



# Основы радиозэкологии и безопасной жизнедеятельности

Пособие для учителей  
общеобразовательных учреждений

*Подготовлено при поддержке ЮНЕСКО  
в рамках международной программы  
CORE (Сотрудничество для реабилитации)  
и издано при финансовой поддержке  
Департамента по ликвидации последствий  
катастрофы на Чернобыльской АЭС  
Министерства по чрезвычайным ситуациям  
Республики Беларусь*

Минск  
Тонпик  
2008

УДК 614.876.084(072)

ББК 68.9

О-75

Коллектив авторов:

канд. хим. наук *Г.А. Соколик*, канд. хим. наук *С.В. Овсянникова*, канд. хим. наук *С.Л. Лейнова* (Белгосуниверситет); канд. физ.-мат. наук *В.Л. Гурачевский* (Белорусский аграрный технический университет); докт. биол. наук *Я.Э. Кенигсберг* (фил. «Белорусское отделение Российско-белорусского информационного центра по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС» РНИ УП «Институт радиологии»; канд. хим. наук *И.М. Кимленко* (Белгосуниверситет); канд. мед. наук *А.А. Крюкова* (Республиканский научно-практический центр гигиены); канд. техн. наук *О.М. Жукова* (Республиканский центр радиационного контроля и мониторинга окружающей среды); *О.В. Соболев* (Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь); *Т.Г. Иванова*, *В.В. Захаренков* (Белгосуниверситет); канд. техн. наук *Н.Н. Тушин* (Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова). Под общей редакцией *Т.Н. Ковалевой*, *Г.А. Соколик*, *С.В. Овсянниковой*.

**Основы радиозэкологии и безопасной жизнедеятельности:**  
О-75 пособие для учителей общеобразоват. учреждений / *Г.А. Соколик* [и др.]; под общ. ред. *Т.Н. Ковалевой*, *Г.А. Соколик*, *С.В. Овсянниковой*. — Минск : Тонпик, 2008. — 366 с.

ISBN 978-985-6806-72-1.

В пособии рассматриваются причины зарождения радиозэкологии, дается представление об излучениях, включая ионизирующие излучения природного и искусственного происхождения. Дается представление о дозиметрических величинах, их назначении, о биологических эффектах, вызываемых облучением.

Рассматриваются причины и последствия Чернобыльской катастрофы для природы и жителей Беларуси. Особое внимание уделено мерам по уменьшению негативных последствий облучения людей.

Пособие предназначено для педагогов, работающих с детьми и подростками в районах, пострадавших от Чернобыльской катастрофы, а также для широкого круга читателей, желающих расширить свои представления в области радиозэкологии и овладеть приемами, способствующими снижению радиационного риска.

УДК 614.876.084(072)  
ББК 68.9

## К ЧИТАТЕЛЯМ

*Дорогие коллеги,*

перед Вами пособие, которое поведет Вас в мир радиоэкологии. В последние десятилетия интерес к этой относительно молодой области научного знания необычайно возрос. Немалую роль в этом сыграла и Чернобыльская катастрофа, после которой любой из нас, даже тот, кто далек от науки, осознал, какая энергия, и в то же время опасность, таится в недрах атомного ядра.

Несомненно, ядерная энергия может приносить огромную пользу людям. Современное развитие цивилизации трудно представить без использования ядерных технологий, особенно для удовлетворения энергетических потребностей человечества. «Энергией будущего» называли ядерную энергию в середине XX века, так и до сих пор считают многие ученые. Вместе с тем, разрушительная катастрофа, произошедшая на Чернобыльской АЭС, напомнила, какая грозная и необузданная сила может обрушиться на человечество при неосторожном обращении с «мирным атомом».

Прошло уже более 20 лет после Чернобыльской катастрофы. Правительство нашей страны делает многое, чтобы максимально обезопасить проживание и улучшить качество жизни людей в пострадавших районах. Ежегодно на это расходуются значительные средства из бюджета страны. Вместе с тем, последствия произошедшей катастрофы до сих пор волнуют людей, порождая как обоснованные, так и необоснованные страхи и опасения. Во многом эти страхи связаны с недостатком знаний в области радиоэкологии, неумением реально оценивать радиационную обстановку и, по возможности, избегать чрезмерного облучения в повседневной жизни с помощью совсем несложных и доступных мер.

Это пособие, предлагаемое Вашему вниманию, в первую очередь, предназначено для педагогов, которые проводят занятия по основам безопасной жизнедеятельности в школах, расположенных на территории, загрязненной радионуклидами чернобыльского выброса, или вблизи такой территории. Учителя химии, физики, биологии и других предметов также найдут здесь материал, который окажется полезным при проведении уроков как по обязательной программе их курса, так и при организации внеклассной работы.

Любознательный читатель найдет здесь множество полезных советов, которые пригодятся в повседневной жизни и помогут сохранить и укрепить здоровье.

Материалы пособия не только познакомят Вас с основами радиоэкологии и радиационной безопасности, но и расширят и углубят знание предмета. Они помогут разобраться, как самостоятельно оценивать степень радиационного риска в реальной жизненной ситуации, как выбирать наиболее подходящие приемы, чтобы, по возможности, уменьшить этот риск.

Пособие охватывает широкий круг вопросов. Оно состоит из двух частей. *Первая часть* посвящена теоретическим основам радиоэкологии и радиационной безопасности. Здесь рассказывается о природе различных видов ионизирующего излучения, применении источников излучения, искусственно созданных человеком, в различных областях науки и техники, о биологических эффектах, к которым может приводить облучение человека.

Во *второй части* в общих чертах рассматривается, как и почему произошла катастрофа на Чернобыльской АЭС, как развивались события после разрушения ядерного реактора, какие радионуклиды представляли наибольшую опасность в разные периоды после катастрофы, к каким последствиям для природы Беларуси привело загрязнение окружающей среды продуктами чернобыльского выброса. Особое внимание уделено тому, что может реально предпринять человек, чтобы уменьшить облучение своего организма, какими должны быть его образ жизни и питание при проживании на территории, подвергшейся загрязнению радионуклидами.

Чтобы легче ориентироваться в обширном материале, первый том пособия содержит *приложение*, включающее таблицы основных единиц измерения содержания радионуклидов в объектах окружающей среды и дозиметрических величин, а также словарь терминов. Завершает этот том список публикаций научного и методического характера, материалы которых использовались при подготовке пособия.

Пособие подготовлено при поддержке ЮНЕСКО в рамках международной программы CORE (Сотрудничество для реабилитации).

Авторы использовали множество источников информации, в том числе научных и официальных, но старались излагать материал простым и доступным языком. Для понимания изложенного материала вовсе не требуется специальной подготовки. Пособие поможет Вам расширить кругозор и получить знания, необходимые всем людям, живущим на территории, загрязненной радионуклидами.

Недостаток знаний и умений, непонимание сути явлений порождает страх, ощущение бессилия, неуверенность в завтрашнем дне. Знание проясняет ситуацию, помогает осознать, что Ваше стремление сохранить и укрепить собственное здоровье и здоровье близких Вам людей осуществимо. Это вселяет надежду и придает новые силы.

Авторы надеются, что материалы пособия помогут Вам воспитать активное, целеустремленное молодое поколение, способное объективно оценивать радиоэкологическую ситуацию, освоить практические навыки безопасной жизнедеятельности и в дальнейшем активно участвовать в культурном и экономическом возрождении регионов, пострадавших от Чернобыльской катастрофы. При этом многое зависит от Вашего собственного оптимизма, упорства и активности.

Удачи Вам на этом пути!

**Т.Н. Ковалева,**  
кандидат психологических наук

# ЧАСТЬ I

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЭКОЛОГИИ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### Общие вопросы радиоэкологии

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** экология, радиоэкология, популяция, биоценоз, экосистема

Радиоэкология зародилась на определенном этапе развития экологии. Ее появление связано с открытием ионизирующих излучений и использованием ядерной энергии в мирных и военных целях, что привело к дополнительному загрязнению биосферы искусственными источниками ионизирующего излучения и увеличению воздействия излучений на живые организмы и среду их обитания.

Изучив главу...



Вы узнаете, почему радиоэкология выделилась из других наук и что является предметом ее изучения, какие вопросы рассматривает общая, теоретическая и экспериментальная радиоэкология.

### Глава 1

#### 1.1. Экология и радиоэкология

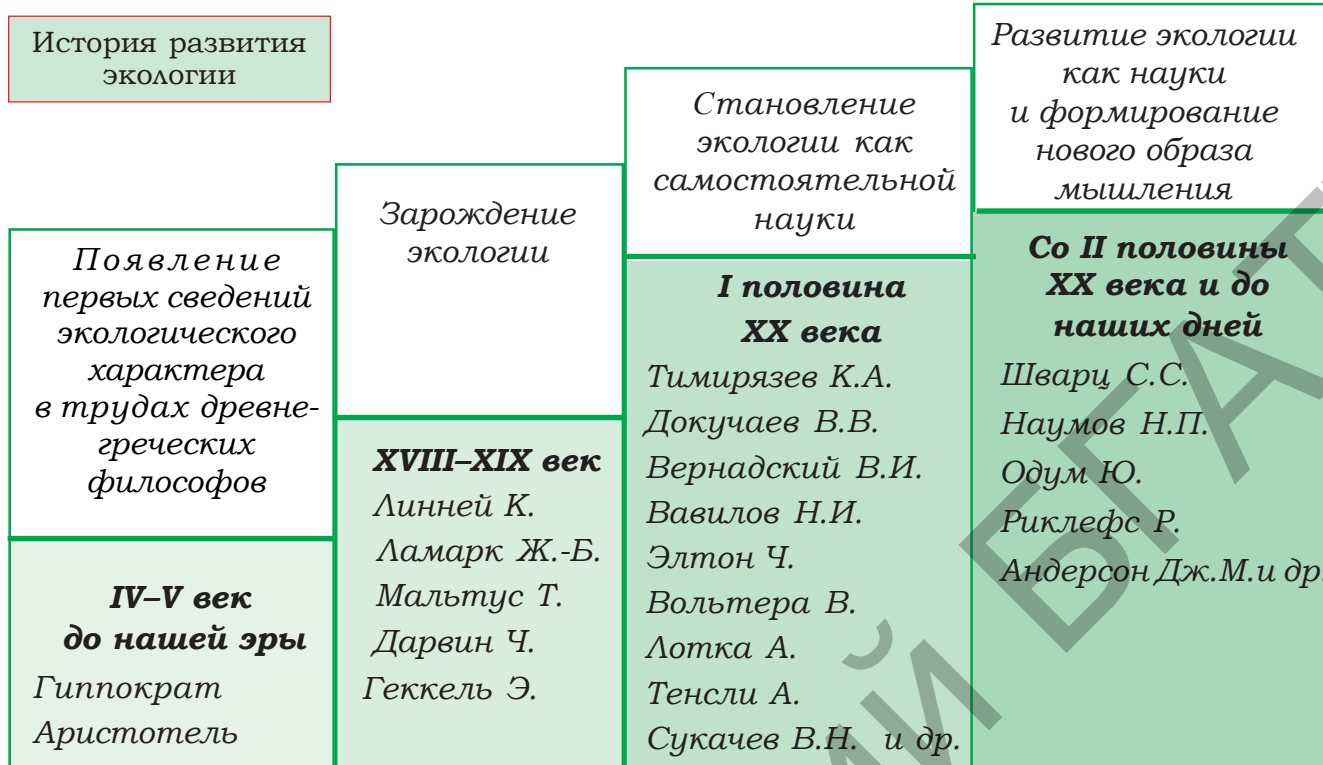
В современную эпоху не существует более важной проблемы, чем сохранение природы и выживание человечества. В свое время экология возникла как новое направление биологии, изучающее влияние внешней среды на эволюцию организмов. С развитием этой отрасли знания число объектов изучения экологии значительно расширилось.

Согласно современным представлениям, экология — это **наука о взаимоотношениях живых организмов между собой и с окружающей средой.**

Еще в древности человек интересовался окружающим миром и, чтобы выжить, каждый должен был овладеть определенными знаниями о силах природы, окружающих растениях и животных. Подобно другим научным направлениям, экология развивалась непрерывно, хотя и неравномерно.

Что такое «экология»?

**Основные этапы в истории развития экологии и имена ученых, с которыми они связаны**



Что изучает экология?

Рассмотрим подробнее, что же изучает экология. С одной стороны, эта природоведческая наука исследует, как среда обитания влияет на растительные и животные организмы, как меняются их многообразие, численность и взаимоотношения. Она рассматривает, какова реакция популяций, сообществ, отдельных особей на изменение условий жизни.

С другой стороны, экология изучает, как меняется среда обитания под влиянием жизнедеятельности организмов. Иными словами, экология выявляет закономерности существования и сохранения экологических систем.

**Экологическая система (экосистема)** — это сообщество совместно обитающих живых организмов различных видов в совокупности с жизненным пространством, которое оно занимает и где осуществляется круговорот веществ и обмен энергией. Природная экосистема является объектом, в котором есть все необходимое для ее самостоятельного длительного существования. Луг, лес, болото, озеро и т. п. вместе со всеми обитающими в них организмами являются экосистемами. В любой экосистеме должны осуществляться процессы саморегуляции и самовосстановления составляющих ее элементов. Совокупность всех эко-



Совокупность всех экосистем планеты образует биосферу — самую крупную экосистему Земли.

систем планеты, существующих в атмосфере, на суше и в воде, образует самую крупную экосистему Земли — биосферу.

В любой экосистеме можно выделить две основные части — *живую систему* (популяция, вид, сообщество организмов) и *окружающую среду*, которые и являются предметом изучения экологии.

Существует три подхода в определении предмета изучения экологии в зависимости от принципа его выделения, которые отражены в следующей таблице.

**Предмет изучения экологии в зависимости от принципа его выделения**

Принцип выделения	Предмет изучения экологии
уровень организации	популяции организмов, виды, сообщества, экосистемы
тип среды и место обитания	водные (пресноводные, морские и океанические) и сухопутные экосистемы
область приложения экологических знаний	природные ресурсы, загрязнители среды обитания человека и биосферы в целом

Жизнь на Земле представлена существами (организмами), которые принадлежат к тем или иным систематическим группам, а также к сообществам разной сложности. Отдельные организмы (индивидуумы) обладают определенной структурой и состоят из молекул, клеток, тканей, органов.

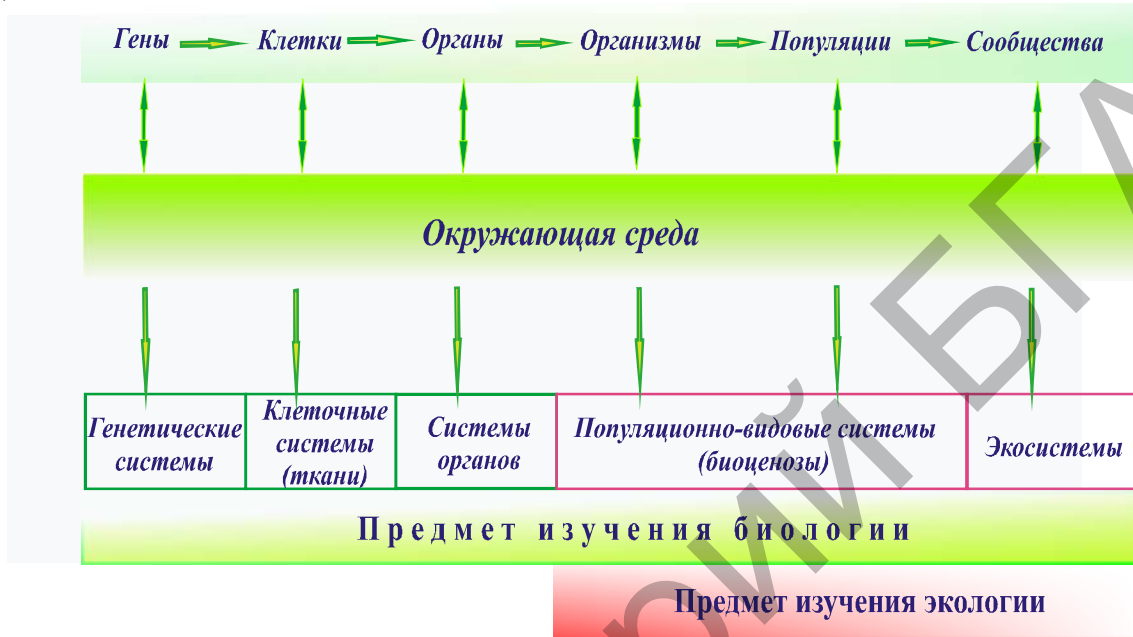
Сообщества могут быть представлены одним или несколькими видами. Индивидуумы и сообщества — это живые (биологические) системы, которые определенным образом организованы в пространстве и определенным образом меняются во времени.

При изучении биологических систем условно выделяют разные уровни организации живой материи: *молекулярно-генетический, клеточный, органотканевый, организменный, популяционно-видовой (биоценотический), биогеоценотически-биосферный*, которые составляют своего рода «биологический спектр».

*Обычно в экологии изучают живые системы, уровень организации которых выше организменного, однако в случае видов, которым грозит исчезновение, изучаются и отдельные организмы.*

Основными элементарными единицами на этих уровнях организации живой материи соответственно являются *ген, клетка, орган, организм (особь), популяция, сообщество организмов (биоценоз), биогеоценоз.*

**Уровни организации живой материи («биологический спектр») и их элементарные единицы**



На всех уровнях организации живая материя обменивается веществом и энергией с окружающей средой. Это поддерживает существование и функционирование биологических систем. Экология изучает живые системы, уровень организации которых не ниже организменного. Эти системы расположены в правой части «биологического спектра». Самая крупная экосистема Земли — биосфера отличается самым высоким уровнем организации.

По мере развития экологии в ней выделились новые направления, среди которых особое место заняла **радиоэкология**.

Человек всегда жил в мире излучений, в том числе и таких, о существовании которых он и не подозревал. Если тепловые и световые лучи человек может ощущать, то невидимые и неосязаемые ионизирующие излучения (электромагнитные волны, поток электронов, протонов, нейтронов и других частиц) остаются за пределами восприятия его органов чувств.



Открытие в природе источников ионизирующего излучения позволило по-новому взглянуть на окружающий мир. Перед учеными встал вопрос, как же эти невидимые лучи влияют на живые организмы и среду их обитания. Этот вопрос стал еще острее, когда технический прогресс привел к появлению искусственно созданных человеком источников ионизирующего излучения.

С освоением человеком ядерной энергии, созданием ядерного оружия и развитием ядерных технологий роль в биосфере искусственных источников ионизирующего излучения существенно увеличилась.

Это привело к изменению радиационных свойств окружающей среды и увеличению степени воздействия излучений на живые организмы. Возникла потребность в углубленном изучении влияния ионизирующих излучений на живые организмы и среду их обитания, что, в конце концов, привело к появлению новой области научных знаний — *радиоэкологии*.

## 1.2. Радиоэкология как наука

***Радиоэкология — это наука, которая изучает особенности существования организмов и сообществ организмов, их взаимоотношения между собой и с окружающей средой в условиях постоянного воздействия ионизирующего излучения.***

*Ионизирующее излучение* — это такое излучение, прохождение которого через вещество приводит к образованию в нем ионов разных знаков. Подробнее об этом мы расскажем в следующей главе.

Радиоэкология исследует, как функционируют экологические системы при повышенных по сравнению с природными уровнях ионизирующих излучений. В своем развитии эта область научных знаний опирается на современные достижения биологии, химии, физики, медицины и других дисциплин.

## Радиоэкология изучает:

## Важные даты истории

- Источники ионизирующих излучений в экосистемах и их происхождение,
- содержание радионуклидов\* в отдельных компонентах экосистем,
- степень облучения живых организмов

- Процессы перераспределения радионуклидов:
  - между компонентами экосистем
  - между экосистемами

- Особенности поступления радионуклидов в живые организмы,
- закономерности их перераспределения внутри организмов,
- выведение радиоактивных продуктов из организмов

### 1895 год

Открытие В.К. Рентгеном проникающего излучения, которое позднее назвали рентгеновским

### 1896 год

Открытие А. Беккерелем ионизирующего излучения природных соединений урана

### 1898 год

Открытие Пьером и Марией Кюри радия и полония. Введение понятия «радиоактивность»

### 1928 год

Создание Международного комитета по защите от рентгеновского излучения и излучения радия (МКЗРИР), который в 1950 году в связи с возрастающим использованием искусственных источников ионизирующих излучений был реорганизован в Международную Комиссию по радиологической защите (МКРЗ). Комиссия обобщает данные по воздействию излучений на организм человека и разрабатывает рекомендации, помогающие обеспечить единую основу для разработки национальных и региональных регламентов на облучение человека. В отдельных странах имеются свои организации подобного рода. В нашей стране это Национальная Комиссия по радиационной защите при Совете Министров Республики Беларусь

### 1934 год

Открытие Фредериком и Ирэн Жолио-Кюри искусственной радиоактивности

### 1945 год

Первое испытание атомного оружия. Атомная бомбардировка японских городов Хиросима и Нагасаки

### 1955 год

Образование Научного Комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН). Комитет предназначен для сбора, изучения и распространения информации по уровням ионизирующего излучения естественного и антропогенного происхождения, наблюдающимся в окружающей среде, а также по последствиям воздействия такого излучения для человека и окружающей среды

### 1956 год

Первое появление в научной печати термина «радиоэкология»

### 1957 год

Создание Международного Агентства по Атомной Энергии (МАГАТЭ)

### 1963 год

Международный договор об ограничении испытаний ядерного оружия (в атмосфере, под водой и в Космосе)

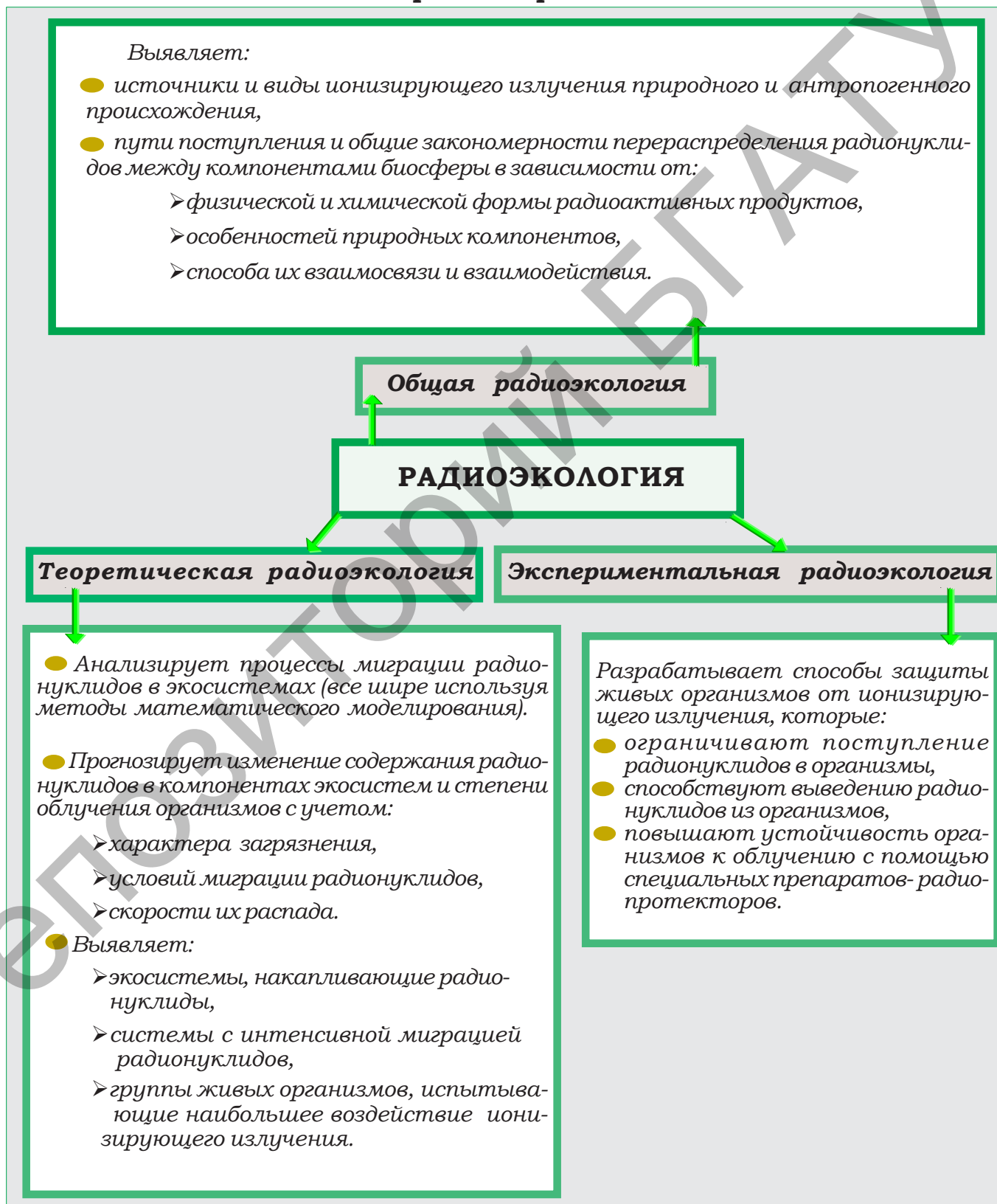
### 1986 год

Катастрофа на Чернобыльской АЭС

\*Радионуклиды — см. раздел 1.2

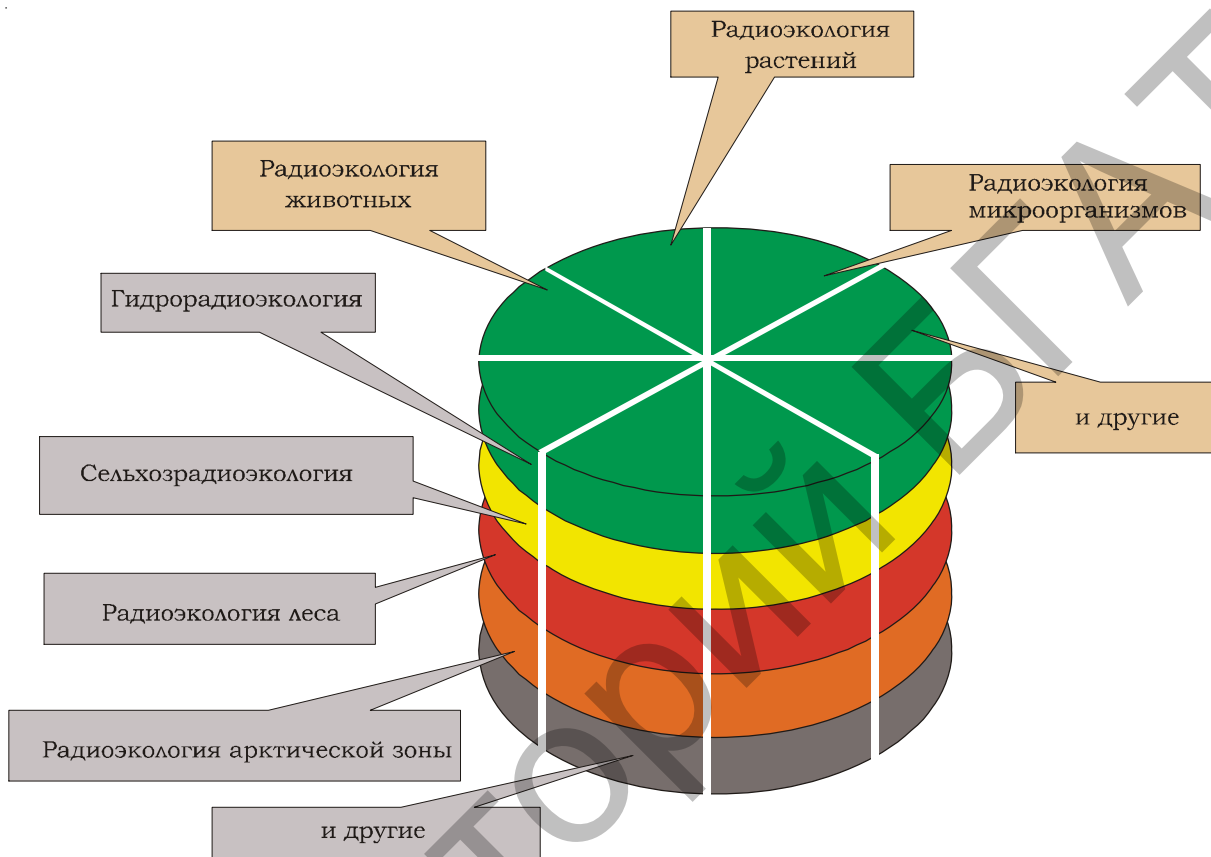
Радиоэкология является естественнонаучной дисциплиной. Подобно экологии, в ней можно выделить самостоятельные разделы. В соответствии с целями и задачами исследований радиоэкология подразделяется на **общую, теоретическую и экспериментальную.**

**Основные разделы радиоэкологии**



Радиоэкологию можно также систематизировать по разделам, изучающим определенные экологические системы или определенные группы живых организмов. Представим себе структуру радиоэкологии в виде «слоеного пирога».

## Структура радиоэкологии



«Пирог» можно делить на части двумя способами. Если делить его по горизонтали, то получим основные направления современной радиоэкологии, которые изучают воздействие ионизирующих излучений на определенные природные и искусственно созданные человеком системы. К ним относятся гидрорадиоэкология, сельскохозяйственная радиоэкология, радиоэкология леса, радиоэкология арктической зоны и другие разделы радиоэкологии.

Мы можем также делить наш «пирог» по вертикали и получим так называемые «таксономические» разделы радиоэкологии. Эти разделы — радиоэкология растений, животных, микроорганизмов и т. д. — изучают определенные группы организмов (например, млекопитающих, червей) во взаимосвязи между собой и средой обитания.

Получив представление о том, что изучает радиоэкология, рассмотрим основные понятия, которыми она оперирует.

**Таксоны** — систематические единицы или категории, лежащие в основе классификации организмов. Вид, род, семейство, отряд, класс, тип — все это таксоны.

