gg T_{1/2}$. В этом случае можно считать, что время распада стремится к бесконечности $t \rightarrow \infty$ и, согласно графику, количество оставшихся ядер и конечная активность стремятся к нулю $N \rightarrow 0, A \rightarrow 0$.

2. Время распада гораздо меньше, чем период полураспада $t \ll T_{1/2}$. В этом случае можно считать, что время распада стремится к нулю $t \rightarrow 0$ и, согласно графика, количество оставшихся ядер стремится к начальному количеству ядер и конечная активность стремится к начальной активности образца $N \rightarrow N_0, N \approx N_0, A \rightarrow A_0, A \approx A_0$.

Приложение 12

Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

	I						
1	1.00794						
1	H водород		II		III	IV	V
2	6.941	4	9.012182	5	10.811	6	12.011
2	Li литий		Be бериллий		B бор	C углерод	N азот
3	11 22.989768	12	24.3050	13	26.981539	14	28.0855
3	Na натрий		Mg магний		Al алюминий	Si кремний	P фосфор
4	19 39.0983	20	40.078	21	44.955910	22	47.88
4	K калий		Ca кальций		Sc скандий	Ti титан	V ванадий
5	29 63.546	30	65.39	31	69.723	32	72.61
5	Cu медь		Zn цинк		Ga галлий	Ge германий	As мышьяк
6	37 85.4678	38	87.62	39	88.60585	40	91.224
6	Rb рубидий		Sr стронций		Y иттрий	Zr цирконий	Nb ниобий
7	47 107.8682	48	112.411	49	114.82	50	118.710
7	Ag серебро		Cd кадмий		In индий	Sn олово	Sb сурьма
8	55 132.90543	56	137.327	57	138.9055	72	178.49
8	Cs цезий		Ba барий		La* лантан	Hf гафний	Ta тантал
9	79 196.96654	80	200.59	81	204.3833	82	207.2
9	Au золото		Hg ртуть		Tl таллий	Pb свинец	Bi висмут
10	87 223.0197	88	226.0254	89	227.0278	104	261.11
10	Fr франций		Ra радий		Ac** актиний	(Ku) (курчатовий)	(Ns) (нильсборий)

*лантаноиды

58	59	60	61	62	63	64
140.12	140.9077	144.2	[145]	150.4	151.96	157.2
Ce церий	Pr празеодим	Nd неодим	Pm прометий	Sm самарий	Eu европий	Gd гадолиний

**актиноиды

90	91	92	93	94	95	96
232.0381	231.0359	238.02	237.0482	[244]	[243]	[247]
Th торий	Pa протактиний	U уран	Np нептуний	Pu плутоний	Am америций	Cm кюри

		VIII			
VI		VII		2 4.002602 He гелий	
8 15.9994 O кислород	9 18.9984032 F фтор	10 20.1797 Ne неон			
16 32.066 S сера	17 35.4527 Cl хлор	18 39.948 Ar аргон			
24 51.9961 Cr хром	26 54.93805 Mn марганец	26 65.847 Fe железо	27 58.93320 Co кобальт	28 58.69 Ni никель	
34 78.96 Se селен	35 79.904 Br бром	36 83.80 Kr криптон			
42 95.94 Mo молибден	43 97.9072 Tc технеций	44 101.07 Ru рутений	45 102.90550 Rh родий	46 106.42 Pd палладий	
52 127.60 Tc теллур	53 126.90447 I йод	54 131.29 Xe ксенон			
74 183.86 W вольфрам	75 186.207 Re рений	76 190.2 Os осмий	77 178.49 Ir иридий	78 180.9479 Pt платина	
84 208.9824 Po полоний	85 209.9871 At астат	86 222.0176 Rn радон			
106 263.118	107 262.12				

*ЛАНТАНОИДЫ						
65 158.9254 Tb тербий	66 162.5 Dy диспрозий	67 164.9304 Ho гольмий	68 167.2 Er эрбий	69 168.9342 Tm тулий	70 173.0 Yb иттербий	71 174.96 Lu лютеций
**АКТИНОИДЫ						
97 [247] Bk берклий	98 [251] Cf калифорний	99 [254] Es эйнштейний	100 [257] Fm фермий	101 [258] Md менделевий	102 [255] (No) нобелий	103 [256] (Lr) лоуренсий