### 1.3. Основные понятия радиэкологии

Радиэкология тесно переплетается со многими естественнонаучными дисциплинами и широко использует их терминологию и результаты исследований. Так, современная радиэкология своими корнями тесно связана с экологией и не может обойтись без основных экологических понятий.

#### Основные экологические понятия, используемые в радиэкологии

**Популяция.** Совокупность относительно обособленных особей одного вида, объединенных общим местом длительного обитания, свободно скрещивающихся между собой и дающих плодовитое потомство, способных к саморегулированию для поддержания их определенной численности.

**Жизнь.** Особая форма организации материи со специфическим обменом веществом и энергией с окружающей средой для поддержания и воспроизводства характерной структуры.

**Организм.** Совокупность упорядоченно взаимодействующих структур, образующих единое целое. Организм состоит из органов, органы — из тканей, ткани — из клеток. Важнейшим строительным материалом клеток являются биологические молекулы. Организм — это открытая система, которой присущи особенности, отличающие живую материю от не живой: обмен веществом и энергией, рост, развитие, саморегуляция, самовоспроизведение, устойчивость. Организму свойственны раздражимость (способность отвечать на внешние раздражения специфическими реакциями) и адаптация (приспособление) к среде обитания.

**Биоценоз.** Единое сообщество совместно обитающих групп различных организмов (растений, животных, микроорганизмов), населяющих относительно однородное жизненное пространство.

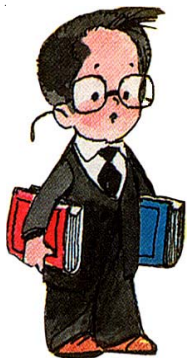
**Биосфера.** Совокупность всех экосистем планеты в пределах атмосферы, гидросферы и литосферы, охватывающая все биомы планеты.

**Биом.** Крупная экосистема, расположенная в определенной климатической и ландшафтно-географической зоне (например, тундра, степь, тайга, пустыня).

**Экосистема.** Сообщество совместно обитающих живых организмов в совокупности с жизненным пространством, которое оно занимает и где осуществляется круговорот веществ и обмен энергией.

**Биогеоценоз.** Природный комплекс, включающий сообщество совместно обитающих живых организмов и среду их обитания, которые объединены обменом веществ и энергии на относительно однородном участке

Наряду с экологическими понятиями радиэкология широко использует понятия биологии, ядерной физики и химии.



На следующих страницах книги мы подробно расскажем о **радионуклидах, радиоактивности, особенностях ионизирующих излучений**, покажем, где они встречаются в природе и какое воздействие оказывают на живые организмы. Мы познакомим вас с **дозами облучения**, расскажем, как их определяют, постараемся прояснить, когда и как наш организм подвергается облучению и всегда ли стоит этого опасаться. Со многими из этих понятий вы уже знакомы, с некоторыми столкнетесь впервые. Все они являются неотъемлемой частью радиоэкологических знаний. Без этих знаний невозможно реально оценить радиоэкологическую ситуацию и разобраться, какие защитные меры, в случае необходимости, следует предпринять, чтобы уменьшить вредное воздействие радиации на организм человека.

Итак, 

Вы узнали, что

**радиоэкология — наука, изучающая:**

**особенности существования организмов и их сообществ в условиях постоянного воздействия природных или искусственных ионизирующих излучений,**

**перераспределение радионуклидов в биосфере,**

**изменение степени воздействия ионизирующего излучения на человека и окружающую среду в результате миграции и распада радионуклидов.**

**Радиоэкология тесно связана с экологией и другими науками о природе. Она расширяет наши представления об условиях существования живых систем в мире, где присутствуют ионизирующие излучения.**

**Главная задача радиоэкологии — познавая законы природы и используя современные достижения научно-технического прогресса, обосновать способы наиболее безопасной жизнедеятельности людей при наличии в окружающей среде источников ионизирующего излучения природного и искусственного происхождения.**

В этой главе мы открыли дверь в область научных знаний, которые помогут каждому оценить реальную опасность тех или иных источников ионизирующего излучения и самим разобраться, можно ли защититься от облучения и как это сделать. Знания не только помогут избавиться от состояния неуверенности в завтрашнем дне, порождаемом страхом чего-то неведомого и непонятного, но и освоить правила поведения, которых следует придерживаться в повседневной жизни при наличии источников ионизирующего излучения в окружающей среде.

**Вопросы для самоконтроля и обсуждения:**

1. Из каких наук «родилась» радиоэкология?
2. Что является предметом изучения радиоэкологии?
3. Какие этапы можно выделить в истории развития экологии? С именами каких ученых они связаны?
4. На какие научные знания опирается радиоэкология?
5. Какие экологические понятия используются в радиоэкологии?
6. Приведите примеры экологических систем. Какая из них самая крупная?
7. Что изучают общая, теоретическая и экспериментальная радиоэкология?
8. Какая главная задача радиоэкологии?
9. Какой раздел радиоэкологии занимается вопросами защиты живых организмов от ионизирующего излучения?



**Ключевые слова и словосочетания:** атом, радиоактивность, ионизирующие излучения, изотопы, радио-нуклиды, период полураспада

Радиоактивность — это самопроизвольное превращение неустойчивых атомных ядер в более устойчивые ядра других атомов, сопровождающееся выделением энергии в виде ионизирующих излучений. Природа радиоактивности установлена в результате изучения строения атома и атомного ядра. Все виды излучения, которые сопровождают ядерные превращения, ионизируют окружающую среду. Скорость радиоактивного распада неустойчивых атомных ядер нельзя изменить физическими, химическими, биологическими и другими известными способами.

Изучив главу...



Вы познакомитесь с явлением радиоактивности и различными видами ионизирующих излучений; узнаете, что такое радионуклиды и радиоизотопы, как характеризуют скорость распада радионуклидов и как оценивают их содержание в тех или иных объектах.

## 2.1. Из истории открытия ионизирующих излучений

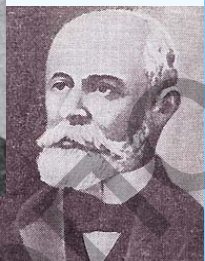
Мир, в котором мы живем, полон разного рода излучений. О тепле и свете человек знал еще с древних времен, широко использовал эти виды излучений, хотя и не имел представления об их физической природе. Больше узнав о строении вещества, человек открыл для себя новый мир — мир излучений.

### От открытия радиоактивности к познанию ее природы

1895–1896 годы



В.К. Рентген  
(1845–1923)



А. Беккерель  
(1852–1908)

**1895 год** — открытие Вильгельмом Конрадом Рентгеном икс-лучей, которые возникают при попадании катодных лучей в вещество. Позднее икс-лучи были названы «рентгеновскими».

**1896 год** — открытие Анри Беккерелем способности соединений урана самопроизвольно испускать лучи, которые

- невидимы,
- проходят через непрозрачные тела,
- засвечивают фотоматериалы,
- увеличивают электропроводность облучаемых веществ.

Во всем мире 1 марта 1896 года считается датой открытия радиоактивности.

1898 год

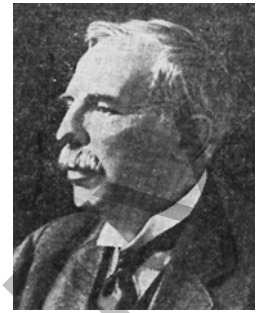


Открытие М. Склодовской-Кюри и П. Кюри радия и полония, которые подобно урану испускают невидимые лучи, увеличивающие электропроводность облучаемых веществ. Способность веществ испускать такие лучи М. Склодовская-Кюри предложила назвать **радиоактивностью**, а вещества, которые их излучают — **радиоактивными**.

Пьер Кюри (1859–1906)  
и Мария Склодовская-Кюри (1867–1934) в лаборатории



Начало XX века

Э. Резерфорд  
(1871–1937)

- Доказательство Э. Резерфордом, Ф. Содди, К. Фаянсом и другими учеными, что **радиоактивность связана с неустойчивостью атомных ядер**. Позднее атомы с неустойчивыми, самопроизвольно распадающимися ядрами были названы **радионуклидами**.
- Исследование строения атома Э. Резерфордом, Н. Бором, Г. Мозли, Р. Милликеном, Х.В. Гейгером, Э. Марсденом, Дж. Чедвиком и другими учеными.
- Открытие более 30 радиоактивных элементов в природе. Изучение процесса их распада и определение характеристик испускаемых излучений.

Начало XIX века ознаменовалось торжеством атомистических представлений, однако уже к концу века представления об атомах как о мельчайших неделимых частицах вещества подверглись серьезным сомнениям. Ученые-физики с помощью блестяще проведенных экспериментов, вошедших в историю науки, убедительно доказали, что атом имеет сложное строение. Только заглянув вглубь атома, можно понять природу радиоактивности.

## 2.2. Что мы знаем об атомах

**Атомы — это наименьшие химически неделимые частицы вещества**, основные кирпичики, из которых построено все вокруг нас. По своему строению атом напоминает миниатюрную Солнечную систему. В центре атома располагается очень плотное тяжелое ядро, которое состоит из положительно заряженных **протонов** и не имеющих заряда **нейтронов**. Ядро имеет положительный заряд, величина которого определяется числом протонов в ядре. Массы протона и нейтрона почти одинаковы и примерно равны одной условной единице (атомной единице массы или сокращенно а. е. м.). Протоны и нейтроны, составляющие атомное ядро, называют **нуклонами** (от латинского «*nucleus*», что означает «ядро»).

Нуклоны удерживаются в ядре мощными ядерными силами притяжения, которые уравнивают силы кулоновского отталкивания положительно заряженных протонов.

В ядре каждого атома нуклоны находятся на определенном расстоянии друг от друга. В масштабах ядра в качестве единицы измерения расстояния используют **ферми (ф)**. Эта единица измерения названа

Атом

1 а. е. м. =  $1,66057 \cdot 10^{-27}$  кг

Ферми  
 $1 \text{ ф} = 10^{-15} \text{ м}$



Э. Ферми  
 (1901–1954)

Заряд протона —  
 $+1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$   
 Заряд электрона —  
 $-1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$

Масса электрона —  
 $9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$   
 Масса протона —  
 $1,673 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$   
 Масса нейтрона —  
 $1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

по имени итальянского физика Энрико Ферми. *1 ферми* соответствует  $10^{-15} \text{ м}$ .

Радиус действия ядерных сил не превышает **1,4 ф**. Связь между нуклонами наиболее прочна, когда расстояние между ними **0,5 ф**. При сближении на расстояние до **0,2 ф** ядерные силы притяжения сменяются силами отталкивания.

Энергия связи нуклонов в ядре атома значительно превосходит энергию химической связи атомов в молекуле. Поэтому в процессе химических превращений ядра атомов не разрушаются, происходит лишь перегруппировка атомов.

Ядро окружают легкие, отрицательно заряженные частицы — *электроны*, которые по размерам и массе значительно уступают нуклонам. Масса электрона более чем в 1 800 раз меньше массы нуклона. Заряд электрона условно принят за элементарную единицу отрицательного заряда. По абсолютной величине заряд протона равен заряду электрона. Электрон, протон и нейтрон называют *элементарными частицами*.

**Заряд и масса элементарных атомных частиц**

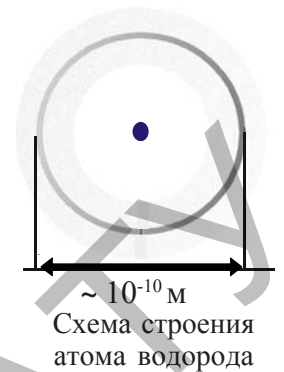
Элементарная частица	Относительный заряд	Масса покоя, а. е. м.
протон	+1	1,0073
нейтрон	0	1,0087
электрон	-1	$5,4858 \cdot 10^{-4}$

В целом, атом электрически нейтрален, так как число протонов в его ядре равно числу электронов, движущихся вокруг ядра, и положительный заряд ядра уравновешен отрицательным зарядом окружающих его электронов.

Согласно представлениям квантовой механики — раздела физики, изучающего движение электронов, протонов, нейтронов и других микрообъектов, — электрон имеет двойственную природу. С одной стороны, он является частицей, поскольку имеет определенную массу и заряд. С другой стороны, движению электрона

Всякое схематическое представление атома условно, поскольку законы микромира существенно отличаются от привычных.

вокруг ядра присущ волновой характер. У него нет определенной траектории движения и невозможно точно указать его местоположение в пространстве в конкретный момент времени. Можно говорить лишь о вероятности нахождения электрона в определенной части атома. Его положение в атоме относительно ядра описывается моделью своеобразного облака. Плотность этого электронного облака выше в тех местах, где наиболее вероятно встретить электрон.



Ядро занимает лишь незначительную часть атомного пространства. Его размеры примерно в 100 000 раз меньше размеров атома. В то же время более 99,96 % массы атома сосредоточено в ядре, поэтому плотность ядерного вещества огромна — 1,8 · 10<sup>14</sup> г/см<sup>3</sup>.

Поперечное сечение атома — ~ 10<sup>-10</sup> м  
атомного ядра — ~ 10<sup>-14</sup> — 10<sup>-15</sup> м  
Массы атомов — ~ 10<sup>-27</sup> — 10<sup>-25</sup> кг

Число протонов в ядре атома называют *протонным числом (Z)*, а число нейтронов — *нейтронным числом (N)*. Суммарное количество протонов и нейтронов в ядре атома называют *атомным числом (A)*.

**Протонное число соответствует порядковому номеру химического элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева.**

Ядра атомов одного и того же элемента всегда содержат одинаковое число протонов. Например, все атомы углерода содержат в ядре по 6 протонов, а все атомы азота — по 7 протонов.

C <sup>6</sup> Углерод	N <sup>7</sup> Азот
---------------------------	------------------------

Массовое число атома (**A**)

$$A = Z + N$$

**Z** — число протонов  
**N** — число нейтронов в ядре атома

**Химический элемент — это совокупность атомов с одинаковым числом протонов в ядре, то есть с одинаковым зарядом ядра.**

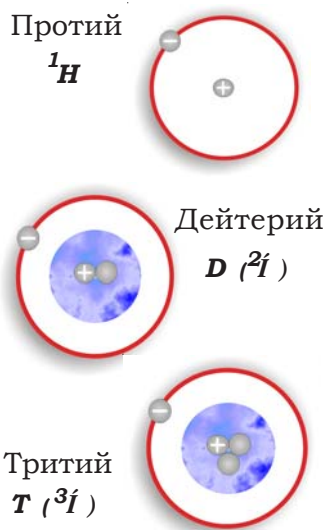
Масса атома практически определяется суммой масс протонов и нейтронов в ядре, так как масса электронов атома ничтожно мала по сравнению с массой ядра. Массовое число атома, выраженное в атомных единицах массы, примерно соответствует суммарному количеству протонов (**Z**) и нейтронов (**N**) в атомном ядре, то есть атомному числу (**A**). Массовое число атома принято указывать вверху слева от символа химического элемента (<sup>12</sup>C, <sup>14</sup>N и т. п.).

Ядра атомов одного и того же химического элемента при одинаковом количестве протонов могут, однако, отличаться по числу нейтронов. Массовые числа атомов с одинаковым количеством протонов, но разным количеством нейтронов в ядре различны. Такие атомы называют *изотопами*.

Изотопы

**Схемы строения атомов протия, дейтерия и трития**

В отличие от изотопов других элементов, каждый изотоп водорода имеет свое название и обозначение.



⊕ — протон (p<sup>+</sup>)  
 ○ — нейтрон (n<sup>0</sup>)

**Изотопы** — это атомы одного и того же химического элемента, то есть атомы, имеющие в своих ядрах одинаковое количество протонов, но отличающиеся массовыми числами из-за разного количества в ядрах нейтронов.

Названия и **символы** изотопов, как правило, совпадают с названием и **символом** соответствующего химического элемента. Только изотопы водорода имеют собственные названия и символы. Изотопы одного и того же элемента различают по массовому числу, указанному слева вверху, рядом с символом химического элемента. Химические свойства изотопов практически одинаковы.

В современной научной литературе широкое распространение получил термин «нуклид».

**Нуклид** — это совокупность атомов с определенным количеством протонов и нейтронов в ядре.

Именно в таком смысле понятие «нуклид» чаще всего используют в химии. В ядерной физике термин «нуклид» обычно применяют для обозначения не определенного вида атомов, а только их ядер.

- **Атом** — это электронейтральная микросистема, состоящая из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов.
- **Протоны, нейтроны и электроны** — элементарные частицы, входящие в состав атома.
- **Количество протонов в ядре определяет заряд атомного ядра. Порядковый номер химического элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева соответствует заряду ядра и количеству электронов в любом атоме этого элемента.**
- **Изотопы** — это атомы одного и того же химического элемента, то есть атомы, имеющие одинаковое количество протонов в своих ядрах, но отличающиеся массовыми числами из-за разного количества в ядрах нейтронов.

**2.3. Радиоактивность. Радионуклиды. Радиоактивные семейства**

В природе, наряду с устойчивыми (стабильными) нуклидами, существуют и неустойчивые радиоактивные нуклиды (радионуклиды). Ядра устойчивых нуклидов могут существовать в практически неизменном виде, когда число протонов и нейтронов в них не меняется, неограниченно долго. Ядра неустойчивых радиоактивных нуклидов (радионуклидов) самопроизвольно распадаются.

**Условие устойчивости атомных ядер:**  
 $N/Z \approx 1$  — устойчивы нуклиды легких химических элементов с  $Z$  от 1 до 20.

В целом, стабильность ядер нуклида зависит от соотношения числа протонов и нейтронов в атомном ядре.

Избыток протонов или нейтронов делает атомное ядро неустойчивым. Неустойчивые атомные ядра обладают избыточной энергией и стремятся перейти в более устойчивое состояние с меньшей энергией. Любые самопроизвольные процессы таких ядерных превращений сопровождаются выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения. В результате, одни атомные ядра превращаются в другие, энергетически более устойчивые ядра.

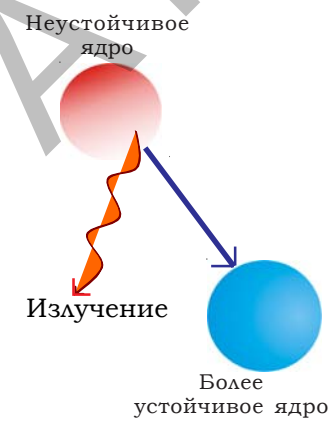
**Радиоактивность — это самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер в другие, более устойчивые ядра с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения.**

**Радионуклиды — это атомы с нестабильными ядрами, которые самопроизвольно превращаются в более устойчивые ядра атомов других химических элементов или других изотопов того же элемента с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения.**

Химические элементы, у которых все изотопы радиоактивны, называют *радиоактивными элементами*. Примером радиоактивного элемента является уран. Если сравнить изотопы водорода и радиоактивного элемента урана, то можно увидеть, что у водорода существует два стабильных изотопа (протий и дейтерий) и один радиоактивный (тритий), а у урана стабильные изотопы отсутствуют — все его изотопы радиоактивны.

**Условие устойчивости атомных ядер:**  
 $N/Z > 1$  — устойчивы нуклиды тяжелых элементов с  $Z$  от 20 до 83.

Например, стабильны  
 $^{90}\text{Zn}: N/Z = \frac{50}{40} \approx 1,3$   
 $^{209}\text{Bi}: N/Z = \frac{126}{83} \approx 1,5$

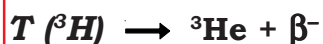


Термин «радионуклид» произошел от латинских слов «radiare» — излучать, испускать лучи и «nucleus» — ядро.

Все виды излучения, сопровождающие ядерные превращения, называют ядерными излучениями.

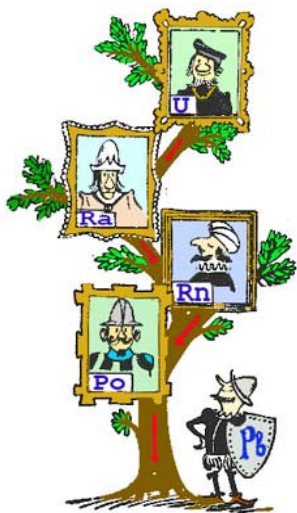
**Изотопы водорода и изотопы урана**

Химический элемент	Состав ядер	
	стабильные	радиоактивные
Водород	<i>протий</i> $^1\text{H}$ $Z = 1$ $N = 0$ <i>дейтерий</i> $D$ ( $^2\text{H}$ ) $Z = 1$ $N = 1$	<i>тритий</i> $T$ ( $^3\text{H}$ ) $Z = 1$ $N = 2$
Уран	отсутствуют	$^{233}\text{U}$ $Z = 92$ $N = 141$ $^{235}\text{U}$ $Z = 92$ $N = 143$ $^{238}\text{U}$ $Z = 92$ $N = 145$ и др.



### Радиоактивное семейство ${}^{238}U$

Ядерные превращения начинаются с распада радионуклида  ${}^{238}U$  (родоначальник радиоактивного семейства)...



...и заканчиваются образованием стабильного нуклида  ${}^{206}Pb$  (конечный продукт).

Радиоактивными являются все химические элементы, расположенные в Периодической системе элементов за висмутом, порядковый номер которого равен 83. Остальные химические элементы имеют как стабильные, так и радиоактивные изотопы.

Из почти 1 700 известных в настоящее время нуклидов стабильны только 264. Остальные являются радиоактивными и самопроизвольно распадаются, превращаясь в стабильные нуклиды.

Превращение нестабильного ядра в устойчивое ядро может осуществляться в результате одного или нескольких последовательных радиоактивных распадов. Легкие радионуклиды, которые содержат в ядре небольшое число протонов и нейтронов, обычно превращаются в стабильные нуклиды в результате одного ядерного превращения (например,  $T (^3H)$ ,  ${}^{14}C$ ,  ${}^{40}K$  и др.). При распаде некоторых ядер атомов тяжелых радиоактивных элементов ( $Z > 83$ ) может осуществляться цепочка последовательных ядерных превращений, которая продолжается до тех пор, пока не образуется устойчивое ядро.

Группа тяжелых радиоактивных элементов, объединенных цепочкой последовательных самопроизвольных ядерных превращений, образует **радиоактивное семейство**.

В настоящее время на Земле присутствуют члены трех естественных радиоактивных семейств:  ${}^{235}U$ ,  ${}^{238}U$  и  ${}^{232}Th$ . Члены четвертого радиоактивного семейства  ${}^{237}Np$  были получены искусственно. Как полагают ученые, когда-то они также присутствовали на Земле, но за время существования планеты все члены этого радиоактивного семейства распались. Более подробно радиоактивные семейства будут рассмотрены в главе 4.

Из первичных радионуклидов, вошедших в состав земного вещества в период формирования нашей планеты в составе Солнечной системы, сейчас можно встретить лишь те радионуклиды, которые не успели подвергнуться радиоактивному распаду за время существования Земли.

На ранних этапах исследований радиоактивности ученые установили, что неустойчивые атомные ядра химических элементов могут самопроизвольно превращаться в атомные ядра других химических элементов. В ходе дальнейших исследований было также обнаружено, что процессы ядерных превращений можно вызывать и искусственно.

Первое искусственное превращение атомных ядер одного элемента в ядра атомов другого химического элемента осуществил в 1919 году Э. Резерфорд. Используя поток быстрых ядер гелия (*альфа-частиц*), испускаемых при радиоактивном распаде радия ( $^{226}\text{Ra}$ ), ему удалось превратить атомы азота  $^{14}\text{N}$  в атомы кислорода  $^{17}\text{O}$ .

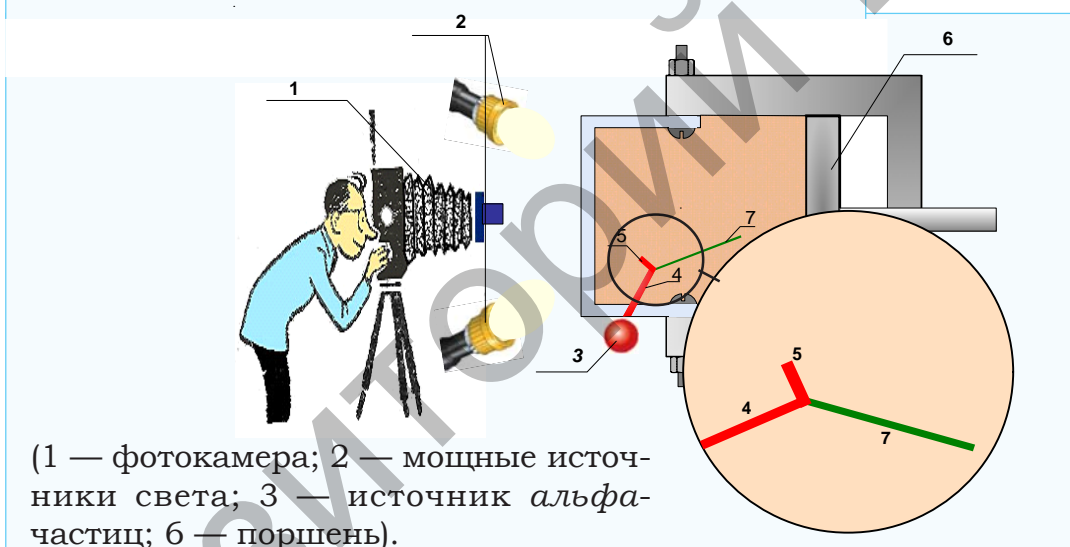
### Первое искусственное ядерное превращение

При проведении опыта камера Вильсона была заполнена азотом и пересыщенным водяным паром. Поток *альфа-частиц*, попадая в камеру, вызывал ионизацию молекул газа. Образующиеся ионы способствовали конденсации молекул воды из пересыщенного водяного пара. Мельчайшие капельки сконденсированной воды создавали видимый след на пути движения ионизирующего излучения.



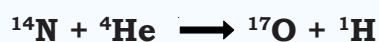
1919 год

Первое искусственное ядерное превращение, осуществленное Э. Резерфордом при облучении атомов  $^{14}\text{N}$  *альфа-частицами* в камере Вильсона.



(1 — фотокамера; 2 — мощные источники света; 3 — источник *альфа-частиц*; 6 — поршень).

Э. Резерфорд наблюдал, как при попадании *альфа-частиц* в газовую среду через какое-то время след некоторых *альфа-частиц* (4) обрывался и вместо него появлялись два новых следа: короткий и широкий (5) и длинный и узкий (7). Резерфорд предположил, что при облучении атомов азота с атомной массой 14 а. е. м. ( $^{14}\text{N}$ ) *альфа-частицами*, представляющими собой ядра атомов гелия ( $^4\text{He}$ ), происходит ядерное превращение. В результате образуются ядра атомов кислорода  $^{17}\text{O}$ , оставляющие короткие и широкие следы, и ядра атомов водорода  $^1\text{H}$ , дающие длинные и узкие следы.



Открытие возможности искусственного превращения атомных ядер одних химических элементов в атомные ядра других химических элементов открыло путь к искусственному получению самых разных атомных ядер, в том числе, и радиоактивных.

## 2.4. Искусственная радиоактивность

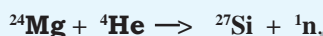
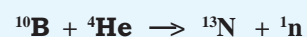
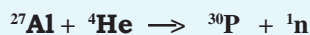
Если бомбардировать устойчивые атомные ядра ядерными частицами (нейтронами, протонами, альфа-частицами) и более тяжелыми ядрами атомов других химических элементов, можно осуществить различные ядерные превращения.

В результате таких ядерных превращений могут образоваться как устойчивые, так и неустойчивые атомные ядра. Если в процессе бомбардировки устойчивые атомные ядра захватывают бомбардирующие частицы, превращаясь в новые неустойчивые ядра, эти неустойчивые ядра затем самопроизвольно распадаются с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения. Радиоактивность, вызываемую искусственно при бомбардировке устойчивых атомных ядер ядерными частицами, называют искусственной.

## Открытие искусственной радиоактивности

1934 год

Впервые Ирэн Кюри и Фредерик Жолио-Кюри при бомбардировке альфа-частицами магния, бора, алюминия искусственно получили радиоактивные изотопы других легких элементов:



Открытие явления искусственной радиоактивности связано с именами Ирэн Кюри и Фредерика Жолио-Кюри, которые впервые в лабораторных условиях получили искусственные радиоактивные нуклиды фосфора ( ${}^{30}\text{P}$ ), азота ( ${}^{13}\text{N}$ ), кремния ( ${}^{27}\text{Si}$ ) и других элементов. Это открытие показало, что в искусственных условиях возможен синтез радионуклидов.

Начиная с 1934 года ...

При бомбардировке нейтронами разнообразных веществ искусственно получено множество радиоактивных изотопов химических элементов. В их числе и изотопы тяжелых радиоактивных элементов, помещенные в Периодической системе за ураном. Их называли *трансурановыми элементами*.

Большинство синтезированных радионуклидов получено при использовании в качестве бомбардирующих частиц нейтронов. Поскольку нейтроны электрически нейтральны, они не отталкиваются атомными ядрами, и с их помощью легче вызвать ядерные превращения.

Положительно заряженные бомбардирующие частицы (протоны, ядра гелия) должны обладать большой энергией, то есть двигаться со значительной скоростью, чтобы преодолеть электростатическое отталкивание ядра-мишени. Чем больше заряд бомбардирующей частицы и ядра-мишени, тем с большей скоростью должна двигаться бомбардирующая частица, чтобы вызвать ядерное превращение.

1939 год

Открытие процесса ядерного деления урана и возможности его использования в мирных и военных целях.



В связи с этим разработано множество методов ускорения заряженных частиц с использованием сильных электрических и магнитных полей.

**За выдающиеся научные открытия были вручены Нобелевские премии:**

**1901 год**  
(первая в истории)  
**Вильгельму Конраду Рентгену**

«В признание огромной важности открытия замечательных лучей», впоследствии названных его именем

**1903 год**  
**Марии и Пьеру Кюри, Антуану Анри Беккерелю**

«В признание огромной важности открытия самопроизвольной радиоактивности и в признание выдающегося значения их совместных исследований явления радиоактивности»

**1908 год**  
**Эрнесту Резерфорду**

«За исследование в области распада элементов и химии радиоактивных веществ»

**1921 год**  
**Фредерикю Содди**

«За вклад в химию радиоактивных веществ и за исследование природы и происхождения изотопов»

**1935 год**  
**Ирэн и Фредерикю Жану Жолио-Кюри**

«В признание синтеза новых радиоактивных элементов»

**1922 год**  
**Нильсу Хенрику Давиду Бору**

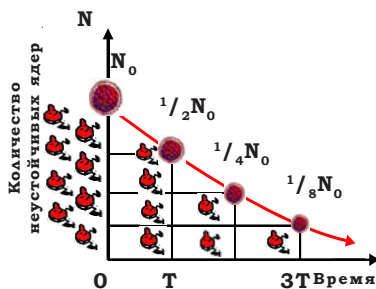
«За заслуги в изучении структуры атома и излучения из него»

и другим ученым.

## 2.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Активность

### Закон радиоактивного распада

характеризует изменение во времени количества неустойчивых атомных ядер радионуклида:



$N_0$  — количество неустойчивых атомных ядер в начальный момент наблюдения;

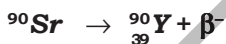
$T$  — промежуток времени, равный периоду полураспада.

Например, радионуклид  $^{90}\text{Sr}$  имеет период полураспада 28,5 года.

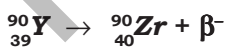
Из 10 г радионуклида через 28,5 года останется только 5,0 г  $^{90}\text{Sr}$ .

В течение последующих 28,5 года распадется еще половина  $^{90}\text{Sr}$ , останется 2,5 г радионуклида и т. д.

При распаде из ядра атома  $^{90}\text{Sr}$  вылетает бета-частица и образуется радиоактивный иттрий ( $^{90}\text{Y}$ ):



Радионуклид  $^{90}\text{Y}$  имеет период полураспада 64 часа и, испуская еще одну бета-частицу, превращается в стабильный нуклид циркония ( $^{90}\text{Zr}$ ):



Таким образом, по мере распада радиоактивного стронция ( $^{90}\text{Sr}$ ), в образце накапливается стабильный цирконий ( $^{90}\text{Zr}$ ).

Самопроизвольные превращения неустойчивых атомных ядер происходят независимо друг от друга. За конкретный промежуток времени определенная часть ядер обязательно распадается. Однако для каждого отдельного атомного ядра невозможно предсказать момент его превращения.

Распад неустойчивого атомного ядра может произойти в любое мгновение: через секунду, через несколько минут, через час, через сутки и т. д.

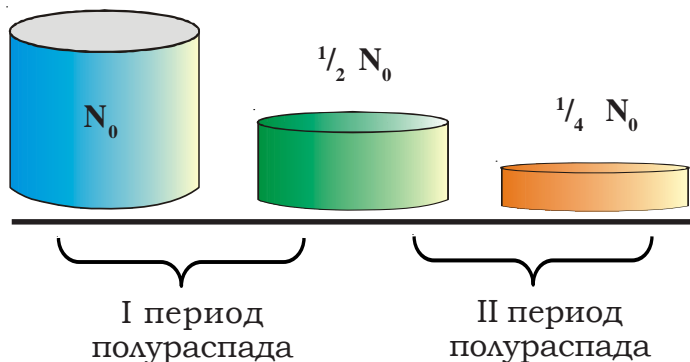
Можно говорить лишь о *вероятности* процесса радиоактивного распада неустойчивого ядра через определенный промежуток времени. Вероятность распада зависит от особенностей строения ядра нуклида и не зависит от того, входит ли радионуклид в состав тех или иных химических соединений, находятся ли вещества в газообразном, жидком или твердом состоянии.

Ученые установили, что **скорость радиоактивного распада радионуклида пропорциональна числу нераспавшихся атомных ядер этого радионуклида**. Выявленную закономерность назвали **законом радиоактивного распада**.

Промежуток времени, за который распадается половина любого количества определенного радионуклида, *величина постоянная*. Его называют *периодом полураспада* и используют для характеристики радионуклида.

**Период полураспада радионуклида — это промежуток времени, за который распадается половина любого количества радионуклида.**

По величине периода полураспада судят о скорости распада радионуклида. Период полураспада обычно обозначают  $T_{1/2}$ .



$N_0$  — количество неустойчивых атомных ядер.

Продолжительность периода полураспада для различных радионуклидов может составлять от миллионных долей секунды до нескольких миллиардов лет.

**За промежуток времени, в 10 раз превышающий период полураспада, любое количество радионуклида практически полностью распадается (уменьшится в  $2^{10}$ , или примерно в 1000 раз).**

Вещество, которое содержит один или несколько радионуклидов, называют радиоактивным.

Количество радионуклида можно измерять в единицах массы (килограмм, грамм, миллиграмм, микрограмм и т. д.). Однако это неудобно, поскольку обычно приходится иметь дело с ничтожно малыми весовыми количествами радионуклида (миллионными, миллиардными и меньшими долями грамма). На практике о количестве радионуклида судят по величине *активности*.

**Активность — это число распадов радионуклида в единицу времени.**

Фактически, активность характеризует скорость распада радионуклида. Согласно закону радиоактивного распада, скорость распада радионуклида пропорциональна числу нераспавшихся радиоактивных ядер. Поэтому активность можно использовать в качестве количественной меры содержания радионуклида в веществе. Чем выше активность, тем больше ядерных превращений происходит в веществе в единицу времени и тем больше количество радионуклида в нем.

В системе СИ единицей измерения активности является *Беккерель (Бк)*. Свое название она получила в честь А. Беккереля. В радиоактивном веществе активностью *1 Бк* в среднем происходит одно спонтанное ядерное превращение в секунду.

Существуют и внесистемные единицы измерения активности, среди которых наиболее часто употребляется *Кюри (Ки)*. Эта единица названа в честь Марии и Пьера Кюри. *1 Кюри* соответствует активности *1 г радия*.

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$$

Концентрацию радионуклида в веществе можно оценивать по *удельной или объемной активности*.

**Удельная активность — это активность вещества в расчете на единицу его массы, а объемная активность — на единицу объема вещества.**

Активность 1 Бк  
соответствует массе  
 $^{137}\text{Cs}$  —  $3,1 \cdot 10^{-13}$  г  
 $^{90}\text{Sr}$  —  $1,9 \cdot 10^{-13}$  г

**Активность радионуклида**

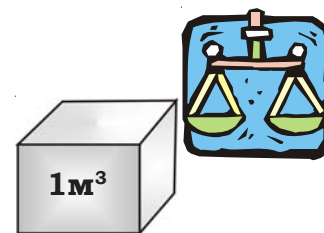
$$A = \Delta N / \Delta t,$$

$\Delta N$  — число ядерных распадов за промежуток времени  $\Delta t$

**Единицы измерения активности**

1 Бк = 1 расп/с  
и его производные:  
1 миллибеккерель (мБк) =  $10^{-3}$  Бк  
1 килбеккерель (кБк) =  $10^3$  Бк  
и др.

**Удельная ( $A_m$ ) и объемная ( $A_v$ ) активность вещества**  
 $A_m = A/m$  (Бк/кг)



$$A_v = A/V \text{ (Бк/м}^3\text{)}$$

**Плотность радиоактивного загрязнения территорий**

$$A_s = A/S \text{ (Бк/м}^2, \text{Ки/км}^2)$$

$$1 \text{ Ки/км}^2 = 37\,000 \text{ Бк/м}^2$$



Удельную активность ( $A_m$ , Бк/кг) обычно применяют при оценке содержания радионуклидов в твердых веществах, а объемную ( $A_v$ , Бк/м<sup>3</sup>) — при оценке содержания радионуклидов в жидких и газообразных веществах (вода, воздух и т. п.)

Распределение радионуклида по поверхности объекта характеризуют по **активности радионуклида на единице площади поверхности объекта**. Эта величина обычно применяется для характеристики уровня загрязнения территории радионуклидами, часто ее называют *плотностью загрязнения*.

Энергия излучений, испускаемых при ядерных превращениях, довольно велика.

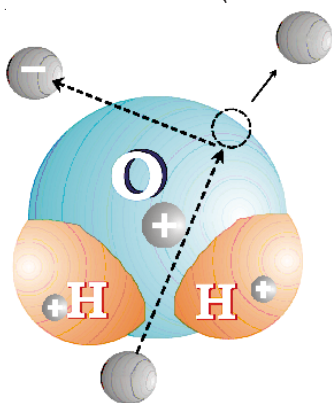
Этой энергии вполне достаточно для отрыва электронов от электронейтральных атомов и молекул, попадающих на пути распространения излучения, и образования положительно заряженных ионов. Электроны, потерявшие связь с ядром, не могут долго оставаться свободными и захватываются другими атомами и молекулами с образованием отрицательно заряженных ионов. Атомы или молекулы, утратившие часть электронов, называют *катионами*, а захватившие избыточные электроны — *анионами*.

**Поскольку излучения, сопровождающие процессы ядерных превращений, вызывают ионизацию окружающего вещества, их относят к ионизирующим излучениям.**

**Ионизирующим является любое излучение, которое при попадании в вещество вызывает его ионизацию.**

В следующем разделе мы рассмотрим основные виды и свойства ядерных излучений, которые сопровождают процессы радиоактивного распада.

Ионизация молекул воды заряженной частицей



Бомбардирующая частица

## 2.6. Основные виды ионизирующих излучений

Существуют разные виды ионизирующего излучения, которые отличаются по своей природе, энергии, глубине проникновения в вещество и степени воздействия на живые организмы. Выделяют две группы ионизирующих излучений: *корпускулярные* и *электромагнитные (фотонные)*.

Корпускулярное излучение (альфа-, бета-, протонное, нейтронное и др.) представляет собой поток быстро движущихся частиц.

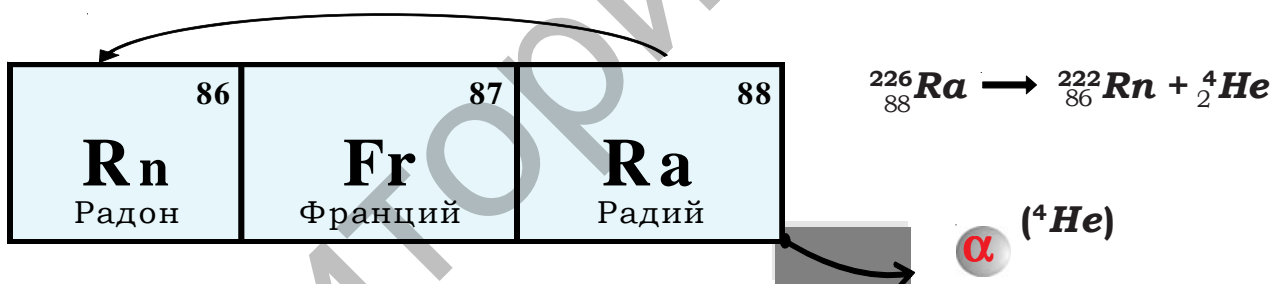
Электромагнитное (фотонное) излучение (рентгеновское, гамма-излучение) — это разновидность электромагнитных волн. Все виды электромагнитных волн излучаются и переносят энергию в пространстве строго определенными порциями — квантами или фотонами.

Рассмотрим основные виды ионизирующего излучения.

### Альфа-излучение

**Альфа-излучение ( $\alpha$ ) — это поток положительно заряженных частиц. Каждая альфа-частица состоит из двух протонов и двух нейтронов, которые прочно связаны между собой. Фактически, альфа-частицы представляют собой ядра атомов гелия  ${}^4\text{He}$ , то есть имеют массу, равную 4 а. е. м., а заряд — +2.**

Альфа-частицы образуются при ядерном распаде тяжелых радиоактивных элементов. Примером может служить происходящий в природе распад ядер радия —  ${}^{226}\text{Ra}$ :



В результате альфа-распада заряд ядра уменьшается на 2 относительные единицы, а его масса — на 4 атомные единицы массы, то есть положение полученного в результате распада атома смещается в Периодической системе элементов на 2 позиции влево.

**Альфа-частицы, образующиеся при радиоактивном распаде, обладают энергией от 2 до 14 МэВ и движутся со скоростями от 14 до 20 км/с.**

**Альфа-излучение обладает высокой ионизирующей способностью. Например, при движении в воздухе альфа-частицы образуют на каждом сантиметре своего пути от 25 до 60 тысяч пар ионов.**

При попадании в вещество альфа-излучения свободные, положительно заряженные альфа-частицы отдают свою энергию преимущественно электронам атомов.

«Корпусула» в переводе с латинского означает «частица».

Фотон — это квант (порция) электромагнитного излучения, обладающий свойствами волны и частицы

+ — протон (p<sup>+</sup>)  
 0 — нейтрон (n<sup>0</sup>)

1 эВ — энергия, которую приобретает электрон в электрическом поле с разностью потенциалов в 1 Вольт.

$$1 \text{ эВ} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

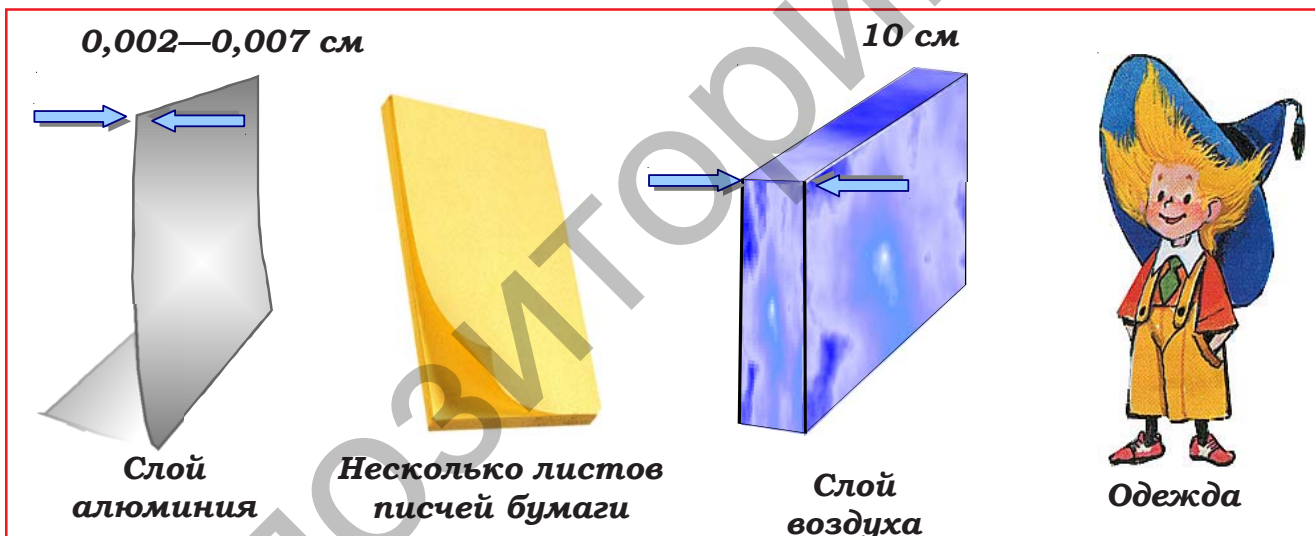
$$1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$$

Получивший избыточную энергию электрон теряет связь с ядром и покидает атом, который превращается в положительно заряженный ион. Как свободная частица образовавшийся электрон может существовать в проводниках, некоторое время — в газах; обычно он вскоре присоединяется к другому атому или молекуле, что ведет к образованию отрицательно заряженных ионов. Лишь в редких случаях *альфа*-частицы при столкновении могут проникать в ядра атомов и вызывать ядерные превращения.

Из-за относительно большого размера и электрического заряда, *альфа*-частицы взаимодействуют со всеми встречающимися на пути их движения атомами. Поэтому в любом веществе *альфа*-излучение быстро теряет свою энергию и проникает в него неглубоко.

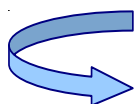
**Способность *альфа*-излучения проникать в вещество зависит от энергии *альфа*-частиц и свойств облучаемого вещества (в основном, от его плотности).**

**Альфа-излучение задерживают:**



В биологические ткани *альфа*-излучение проникает на глубину менее 0,7 мм. Поэтому при внешнем облучении организма *альфа*-излучение, в основном, поглощается наружным слоем кожи и практически не представляет опасности, за исключением тех случаев, когда *альфа*-лучи попадают на слизистую оболочку глаз.

*Альфа*-излучающие радионуклиды могут проникать внутрь организма



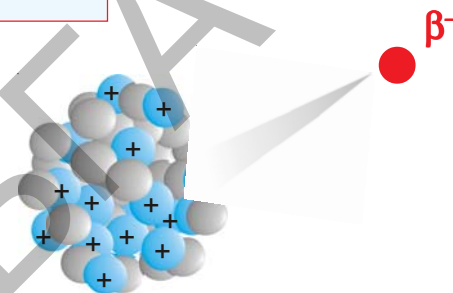
- через открытую рану,
- с пищей,
- с вдыхаемым воздухом.

Проникающая способность *альфа*-излучения

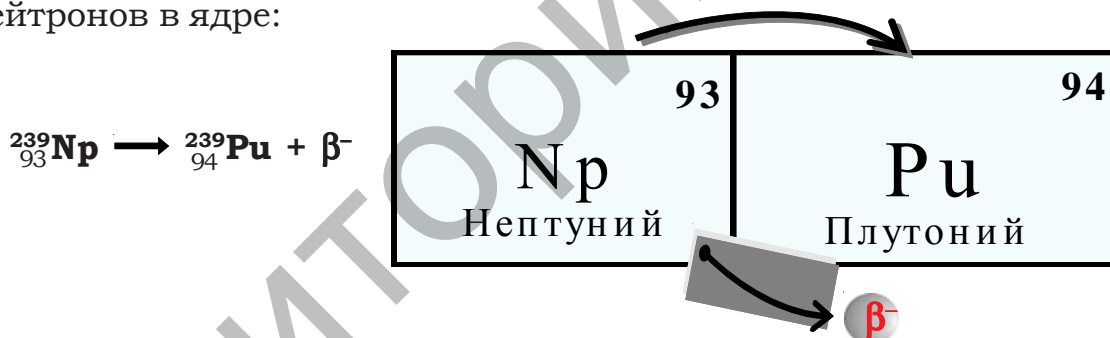
Облучая внутренние органы человека, *альфа*-частицы могут вызывать серьезные нарушения в клетках биологических тканей. От *альфа*-излучения радионуклидов, проникших в легкие, могут пострадать участки легочной ткани и пронизывающие ее капилляры. Специалисты в области радиационной безопасности полагают, что при одинаковой энергии *альфа*-излучение примерно в 20 раз превосходит *бета*- и *гамма*-излучения по способности вызывать нарушения в биологических тканях человека.

### Бета-излучение

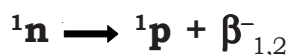
**Бета-излучение ( $\beta^-$ )** — это поток быстро движущихся свободных электронов. По размерам и массе они значительно уступают *альфа*-частицам. Так, масса электрона в 7 344 раза меньше массы *альфа*-частицы. Заряд электрона по абсолютной величине вдвое меньше заряда *альфа*-частицы.



*Бета*-частицы испускаются, например, в результате распада радионуклидов с избыточным содержанием нейтронов в ядре:



В основе *бета*-распада лежит происходящее в ядре атома превращение нейтрона в протон:



В результате *бета*-распада заряд ядра атома увеличивается на единицу, а его масса остается практически без изменения. Положение атома, полученного в результате такого распада, смещается в Периодической системе элементов на одну позицию вправо.

<sup>1</sup> Приводится упрощенная схема превращения нейтрона в протон. Реальный процесс сопровождается испусканием еще одной элементарной частицы — антинейтрино, которая также уносит из ядра часть энергии.

<sup>2</sup> В данном разделе рассматривается лишь один из видов *бета*-распада — электронный *бета*-распад, при котором ядро испускает электрон. Другие виды *бета*-распада — позитронный распад, при котором ядро испускает позитрон и нейтрино в результате превращения ядерного протона в нейтрон, а также К-захват здесь не обсуждаются.

Энергия *бета*-частиц, испускаемых радионуклидами, находится в пределах от **0,02** до **14 МэВ**, а скорость может достигать 0,99 скорости света. При этом природные радионуклиды излучают *бета*-частицы с энергией до **3,5 МэВ**.

При прохождении через вещество *бета*-частицы теряют свою энергию. Они передают ее веществу при взаимодействии с ядрами и электронами атомов. Поведение *бета*-частиц в веществе зависит от их энергии.

*Бета*-частицы, обладающие относительно низкими энергиями (*менее 0,5 МэВ*), при взаимодействии с ядрами и электронами атомов под действием кулоновских сил меняют направление своего движения. Происходит так называемое *упругое рассеяние бета*-частиц на ядрах и электронах атомов, причем, преимущественно — на ядрах.

*Бета*-частицы с более высокими значениями энергии способны выбивать электроны из атомов, то есть ионизировать вещество.

Если энергия *бета*-частиц *выше 1 МэВ*, их взаимодействие с электронами и ядрами атомов приводит к замедлению движения *бета*-частиц и возникновению электромагнитного излучения. Этот процесс называют *радиационным торможением*, а возникающее электромагнитное излучение — *тормозным излучением*. В результате радиационного торможения *бета*-частицы теряют значительное количество энергии.

Из-за маленькой массы и небольшого заряда электрона *бета*-частица ионизирует вещество в меньшей степени, чем *альфа*-частица такой же энергии. Поэтому энергия *бета*-частицы расходуется на большем расстоянии, чем энергия *альфа*-частицы. В результате, при одинаковой энергии пробег *бета*-частиц в веществе значительно превышает пробег *альфа*-частиц. При этом траектория движения *бета*-частицы представляет собой ломаную линию, поэтому суммарная длина пути *бета*-частицы значительно превышает расстояние, на которое излучение проникает в вещество.

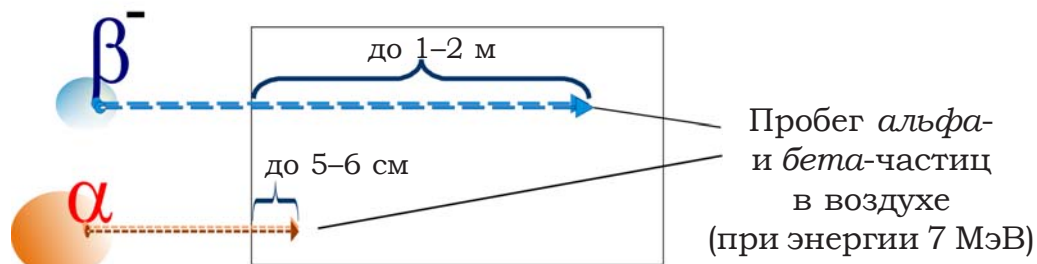
Пробег *бета*-частиц в веществе зависит от энергии *бета*-частиц, химического состава и плотности вещества.

В воздухе пробег *бета*-частиц, испускаемых радионуклидами, может достигать 1–2 м.

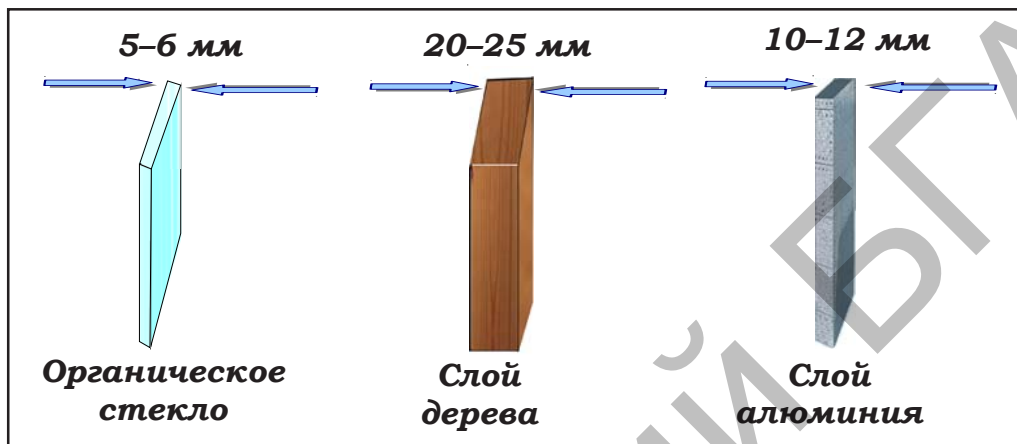
*Радиационное торможение* — это потеря энергии быстрых заряженных частиц в электрическом поле атома, сопровождаемая выделением электромагнитного (*тормозного*) излучения.

*Пробег частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$  и др.)* в веществе — это расстояние, которое они преодолевают, пока не утратят способности ионизировать вещество.





### Бета-излучение задерживают:



Если человек одет в легкую одежду, она задерживает часть бета-частиц. Остальные бета-частицы могут проникать через кожу на глубину в несколько миллиметров. При облучении обнаженных участков тела бета-частицы могут проникать на глубину 1–2 см, вызывая незначительные повреждения биологических тканей. Таким образом, при внешнем облучении бета-излучение радионуклидов не представляет значительной опасности для человека.

### Гамма-излучение и рентгеновское излучение

Гамма-излучение ( $\gamma$ ) и рентгеновское излучение относятся к электромагнитным (фотонным) излучениям. Они характеризуются короткими длинами волн (большими частотами) и, как любое электромагнитное излучение, испускаются строго определенными порциями (квантами, или фотонами). Оба вида излучения отличаются высокой энергией фотонов.

Гамма-излучение ( $\gamma$ ) и рентгеновское излучение имеют одинаковую природу, их кванты (фотоны) не несут электрического заряда. Оба вида излучения представляют собой электромагнитные волны, которые, как и все виды электромагнитных волн, распространяются в вакууме со скоростью света (300 000 км/с). Отличаются эти разновидности

Энергия фотона (E)

$$E = h\nu$$

$\nu$  — частота излучения. Это величина, обратно пропорциональная длине волны излучения ( $\lambda$ )

$$\nu = 1/\lambda$$

$h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Дж/с (постоянная Планка).

Чем короче длина волны, тем больше частота и энергия фотона.

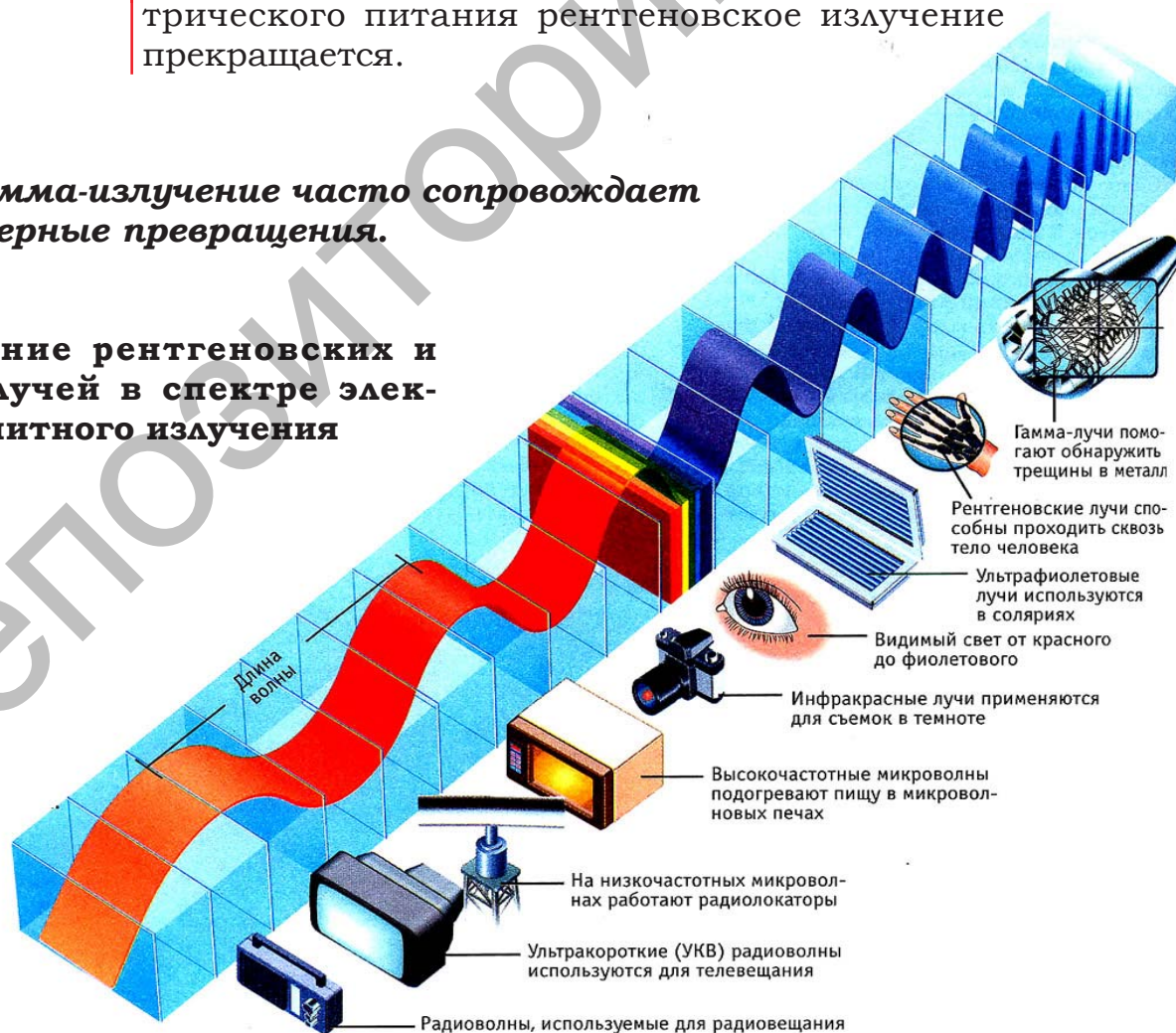
электромагнитного излучения по длине волны и энергии фотонов.

О рентгеновских лучах слышал каждый, кто проходил медицинское обследование. Рентгеновское излучение имеет длины волн от  $10^{-5}$  до  $100 \text{ нм}$  (от  $10^{-14}$  до  $10^{-7} \text{ м}$ ).  $1 \text{ нм}$  (нанометр) =  $10^{-9} \text{ м}$  (одна миллиардная часть метра).