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Дорожко, С. В. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность : учеб. пособие в 3 ч. Ч. 3 : Радиационная безопасность / С. В. Дорожко, В. П. Бубнов, В. Т. Пустовит. – Мн., 2003. – 208 с.
2. Ковчур, С. Г. Радиационная безопасность: учеб. пособие / С. Г. Ковчур, О. А. Щигельский, В. Н. Потоцкий. – Витебск, 2005. – 150 с.
3. Козлов, В. Ф. Справочник по радиационной безопасности / В. Ф. Козлов. – Мн., : Энергоатомиздат, 1991.
4. Курс радиационной безопасности : учеб. пособие / В. Т. Ветрова [и др.]. – Мн., 1995.
5. О радиационной безопасности населения : закон Республики Беларусь № 122-З от 05.01.1998 г // Ведомости Национального собрания РБ. – 1998. – № 5.
6. Ушаков, В. В. Защита населения и объектов хозяйствования в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность : метод. разработка / В. В. Ушаков, А. А. Трутнев, Ю. А. Нетсев, А. В. Гречаников. – Витебск, УО «ВГТУ», 2005. – 65 с.

Дополнительная

1. Белов, А. Д. Радиобиология / А. Д. Белов, Н. П. Лысенко. – М., 1999.
2. Галицкий, Э. А. Основы радиационной безопасности : учеб. пособие / Э. А. Галицкий, Н. Н. Забелин, Н. А. Переверзева. – Гродно, 2001.
3. Дарашкевіч, М. П. Асновы радыяцыйнай бяспекі : вучэб. дапаможнік / М. П. Дарашкевіч, Л. Б. Гапановіч. – Мн., 1995.
4. Кириллов, В. Ф. Радиационная гигиена / В. Ф. Кириллов, В. А. Книжников, И. П. Коренков. – М., 1998.
5. Люцко, А. М. Выжить после Чернобыля / А. М. Люцко, Н. В. Ролевич, В. Н. Тернов. – Мн., 1990.
6. Основы сельскохозяйственной экологии и радиационная безопасность : учеб. пособие / А. В. Кильчевский [и др.]. – Мн., 2001.
7. Поленов, Б. В. Дозиметрические приборы для населения / Б. В. Поленов. – М., 1991.
8. Саечников, В. А. Основы радиационной безопасности : учеб. пособие / В. А. Саечников, В. М. Зеленкевич. – Мн., БГУ., 2002 – 180 с.
9. Сельскохозяйственная радиоэкология : учеб. пособие / Р. М. Алексин [и др.]. – М., 1992.
10. Хлопцев, А. Ф. Радиационная безопасность : учеб. пособие / А. Ф. Хлопцев, О. А. Щигельский. – Витебск : ВГУ, 2003.
11. Ярмоленко, С. П. Радиобиология человека и животных : учеб. для биол. спец. ВУЗов / С. П. Ярмоленко. – М., 1988.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА I РАДИОАКТИВНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ЯДЕР	5
1.1. Строение вещества и атома	5
1.2. Строение атомного ядра	8
1.3. Элементарные частицы: лептоны, мезоны, барионы, гипероны, резонансы	10
1.4. Энергия связи ядра	13
1.5. Стабильные и радиоактивные изотопы	18
1.6. Сравнительная характеристика ядра и атома. Принцип неопределенности Гейзенберга	19
1.7. Понятие о радиоактивности	21
1.8. Типы ядерных превращений	23
1.9. Взаимные превращения нуклонов в устойчивых ядрах	27
1.10. Ядерные и термоядерные реакции	29
1.11. Период полураспада радионуклидов. Закон радиоактивного распада	31
ГЛАВА II ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	36
2.1. Понятие об ионизирующих излучениях	36
2.2. Основные свойства элементарных частиц	38
2.3. Характеристика отдельных видов излучений	43
2.4. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом	47
ГЛАВА III ОСНОВНЫЕ ДОЗОВЫЕ ВЕЛИЧИНЫ	54
3.1. Понятие о дозиметрии	54
3.2. Активность радионуклида. Единицы активности	54
3.3. Экспозиционная доза	58
3.4. Поглощенная доза	59
3.5. Эквивалентная доза	60
3.6. Эффективная эквивалентная доза	62
3.7. Другие дозовые величины	62
3.8. Переходные коэффициенты	63
ГЛАВА IV МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ	65
4.1. Общие сведения	65
4.2. Методы дозиметрического контроля	65
4.3. Дозиметрические приборы	69
4.4. Дозиметрический контроль	71
ГЛАВА V ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	72
5.1. Понятие о радиационном фоне	72
5.2. Космическое излучение	73
5.3. Внешние источники радиации земного происхождения	75
5.4. Искусственная радиоактивность	77
5.5. Характеристика основных естественных и искусственных радионуклидов	79
ГЛАВА VI РАДИОИЗОТОПЫ И БИОСФЕРА	82
6.1. Поведение радионуклидов в почве	82
6.2. Нуклиды и растительный мир	83
6.3. Аэрозольное загрязнение растений	85
6.4. Поступление радионуклидов в организм гидробионтов	86
6.5. Действие излучений на растения	87
6.6. Действие излучений на животных	88
ГЛАВА VII БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ	90
7.1. Действие ионизирующих излучений	90
на биологические объекты	90
7.2. Пищевые цепочки	96
7.3. Пути поступления радионуклидов в организм человека	97
7.4. Распределение радионуклидов в организме человека	99
7.5. Выведение радионуклидов из организма человека	100
7.6. Основные этапы действия ионизирующих излучений на биологические объекты	101
7.7. Внешнее и внутреннее облучение	106
7.8. Факторы, влияющие на степень тяжести лучевых поражений	107