Гамма-излучение — это электромагнитные волны с длиной волны менее **0,2 нм** ( $2 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ). В спектре электромагнитного излучения эти лучи занимают крайнее положение и охватывают область наиболее коротких длин волн. Четкой границы между гамма-излучением и рентгеновским излучением нет. Энергия фотонов гамма-излучения обычно больше, чем энергия фотонов рентгеновского излучения. Однако в переходной области от одного вида излучения к другому энергия фотонов рентгеновского излучения может оказаться выше энергии фотонов гамма-излучения. Отличаются эти виды излучения и по способам получения. Рентгеновское излучение можно получить искусственно в рентгеновской трубке, работающей на электрической энергии. При отключении электрического питания рентгеновское излучение прекращается.

**Гамма-излучение часто сопровождает ядерные превращения.**

**Положение рентгеновских и гамма-лучей в спектре электромагнитного излучения**



Гамма-кванты испускаются в тех случаях, когда после радиоактивного распада (альфа и бета) ядро оказывается в возбужденном состоянии. Подобно возбужденному атому, такое ядро переходит в основное состояние (с минимальной энергией), испуская фотон. При распаде радионуклидов обычно излучаются гамма-кванты с энергией от 10 до 5000 килоэлектронвольт (кэВ).

Рентгеновское излучение образуется при торможении заряженных частиц, которые бомбардируют мишень в электрическом поле, и при взаимодействии заряженных частиц высоких энергий с электронами внутренних электронных оболочек атома. Такие частицы способны выбивать электроны с внутренних оболочек атома. Атомы с незаполненными местами во внутренних электронных оболочках чрезвычайно неустойчивы. Освободившиеся места могут заполнять электроны из внешних электронных оболочек. При этом атомы переходят в более устойчивое состояние, а избыточная энергия испускается в виде квантов рентгеновского излучения.

Как альфа- и бета-частицы, гамма-кванты ионизируют вещество, однако ионизация вещества гамма-излучением имеет свои особенности.

При прохождении через вещество гамма-кванты могут передавать свою энергию электронам атомов.

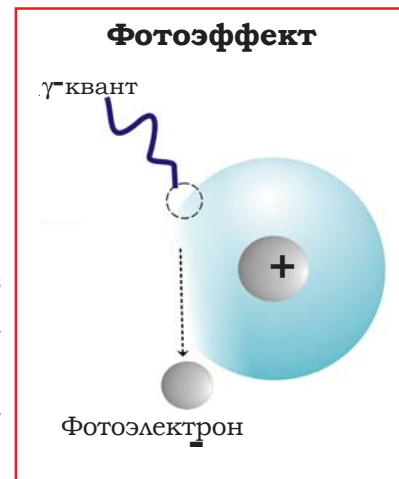
Если энергия электрона после взаимодействия с гамма-квантом превышает энергию его связи с ядром, то электрон, получив дополнительную энергию, покидает атом. Образовавшиеся таким способом свободные электроны называют фотоэлектронами.

**Появление в веществе свободных электронов под действием электромагнитного излучения называют фотоэффектом.**

Фотоэффект наблюдается при энергиях гамма-квантов от 0,01 до 1 МэВ. В этом случае именно фотоэлектроны, в основном, и производят ионизацию среды при прохождении гамма-излучения через вещество. Поэтому такой способ ионизации вещества называют косвенным.

Гамма-излучение обладает высокой проникающей способностью.

**Из-за высокой проникающей способности защититься от гамма-излучения можно лишь толстым слоем плотного материала (например, свинца или бетона).**



Толщину слоя материала, необходимого, чтобы уменьшить интенсивность излучения в 2 раза, называют *слоем половинного ослабления*.

По величине энергии и связанной с ней проникающей способности условно выделяют «мягкую» и «жесткую» компоненты рентгеновского и *гамма*-излучений. «Жесткая» компонента характеризуется более высокими энергией и проникающей способностью по сравнению с «мягкой» компонентой. Так, рентгеновское излучение с  $\lambda < 2 \cdot 10^{-10}$  м называют «жестким», а с  $\lambda > 2 \cdot 10^{-10}$  м «мягким».

Слой половинного ослабления *гамма*-излучения с энергией *гамма*-квантов 1 МэВ для разных веществ составляет:

- свинец — 13 см,
- железо — 3,3 см,
- бетон — 26 см,
- вода — 26 см.

Слой бетона толщиной 50 см более чем в 100 раз ослабляет *гамма*-излучение, сопровождающее распад  $^{137}\text{Cs}$ .

При одинаковой энергии *гамма*-квантов и *альфа*-частиц *гамма*-излучение радионуклидов, попавших внутрь организма, обычно вызывает менее тяжелые повреждения, чем *альфа*-излучение радионуклидов. Эти повреждения чаще всего не приводят к гибели клеток (если только содержание радионуклидов в органе или биологической ткани не чрезмерно велико).

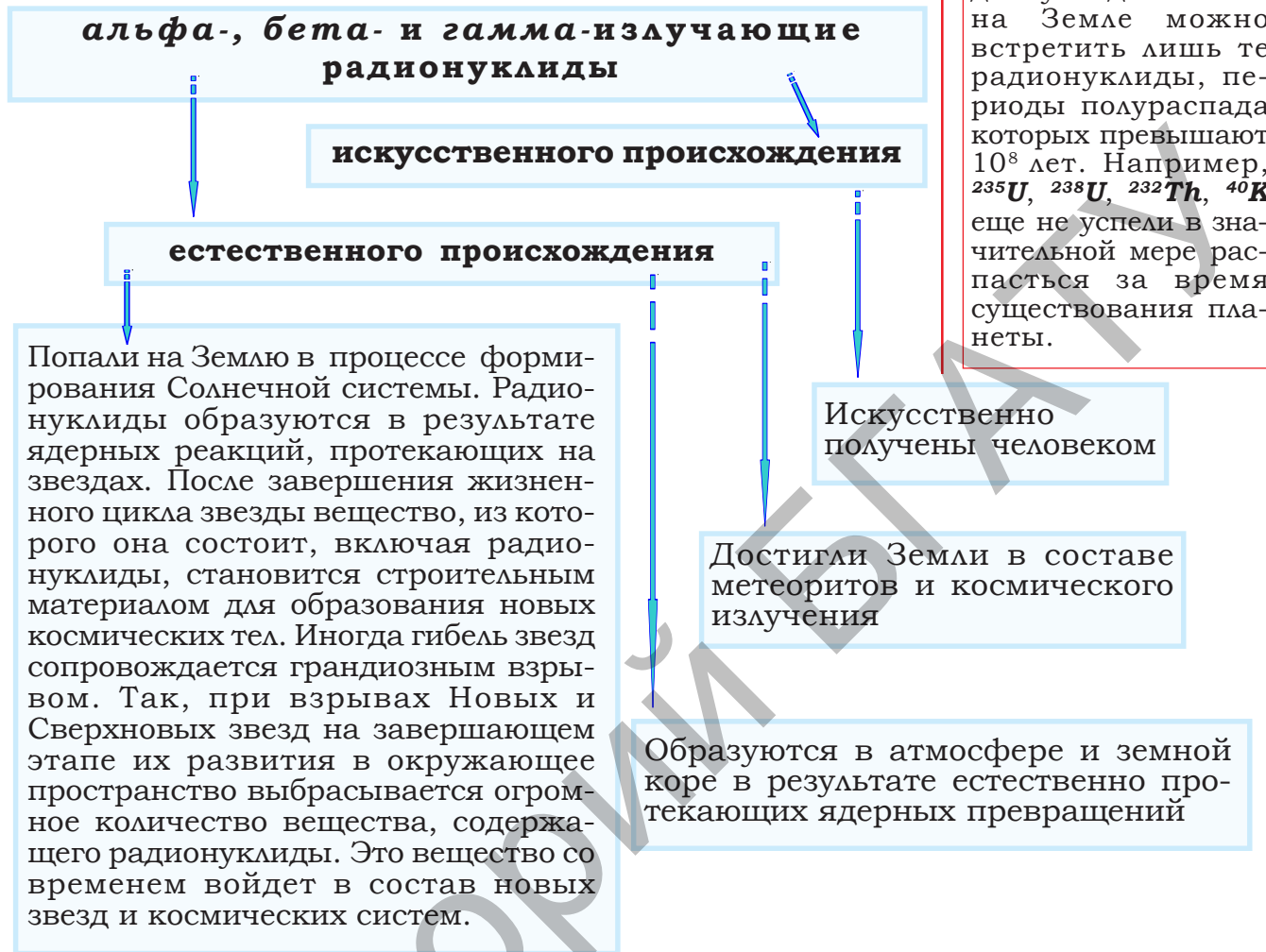
При внешнем облучении организма основную опасность представляет *гамма*-излучение.

Из вышеизложенного видно, что проникающая способность ионизирующего излучения и его воздействие на вещество существенно зависят от вида излучения. Каждый вид ионизирующего излучения имеет свои физические характеристики.

### Характеристики основных видов ионизирующего излучения

Характеристики	Излучение		
	<i>альфа</i> -частицы ( $\alpha$ )	<i>бета</i> -частицы ( $\beta$ )	<i>гамма</i> -кванты ( $\gamma$ )
Вид излучения	ядра атомов гелия	электроны	электромагнитное излучение
Заряд, отн. ед.	+2	-1	0
Масса покоя, г	$6,64 \cdot 10^{-24}$	$9,11 \cdot 10^{-28}$	0
Относительная проникающая способность при одинаковой энергии	1	100	1 000

**В настоящее время на Земле присутствуют:**



Из первичных радионуклидов сейчас на Земле можно встретить лишь те радионуклиды, периоды полураспада которых превышают  $10^8$  лет. Например,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  еще не успели в значительной мере распасться за время существования планеты.

В природе, наряду со стабильными, существуют и неустойчивые радиоактивные нуклиды (радионуклиды), ядра которых самопроизвольно распадаются.

Изучая явление радиоактивности, ученые установили:

- **радиоактивный распад — одна из форм ядерных превращений;**
- **ядерные превращения всегда сопровождаются испусканием ионизирующих излучений;**
- **все виды ионизирующего излучения нельзя увидеть, почувствовать или услышать; они не имеют ни цвета, ни вкуса, ни запаха;**
- **излучение уносит из нестабильного ядра радионуклида часть энергии, что способствует его переходу в более устойчивое состояние.**

Итак,



Способность радионуклидов распадаться зависит от строения атомных ядер и сил, связывающих нуклоны в ядре. Строение ядер и причины радиоактивного распада изучает ядерная физика.

Все современные научные знания свидетельствуют:

**Скорость распада радионуклидов не зависит от:**

- внешних условий, (температуры, давления и др.),
- состава химических соединений,
- агрегатного состояния вещества.

**Это означает, что периоды полураспада радионуклидов нельзя изменить:**

- химическими,
- физическими,
- биологическими способами.

Альфа-, бета- и гамма-излучения, которые сопровождают процессы радиоактивного распада, могут прямо или косвенно вызывать ионизацию вещества. В отличие от химически токсичных веществ, свойства которых можно изменить путем химических превращений, радиоактивные свойства радионуклидов нельзя устранить посредством:

- химических превращений,
- изменения агрегатного состояния радиоактивного вещества (замораживания, растворения, испарения и т. п.),
- биологического воздействия.

Однако организм можно защитить от внешнего воздействия *альфа*- и *бета*-излучений с помощью одежды или других разнообразных доступных материалов. Степень воздействия *гамма*-излучения можно уменьшить, сократив время пребывания на территории с высоким уровнем радиоактивного загрязнения.

В следующей главе Вы узнаете о том, как оценивают степень облучения живых организмов, как формируются дозы внешнего и внутреннего облучения организма человека.

**Вопросы для самоконтроля и обсуждения:**

1. Как было обнаружено явление радиоактивности?
2. Что такое радиоактивность?
3. Чем отличаются радиоактивные нуклиды от стабильных?
4. Что такое изотопы?
5. Кто открыл явление искусственной радиоактивности?



6. Как появились на Земле радионуклиды естественного и искусственного происхождения? Отличаются ли они по свойствам?
7. Что такое радиоактивное семейство?
8. Почему излучения, сопровождающие ядерные превращения, называют ионизирующими?
9. Какие виды ионизирующего излучения сопровождают процессы распада радионуклидов? Охарактеризуйте их.
10. Какие химические элементы называют радиоактивными?
11. Что такое период полураспада радионуклида?
12. Как оценивают содержание радионуклидов в радиоактивном веществе?
13. Что такое удельная активность вещества?
14. С помощью какой величины характеризуют уровень загрязнения территории радионуклидами?
15. Можно ли какими-либо способами изменять скорости распада радионуклидов?

**Ключевые слова и словосочетания:** дозиметрия, радиационный эффект, поглощенная доза, эквивалентная доза, эффективная доза, радиометры, спектрометры, дозиметры

*Воздействие ионизирующих излучений на облучаемые объекты оценивают с помощью дозиметрических величин. Основными дозиметрическими величинами, характеризующими последствия облучения организма человека, являются эквивалентная и эффективная дозы. Их применяют для установления предельно допустимых уровней облучения людей. Если источник излучения находится вне организма, человек подвергается внешнему облучению, а при попадании радионуклидов в организм — внутреннему. Внешнее облучение людей контролируют с помощью дозиметров, внутреннее — оценивают по количеству радионуклидов, поступающих в организм.*

*Изучив главу...* Вы познакомитесь со способами оценки величин, характеризующих воздействие ионизирующих излучений на организм человека; узнаете, как формируется доза облучения каждого отдельного человека и коллективов людей, как определяют дозиметрические величины и о чем говорят результаты их измерений.



### 3.1. Дозиметрические понятия.

#### Основные дозиметрические величины

**Дозиметрия** — это раздел прикладной ядерной физики, в котором изучают величины, характеризующие ионизирующее излучение и его взаимодействие с веществом. Эти величины могут быть сопоставлены с эффектами, возникающими в объектах живой и неживой природы при облучении. Прежде всего, воздействие ионизирующего излучения (облучение) приводит к *ионизации* вещества. В твердых телах при облучении могут возникать структурные изменения, что отражается на механических, электрических и других свойствах этих тел. В живых организмах возможны нарушения в клетках и тканях, а в некоторых случаях — даже их отмирание.

**Изменения, возникающие в объектах под действием ионизирующего излучения, называют радиационными эффектами.**

Наиболее сложно оценивать действие радиации на биологические объекты. Для такой оценки нужно знать, какова связь между характеристиками излучения, с одной стороны, и радиационными эффектами, вызываемыми этим излучением в организме, с другой. Выявление подобных связей относится к области знаний на границе физики и биологии.

Изучение физических свойств ионизирующих излучений позволило установить, что ионизирующее излучение, независимо от его вида, переносит энергию.

Воздействие излучения на объекты называется **облучением**

Радиационные эффекты



При облучении объекта энергия ионизирующего излучения частично или полностью поглощается объектом, и это приводит к появлению радиационных эффектов. Количество поглощенной объектом энергии ионизирующего излучения является важнейшей физической величиной, которая характеризует степень облучения объекта.

### П о г л о щ е н н а я   д о з а

**Поглощенная доза излучения ( $D$ ) — это количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной облучаемым объектом, в расчете на единицу его массы.**

$$D = \Delta E / \Delta m,$$

где  $\Delta E$  — количество энергии, переданное излучением веществу в элементарном объеме;

$\Delta m$  — масса вещества в этом объеме.

В системе СИ поглощенная доза измеряется в *Джоулях на килограмм (Дж/кг)*. Эта единица получила название **Грей (Гр)** в честь английского ученого Гарольда Грея, который внес значительный вклад в развитие дозиметрии. **1 Грей** — это поглощенная доза любого ионизирующего излучения, которая соответствует поглощению *1 Дж* энергии излучения в расчете на *1 кг* облучаемого вещества.

Применительно к тепловой энергии *1 Дж/кг* — это совсем небольшая величина. Поглощение такого количества *тепловой энергии* не может вызвать серьезных нарушений в организме человека.

В то же время, применительно к *ионизирующему излучению*, доза *1 Дж/кг* — это большая величина. Такое количество энергии *ионизирующего излучения* может приводить к появлению серьезных нарушений в организме.

Чем же объясняются такие разные последствия при поглощении организмом одинакового количества тепловой энергии и энергии ионизирующего излучения?

Прежде всего, кванты теплового излучения не обладают энергией, достаточной для ионизации атомов и молекул (около 30 эВ). Такой энергией могут обладать кванты *альфа*, *бета* и *гамма*-излучения, но не обладают тепловые фотоны.

Другое различие связано с неодинаковым характером передачи энергии биологической ткани для разных видов излучений. Дело в том, что *поглощенная тепловая энергия* сравнительно равномерно распределяется в биологической ткани. Поглощение

D



Гарольд Грей  
(1905–1965)

тепловой энергии приводит только к *возбуждению молекул*. Чтобы вызвать химическое преобразование биологически важных молекул, которое может привести к серьезным нарушениям в организме, требуется поглощение значительно большего количества тепловой энергии, чем *1 Дж на кг массы тела*.

В силу квантового характера ионизирующих излучений поглощенная биологической тканью энергия крайне неравномерно распределяется в молекулах, входящих в состав клеток биологической ткани и обеспечивающих нормальное функционирование клеток и ткани. Определенным участкам биологических молекул передается практически вся поглощенная энергия излучения, а другим участкам достается совсем незначительная ее часть. В результате, поглощенная энергия излучения оказывается сконцентрированной в определенных местах таких молекул. Ее достаточно для *ионизации*, химического изменения и повреждения биологически важных молекул. Именно поэтому поглощение биологической тканью даже *1 Дж/кг* энергии ионизирующего излучения может привести к серьезным нарушениям в организме человека.

Таким образом, *1 Грей* соответствует большой величине поглощенной дозы излучения. Обычно приходится иметь дело со значительно меньшими дозами, которые выражают в тысячных или миллионных долях Грея — *миллигряях (мГр)* или *мик로그ряях (мкГр)*. Устаревшей внесистемной единицей измерения поглощенной дозы является *рад*. *1 Грей* соответствует *100 радам*.

Величина поглощенной дозы зависит от продолжительности облучения. Чем дольше облучается организм, тем больше величина поглощенной дозы. Следовательно, при облучении организма с течением времени поглощенная доза накапливается. Скорость накопления поглощенной дозы характеризуют *величиной мощности поглощенной дозы (МД)*.

**Мощность поглощенной дозы (МД)** — это изменение поглощенной дозы в единицу времени

$$МД = \Delta D / \Delta t,$$

где  $\Delta D$  — изменение поглощенной дозы за промежуток времени  $\Delta t$ .

Обычно мощность поглощенной дозы измеряют в *миллигряях в час (мГр/час)* или *мик로그ряях в час (мкГр/час)*.

Единицы измерения

**1 Гр = 1 Дж/кг**

и производные

Чтобы выяснить, как ионизирующее излучение действует на организм человека и другие биологические объекты, проводятся:



Различают два основных вида радиационных эффектов, которые возникают в организме человека: *детерминированные* и *стохастические*. Подробнее об этом — в главе 5.

### Радиационные эффекты в организме

<b>Детерминированные</b> (предопределенные)	<b>Стохастические</b> (спонтанные, возникающие случайно)
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Характерны для больших доз облучения (обычно 1 Гр и более).</i></li> <li>➤ Появляются при превышении <i>определенных пороговых уровней доз</i> в результате повреждения значительное число клеток органов или биологических тканей, что приводит к серьезным физиологическим нарушениям в организме (например, <i>радиационным ожогам, лучевой катаракте, лучевой болезни</i>).</li> <li>➤ Возникают непосредственно после воздействия ионизирующего излучения на организм (в течение нескольких часов, нескольких дней) или через более продолжительный период времени, когда превышен пороговый уровень дозы.</li> <li>➤ При превышении порогового уровня дозы связь между облучением и возникшим заболеванием <i>однозначна</i>. Заболевание неизбежно (предопределено).</li> <li>➤ При дальнейшем увеличении дозы возрастает тяжесть поражения. Чем больше величина дозы, тем больше нарушений возникает в организме человека и тем тяжелее протекает заболевание, возникающее в результате облучения.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Характерны для средних (0,2–1 Гр) и малых (менее 0,2 Гр) доз облучения.</i></li> <li>➤ Проявляются в виде раковых и генетических (наследственных) заболеваний, которые сокращают продолжительность жизни человека.</li> <li>➤ Возникновение заболевания является случайным событием, которое может реализоваться по истечении продолжительного периода после облучения. Этот период называют <i>скрытым</i>, или <i>латентным</i>. После завершения латентного периода человек может заболеть, однако может и не заболеть.</li> <li>➤ Протекание заболевания (его тяжесть) не зависит от величины дозы.</li> <li>➤ Полагают, что <i>стохастические эффекты</i> могут возникать при любых, даже сколь угодно малых дозах облучения. Вероятность возникновения стохастических радиационных эффектов <i>возрастает (уменьшается) пропорционально увеличению (уменьшению) дозы</i>.</li> </ul>

Величины, характеризующие *ионизирующее излучение* и последствия его воздействия на облучаемый объект, называют **дозиметрическими**. Различают *базовые* и *нормируемые* дозиметрические величины.

**Дозиметрические величины**

**Базовые**

Характеризуют:

- степень физического воздействия излучения на вещество
- источник излучения
- само излучение

*Могут быть измерены непосредственно*

Поглощенная доза — базовая величина

**Нормируемые**

Являются мерой вреда от воздействия ионизирующих излучений на человека

Позволяют оценить *вероятность возникновения стохастических эффектов* в результате воздействия *малых и средних доз* ионизирующего излучения на организм человека

*Не могут быть измерены непосредственно*

Их оценивают по величине, которая может быть непосредственно измерена (например, по величине поглощенной дозы), путем умножения ее на определенные коэффициенты

Эквивалентная и эффективная дозы — нормируемые величины

*Нормировать* — значит устанавливать определенные пределы облучения людей, что является основой разработки мер, ограничивающих негативные последствия облучения.

*Базовые дозиметрические величины* — это физические характеристики излучения, от которых зависят радиационные эффекты. Эти величины могут быть измерены непосредственно. Основной базовой величиной является *поглощенная доза*.

*Нормируемые дозиметрические величины* связывают дозу облучения с медико-биологическими последствиями действия ионизирующего излучения на организм человека при средних и малых дозах. Они *не могут быть измерены непосредственно*. Их определяют по величине, которая может быть непосредственно измерена. Нормируемыми величинами являются *эквивалентная и эффективная дозы*.

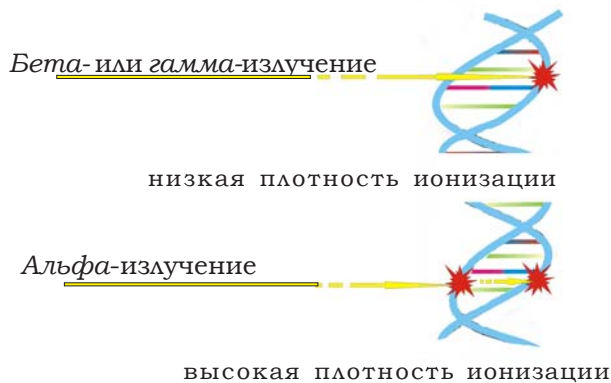
$$H_T, W_R$$

**Эквивалентная доза облучения, взвешивающие коэффициенты излучения**

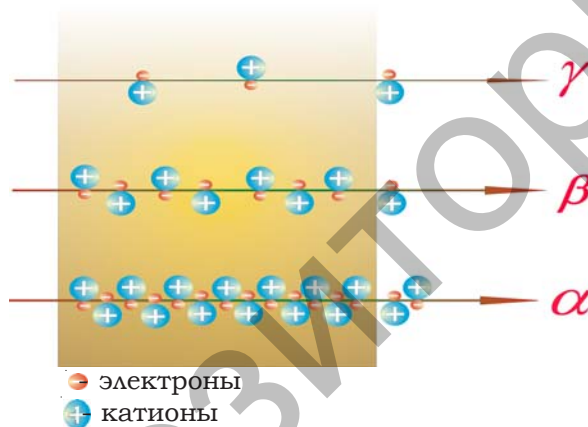
Радиационные эффекты, вызываемые облучением организма, зависят не только от величины поглощенной дозы, но и от вида излучения. Это означает, что при одинаковой поглощенной дозе различные виды излучения могут вызывать неодинаковые биологические эффекты.

Напомним в общих чертах особенности действия ионизирующего излучения на биологические объекты.

### Различие между повреждениями ДНК при воздействии бета- (или гамма) и альфа-излучений



### Плотность ионизации биологической материи при прохождении ионизирующих излучений через участок хромосомы



**Гамма-излучение** обладает высокой проникающей способностью и передает свою энергию большому объему облучаемого вещества. Поглощенная энергия расходуется на ионизацию и возбуждение молекул, что может приводить к повреждению клеток организма. Часть этих повреждений организм может устранять самостоятельно.

Подобное воздействие оказывает и **бета-излучение**. Однако при одинаковой энергии бета-частицы обладают значительно меньшим пробегом в веществе, чем гамма-кванты. При внешнем облучении организма человека бета-излучение, как правило, вносит незначительный вклад в дозу облучения. При внутреннем облучении бета-излучение радионуклидов, попавших внутрь организма, может играть более весомую роль, поскольку вся его энергия поглощается в облучаемом органе или ткани.

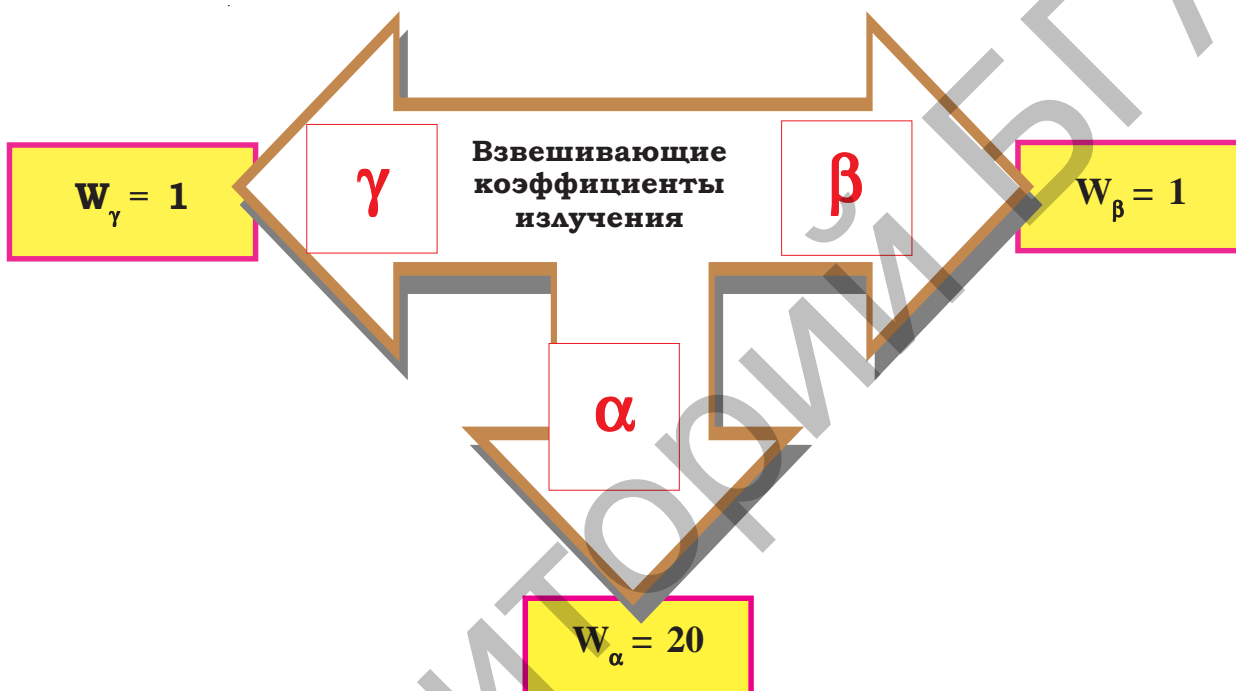
Пробег **альфа-частиц** в веществе еще меньше, чем бета-частиц. При внешнем облучении организма человека альфа-излучение радионуклидов, находящихся в окружающей среде, практически не влияет на величину дозы облучения. При попадании альфа-излучающих радионуклидов внутрь организма альфа-частицы отдают свою энергию в небольшом объеме биологической ткани. В силу своих физических особенностей (значительная масса и заряд частиц) альфа-излучение способно вызывать более серьезные повреждения в биологических тканях, чем бета- и гамма-излучения.

Таким образом, количественно оценивать и сравнивать действие разных ионизирующих излучений на организм человека совсем непросто. Разные виды излучения вызывают неодинаковые повреждения в биологических тканях.

Биологические последствия при действии различных видов ионизирующего излучения на биологическую ткань или орган учитывают с помощью **взвешивающих коэффициентов излучения ( $W_R$ )**.

Каждому виду ионизирующего излучения приписывают определенный *взвешивающий коэффициент*. Соответствующие коэффициенты для *гамма*-, *бета*- и *альфа*-излучений обозначают  $W_\gamma$ ,  $W_\beta$ ,  $W_\alpha$ . Чем более существенные нарушения вызывает излучение в биологической ткани при одинаковой поглощенной дозе, тем больше взвешивающий коэффициент этого излучения.

Величины взвешивающих коэффициентов отдельных видов излучений установлены в результате анализа накопленных к настоящему времени медико-биологических данных по действию ионизирующих излучений на ткани (или органы) людей.



Взвешивающий коэффициент *гамма*-излучения ( $W_\gamma$ ) условно принят за 1. Взвешивающий коэффициент *бета*-излучения ( $W_\beta$ ) такой же, как у *гамма*-излучения, т. е. также равен 1. Взвешивающий коэффициент *альфа*-излучения ( $W_\alpha$ ) в 20 раз выше и равен 20. Это означает, что при одинаковой поглощенной дозе *гамма*-кванты вызывают примерно такие же радиационные эффекты, как и *бета*-частицы. *Альфа*-частицы при этом вызывают более серьезные нарушения в биологической ткани (или органе), которые являются в 20 раз более опасными для организма по сравнению с нарушениями, вызываемыми *гамма*-квантами или *бета*-частицами.

Более полная информация по величинам взвешивающих коэффициентов для разных видов ионизирующих излучений приведена в следующей таблице.

## Величины взвешивающих коэффициентов ионизирующих излучений

Вид излучения и его энергия	Взвешивающий коэффициент излучений ( $W_R$ ) <sup>1</sup>
Электромагнитное излучение (гамма-, рентгеновское) с фотонами всех энергий	1
Бета-излучение ( $\beta^-$ ) с любой энергией электронов	1
Альфа-излучение	20
Нейтронное излучение с энергией нейтронов:	
< 0,01 МэВ	5
0,01 – 0,1 МэВ	10
> 0,1 – 2 МэВ	20
> 2 – 20 МэВ	10
> 20 МэВ	5
Протонное излучение с энергией протонов более 2 МэВ <sup>2</sup>	5
Излучение, образованное осколками ядерного деления или тяжелыми ядрами	20

Чтобы оценивать действие любого вида ионизирующего излучения на биологические ткани (или органы) человека, ввели особую величину, которую назвали эквивалентной дозой.

**Эквивалентная доза** — это доза облучения, которая учитывает особенности действия любого вида ионизирующего излучения на биологическую ткань (или орган) человека с помощью взвешивающих коэффициентов излучения.

Эквивалентную дозу (**H**) можно получить, если умножить среднюю поглощенную дозу в биологической ткани (или органе) человека на взвешивающий коэффициент ионизирующего излучения, действующего

Эквивалентная  
доза

<sup>1</sup> Все значения взвешивающих коэффициентов излучения относятся к излучению, воздействующему на организм человека извне (внешнее облучение); в случае внутреннего облучения организма коэффициенты относятся к излучениям, испускаемым при ядерных превращениях.

<sup>2</sup> Кроме протонов отдачи.



Рольф Зиверт  
(1896–1966)

Первый председа-  
тель Международной  
комиссии по радио-  
логической защите  
(МКРЗ)

на эту биологическую ткань (или орган):

$$H_T = D_T \cdot W_R,$$

где  $D_T$  — средняя *поглощенная* доза излучения  $R$  типа  $\alpha, \beta, \gamma$  (или др.), действующего на биологическую ткань (или орган) человека;

$W_R$  — взвешивающий коэффициент излучения.

Эквивалентную дозу используют при радиационном нормировании в условиях длительного (хронического) облучения органа или ткани человека в малых дозах. При больших дозах взвешивающие коэффициенты излучения могут зависеть от величины мощности дозы.

Благодаря более высокому значению взвешивающего коэффициента *альфа*-излучения по сравнению со значениями взвешивающих коэффициентов *гамма*- и *бета*-излучений, при одинаковой поглощенной дозе в биологической ткани (или органе) человека эквивалентная доза от *альфа*-излучения в 20 раз превышает эквивалентную дозу как от *гамма*-, так и от *бета*-излучения.

Чтобы различать эквивалентную и поглощенную дозу, для их измерения пользуются разными единицами. В системе СИ единицей измерения *поглощенной дозы* является *Грей*, а единицей измерения *эквивалентной дозы* — *Зиверт* (Зв), по имени шведского ученого Рольфа Зиверта.

1 *Зиверт* соответствует поглощенной дозе величиной в 1 *Грей* для ионизирующего излучения, взвешивающий коэффициент которого равен единице.

1 *Зиверт*, как и 1 *Грей*, относится к большим дозам. Поэтому на практике для измерения эквивалентных доз облучения органов или биологических тканей людей обычно используют производные Зиверта: *миллизиверт* (мЗв) и *микрозиверт* (мкЗв).

1 Зиверт (Зв) = 1 000 миллизиверт (мЗв) = 1 000 000 микрозиверт (мкЗв).

Если на орган или ткань одновременно действует излучение различных видов ( $\alpha, \beta, \gamma$ ), при определении эквивалентной дозы излучения ( $H$ ) оценивают эквивалентные дозы от каждого вида излучения и полученные дозы суммируют:

$$H_T = D_{T\alpha} \cdot W_\alpha + D_{T\beta} \cdot W_\beta + D_{T\gamma} \cdot W_\gamma$$

где  $D_{T\alpha}, D_{T\beta}, D_{T\gamma}$  — поглощенные дозы соответственно *альфа*-, *бета*- и *гамма*-излучения;

$W_\alpha, W_\beta, W_\gamma$  — взвешивающие коэффициенты этих излучений.

При одинаковой поглощенной дозе в биологической ткани (или органе), равной **0,01 Гр**, эквивалентная доза при действии только *гамма*- или *бета*-излучения составляет **0,01 Зв**, а при действии *альфа*-излучения — **0,2 Зв**.

$$1 \text{ мЗв} = 10^{-3} \text{ Зв}$$

$$1 \text{ мкЗв} = 10^{-6} \text{ Зв}$$

Суммы подобного типа называют *взвешенными*. Поэтому говорят, что *эквивалентная доза* представляет собой *поглощенную дозу*, взвешенную по типу излучения.



**Величина эквивалентной дозы позволяет характеризовать действие ионизирующего излучения на конкретную биологическую ткань (или орган) без указания вида излучения, поскольку радиационные эффекты от разных видов излучения уже учтены с помощью взвешивающих коэффициентов излучения ( $W_R$ ), то есть приведены к единому биологическому эквиваленту.**

По величине эквивалентной дозы можно оценивать вероятность возникновения радиационных эффектов в определенной биологической ткани или органе человека при их облучении (*радиационный риск*).

**Радиационный риск — это вероятность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного эффекта в результате облучения (НРБ-2000).**

Ранее отмечалось, что действие ионизирующего излучения на людей может привести к возникновению детерминированных и стохастических эффектов. Детерминированные эффекты, как правило, возникают у людей при накоплении больших доз облучения, превышающих пороговые значения. Такие уровни дозовых нагрузок могут достигаться лишь в случае радиационных аварий у ограниченного числа людей.

В подавляющем большинстве случаев приходится иметь дело со стохастическими радиационными эффектами, которые могут возникать при *малых и средних дозах облучения*. При оценке вероятности возникновения *стохастических эффектов* в определенной биологической ткани или органе человека в результате их облучения (*радиационный риск при малых и средних дозах облучения ткани или органа*) и используют эквивалентную дозу.

**Радиационный риск при малых и средних дозах облучения определенной биологической ткани или органа — это вероятность возникновения стохастических радиационных эффектов, вызванных действием ионизирующего излучения на эту ткань или орган человека.**

Иными словами, величина эквивалентной дозы позволяет оценивать вероятность возникновения у человека или его потомства онкологических или наследственных заболеваний конкретной биологической ткани или органа в результате воздействия на них любого ионизирующего излучения.

Радиационный  
риск

$E, W_T$

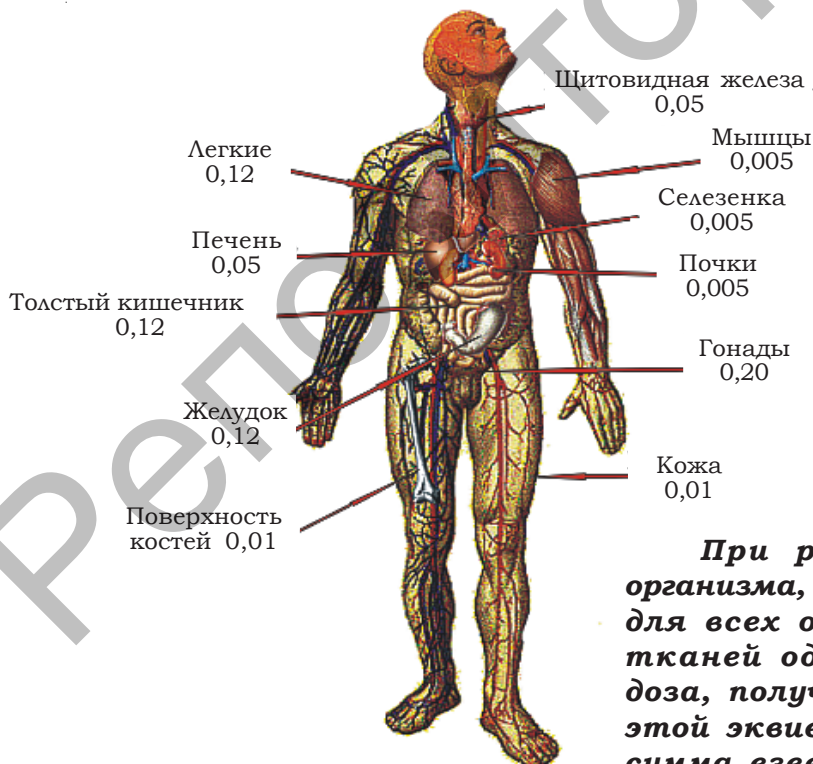
**Эффективная доза облучения.  
Взвешивающие коэффициенты для тканей  
и органов при расчете эффективной дозы**

Разные органы и ткани человека обладают неодинаковой радиационной чувствительностью. Поэтому последствия облучения зависят не только от величины эквивалентной дозы для отдельной биологической ткани или органа, но и от типа ткани и органа, которые подвергаются действию излучения. Чтобы оценить биологические последствия действия ионизирующего излучения на организм человека в целом, введена **эффективная доза** облучения.

*Относительную чувствительность разных биологических тканей и органов к действию ионизирующих излучений учитывают с помощью взвешивающих коэффициентов для тканей и органов ( $W_T$ ).*

Каждый вид биологической ткани и каждый орган человека характеризуются определенной величиной взвешивающего коэффициента. Величины взвешивающих коэффициентов для тканей и органов

**Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов человека ( $W_T$ )**



**При равномерном облучении организма, когда эквивалентная доза для всех органов и биологических тканей одинакова, эффективная доза, полученная человеком, равна этой эквивалентной дозе. Поэтому сумма взвешивающих коэффициентов равна 1,00.**

установлены по результатам многолетних исследований заболеваемости в группах облученных людей. Каждый из этих коэффициентов меньше 1, поскольку облучение одного органа или ткани менее опасно, чем всего тела.

Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов характеризуют относительный вклад отдельных биологических тканей и органов в возникновение стохастических радиационных эффектов при равномерном облучении всего тела человека.

**Эффективная доза облучения ( $E$ )** — это сумма эквивалентных доз облучения ( $H_{Ti}$ ) отдельных биологических тканей (или органов), умноженных на соответствующие взвешивающие коэффициенты для тканей и органов ( $W_{Ti}$ ).

$$E = H_{T1} \cdot W_{T1} + H_{T2} \cdot W_{T2} + H_{T3} \cdot W_{T3} + \dots,$$

$H_{T1}$ ,  $H_{T2}$  и т. д. — эквивалентные дозы в биологических тканях или органах человека, обозначенных индексами **T1**, **T2** и т. д.;

$W_{T1}$ ,  $W_{T2}$  и т. д. — взвешивающие коэффициенты для соответствующих биологических тканей и органов.

Поскольку взвешивающие коэффициенты для тканей и органов являются безразмерными величинами, **эффективная доза**, как и эквивалентная, измеряется в *Зивертах* (Зв).

**Эффективная доза** наиболее полно характеризует последствия облучения. Она позволяет оценивать суммарный биологический эффект от действия ионизирующего излучения для организма человека в целом.

Рассмотрим подробнее, как формируется эффективная доза в условиях радиационной аварии. Она состоит из доз *внешнего* и *внутреннего* облучения. Поскольку поглощенная энергия зависит от продолжительности облучения, все дозы оценивают для конкретного промежутка времени: года, всей жизни человека или любого интересующего периода. Важное понятие — **годовая эффективная доза**, которая равна сумме эффективной дозы внешнего и внутреннего облучения за один и тот же год.

Годовую дозу внутреннего облучения можно рассчитать, зная активность радионуклидов, поступивших

#### Годовая эффективная доза ( $E$ )

$$E = E_{\text{внеш}} + E_{\text{внутр}}$$

$E_{\text{внеш}}$  — годовая эффективная доза внешнего облучения,

$E_{\text{внутр}}$  — эффективная доза внутреннего облучения за этот же год.

в организм с потребляемыми продуктами питания, питьевой водой, а также при дыхании.

Расчет дозы внешнего облучения возможен, если известны параметры радиоактивного загрязнения окружающей среды и средние значения времени пребывания человека дома, на улице, в лесу и других местах.

Более точные результаты можно получить, определяя дозы внешнего облучения *дозиметром*, а внутреннего — на основе измерений содержания радионуклидов в организме с помощью специальных приборов — счетчиков излучений человека (СИЧ).

И внешнее, и внутреннее облучение организма при малых и средних дозах может привести к появлению стохастических радиационных эффектов. Эффективная доза позволяет оценивать риск возникновения стохастических радиационных эффектов (*радиационный риск*) при совместном внешнем и внутреннем облучении организма. В этом случае радиационные риски от внешнего и внутреннего облучения организма человека суммируются.

В повседневной жизни человек часто пользуется понятием «риск». Здоровье и жизнь человека постоянно подвергаются той или иной опасности (фактору риска). Чаще всего под «фактором риска» подразумевают вероятность возможных неблагоприятных последствий для человека в опасной ситуации (езда на мотоцикле, автомобиле, путешествие самолетом, скалолазание и т. п.).

В случае воздействия на организм ионизирующего излучения в малых и средних дозах человек подвергается опасности *возникновения стохастических радиационных эффектов*. Опасность облучения человека обычно оценивают по величине *индивидуального пожизненного риска*.

***Индивидуальный пожизненный риск ( $R_i$ ) — это вероятность возникновения стохастических радиационных эффектов в течение жизни человека.***

Продолжительность жизни человека, в среднем, составляет *70 лет*. Для оценки индивидуального пожизненного риска используют *коэффициент пожизненного риска ( $r_i$ )*.

Индивидуальный  
пожизненный  
риск,  $R_i$

**Коэффициент пожизненного риска ( $r_i$ ) характеризует вероятность возникновения стохастических радиационных эффектов в расчете на 1 Зв эффективной дозы.**

Коэффициенты пожизненного риска ( $r_i$ ) устанавливаются на основе многолетних наблюдений за большими группами облученных людей. По мере накопления информации о заболеваемости людей в результате облучения коэффициенты риска уточняются.

Величину коэффициента пожизненного риска ( $r_i$ ) можно найти в справочниках по дозиметрии или руководствах по радиационной безопасности. Величина коэффициента пожизненного риска для населения ( $r_i$ ) составляет  $7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Зв}^{-1}$  при эффективной дозе менее 200 мЗв в год (Нормы радиационной безопасности — 2000).

Индивидуальный пожизненный риск ( $R_i$ ) можно оценить, умножив коэффициент пожизненного риска ( $r_i$ ) на эффективную дозу ( $E$ ), которую человек может получить в течение жизни.

**Индивидуальный пожизненный риск ( $R_i$ ) возникновения стохастических радиационных эффектов, то есть риск возникновения раковых или генетических (наследственных) заболеваний в результате облучения, можно уменьшить путем снижения дозы облучения.**

Реально коэффициент пожизненного риска ( $r_i$ ) определяется индивидуальной чувствительностью организма, которая зависит от возраста, пола, физиологического, психо-эмоционального состояния человека и других факторов.

Укрепляя здоровье, контролируя продукты питания и сокращая пребывание в местах с повышенным уровнем загрязнения радионуклидами, можно значительно сократить дозовые нагрузки на организм и снизить радиационный риск.

Дозы облучения, полученные населением вследствие катастрофы на ЧАЭС, реально могут привести только к стохастическим радиационным эффектам. Лишь у тех, кто непосредственно принимал участие

в ликвидации последствий катастрофы и получил наиболее высокие дозы облучения, наблюдались *детерминированные радиационные* эффекты. Подобные эффекты наблюдались также у жертв атомных бомбардировок и несчастных случаев при неправильном обращении с радиоактивными источниками.

При характеристике *детерминированных* эффектов обычно используют величину *поглощенной дозы, D (Гр)*.

**Возникновение детерминированных радиационных эффектов** как у профессионалов, работающих с источниками ионизирующего излучения, так и у остальной части населения **маловероятно** (за исключением аварийных ситуаций).

Все изложенное выше касается оценки *индивидуальных* дозовых нагрузок и *индивидуальных* радиационных рисков. Однако при радиационных авариях действию ионизирующего излучения могут одновременно подвергаться большие группы людей, и возникает потребность в оценке последствий подобного облучения. Для таких оценок используют понятие «коллективная доза».

### Коллективная доза

**Коллективная эффективная доза — это сумма индивидуальных эффективных доз, полученных группой людей от какого-либо источника излучения за определенный промежуток времени.**

Величину коллективной эффективной дозы группы людей получают, умножая среднюю *индивидуальную* эффективную дозу на количество людей в рассматриваемой группе.

Единицей измерения коллективной эффективной дозы служит *человеко-зиверт (чел.-Зв)*.

**Коллективная эффективная доза для определенной группы людей складывается из индивидуальных эффективных доз членов этой группы. Ее можно оценить для:**

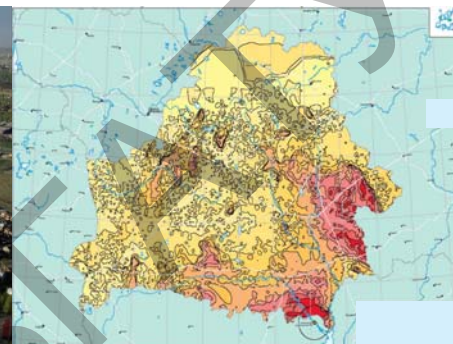
**группы людей определенного возраста или пола**



**жителей отдельного населенного пункта**



**населения области или страны в целом**



При оценке коллективной дозы указывают промежуток времени, за который она получена. Обычно оценивают коллективную дозу, полученную за год или за период предстоящей жизни рассматриваемой группы людей.

**Годовая коллективная эффективная доза облучения определенной группы людей:**

**коллективная эффективная доза внешнего облучения**

**+**

**коллективная эффективная доза внутреннего облучения**

*Предполагается, что дозы внешнего и внутреннего облучения получены наблюдаемой группой в течение одного и того же года.*

Умножив величину коллективной эффективной дозы на коэффициент радиационного риска, можно оценить *коллективный пожизненный риск*, то есть количество пострадавших (заболевших) в результате радиационного воздействия в группе людей определенной численности.

**Коллективный пожизненный риск**

Знание коллективных доз позволяет определять, необходимы ли защитные меры и, если необходимы, то какие, планировать их проведение, а затем и оценивать эффективность предпринятых защитных мер.

Коллективная доза в результате аварии, подобной чернобыльской, накапливается в течение длительного времени и может затрагивать несколько поколений людей.

**Полная (ожидаемая) коллективная доза — это коллективная доза, которую получили (или получают) все поколения людей от какого-либо источника ионизирующего излучения за время его существования.**

По оценкам специалистов, полная (ожидаемая) коллективная доза населения Земли в результате катастрофы на ЧАЭС превышает 1 млн. чел.-Зв.

Величина полной (ожидаемой) коллективной дозы отражает масштаб последствий радиационной аварии. Она дает возможность предсказывать число ожидаемых неблагоприятных последствий облучения (дополнительных случаев раковых и генетических заболеваний).

Поскольку ожидаемая доза может быть предотвращена путем проведения защитных мероприятий, в последнее время в радиационной безопасности используют понятие «предотвращаемая доза».

**Предотвращаемая доза — это прогнозируемая доза вследствие радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.**

Радиационная безопасность — не абстрактная наука. Она имеет практическую направленность и служит обеспечению **безопасности людей** при воздействии на них ионизирующего излучения.

На современном этапе главной задачей радиационной безопасности является ограничение возможного возникновения у людей стохастических радиационных эффектов в нормальных (неаварийных) условиях.

Основой для разработки мер, обеспечивающих приемлемый уровень радиационной безопасности людей, служит *радиационное нормирование*.



**Нормирование** предполагает установление некоторых допустимых уровней облучения людей, выше которых ущерб, наносимый облучением человеку, становится неприемлемым.

*Эффективная и эквивалентная дозы* характеризуют отдаленные последствия облучения организма человека:

- эффективная — для организма в целом,
- эквивалентная — для отдельных органов или тканей.

Поэтому эти дозы используют для установления предельно допустимых уровней облучения людей, то есть для нормирования облучения.

В заключение еще раз вернемся к основным дозиметрическим понятиям, которые были рассмотрены в настоящем разделе.

### Основные понятия, используемые в дозиметрии

Радиационные эффекты	Степень воздействия излучения на организм человека определяют		
	Количество поглощенной энергии излучения	Тип излучения	Восприимчивость биологической ткани к облучению
Детерминированные	↓ Поглощенная доза	↓	↓
Стохастические	Эквивалентная доза		↓
Эффективная доза			

Как следует из таблицы, *поглощенную дозу* обычно используют для прогнозирования возникновения у людей детерминированных радиационных эффектов, в то время как *эквивалентную и эффективную дозы* — для стохастических эффектов.

Таким образом, *поглощенная доза* учитывает

- количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной любым облучаемым объектом в расчете на единицу его массы;

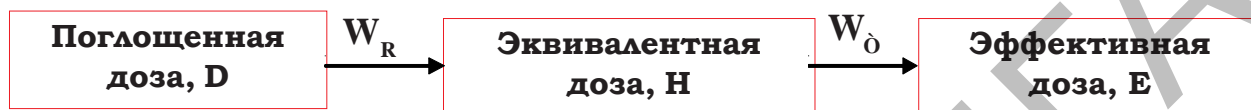
*эквивалентная доза* учитывает:

- количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной органом или биологической тканью человека,
- тип ионизирующего излучения;

эффективная доза учитывает:

- количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной организмом человека в целом,
- тип излучения,
- относительную чувствительность органов и тканей человека к воздействию ионизирующего излучения.

**Взаимосвязь между основными дозиметрическими величинами**



$W_R$  — взвешивающие коэффициенты излучения **R**-типа,

$W_T$  — взвешивающие коэффициенты для биологических тканей и органов человека.

**3.2. Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения**

Используют три основные группы приборов для измерения и контроля ионизирующих излучений: *радиометры, спектрометры и дозиметры.*

**Радиометры**

- измеряют активность источника ионизирующего излучения;
- позволяют определить активность конкретного радионуклида или суммарную активность радионуклидов в источнике излучения (в Беккерелях).

**Спектрометры**

- измеряют энергетический спектр излучения — распределение гамма-квантов, альфа- или бета-частиц по энергиям;
- позволяют установить радионуклидный состав и содержание (активность) каждого радионуклида в источнике (в Беккерелях).

**Дозиметры**

- дают оценки доз облучения: поглощенной — в Грех (Гр) и производных (мГр, мкГр и др.); эквивалентной или эффективной — в Зивертах и производных (мЗв, мкЗв); а также мощности доз.

Важнейшей частью подобных приборов является *детектор — устройство для регистрации ионизирующего излучения.*

## Детекторы

*Детектором* называют устройство, в котором энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрическую или другие виды энергии, что позволяет регистрировать излучение.

Регистрация каждого вида излучения (*альфа*-, *бета*-, *гамма*- или др.) имеет свои особенности. Существует множество разновидностей детекторов в зависимости от типа регистрируемого излучения и типа прибора.

### Важнейшие характеристики детектора ионизирующего излучения:

- эффективность регистрации,
- энергетическое разрешение,
- быстродействие.

#### Эффективность регистрации

Доля частиц или *гамма*-квантов, регистрируемых детектором из числа всех, попавших в рабочий объем детектора

#### Энергетическое разрешение

Способность различать частицы или *гамма*-кванты разных энергий

#### Быстродействие

Максимальное число частиц или *гамма*-квантов излучения, поступающих в рабочий объем детектора в единицу времени и регистрируемых детектором как отдельные события

Наиболее широко используются **электронные детекторы**, в которых энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрический сигнал.

### Основные типы электронных детекторов

газоразрядные

полупроводниковые

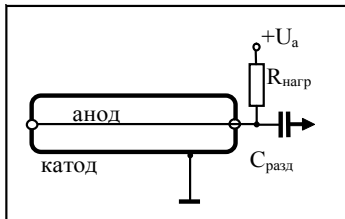
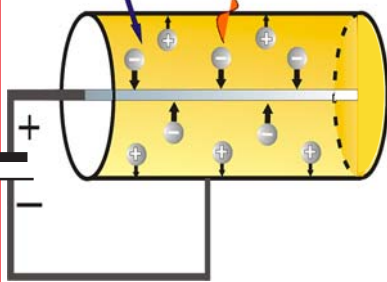
сцинтилляционные

Работа **газоразрядных (ионизационных) детекторов** основана на ионизации рабочего вещества (газа) излучением.

Простейший детектор такого типа — **ионизационная камера**. Она представляет собой плоский или цилиндрический конденсатор, внутренний (рабочий) объем которого заполнен газом. К обкладкам конденсатора приложено постоянное электрическое напряжение. При отсутствии внешнего облучения газ, находящийся между пластинами

Ионизирующее излучение

Газ



Принцип действия и электрическая схема газоразрядного детектора

конденсатора, является изолятором, и поэтому ток в цепи отсутствует. Когда же частицы ионизирующего излучения попадают в рабочее пространство конденсатора, они вызывают ионизацию молекул газа — образуются заряженные частицы: свободные электроны и ионы (подробнее об этом рассказано в главе 2). При попадании в рабочее пространство конденсатора *гамма*-квантов газ, наполняющий это пространство, ионизируется фотоэлектронами, которые вырываются из материала стенок камеры под действием *гамма*-излучения.

В электрическом поле конденсатора отрицательно заряженные частицы устремляются к аноду (+), а положительно заряженные — к катоду (-). Как следствие, в цепи возникает кратковременный электрический ток — *электрический импульс*. Этот импульс и представляет собой регистрируемый сигнал, свидетельствующий о наличии частиц или *гамма*-квантов излучения, а его амплитуда зависит от энергии частиц или *гамма*-квантов. Определяя суммарный электрический заряд, возникающий в рабочем объеме детектора, можно оценить величину дозы внешнего облучения объекта.

Достоинства ионизационной камеры — простота и надежность, недостаток — слабый электрический сигнал при регистрации излучения, то есть низкая эффективность регистрации.

**Пропорциональные детекторы и счетчики Гейгера-Мюллера** — это разновидности приборов на основе газоразрядных детекторов. Они отличаются относительно высоким анодным напряжением, что позволяет значительно усиливать электрические сигналы, вызываемые ионизирующим излучением.

Среди образующихся в процессе ионизации заряженных частиц наиболее подвижны электроны. При определенной величине напряженности электрического поля (в так называемой области пропорциональности) электроны разгоняются до такой степени, что их энергии оказывается достаточно для ионизации молекул газа при столкновении с ними (ударная ионизация). В свою очередь, образовавшиеся электроны также способны производить ударную ионизацию.

В результате последовательного рождения новых заряженных частиц возникает электронно-ионная лавина. Таким образом, амплитуда импульса тока и амплитуда выходного импульса напряжения, сохраняя пропорциональность энергии регистрируемой частицы, оказываются значительно усиленными (т. н. «газовое усиление»). Так работают пропорциональные детекторы.

**Эффективность регистрации излучений газоразрядными детекторами**  
*гамма*-излучения — ~ 1 %,  
*бета*-излучения — от ~ 10 %,  
 для частиц с энергией 100 кэВ до 100 % для частиц с энергией более 1,5 МэВ.

При еще более высокой напряженности поля (область Гейгера) начинает играть роль возбуждение молекул электронно-ионной лавиной. При возврате в основное состояние молекулы испускают фотоны с энергией, достаточной для образования фотоэлектронов на катоде. Эти электроны становятся инициаторами новых лавин. Поскольку фотоны испускаются молекулами в различных направлениях, лавины охватывают весь рабочий объем счетчика.

Следовательно, достаточно попасть одной заряженной частице в рабочий объем счетчика Гейгера-Мюллера, чтобы вызвать в счетчике мощный электрический разряд, интенсивность которого не зависит от энергии частицы. Параметры разряда можно регулировать, только меняя напряжение на электродах и состав газа в рабочем объеме счетчика. Заряд, снимаемый с обкладок конденсатора, в зависимости от величины напряжения и состава газа, может увеличиваться в  $10^3$ – $10^6$  раз. Как следствие, амплитуда выходных электрических импульсов значительно возрастает, что позволяет регистрировать даже слабые ионизирующие излучения.

В результате, в счетчиках Гейгера-Мюллера получаются самые сильные электрические сигналы, но они одинаковы для всех регистрируемых частиц или гамма-квантов, независимо от их энергии. Поэтому подобные счетчики служат только для определения общего числа частиц или гамма-квантов, не различая их по энергии.

При использовании пропорционального счетчика сохраняется возможность распознавать частицы или гамма-кванты, отличающиеся по энергии.

Недостаток газоразрядных детекторов — низкая эффективность регистрации гамма-излучения. В силу высокой проникающей способности большая часть гамма-квантов покидает рабочий объем детектора, так и не вызвав ионизации молекул газа.

В случае альфа- и бета-излучения возникает другая проблема. Регистрация альфа-частиц газоразрядными счетчиками практически невозможна, так как почти все эти частицы поглощаются стенками детектора. Бета-частицы также в значительной степени поглощаются стенками детектора. Чтобы снизить степень поглощения бета-частиц, уменьшают толщину корпуса в том месте, где излучение проникает в рабочий объем детектора. Например, в так называемых торцовых счетчиках излучение попадает в рабочий объем детектора через тонкое окно из слюды или органического материала.



Счетчик Гейгера-Мюллера и его устройство

Корпус (катод) детектора чаще всего изготавливается из алюминия, его толщина обычно не превышает 0,1 мм.

**Полупроводниковые детекторы** также относятся к ионизационным. По принципу действия они подобны ионизационным камерам, но вместо газа в качестве рабочего вещества используют полупроводниковые материалы (область *p-n-перехода*, включенного в обратном направлении).

Длина пробега *альфа*-частиц в твердом теле невелика, поэтому для их регистрации достаточно тонкого слоя полупроводника.

Для регистрации *бета*- и *гамма*-излучений нужен более толстый слой полупроводникового материала.

*Полупроводниковые детекторы* позволяют хорошо различать частицы, близкие по энергии, то есть обладают высоким *энергетическим разрешением*. Некоторые виды полупроводниковых детекторов работают лишь при температуре жидкого азота, что значительно усложняет их конструкцию и эксплуатацию.

Широко распространены и **сцинтилляционные детекторы**.