7.9. Лучевые поражения организма человека.....	109
7.10. Отдаленные последствия облучения человека.....	114
ГЛАВА VIII АВАРИЯ НА ЧАЭС И ЕЁ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.....	118
8.1. Причины аварии на ЧАЭС.....	118
8.2. Радиоактивное загрязнение после аварии на ЧАЭС.....	120
8.3. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси.....	121
8.4. Последствия аварии на ЧАЭС для Республики Беларусь.....	125
ГЛАВА IX ПРИНЦИПЫ И КРИТЕРИИ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	126
9.1. Международная деятельность в области радиационной защиты.....	126
9.2. Нормирование радиационного воздействия.....	127
9.3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000).....	129
9.4. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами.....	130
ГЛАВА X ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	134
10.1. Мероприятия радиационной безопасности.....	134
10.2. Пути снижения внешнего облучения.....	134
10.3. Пути снижения внутреннего облучения.....	137
10.4. Мероприятия по ускорению выведения радионуклидов из организма.....	139
10.5. Пути снижения содержания радионуклидов в продукции растениеводства и животноводства.....	141
ГЛАВА XI НЕКОТОРЫЕ ПРАВОВЫЕ, СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ.....	145
11.1. Концепция защиты населения Республики Беларусь при радиационных авариях на АЭС.....	145
11.2. Некоторые социальные аспекты.....	147
11.3. Состояние здоровья населения.....	147
11.4. Наиболее реальный путь оздоровления населения.....	153
Приложение 1.....	156
Соотношение между единицами СИ и внесистемными единицами в области ионизирующих излучений.....	156
Приложение 2.....	156
Множители и приставки.....	156
Приложение 3.....	157
Некоторые параметры элементарных частиц.....	157
Приложение 4.....	157
Эффективные эквивалентные дозы облучения от различных источников излучения.....	157
Приложение 5.....	158
Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (Бк/кг, Бк/л).....	158
Приложение 6.....	159
Коэффициенты качества излучения.....	159
Приложение 7.....	159
Среднестатистические параметры человека.....	159
Приложение 8.....	160
Взвешивающие коэффициенты W_T	160
Приложение 9.....	161
Изотопы, попавшие в выброс с результате Чернобыльской аварии.....	161
Приложение 10.....	162
Толщина слоев половинного ослабления ионизирующих излучений для различных материалов.....	162
Приложение 11.....	163
Примеры решения задач по курсу «радиационная безопасность».....	163
1. Рассчитать долю распадающихся за 1 секунду ядер калия-40 в исследуемом веществе.....	163
2. Сравнение устойчивости различных ядер.....	164
3. Вызвать массу элементарной частицы всеми возможными способами, если известна ее масса в килограммах.....	166
4. Основные правила составления уравнений ядерных реакций.....	166
5. Определение постоянной радиоактивного распада, количества радиоактивных ядер и активности.....	168
Приложение 12.....	170
Периодическая система элементов Д. И. Менделеева.....	170
ЛИТЕРАТУРА.....	172
ОГЛАВЛЕНИЕ.....	173

Учебное издание

Ковчур Сергей Григорьевич
Щигельский Олег Александрович
Потоцкий Василий Николаевич

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**Второе издание
переработанное и дополненное**

Пособие по курсу «Радиационная безопасность»

Редактор И.А. Тимонов
Технический редактор А.А.Старцев
Корректор И.П. Лабусова
Компьютерная вёрстка А.А.Старцев

Подписано к печати 08.08.06 г. Формат 60×90 1/16 Бумага офсетная №1. Гарнитура «Таймс». Усл.печ.листов 11,8 Уч.издат.листов 11 Тираж 613 экз. Зак. № 395

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет» 210035, Витебск, Московский пр-т, 72.

Отпечатано на ризографе Учреждения образования «Витебский государственный технологический университет».

Лицензия № 02330/0133005 от 1 апреля 2004 г.