Их работа основана на способности некоторых соединений светиться под действием ионизирующего излучения. При попадании в детектор излучение возбуждает молекулы этих соединений, то есть переводит электроны молекул на более высокие энергетические уровни. Возврат молекул в основное энергетическое состояние происходит спустя очень короткий промежуток времени и сопровождается испусканием фотонов.

Световые вспышки регистрируются. Такой способ детектирования ионизирующих излучений нашел широкое применение с появлением **фотоэлектронных умножителей** (ФЭУ) — устройств, позволяющих измерять сверхслабые (вплоть до единичных фотонов) световые вспышки.

ФЭУ, кроме фотокатода и анода, содержит ряд промежуточных анодов (динодов). Возникшие в сцинтиляторе фотоны выбивают электроны из фотокатода. Анод и диноды с помощью делителя напряжения подключены к высоковольтному источнику питания. При этом потенциал первого динода выше, чем катода, а каждого последующего электрода выше, чем предыдущего. Ускоряясь между парой электродов, электрон приобретает энергию, достаточную для того, чтобы выбить из динода дополнительные электроны (вторичная эмиссия электронов). Благодаря этому электрон, выбитый из



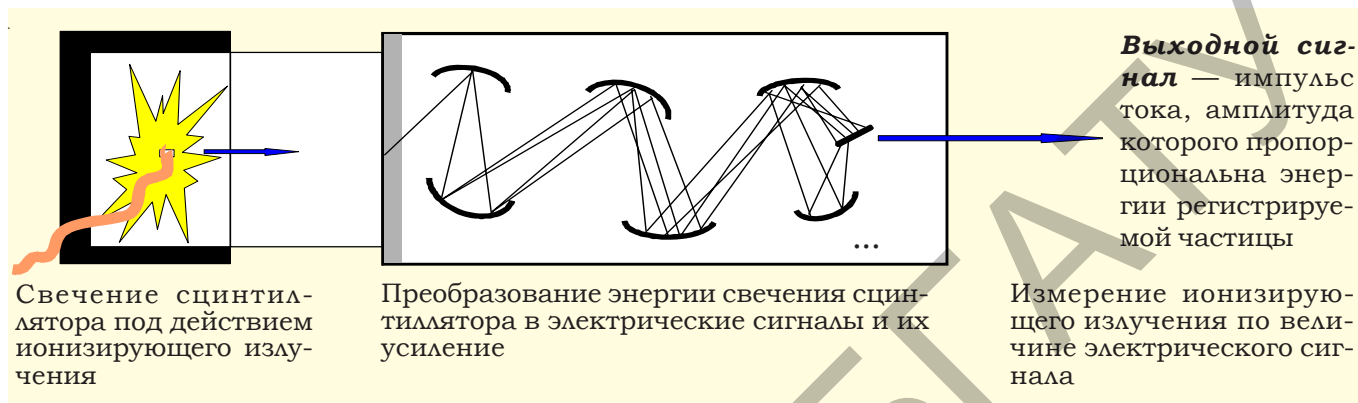
Полупроводниковые детекторы



Сцинтилляционные детекторы

фото катода, рождает лавину заряженных частиц, что приводит к появлению в анодной цепи значительного импульса тока.

### Принцип действия сцинтилляционного детектора



В качестве сцинтилляторов используют неорганические и органические соединения в твердом и жидком состоянии.

Для регистрации *гамма*-квантов широко используют сцинтилляторы на основе монокристаллов **NaJ** и **CsJ**. В этом случае эффективность регистрации *гамма*-излучения составляет десятки процентов.

При регистрации *бета*-излучения предпочтительнее использовать органические сцинтилляторы, в том числе и жидкие.

В случае *альфа*-излучения применяют сцинтилляторы на основе сульфида цинка или кадмия.

Сцинтилляционные детекторы имеют неплохое энергетическое разрешение, однако в этом отношении уступают полупроводниковым. Оба типа детекторов отличаются высоким быстродействием.

Принцип действия **фотоэмульсионных детекторов** подобен фотографическому. Ионизирующее излучение воздействует на фотоэмульсию, нанесенную на пленку или пластинку, и образует *скрытое изображение*. После проявления в тех местах, которые подверглись облучению, остается темный след. Такие детекторы способны фиксировать след (трек) движения ядерных частиц, поэтому их относят к классу *трековых*.

**Монокристалл** — это отдельный кристалл с непрерывной кристаллической решеткой.

**Поликристаллы** состоят из множества различно ориентированных мелких монокристаллов.

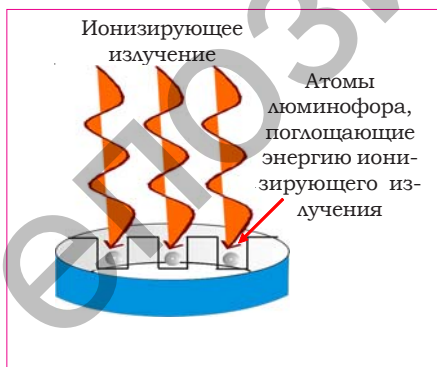
В дозиметрии используют **фотоэмульсионные**, а также **термолюминесцентные** (ТЛД) и **фотолюминесцентные** (ФЛД) детекторы. В состав ТЛД и ФЛД входят **люминофоры** — вещества, облучение которых приводит к возникновению так называемых центров фотолюминесценции. Подобные центры возникают в результате возбуждения молекул люминофора. В отличие от сцинтилляторов, молекулы люминофора могут находиться в возбужденном состоянии весьма длительное время, и поглощенная энергия излучения может сохраняться в облучаемом материале.

Люминесценция начинается не сразу после облучения, а лишь после дополнительного воздействия на люминофор. В случае ФЛД люминесценцию может вызывать *ультрафиолетовое излучение*. В ТЛД люминесценция начинается после *нагрева люминофора* до определенной температуры (обычно не более 573 К).

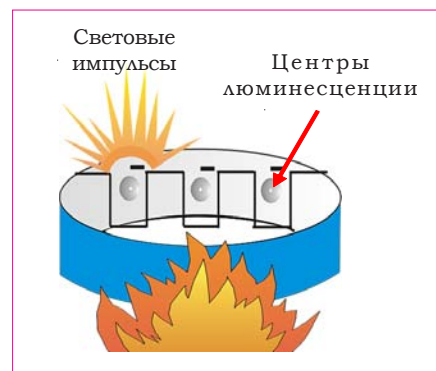
Такое воздействие оказывается на люминофор в приборе, где измеряется интенсивность свечения. По ее величине определяют накопленную человеком дозу внешнего облучения. После «считывания показаний» детекторы ФЛД и ТЛД могут быть вновь использованы для дозиметрических измерений.

Люминесценция — свечение некоторых материалов при определенном воздействии на них.

**Схема действия фотолюминесцентных (ФЛД) и термолюминесцентных (ТЛД) детекторов**



Поглощение энергии ионизирующего излучения люминесцентным детектором (ФЛД или ТЛД)



Свечение облученного люминофора при нагревании ТЛД



## Дозиметры, радиометры, спектрометры

Простейшие **дозиметры** созданы на основе ионизационной камеры и фактически измеряют суммарный электрический заряд частиц, образующихся в веществе за определенный промежуток времени под действием *гамма*-излучения.

Возникающие в ионизационной камере электрические заряды чрезвычайно малы и с трудом поддаются измерению. Поэтому ионизационные камеры используют только для оценки дозы *гамма*-излучения высокой интенсивности. В большинстве случаев используют другие детекторы излучения.

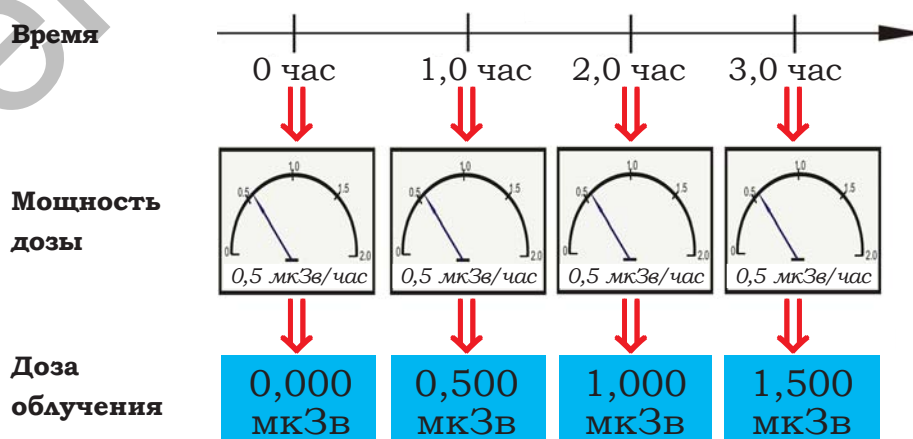
Чаще используют счетчики Гейгера-Мюллера, а также приборы на основе сцинтилляционных и полупроводниковых детекторов.

*Создание дозиметров является непростой задачей, так как необходимо учитывать тип излучения и энергию составляющих его частиц или гамма-квантов. Наиболее сложно измерить дозу смешанного излучения, состоящего одновременно из частиц (альфа-, бета-) и гамма-квантов.*

*На практике при определении дозы в биологической ткани используют детекторы на основе материалов, способных ионизироваться при воздействии излучения подобно тканям организма человека. Это так называемые тканеэквивалентные детекторы, созданные, например, на основе полимерных сцинтилляторов.*

Дозы внешнего облучения человека контролируют с помощью **индивидуальных дозиметров**. Современные дозиметры позволяют определять эффективную дозу внешнего облучения организма человека и дают показания в *микрозивертах* ( $\mu\text{Зв}$ ) или *миллизивертах* ( $\text{мЗв}$ ). В приборах, с помощью которых определяется мощность дозы внешнего облучения, единицей измерения обычно служит *микрозиверт в час* ( $\mu\text{Зв}/\text{час}$ ).

### Взаимосвязь между мощностью дозы и дозой ионизирующего излучения



Дозиметры индивидуальные PM1621/1621A

*С помощью ТЛД — дозиметров можно определить дозу, полученную человеком за достаточно длительный промежуток времени (неделя, месяц, ...). Такие дозиметры обычно делают в виде броши, часов или браслета.*



Радиометр  
РКГ-АТ1320

Для защиты от внешнего облучения образец вместе с детектором обычно размещают в свинцовом «домике».

Из черномыльских радионуклидов в настоящее время основным источником гамма-излучения является  $^{137}\text{Cs}$ .

С помощью дозиметров нельзя измерять содержание радионуклидов в почве и уровень загрязнения радионуклидами продуктов питания. Такие измерения можно проводить с помощью *радиометров* и *спектрометров*.

**Радиометры** предназначены для определения содержания радионуклидов в образцах почвы, воды, продуктов питания и т. д. по величине измеренной активности радионуклидов в этих образцах.

В **гамма-радиометрах** обычно используют сцинтилляционные детекторы. В радиометре имеется специальный блок обработки, в котором на основе введенной информации о массе или объеме пробы по числу зарегистрированных прибором гамма-квантов определяется удельная активность измеряемой пробы. Прибор выдает показания в *Беккерелях на килограмм* ( $\text{Бк/кг}$ ) или в *Беккерелях на литр* ( $\text{Бк/л}$ ).

Особые требования предъявляются к защите радиометра от фонового излучения, которое может исказить показания прибора. Чем меньше удельная активность измеряемых образцов, тем выше требования, предъявляемые к качеству детектора и защиты прибора от фоновых излучений, не связанных с излучением исследуемого образца.

**Счетчик излучения человека (СИЧ)** является разновидностью радиометра и предназначен для измерения активности в теле человека радиоактивного цезия ( $^{137}\text{Cs}$ ), калия ( $^{40}\text{K}$ ) и других радионуклидов по сопровождающему их распад гамма-излучению.

Система регистрации СИЧ состоит из нескольких сцинтилляционных детекторов, которые установлены в кресле или другом устройстве, где размещается человек. В результате измерений определяют активность радионуклидов, содержащихся в организме человека в момент измерения (в *Беккерелях*).

По активности радионуклидов и массе тела можно оценить удельную активность тела человека в *Беккерелях на килограмм* ( $\text{Бк/кг}$ ).



Счетчик излучения  
человека

С помощью специально разработанных компьютерных программ (с учетом массы, роста, возраста, пола) можно также рассчитать, какую *эффективную дозу* получит человек в результате внутреннего облучения за любой промежуток времени (например, за год) при зарегистрированном содержании радионуклидов в организме. В этом случае результаты обследования на установке **СИЧ** могут быть представлены в дозовых единицах — в *миллизивертах в год (мЗв/год)*.

В случае загрязнения территории  $^{90}\text{Sr}$  и альфа-излучающими радионуклидами *плутония* и *америция* возникает необходимость в бета- и альфа-радиометрических измерениях.

Непосредственно измерить содержание альфа- и бета-излучающих радионуклидов в образцах почвы, воды, продуктов питания, как правило, не удастся. Это связано с незначительным пробегом альфа- и бета-частиц в твердых и жидких веществах. В результате, основная часть альфа- и бета-частиц, излучаемых при распаде радионуклидов, которые находятся внутри образца, не достигает рабочего объема детектора и не может быть зарегистрирована. В этом случае используют радиохимический анализ, специальные методы подготовки образцов и регистрации излучений.

**Спектрометры** дают наиболее полную информацию об излучении радионуклидов. Гамма-, альфа- и бета-спектрометры позволяют определить энергетический спектр излучения, то есть распределение гамма-квантов, альфа- или бета-частиц по энергиям.

**Спектр излучения каждого радионуклида уникален, что позволяет определять, какие радионуклиды и в каком количестве содержатся в анализируемом образце.**

В спектрометрах используют полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы. Спектрометры — это наиболее сложные и дорогостоящие измерительные приборы.

При внутреннем облучении дозу  $1 \text{ мЗв}$  в год можно получить при накоплении  $^{137}\text{Cs}$  в организме человека до уровня  $77 \text{ кБк}$ .

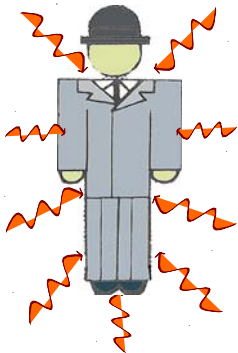
В бета- и альфа-радиометрах обычно используют полупроводниковые или сцинтилляционные детекторы и измеряют активность радионуклидов в образцах после радиохимической обработки исследуемых проб.



Гамма-бета спектрометр  
МКС АТ-1315

### 3.3. Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека

#### Внешнее облучение жителей Земли



Источники:

- космическое излучение
- радионуклиды земной коры
- медицинские источники
- промышленные источники

На протяжении своей жизни человек испытывает воздействие различных видов ионизирующего излучения.

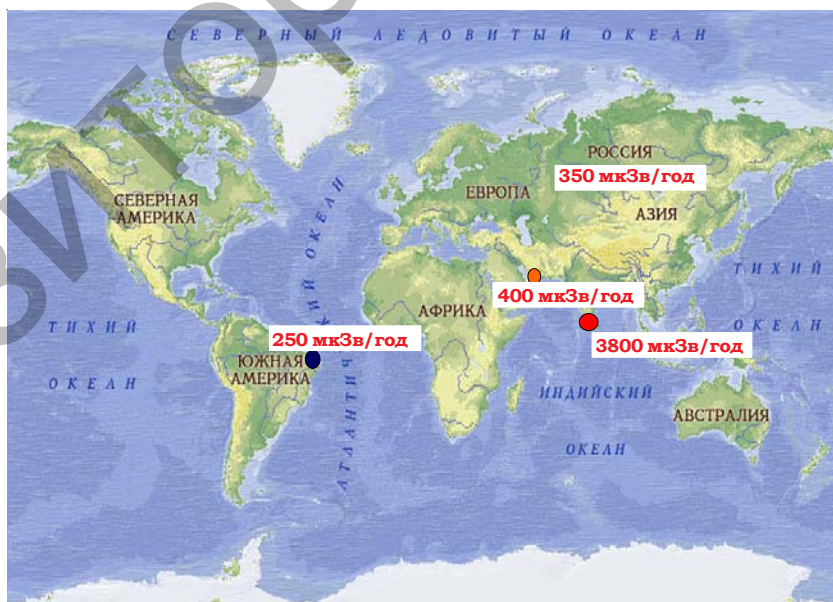
Жители Земли постоянно подвергаются внешнему воздействию *космического излучения*. Земная атмосфера поглощает основную часть космического излучения, и его интенсивность убывает с уменьшением высоты над уровнем моря. Поэтому жители горных районов получают повышенные (по сравнению с жителями равнин) дозы от космического излучения. В среднем, эффективная доза от космического излучения для жителей Земли составляет 0,4 мЗв в год, а для жителей высокогорных районов — в несколько раз больше.

Путешествуя самолетом и отправляясь в космос, человек также получает повышенные дозы от космического излучения, которые заметно превосходят дозы,

#### Мощность дозы от космического излучения на разной высоте над уровнем моря



#### Средние эффективные дозы внешнего облучения от земных источников радиации в мкЗв/год



Средняя эффективная доза внешнего облучения жителей Республики Беларусь, Украины, средней полосы европейской части Российской Федерации от земных источников радиации составляет 0,35 мЗв в год. Однако есть места на земном шаре, где уровни радиации значительно выше, например, на побережье юго-западной Индии, в Бразилии (неподалеку от города Посус-ди-Кадас), Иране (вблизи города Рамсер).

получаемые им в обычных условиях жизни. Так, во время путешествия на воздушном лайнере, летящем на высоте 10 км, экипаж и пассажиры самолета получают дозу от внешнего облучения 5 мкЗв в час.

Ионизирующие излучения, сопровождающие распад радионуклидов, которые содержатся в земной коре, в окружающем воздухе, растительности, воде рек и озер, также облучают нас извне. Обследуясь в рентгеновском кабинете, мы также подвергаемся внешнему облучению. На работе и дома людей окружают самые разнообразные источники излучения.

Вместе с пищей, водой и вдыхаемым воздухом радионуклиды могут попасть внутрь организма и привести к внутреннему облучению.

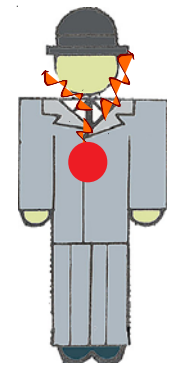
***Внутреннее облучение вызывает ионизирующее излучение, сопровождающее распад радионуклидов, попавших внутрь организма.***

В среднем, годовая эффективная доза жителя Земли, получаемая от всех естественных источников ионизирующего излучения, составляет 2,4 мЗв. Более 60 % этой дозы связано с радионуклидами, которые поступают в организм с пищей, водой, атмосферным воздухом и обуславливают *внутреннее облучение* организма человека. Остальные 40 % дозы приходятся на *внешнее облучение*, которое в основном связано с космическим излучением и *гамма-излучением* радионуклидов земной коры.

#### **Радионуклиды естественного происхождения поступают в организм человека:**

- *вместе с вдыхаемым воздухом:*
  - **изотопы радона ( $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ )**, являющиеся промежуточными членами естественных радиоактивных семейств урана и тория,
  - **радиоактивные углерод ( $^{14}\text{C}$ ) и тритий (Т или  $^3\text{H}$ )**, которые образуются в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения, и др.;

#### **Внутреннее облучение жителей Земли**



Способы поступления радионуклидов в организм человека:

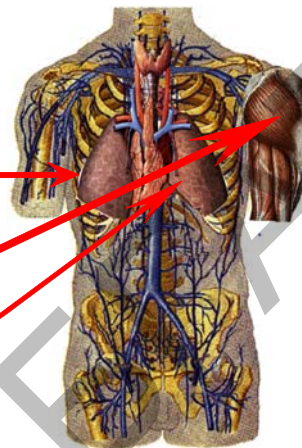
- *ингаляционный* (через органы дыхания),
- *пероральный* (с пищей и водой),
- *через кожу, слизистые оболочки глаз.*

За 55 лет жизни эффективная доза внутреннего облучения человека в результате попадания в его организм радионуклидов естественного происхождения составляет примерно 85 мЗв (1,55 мЗв в год).

- с пищей и водой :
  - радионуклиды, входящие в состав естественных радиоактивных семейств  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,
  - радиоактивный **калий** ( $^{40}\text{K}$ ).

### Радионуклиды концентрируются:

- радий и полоний — **в костной ткани**
- радионуклиды углерода ( $^{14}\text{C}$ ) и калия ( $^{40}\text{K}$ ) — **в мышцах**
- радон и продукты его распада — **в легких**



### Интересно, что...

радионуклиды  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$  могут поступать в организм:

- с морепродуктами (морской рыбой, моллюсками, креветками и др., которые извлекают эти элементы из морской воды);
- с мясом северного оленя. Радионуклиды поступают в организм животных преимущественно зимой, когда основной пищей оленей становятся лишайники, обладающие способностью накапливать полоний и свинец из почвы.

Люди, живущие в Западной Австралии, где отмечается повышенное содержание в почве природного урана, получают дозы облучения, в 75 раз превосходящие средний уровень доз, получаемых жителями Земли от этого природного радиоактивного элемента. Это связано с употреблением в пищу местными жителями мяса и внутренностей овец и кенгуру, в организме которых накапливается уран. Указанные животные, в основном, питаются травой, куда уран поступает из почвы.

В течение жизни жители Земли дополнительно облучаются и от источников ионизирующего излучения искусственного происхождения, получая, в среднем, эффективную дозу 0,4 мЗв в год (от 0,2 до 1,5 мЗв в год).

Для развитых стран это, в основном, источники ионизирующего излучения медицинского назначения. Определенный вклад вносят промышленные устройства, генерирующие ионизирующие излучения или использующие искусственно полученные радионуклиды. Подробная информация о естественных и искусственных источниках облучения человека содержится в главе 4.

В результате широкого применения радионуклидов искусственного происхождения возможно попадание этих радионуклидов в окружающую среду и ее загрязнение, что сильнее всего может проявиться в результате радиационной аварии. При этом возможно перераспределение радионуклидов в окружающей среде, что создает множество путей для дополнительного облучения человека.

На начальном этапе аварии почва, воздух и водные системы подвергаются *первичному* загрязнению. Далее могут происходить процессы *вторичного* загрязнения.

Мелкие частицы почвы вместе с содержащимися в них радионуклидами поднимаются ветром и загрязняют атмосферный воздух. Из почвы радионуклиды попадают в поверхностные воды, усваиваются наземными и водными растениями. Растения служат кормом животным, а их, в свою очередь, поедают другие животные. Человек употребляет в пищу продукты животного и растительного происхождения, и по многочисленным пищевым цепочкам радионуклиды попадают в его организм.

Ежегодно жители Земли получают:

- от *природных* источников излучения ~ **86 %**,
- от искусственных источников излучения ~ **14 %**, суммарной дозы внешнего и внутреннего облучения.

**Примеры пищевых цепочек, по которым радионуклиды естественного и искусственного происхождения могут поступать в организм человека:**

- почва → продукты растительного происхождения (хлеб, овощи, фрукты) → **человек**
- почва → растительность → молочный скот → молоко и молочные продукты → **человек**
- почва → растительность → животное → мясные продукты → **человек**
- водоем → водные организмы растительного и животного происхождения, служащие кормом для рыбы и других обитателей водоема → рыба (ракообразные и т. д.) → **человек**

Таким образом, на территории, загрязненной искусственными радионуклидами, организм человека подвергается дополнительному облучению — внутреннему и внешнему.

### Дополнительное облучение человека на территории, загрязненной радионуклидами

#### Внутреннее облучение

обусловлено в основном попаданием радионуклидов внутрь организма с продуктами питания и водой, а также в процессе дыхания. Излучение радионуклидов приводит к облучению внутренних органов и тканей, определяя дозу внутреннего облучения человека.

В настоящее время в районах, пострадавших от Чернобыльской катастрофы, внутреннее облучение населения, в основном, связано с загрязнением продуктов питания  $^{137}\text{Cs}$ . В некоторых районах в почве, наряду с *гамма*- и *бета*-излучающим  $^{137}\text{Cs}$ , может присутствовать и *бета*-излучающий  $^{90}\text{Sr}$ . Этот радионуклид также может попадать в организм человека и облучать его изнутри. В местах, непосредственно примыкающих к 30-километровой зоне ЧАЭС, могут присутствовать еще и *альфа*-излучающие радионуклиды плутония (***Pu***) и америция (***Am***). В незначительных количествах они также могут проникать в организм человека, подвергая его внутреннему облучению. Как правило, дозы, формируемые излучением плутония и америция, незначительны и намного меньше, чем дозы, формируемые  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

#### Внешнее облучение

в основном обусловлено *гамма*-излучающими радионуклидами.

В первый период после Чернобыльской катастрофы (апрель-май 1986 года) радиационную обстановку в пострадавших районах Беларуси преимущественно определяли *короткоживущие* радионуклиды (с периодом полураспада до 2 лет), в том числе и  $^{131}\text{I}$ .

В настоящее время, когда короткоживущие радионуклиды практически полностью распались, внешнее облучение населения загрязненных районов, в основном, определяет долгоживущий радионуклид  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} \approx 30$  лет).

Чтобы оценить дозы, получаемые человеком от конкретных радионуклидов, необходимо учесть тот сложный путь, который проходят эти радионуклиды в окружающей среде. Возможные способы перераспределения (миграции) радионуклидов в природе и пути их проникновения в организм человека в самом общем виде показаны на рисунке, приведенном ниже.

Безусловно, эта схема далеко не полностью отражает сложные процессы *миграции* радионуклидов в природе. В процессе *миграции* происходит не только перераспределение радионуклидов между компонентами окружа-

ющей среды, но нередко их *химическое преобразование*, то есть переход радионуклидов из одних химических соединений в другие. Поэтому реальная картина перераспределения радионуклидов в окружающей среде гораздо сложнее. На схеме показаны компоненты среды, играющие наиболее важную роль в поступлении радионуклидов в организм человека.





С помощью представленной схемы можно разобраться, как формируются дополнительные дозы облучения людей от радионуклидов, попавших в окружающую среду в результате радиационной аварии. Чтобы оценить эти дозы, необходимо знать, какая доля радионуклидов, содержащихся в том или ином компоненте окружающей среды, может включаться в последующие процессы миграции и, в конечном счете, поступать в организм человека.

Перераспределение радионуклидов между компонентами экосистемы характеризуют с помощью **коэффициентов перехода (КП)**.

Например, *коэффициент перехода* может использоваться для характеристики поступления конкретных радионуклидов из почвы в растительность. В этом случае *коэффициент перехода* может представлять собой отношение удельной активности образца растительности

Коэффициент  
перехода (**КП**)

( $A_p$ , Бк/кг) к удельной активности образца почвы в том месте, где произрастала растительность ( $A_n$ , Бк/кг):

$$КП = A_p \text{ (Бк/кг)} / A_n \text{ (Бк/кг)}$$

Обычно образец почвы отбирают на глубину 20 см.

*Коэффициенты перехода* могут быть определены для каждого звена пищевой цепи. Величины коэффициентов перехода радионуклидов получают в результате многолетних исследований. Собранный информация анализируется и помещается в специальные справочные руководства.

В нормативных документах по радиационной безопасности, действующих в нашей стране (НРБ — 2000), можно найти величины так называемых *дозовых коэффициентов*, рассчитанные на основании накопленных данных. С их помощью можно оценивать эффективные дозы облучения человека от радионуклидов, поступающих в его организм с пищевыми продуктами и вдыхаемым воздухом. Для этого нужно знать активность конкретных радионуклидов, поступивших в организм тем или иным способом.

**Дозовый коэффициент** — это эффективная доза, полученная человеком от радионуклида, присутствующего:

- в окружающем воздухе
- в пищевых продуктах

в расчете на 1 Бк активности радионуклида.



Итак,

В этой главе Вы познакомились с основными величинами, характеризующими загрязнение окружающей среды радионуклидами, и величинами, позволяющими оценивать степень воздействия ионизирующего излучения на организм человека (дозиметрические величины).

**Важнейшие величины, характеризующие источник излучения, основные дозиметрические величины, единицы измерения и соотношение между ними**

Величина, обозначение	Единица измерения		
	СИ	традиционная	соотношение
Активность, <b>A</b>	Бк	Ки	1 Ки = 3,7 · 10 <sup>10</sup> Бк
Энергия излучения, <b>E<sub>R</sub></b>	Дж	эВ	1 эВ = 1,602 · 10 <sup>-19</sup> Дж
Поглощенная доза, <b>D</b> (для любого облучаемого объекта)	Гр	Рад (устаревшая)	1 рад = 1 · 10 <sup>-2</sup> Гр
Эквивалентная доза, <b>H</b> (для биологической ткани или органа человека)	Зв	бэр (устаревшая)	1 бэр = 10 <sup>-2</sup> Зв
Эффективная доза, <b>E</b> (для организма человека в целом)	Зв		

После того, как была открыта радиоактивность, выделены и изучены радионуклиды естественного происхождения, были созданы и искусственные источники ионизирующего излучения, которые все шире используются в медицине, науке и технике, промышленности и сельском хозяйстве, принося пользу людям. Безусловно, использование подобных источников приводит к увеличению дозы облучения как для отдельных людей, так и для всей популяции человека.

**Активность радионуклидов в компонентах окружающей среды измеряют с помощью различных видов радиометров и спектрометров.**

**Дозы внешнего облучения человека контролируют с помощью индивидуальных дозиметров.**

Уметь правильно оценивать дозы, получаемые человеком от любых источников ионизирующего излучения, чрезвычайно важно. Это позволяет определять, какую дополнительную дозу облучения получают люди от искусственных источников излучения, с которыми им приходится иметь дело, по сравнению с дозами от источников излучения, окружавшими людей на протяжении всей истории их существования.

Это также помогает определять степень опасности того или иного источника излучения и меры, которые в случае необходимости следует предпринимать, чтобы снизить облучение организма человека.

#### **Вопросы для самоконтроля и обсуждения:**

1. Что такое поглощенная доза?
2. Можно ли измерить поглощенную дозу?
3. Чем отличается воздействие *гамма*-излучения от воздействия *альфа*-излучения на биологические объекты?
4. Для чего предназначены взвешивающие коэффициенты излучения?
5. Что такое эквивалентная доза облучения? Можно ли ее измерять?
6. С какой целью введена эффективная доза облучения? В каких единицах ее выражают?



7. Что такое взвешивающие коэффициенты для биологических тканей и органов? Для чего они существуют?
8. Приведите примеры внешнего облучения человека от источников ионизирующего излучения естественного и искусственного происхождения.
9. Перечислите возможные способы проникновения радионуклидов в организм человека.
10. Какие приборы используют для измерения содержания радионуклидов в продуктах питания?
11. Какие приборы используют для определения доз внешнего облучения людей?

**Ключевые слова и словосочетания:**  
радиационный фон, космическое излучение, земная радиация, искусственные источники ионизирующего излучения

Радиация существовала в Космосе задолго до возникновения Солнечной системы и присутствовала на Земле еще до зарождения на ней жизни. Человек живет в мире, неотъемлемой частью которого являются излучения. Окружающий мир наполнен различного рода излучениями как ионизирующими, так и неионизирующими. Ионизирующие излучения существуют в природе и могут быть получены человеком искусственно. Излучения природного происхождения определяют естественный радиационный фон окружающей среды, искусственно полученные излучения увеличивают его. Определение роли природных и антропогенных факторов в формировании радиационного фона окружающей среды — важнейшая задача радиозэкологии.

Изучив главу... Вы узнаете о природе ионизирующих излучений космического и земного происхождения, познакомитесь с источниками излучения, созданными человеком. Вы также узнаете об изменениях радиационного фона, происходящих на поверхности Земли под влиянием природных факторов и в результате деятельности человека.



### 4.1. Космическое излучение

Космическое излучение является ионизирующим излучением естественного происхождения. Оно приходит к Земле из далекого космического пространства и поступает от ближайшей к нам звезды — Солнца. Все, что находится на поверхности Земли, подвергается воздействию космического излучения.

Из Космоса к Земле поступают разнообразные виды корпускулярного и электромагнитного излучения. Основная часть поступающих электромагнитных излучений не относится к ионизирующим излучениям.

Различают космическое излучение **галактического** и **солнечного** происхождения. При этом выделяют *первичное* космическое излучение, поступающее в околоземное пространство, и *вторичное излучение*, возникающее при взаимодействии космического излучения с атмосферой Земли.

#### Первичное космическое излучение

**Первичное космическое излучение состоит из излучения галактического и солнечного происхождения.**

**Космическое излучение галактического происхождения — это, в основном, поток ядер водорода (протонов) колоссальных энергий, несущихся в космическом пространстве с огромными скоро-**

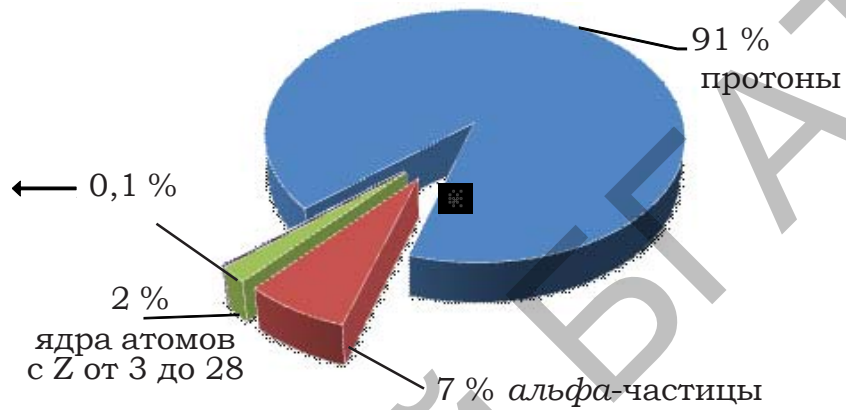
Галактические частицы образуются при взрывах новых и сверхновых звезд. Они также испускаются нейтронными звездами и другими источниками.

стями. В состав галактического излучения также входят ядра гелия (альфа-частицы), ядра атомов более тяжелых элементов (преимущественно с зарядом ядра  $Z$  от 3 до 28) и, в незначительном количестве, другие частицы.

**Состав частиц первичного космического излучения галактического происхождения**

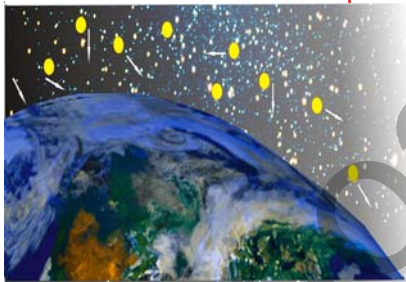
В состав галактического излучения в незначительном количестве ( $< 0,1\%$ ) входят:

- ядра атомов с  $Z > 28$
- нейтроны, неустойчивые в свободном состоянии, основная часть которых распадается с образованием протонов и электронов. Электроны, траектории которых искривляются магнитными полями, движутся с ускорением. Поэтому они теряют энергию на образование электромагнитного излучения, которое могут улавливать радиотелескопы.



Образующиеся в разных местах Галактики космические частицы преодолевают гигантские расстояния. Они могут иметь огромную энергию (до  $10^{15}$  МэВ). Частицы многократно рассеиваются магнитными полями, которые ориентированы в космическом пространстве случайным образом. Поэтому у галактических частиц, поступающих в околоземное пространство, нет какого-либо преимущественного направления движения. Поток галактических частиц со всех сторон равномерно поступает из Космоса к Земле.

**Поток галактических частиц со всех сторон поступает из Космоса к Земле**



**Солнце — главный источник космической радиации на Земле**



Из космического пространства к Земле поступает и излучение ближайшей к нам звезды — Солнца (солнечная радиация). Солнечная радиация является главным источником энергии для большинства биогенных и геохимических процессов, протекающих у поверхности Земли. Солнечное излучение состоит из электромагнитного излучения (электромагнитная компонента) и потока частиц (корпускулярная компонента).

Электромагнитная часть солнечного излучения представлена видимым светом и невидимыми компонентами — инфракрасным, ультрафиолетовым и другими видами излучения. Все перечисленные виды электромагнитного излучения отно-

сятся к *неионизирующим* излучениям. Только самая коротковолновая часть ультрафиолетового излучения способна ионизировать вещество.

*Корпускулярная составляющая* первичного солнечного излучения представлена преимущественно **протонами**, влетающими в околоземное пространство со скоростью от 300 до 1500 км/с, и **электронами**, движущимися со скоростью, близкой к скорости света (~ 300 000 км/с). Кроме того, в потоке солнечных частиц присутствуют ядра гелия (*альфа-частицы*) и в гораздо меньшем количестве — ядра других более тяжелых элементов.

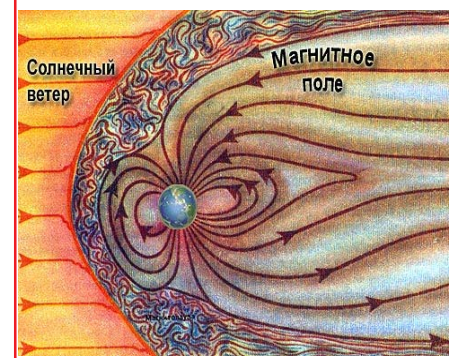
Все эти корпускулярные излучения являются ионизирующими и именно их обычно называют *космическими лучами солнечного происхождения*.

Источником солнечной энергии являются процессы ядерного синтеза, протекающие на Солнце. Основная часть энергии выделяется в результате синтеза ядер гелия из ядер водорода. Выделяющаяся энергия уносится образующимися ядрами, элементарными частицами и фотонами (квантами электромагнитного излучения).

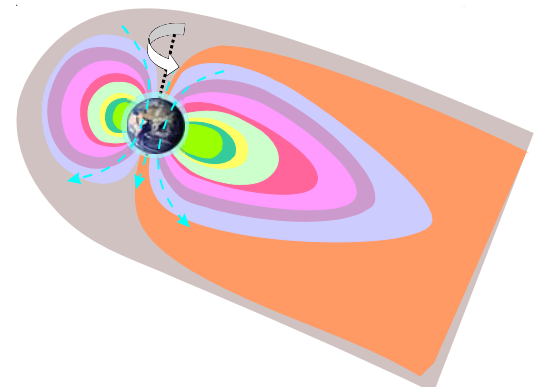
Поток частиц солнечного происхождения в околоземном пространстве намного превосходит поток частиц галактического происхождения, однако по энергии солнечные частицы значительно уступают частицам галактического происхождения. Энергия частиц солнечного излучения обычно не превышает  $10^4$  МэВ.

Наша планета — это огромный магнит. Магнитное поле Земли (*геомагнитное поле*) простирается на расстояние 70–80 тыс. км по направлению к Солнцу и на многие миллионы километров в противоположном направлении. Геомагнитное поле захватывает протоны, электроны и другие заряженные частицы из потока космических частиц, пролетающих в околоземном пространстве, образуя *магнитосферу* — пространство, заполненное заряженными частицами. В основном магнитосферу заполняют частицы, захваченные геомагнитным полем из потока частиц, которые излучает Солнце (*солнечный ветер*).

#### Магнитное поле Земли



#### Радиационные пояса Земли



Магнитное поле Земли отклоняет заряженные частицы космического излучения и удерживает их в особых зонах — радиационных поясах

Магнитосфера неоднородна по магнитным свойствам, и разные ее части отличаются по способности захватывать заряженные космические частицы. В результате, формируются радиационные зоны или радиационные пояса Земли. Каждая зона включает заряженные частицы определенного вида и энергии.

Электроны и протоны, удерживаемые геомагнитным полем, образуют *внутренний* и *внешний* радиационные пояса Земли. *Внутренний радиационный пояс* состоит преимущественно из высокоэнергетических *протонов*. Их максимальная плотность наблюдается над экваториальной областью планеты, на высоте около 3500 км.

*Внешний радиационный пояс* удален от Земли на расстояние от 1 до 8 ее радиусов и состоит из потоков *электронов* и *протонов* с максимальной плотностью частиц на расстоянии 22 000 км от земной поверхности. (Средний радиус Земли  $R = 6\,367$  км.)

### Полярное сияние



Движущиеся заряженные космические частицы создают электромагнитное поле, которое окружает Землю.

Магнитное поле Земли отклоняет основную часть электрически заряженных частиц, движущихся из Космоса в направлении планеты. Однако в районе полюсов, где защита слабее по сравнению с другими местами планеты, часть заряженных космических частиц прорывается через радиационные пояса в атмосферу Земли. В результате в высоких широтах в атмосфере Земли наблюдается *полярное сияние*.

Геомагнитное поле оказывает огромное влияние на все процессы, происходящие на Земле и в околоземном пространстве. С изменениями солнечной активности происходят изменения и геомагнитного поля, которые называют *геомагнитными возмущениями*.

***Интенсивность солнечной радиации существенно зависит от солнечной активности, которая периодически меняется.***

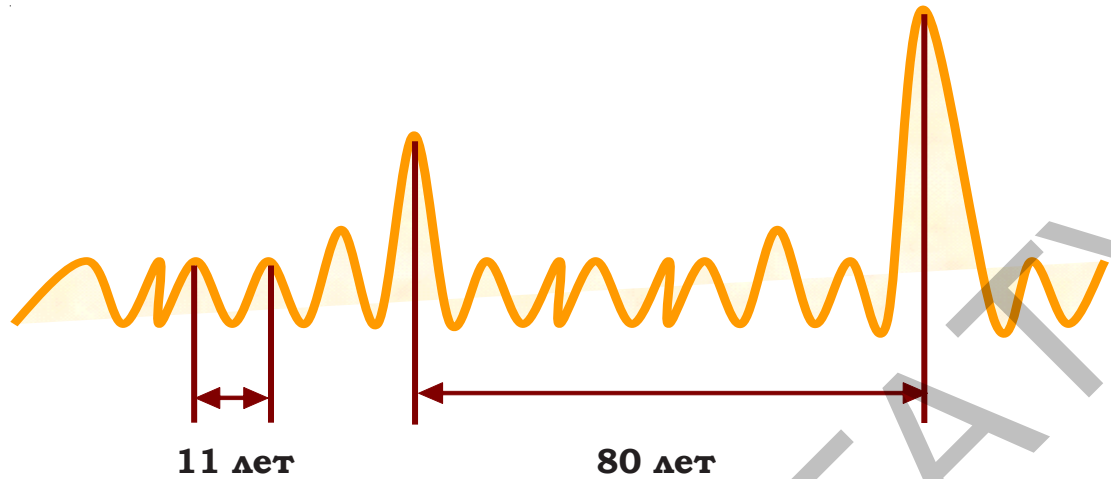
Периодические изменения солнечной активности наблюдают, в среднем, через 11 лет, хотя этот период может сокращаться до 7,5 или увеличиваться до 16 лет. Значительно реже, в среднем через каждые 80 лет, отмечают более существенные изменения солнечной активности.

*В периоды солнечной активности резко увеличивается количество космических частиц солнечного происхождения, прорывающихся сквозь радиационные пояса в атмосферу Земли.*

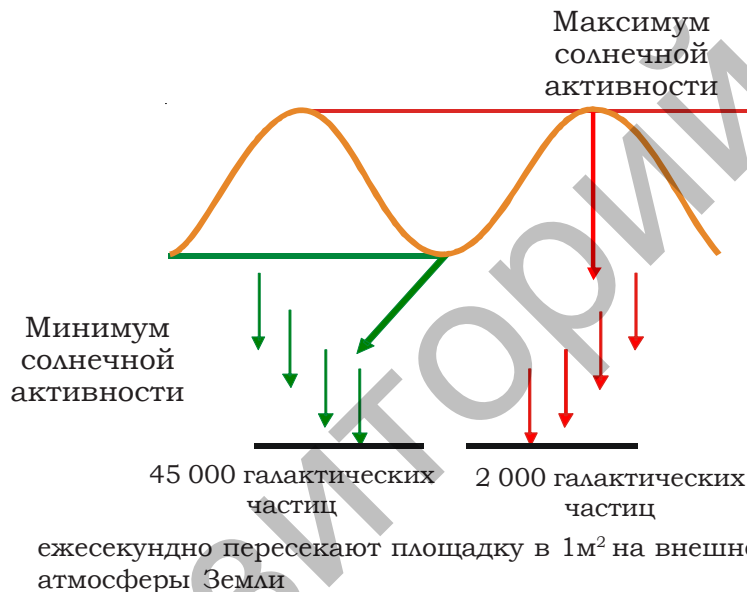
Солнечную активность определяют процессы ядерных превращений, протекающих на Солнце.



## Периодические изменения солнечной активности



**Солнечная активность влияет и на интенсивность космического галактического излучения, поступающего к Земле.**

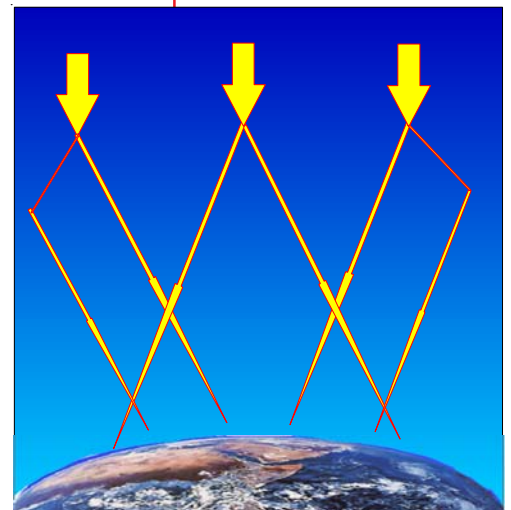


Поток галактических частиц *уменьшается* в периоды максимумов и *возрастает* в периоды минимумов солнечной активности. В зависимости от фазы солнечной активности каждую секунду площадку в  $1\text{ м}^2$  на внешней границе атмосферы Земли пересекает от 2 000 до 45 000 галактических частиц.

### Вторичное космическое излучение

Большая часть первичного космического излучения галактического и солнечного происхождения поглощается в верхних слоях атмосферы.

При попадании в атмосферу частицы первичного космического излучения сталкиваются с ядрами атомов, входящих в состав атмосферы, что может приводить к ядерным превращениям. В результате происходящих ядерных реакций образуется большое количество *вторичных космических частиц* — нейтронов, «осколков» ядер, электронов и других элементарных частиц. Весь этот



комплекс ядерных превращений сопровождается испусканием *гамма*-излучения.

**Вторичное космическое излучение представляет собой излучение, образующееся в результате взаимодействия частиц первичного космического излучения с ядрами атомов, входящих в состав атмосферы Земли.**

В составе вторичного космического излучения встречаются практически все известные элементарные частицы.

Только небольшая часть *вторичного* космического излучения достигает поверхности Земли. Основная его часть поглощается атмосферой.

Среди частиц *вторичного* космического излучения важную роль играют **нейтроны**. Их содержание в атмосфере достигает наибольшей величины на высоте примерно 12,5 км над уровнем моря и с уменьшением высоты заметно убывает.

*Быстрые нейтроны*, обладающие высокой энергией и образующиеся, в основном, на высоте 9–12 км, теряют свою энергию при столкновениях с ядрами атомов атмосферы и могут участвовать в ядерных превращениях.

Большая часть нейтронов взаимодействует с ядрами атомов азота ( $^{14}\text{N}$ ), при этом, в зависимости от энергии нейтронов, протекают различные ядерные реакции. Основным радионуклидом, образующимся в результате ядерных превращений, является радиоактивный углерод  $^{14}\text{C}$  бета-излучатель с периодом полураспада 5730 лет.

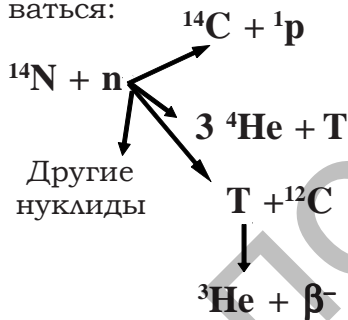
В гораздо меньших количествах образуется радиоактивный бета-изотоп водорода тритий (**T** или  $^3\text{H}$ ) с периодом полураспада 12,5 лет и стабильный изотоп гелия  $^3\text{He}$ . Этот редкий изотоп гелия образуется только при радиоактивном распаде трития.

В остальных реакциях с ядрами азота и других атомов атмосферы участвует лишь незначительная часть нейтронов (не более 2–3 %).

Радионуклиды, образующиеся при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов атмосферы, называют *космогенными*.

В периоды повышения солнечной активности интенсивность потока солнечного излучения, достигающего земной поверхности, заметно возрастает. Это отражается на работе многих наземных приборов и оказывает воздействие на все живое, особенно на высших представителей животного мира, включая человека.

При взаимодействии нейтронов вторичного космического излучения с ядрами атомов азота земной атмосферы могут образоваться:



Среди образующихся в атмосфере радионуклидов  $^{14}\text{C}$  вносит основной вклад в облучение организма человека.

При попадании в организм он обуславливает, в среднем, годовую индивидуальную эффективную дозу около **0,012 мЗв**.

Отмечено, что в периоды повышенной солнечной активности у жителей Земли возрастает число сердечно-сосудистых заболеваний.

Таким образом, наша планета защищена от интенсивной космической радиации магнитным полем и атмосферой. В отсутствие магнитного поля космическое излучение быстро привело бы к практически полной ионизации атмосферного воздуха, и жизнь на Земле, скорее всего, была бы невозможна.

Степень защищенности от космических лучей зависит от особенностей геомагнитного поля в том или ином месте Земли. Наиболее защищены экваториальные области планеты, наименее — районы, прилегающие к Северному и Южному полюсам, где сходятся магнитные силовые линии.

Поскольку атмосфера Земли поглощает космическое излучение, с уменьшением высоты над уровнем моря его интенсивность убывает.

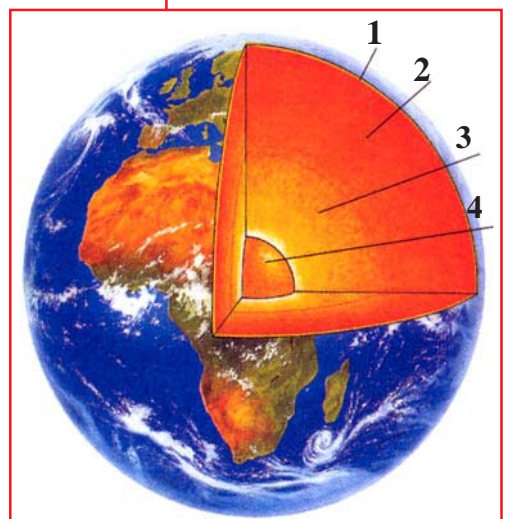
Годовая эффективная доза, получаемая жителями Земли от космического излучения, в среднем составляет 0,4 мЗв, хотя она может меняться в зависимости от высоты местности над уровнем моря от 0,3 до 1,0 мЗв. Эта доза составляет примерно 17 % суммарной дозы, получаемой людьми от всех естественных источников радиации.

## 4.2. Радиация земной коры

При образовании Солнечной системы в ее состав вошли и радионуклиды, присутствовавшие в материале, из которого формировалась планетная система. Со временем часть этих первичных радионуклидов распалась, и сейчас на Земле можно встретить лишь те из них, которые не успели подвергнуться радиоактивному распаду за время существования планеты.

Жизнь на Земле сосредоточена у поверхности самой верхней оболочки планеты — земной коры. Поэтому все организмы подвергаются воздействию излучения радионуклидов, которые содержатся в почве, кристаллических породах и других природных образованиях земной коры. Излучение радионуклидов более глубоких слоев планеты поглощается верхними оболочками Земли и не достигает поверхности.

Схема внутреннего строения Земли



1 — кора, 2 — мантия, 3 — наружное жидкое ядро, 4 — внутреннее твердое ядро

**Периоды полураспада основных радионуклидов земной коры**

Радионуклид	Период полураспада
$^{238}\text{U}$	$4,47 \cdot 10^9$ лет
$^{232}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ лет
$^{40}\text{K}$	$1,28 \cdot 10^9$ лет
$^{87}\text{Rb}$	$4,8 \cdot 10^{10}$ лет
$^{234}\text{U}$	$2,45 \cdot 10^5$ лет
$^{235}\text{U}$	$7,04 \cdot 10^8$ лет

Природные радиоактивные семейства

Уран,  $\text{U}$

Торий,  $\text{Th}$

Воды поверхностных водоемов, приземные слои атмосферы и сами живые организмы также содержат, хотя и в незначительных количествах, радионуклиды, которые попали в них из земной коры.

Излучение радионуклидов земной коры и всех природных образований, в которые попали эти радионуклиды, создают **естественный радиационный фон земной коры**.

Из радиоактивных нуклидов наиболее часто в земной коре встречаются члены естественных радиоактивных семейств  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ , а также  $^{40}\text{K}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ . В среднем, содержание каждого из этих радионуклидов превышает 2 г/т.

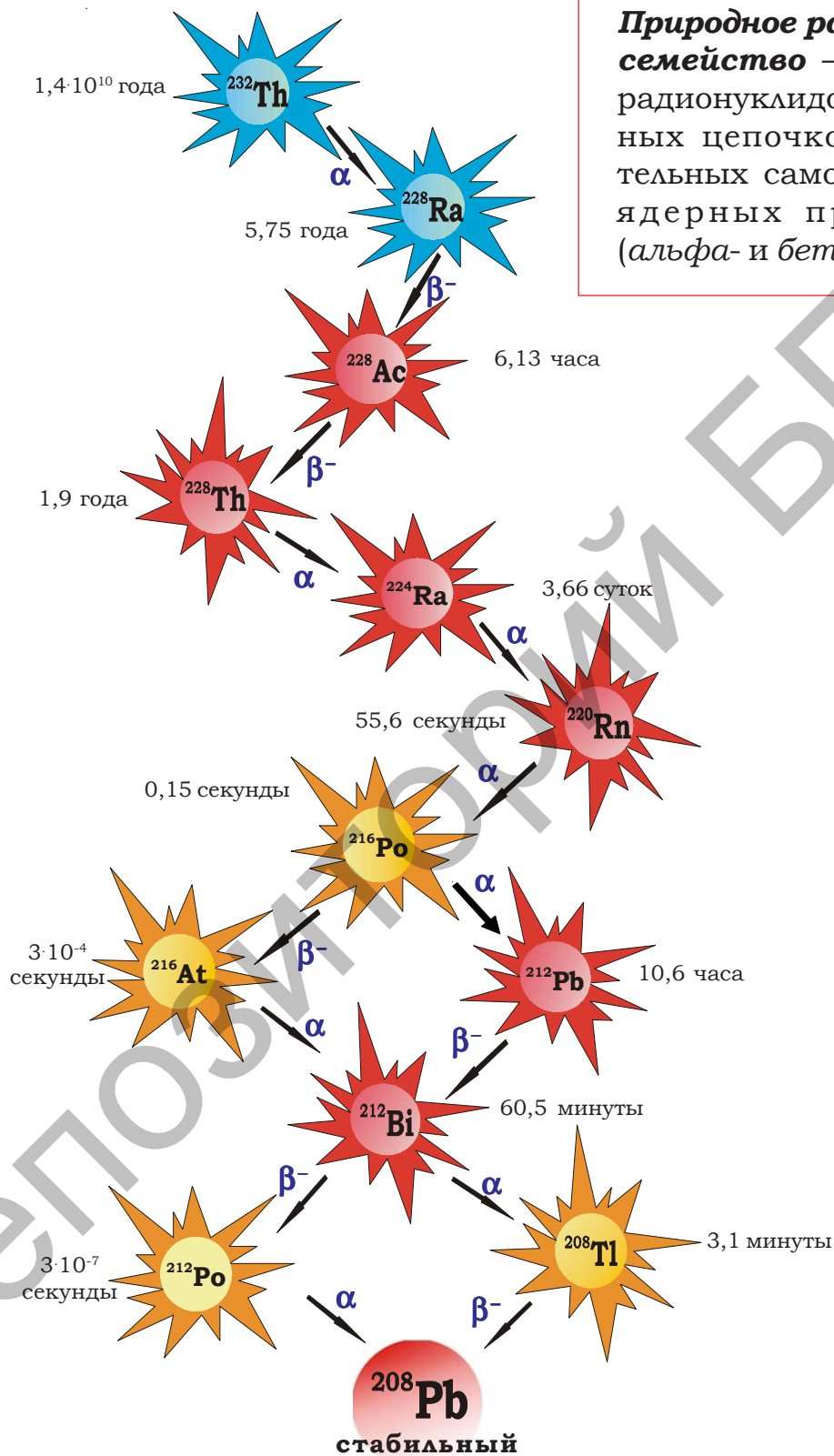
Радионуклиды  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и менее распространенный  $^{235}\text{U}$  являются родоначальниками *природных радиоактивных семейств*. Все промежуточные члены этих семейств, образующиеся в результате цепочки последовательных альфа- и бета-распадов неустойчивых атомных ядер, радиоактивны. Конечные продукты цепи ядерных превращений стабильны. Это изотопы свинца. Практически весь встречающийся на Земле свинец образовался в результате распада урана и тория.

Естественный радиационный фон земной коры зависит от геологической структуры местности. Тип горных пород и глубина их залегания существенно влияют на величину радиационного фона у поверхности Земли.

**Уран и торий** в относительно большом количестве содержатся в гранитах. В тех местах земного шара, где эти породы располагаются ближе к поверхности, уровень радиационного фона местности выше (например, во французских Альпах, Закарпатье, Финляндии, Швеции, Норвегии).

Содержание радионуклидов неодинаково и в почвах, сформированных на разных породах.

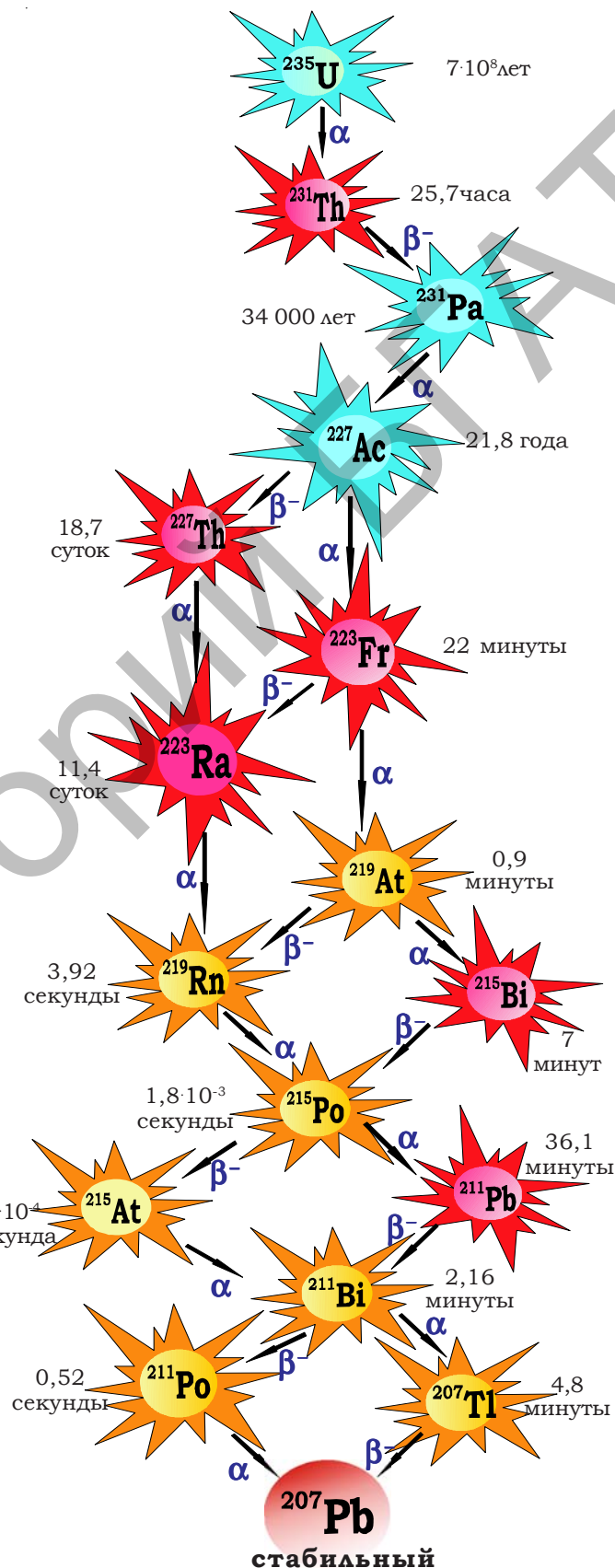
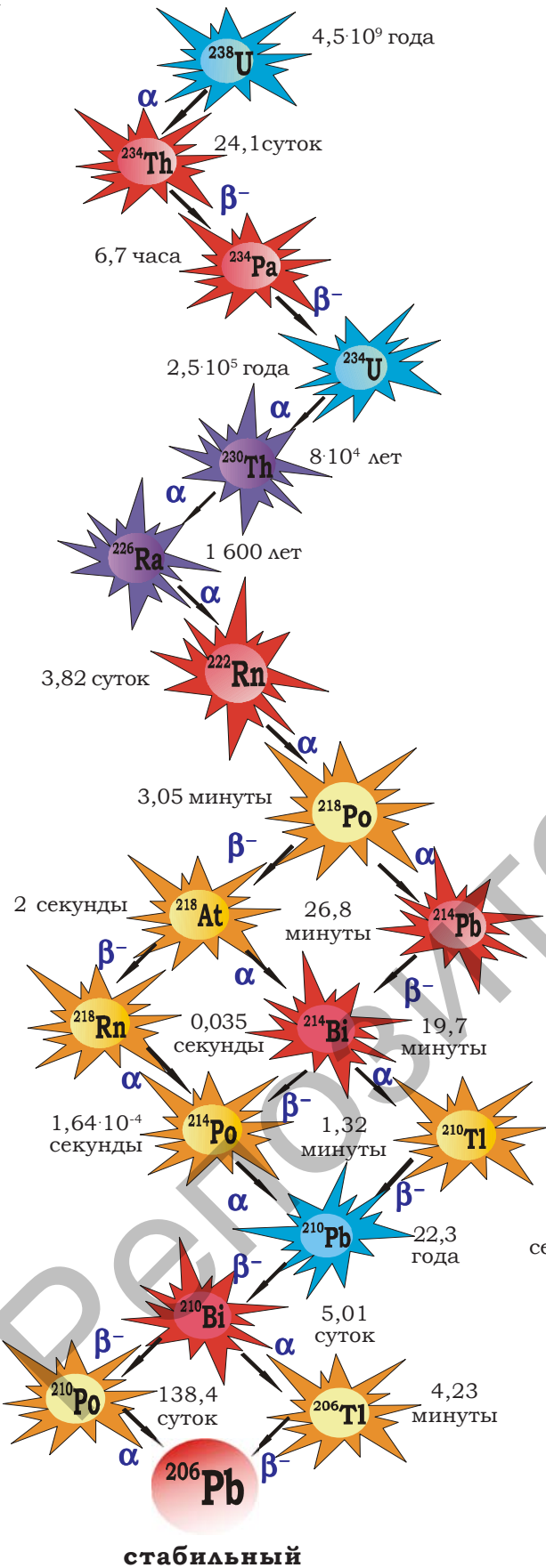
*Глинистые разновидности почв*, по сравнению с их песчаными разновидностями, обычно формируются на породах, более богатых радионуклидами естественного происхождения. Поэтому глинистые почвы, как правило, содержат больше естественных радионуклидов, чем песчаные. Исключение составляют монацитовые пески, которые встречаются на побережье Индии и Бразилии, а также в США (Айдахо, Флорида).

Радиоактивное семейство  $^{232}\text{Th}$ 

**Природное радиоактивное семейство** — это группа радионуклидов, объединенных цепочкой последовательных самопроизвольных ядерных превращений (альфа- и бета-распадов).

Радиоактивное семейство  $^{238}\text{U}$

Радиоактивное семейство  $^{235}\text{U}$



Подобные пески отличаются повышенным содержанием **тория**. Концентрация этого радиоактивного элемента в монацитовых песках достигает 5–10 % (в расчете на  $\text{ThO}_2$ ), что обуславливает более высокий радиационный фон в местах их распространения.

**Основная часть населения Земли живет в местах, где годовая доза облучения от радионуклидов земной коры составляет 0,3–0,6 мЗв.** Небольшая часть населения получает дозу 1,0–1,5 мЗв в год. Между тем, на Земле есть места (в США, Бразилии, Нигерии, Франции, Индии, Иране и других странах), где годовые дозы облучения от радионуклидов земной коры намного выше. Как правило, в этих местах люди не живут.

Во всех естественных радиоактивных семействах, присутствующих в настоящее время на Земле, промежуточными продуктами распада являются радиоактивные изотопы **радона**.

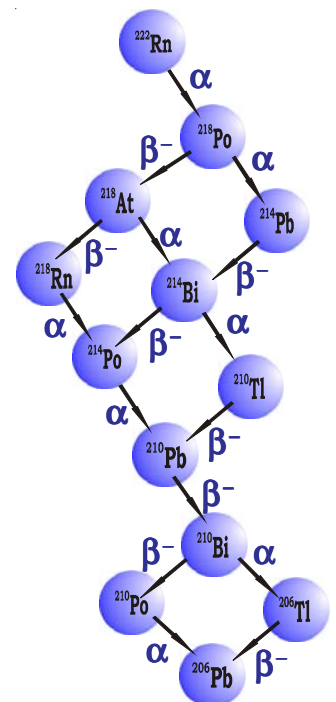
**Радон** — это невидимый инертный газ, который в 7,5 раз тяжелее воздуха. Он освобождается из земной коры повсеместно. Объемная активность почвенного воздуха по радону достигает  $6000\text{--}7000 \text{ Бк/м}^3$ . Удельная же активность атмосферного воздуха (вне помещений) существенно меньше. Она неодинакова в разных местах земного шара и, в среднем, составляет  $4,4 \text{ Бк/м}^3$ . Суммарная активность радона, ежегодно поступающего в атмосферу из разных источников, составляет  $\sim 1,1 \cdot 10^{20} \text{ Бк}$ .

**Источники поступления радона в атмосферу Земли**



**Радон, Rn**

**Продукты распада  $^{222}\text{Rn}$**   
 $T_{1/2} = 3,8 \text{ суток}$



На открытой местности из-за быстрого рассеяния в атмосферном воздухе *радон* не представляет опасности для человека. Однако, проникая внутрь зданий через микротрещины в фундаменте и стенах, он может накапливаться в закрытых непроветриваемых помещениях. Больше всего *радона* накапливается в подвальных помещениях, из которых этот радиоактивный газ распространяется по всему зданию.

**Среди естественных источников радиации радон является основным источником облучения человека.**

Примерно 60 % индивидуальной эффективной дозы, получаемой человеком за год от радионуклидов земной коры, приходится на долю *радона* и *продуктов его распада*. Это составляет около половины годовой индивидуальной эффективной дозы, которую получают жители Земли от всех естественных источников радиации.

Источником радона могут служить и строительные материалы, содержащие микропримеси изотопов *радия*, которые являются членами естественных радиоактивных семейств. Изотопы *радона*, также входящие в состав этих радиоактивных семейств, образуются при распаде изотопов *радия*:

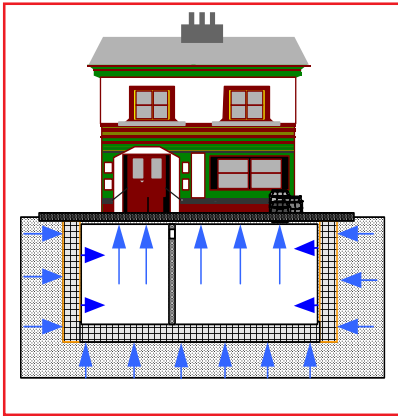


Наиболее долгоживущим радионуклидом *радона* является  $^{222}\text{Rn}$  ( $T_{1/2} = 3,8$  суток).

Периоды полураспада изотопов  $^{220}\text{Rn}$  и  $^{219}\text{Rn}$  соответственно составляют 55,6 и 3,96 секунды. При распаде изотопов *радона* образуются радиоактивные изотопы *полония (Po)*, *висмута (Bi)*, *свинца (Pb)*, которые, попадая в органы дыхания, приводят к внутреннему облучению организма человека. Каким видам радиоактивного распада подвергаются изотопы радона и какие радиоактивные продукты при этом образуются, можно увидеть на рисунках, где представлены схемы распада изотопов радона:  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$  и  $^{219}\text{Rn}$ .

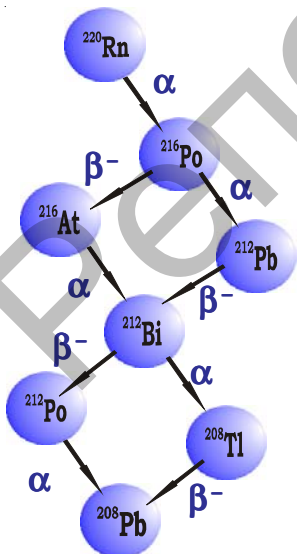
Основной вклад в дозу облучения людей от радона (до 90 %) вносит наиболее долгоживущий из изотопов радона —  $^{222}\text{Rn}$ . Значительно меньший вклад вносит  $^{220}\text{Rn}$  и совсем незначительный —  $^{219}\text{Rn}$ .

**Проникновение радона из грунта во внутренние помещения дома**



**Продукты распада  $^{220}\text{Rn}$**

$T_{1/2} = 55,6$  секунды





В отличие от самого радона продукты, образующиеся в результате последовательной цепочки радиоактивных распадов его изотопов (дочерние продукты распада) хорошо сорбируются на содержащихся в атмосферном воздухе аэрозольных частицах и на поверхности органов дыхания при попадании в организм с вдыхаемым воздухом. Поэтому главную опасность для человека представляет не сам химически инертный радон, а радиоактивные и химически токсичные продукты его распада, накапливающиеся в организме.

Если в домах сельского типа повышенное содержание радона по сравнению с атмосферным воздухом, в основном, связано с его проникновением из почвы, в каменных и железобетонных домах — с поступлением из строительных конструкций (за исключением подвальных помещений и первых этажей зданий).

В настоящее время в Республике Беларусь введены нормативы на содержание изотопов радона  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  во вновь строящихся зданиях жилищного и общественного назначения.

Согласно нормативным документам Республики Беларусь (НРБ-2000), во вновь строящихся зданиях жилищного и общественного назначения предусмотрено, чтобы среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) дочерних продуктов распада  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  в воздухе помещений (ЭРОА  $^{222}\text{Rn}$  + 4 ЭРОА  $^{222}\text{Rn}$ ) не превышала 100 Бк/м<sup>3</sup>. При этом мощность дозы от гамма-излучения в помещении не должна превышать мощность дозы на открытой местности более чем на 0,2 мкЗв/час.

В эксплуатируемых зданиях среднегодовая эквивалентная равновесная объемная активность (ЭРОА) дочерних продуктов распада  $^{222}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  в воздухе помещений не должна превышать 200 Бк/м<sup>3</sup>.

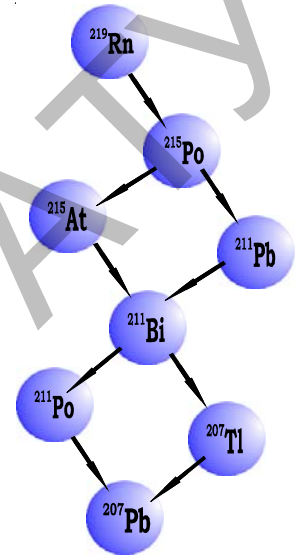
Чтобы эти нормативы соблюдались, материалы, используемые для строительства жилых и общественных зданий, а также в дорожном строительстве (как в пределах населенных пунктов, так и вне этих пунктов) контролируются на содержание природных радионуклидов, включая  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{232}\text{Th}$ .

*Радон* — это газ, поэтому, чтобы ослабить его воздействие на организм человека, необходимо:

- уменьшать поступление *радона* в помещение,
- удалять *радон* из помещения.

### Продукты распада $^{219}\text{Rn}$

$T_{1/2} = 3,96$  секунды



При содержании изотопа  $^{222}\text{Rn}$  в питьевой воде 60 Бк/л и выше воду отстаивают или кипятят, что позволяет очистить ее от радона.

Чтобы сократить поступление *радона* в жилые и производственные помещения, следует хорошо изолировать их от поступления *радона* из почвы. Для этого необходимо заделывать щели и трещины подвальных помещений, окрашивать стены этих помещений водонепроницаемой краской.

Продукты распада *радона* хорошо сорбируются на мельчайших капельках влаги и скапливаются во влажных помещениях. Повышенное содержание *радона* может наблюдаться в ванной комнате и на кухне. Поэтому очень важно их регулярно проветривать.

В небольших количествах *радон* может присутствовать и в природном газе, и в водах артезианских источников. Чтобы освободить питьевую воду от *радона*, достаточно ее дегазировать путем отстаивания или кипячения.

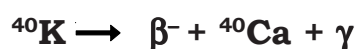
Кроме радионуклидов, входящих в состав естественных радиоактивных семейств, в земной коре в заметных количествах присутствует и радиоактивный калий  $^{40}\text{K}$ . В природной смеси изотопов калия, в основном состоящей из стабильных изотопов  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$ , на долю  $^{40}\text{K}$  приходится лишь 0,012 % от общего числа атомов калия.

$^{40}\text{K}$  является одиночным долгоживущим радионуклидом естественного происхождения.

Одиночными радионуклидами называют такие неустойчивые нуклиды, распад которых непосредственно приводит к образованию стабильных нуклидов.

Радиоактивный распад  $^{40}\text{K}$  осуществляется путем

- **$\beta^-$ -распада** (вероятность **88,8 %**)



- **электронного захвата** — захвата орбитального электрона ядром атома (вероятность **11,2 %**)



При любом способе радиоактивного распада  $^{40}\text{K}$  образуются стабильные нуклиды ( $^{40}\text{Ca}$  и  $^{40}\text{Ar}$ ). Практически весь  $^{40}\text{Ar}$ , присутствующий в атмосфере Земли, образовался в результате распада  $^{40}\text{K}$ , входящего в состав земной коры.

Вместе со стабильными изотопами калия  $^{39}\text{K}$  и  $^{41}\text{K}$ , радиоактивный калий ( $^{40}\text{K}$ ) всегда присутствует в почве. Отсюда с элементами минерального питания он поступает в растения, а затем по пищевым цепочкам в орга-

Калий,  $^{40}\text{K}$

Период  
полураспада  $^{40}\text{K}$

$T_{1/2} = 1,28 \cdot 10^9$  лет

низм человека. От  $^{40}\text{K}$  жители Земли получают в среднем дозу облучения 0,3 мЗв в год, что составляет около 13 % годовой эффективной дозы от источников ионизирующих излучений естественного происхождения.

Все ионизирующие излучения от источников естественного происхождения формируют так называемый **естественный радиационный фон**.

**Естественный радиационный фон характеризует интенсивность ионизирующих излучений естественного происхождения в данном месте.**

В системе СИ величину радиационного фона обычно выражают в *микроЗивертах в час (мкЗв/час)*.

Таким образом, **естественный радиационный фон** местности формируют космическое излучение и излучения радионуклидов земной коры. Радионуклиды земной коры ответственны, в среднем, за 83 % *годовой эффективной дозы*, получаемой жителем Земли от всех источников ионизирующих излучений естественного происхождения. Остальные 17 % формирует космическое излучение.



### 4.3. Ионизирующие излучения искусственного происхождения

После обнаружения удивительных свойств ионизирующих излучений и открытия искусственных способов получения радионуклидов человечество создало множество искусственных источников ионизирующего излучения.

К числу основных источников ионизирующего излучения относятся медицинская аппаратура и промышленные устройства, содержащие радиоактивные вещества или генерирующие ионизирующие излучения.



**Рентгеновская установка**

#### **Медицинская аппаратура**

Рентгеновские, томографические и другие установки используются для диагностики заболеваний человека и лечения больных. В европейских странах индивидуальная годовая эффективная доза, получаемая людьми при медицинских обследованиях, находится в интервале от 0,4 до 1,6 мЗв и составляет в среднем 1,1 мЗв.

#### **Промышленные устройства**



**Установка для контроля грузов**

В промышленности используются устройства для проверки промышленных изделий на наличие внутренних дефектов структуры, качества сварных швов трубопроводов, багажа пассажиров, определения толщины производимых материалов (бумаги, стекла, металлической фольги, жести, полимерных материалов и т. д.), для стерилизации сложной медицинской аппаратуры, продуктов питания, увеличения сцепления между разнородными материалами при изготовлении стекло-, металлокерамики, для определения уровня жидкостей (особенно химически агрессивных) в замкнутых резервуарах, контроля утечки ядовитых веществ и других целей.

#### **Часы со светящимся циферблатом, тонкие оптические линзы**

При изготовлении таких часов в прошлом веке использовали соединения радия, позднее их стали заменять соединениями трития ( $^3\text{H}$  или  $\text{T}$ ), прометия ( $^{147}\text{Pm}$ ) и других радионуклидов. Это позволило уменьшить дозы облучения людей. В 1967 году были введены международные нормы на облучение людей от подобных изделий. Тем не менее, выпущенные ранее часы все еще находятся в употреблении. До сих пор радионуклиды используются при изготовлении светящихся указателей входа-выхода, компасов и других изделий.



**Часы со светящимся циферблатом**

При изготовлении особо тонких оптических линз для приборов внесение соединений радиоактивного тория ( $^{222}\text{Th}$ ) в стекло в процессе его варки позволяет с высокой точностью контролировать толщину линз. Это значительно улучшает оптические свойства линз. Более подробно об источниках ионизирующего излучения искусственного происхождения и их применении мы поговорим в главе 6.

Таким образом, в современном мире невозможно представить жизнь без искусственных источников ионизирующего излучения. Они являются одним из достижений научно-технического прогресса, создают комфорт и во многом облегчают жизнь людей. Вместе с тем, используя эти источники, люди подвергаются дополнительному облучению.

**Главным принципом, которым следует руководствоваться при использовании искусственно созданных источников ионизирующих излучений, является получение пользы от их применения с наименьшими негативными последствиями для человека и окружающей среды.**

#### **4.4. Эволюция радиационного фона под влиянием природных и антропогенных факторов**

Согласно представлениям А.П. Виноградова, в период формирования Земли все элементы, из которых впоследствии сформировались атмосфера и гидросфера Земли, находились в связанном виде и входили в состав твердых веществ:

- кислород и водород — в состав оксидов и гидроксидов,
- азот — нитридов и, возможно, нитратов,
- углерод — графитов, карбидов и карбонатов.

При отсутствии атмосферы радиационный фон у поверхности Земли был обусловлен мощным космическим излучением и излучением радионуклидов, входивших в состав земной коры.

##### **Изменение радиационного фона под влиянием природных факторов**

Возраст Земли, по мнению ученых, составляет примерно 4,5 млрд. лет. Радиационный фон вблизи

## Глава 4

**Столкновение космических тел с поверхностью Земли приводило к образованию газообразных веществ**



ной поверхности менялся в течение всей геологической истории планеты. Эти изменения, в основном, были связаны с изменениями состава верхней твердой и газовой оболочек планеты.

### **Появление газовой оболочки планеты**

Появление первых признаков газовой оболочки Земли связано с бомбардировкой планеты прилетающими из Космоса метеоритами, болидами и другими космическими телами, столкновение которых с земной поверхностью приводило к образованию летучих веществ. Однако большая часть выделяющихся при этом паров воды, оксидов углерода и других химически активных веществ поглощалась земными породами.

Зарождающаяся газовая оболочка была крайне разреженной и, скорее всего, состояла из незначительного количества газов, слабо поглощаемых земными породами (азота, аммиака и инертных газов).

По мнению ученых, в дальнейшем увеличение газовой оболочки происходило за счет вулканических процессов, интенсивно протекавших на Земле в течение первого миллиарда лет ее существования.

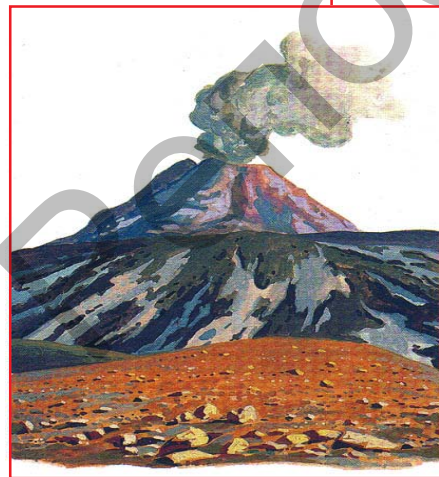
Развитию активной вулканической деятельности способствовал разогрев земных недр, который в значительной степени происходил за счет энергии, выделяющейся при распаде радионуклидов, которые вошли в состав планетного вещества.

Процессы радиоактивного распада неустойчивых нуклидов протекали на протяжении всей истории существования Земли. Продолжаются они и сейчас, частично компенсируя тепловые потери планеты. Выделение радиогенного тепла, в основном, связывают с радиоактивным распадом  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{40}\text{K}$ . В прошлом (3,5–4,0 млрд. лет назад), когда содержание радионуклидов на Земле было значительно выше, планета получала гораздо больше радиогенного тепла.

Активная вулканическая деятельность сопровождалась выделением из недр планеты газообразных веществ, в состав которых входили: водяной пар, оксид и диоксид углерода, метан, аммиак, кислотные пары (сероводород, диоксид серы, галогеноводороды), инертные и другие газы, которые и формировали первичную атмосферу Земли.



**Активная вулканическая деятельность способствовала формированию первичной атмосферы Земли**



Вначале древняя атмосфера Земли была относительно тонкой. Однако по мере развития вулканической деятельности масса газовой оболочки планеты постепенно увеличивалась.

Полагают, что 3,5–4,0 млрд. лет назад температура у земной поверхности была близка к *температуре лучистого равновесия* — такого состояния, когда поток солнечного излучения, поглощаемого земной поверхностью, был равен потоку излучения, отражаемого поверхностью планеты. Если считать, что отражательная способность Земли была такой же, как в настоящее время, то температура лучистого равновесия на планете, в среднем, составляла 288 К. По мнению некоторых ученых, из-за парникового эффекта, создаваемого аммиаком, который в заметных количествах мог присутствовать в древней атмосфере, температура могла быть и выше.

В любом случае, в сложившихся условиях водяной пар вулканических газов мог конденсироваться и превращаться в жидкую воду, из которой формировалась гидросфера Земли.

Вулканические газы растворялись в водах первичного океана. Легкие газы (гелий и, частично, водород) поднимались вверх и, слабо удерживаемые гравитационным полем Земли, рассеивались в космическом пространстве.

Таким образом, 3,5–4,0 млрд. лет назад формирующаяся тонкая атмосфера Земли пропускала практически весь спектр космического излучения до поверхности суши и океана.

В этот же период в процессе активной вулканической деятельности из земных недр на поверхность выбрасывались вещества, обогащенные тяжелыми радиоактивными элементами.

В результате, у поверхности Земли сохранялся высокий уровень радиационного фона, значительно превосходивший современный уровень.

### **Кислород в атмосфере Земли**

В древней атмосфере практически отсутствовал *молекулярный кислород*. В небольшом количестве он мог получаться при разложении молекул воды, входивших в состав водяного пара, под действием высокоэнергетической части космического излучения. Однако весь образующийся кислород быстро расходовался на окисление метана, оксида углерода, аммиака и сероводорода.

Кислород, O<sub>2</sub>

Содержание молекулярного кислорода ( $O_2$ ) в древней атмосфере (даже с учетом возможной фотодиссоциации водяного пара) не превышало 0,001 современного содержания  $O_2$  в атмосфере Земли.

Озон,  $O_3$

*Молекулярный кислород* в заметном количестве появился в атмосфере лишь около 3,4 млрд. лет назад в результате деятельности особых микроорганизмов, способных к фотосинтезу — цианобактерий.

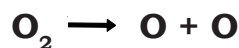
Первые количества кислорода, полученные при фотосинтезе, окисляли атмосферные газы и породы земной коры. При этом аммиак окислялся до молекулярного азота, который стал основным компонентом современной атмосферы. С появлением и повсеместным распространением зеленых фотосинтезирующих бактерий содержание свободного кислорода постепенно увеличивалось, что способствовало возникновению и увеличению численности живых существ, которые использовали его для дыхания.

Примерно 600 млн. лет назад количество свободного кислорода в земной атмосфере достигло 1 % современного уровня.

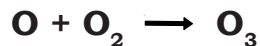
*Кислород стал важным компонентом атмосферного воздуха. С ним связаны дальнейшие основные биологические и многие геохимические процессы, происходившие на Земле.*

Примерно 400 млн. лет назад содержание кислорода в атмосфере достигло 10 % современного уровня и стало возможным образование *озонового слоя*.

В верхних слоях атмосферы Земли на высоте от 30 до 90 км под действием ультрафиолетового излучения двухатомные молекулы кислорода способны распадаться на атомы:



Атомарный кислород, отличающийся высокой реакционной способностью, может взаимодействовать с двухатомными молекулами кислорода с образованием озона:



*По мере накопления в атмосфере Земли молекулярного кислорода ( $O_2$ ) формировался и озоновый слой, в состав которого входили трехатомные молекулы озона ( $O_3$ ). Молекулы озона способны поглощать «жесткую» компоненту ультрафиолетового излучения Солнца с длиной волны менее 210 нм, которая способна ионизировать вещество и губительна для живых организмов.*

При поглощении коротковолновой части ультрафиолетового излучения молекулами озона процесс идет



в обратном направлении, и часть молекул озона распадается:



Увеличение содержания молекулярного кислорода ( $\text{O}_2$ ) в атмосфере Земли до современного уровня происходило за счет бурного протекания *процесса фотосинтеза* в гигантских лесах, существовавших, по мнению ученых, примерно 350 млн. лет назад.

Постепенно установилось равновесие между процессами образования и поглощения кислорода ( $\text{O}_2$ ), и его содержание в атмосфере стабилизировалось. Со временем установилось также равновесие между процессами образования и разрушения молекул озона, и в атмосфере Земли сформировался устойчивый *озоновый слой*.

В результате создания плотного слоя атмосферы с озоновым слоем радиационный фон у поверхности Земли значительно уменьшился.

*На протяжении последних 500 тыс. лет состав атмосферы существенно не менялся.*

На современном этапе истории Земли объемная доля молекулярного кислорода в воздухе тропосферы (наиболее плотном слое воздуха, прилегающем к земной поверхности), составляет примерно 21 %.

### **Изменения радиационного фона под влиянием антропогенных факторов**

Наряду с природными источниками радиации космического и земного происхождения, существование которых не зависит от человека, на определенном этапе развития цивилизации начались изменения радиационного фона, связанные с деятельностью людей.

Рассмотрим, в какой мере крупнейшие изменения, связанные с характером деятельности и условиями жизни людей, повлияли на величину радиационного фона у поверхности нашей планеты.

Одно из крупнейших экологических изменений на Земле связано с *переходом людей от охоты, рыболовства и сбора природных плодов для пропитания к земледелию*. Этот процесс сопровождался вырубкой лесов и обработкой почвы на больших территориях. Известно, что содержание природных радионуклидов в земной коре и ее верхнем почвенном слое с глубиной возрастает.

*Тропосфера* — самый нижний, прилегающий к земной поверхности слой атмосферы, простирающийся, в среднем, до высоты 10 км над полюсами и до высоты 16–18 км над экватором.

*Современный состав сухого воздуха вблизи уровня моря:*

$\text{N}_2$  — 78,084 %

$\text{O}_2$  — 20,948 %

$\text{Ar}$  — 0,934 %

$\text{CO}_2$  — 0,033 %

$\text{Ne}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{Kr}$ ,  $\text{Xe}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и др. — 0,001 % от содержания всех молекул газа в атмосфере Земли.

Любые изменения в природной среде, связанные деятельностью человека, называют **антропогенными**. («*Antropos*» в переводе с латинского означает «человек».)



**Земледелие и добыча полезных ископаемых практически не привели к увеличению радиационного фона у поверхности Земли.**



Поэтому выкорчевывание деревьев, распаивание земель и другие виды деятельности, связанные с обработкой почвы, могли привести к увеличению содержания природных радионуклидов у поверхности Земли и повышению радиационного фона, хотя и в незначительной степени.

Второе важное экологическое изменение связано с бурным развитием промышленности, которое сопровождалось значительным *увеличением масштабов добычи полезных ископаемых из земных недр*. Добыча полезных ископаемых и широкомасштабное строительство промышленных и коммуникационных сооружений были связаны с выносом значительных количеств пород на поверхность планеты. Это также способствовало небольшому локальному увеличению концентрации природных радионуклидов у поверхности Земли, но не могло существенно изменить величину радиационного фона.

В результате переработки некоторых видов природных ископаемых и производственной деятельности человека появляются вещества, которые содержат естественные радионуклиды в более высоких концентрациях, чем в природных материалах.

Минеральные удобрения (например, калийные и фосфорные), применяемые в сельском хозяйстве для повышения урожайности растительных культур, и органическое топливо (каменный и бурый уголь, торф, мазут и т. п.), используемое для получения тепловой и электрической энергии, содержат радионуклиды естественного происхождения. Это могут быть члены естественных радиоактивных семейств (в основном  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ),  $^{40}\text{K}$  и другие радионуклиды.

Изъятые из природной среды минеральное сырье подвергается переработке с целью повышения содержания в нем необходимых растениям питательных веществ (например, калия или фосфора). В процессе переработки и обогащения минерального сырья происходит концентрирование атомов определенного химического элемента, в том числе и естественных радиоактивных изотопов этого элемента. Скопление в местах хранения значительных количеств таких удобрений (например, калийных, фосфорных) превращает их в местные слабые источники ионизирующего излучения.

Развитие теплоэлектроэнергетики также внесло свой вклад в перераспределение природных радионуклидов в окружающей среде и привело небольшому локальному

изменению радиационного фона в окрестностях теплоэлектростанций. При сжигании каменного или бурого угля на теплоэлектростанциях также происходит концентрирование природных радионуклидов. Основная часть радионуклидов остается в шлаке и золе. Вместе с летучими продуктами горения и зольной пылью эти радионуклиды через трубы теплоэлектростанций могут попадать в атмосферу, а затем оседать на земную поверхность, превращаясь в дополнительные слабые источники облучения местных жителей.

Появление радионуклидов, полученных в искусственных условиях, оказало наиболее значительное влияние на изменение радиационного фона, обусловленное деятельностью людей.

### **Испытания ядерного и термоядерного оружия**

В XX столетии заметные изменения радиационного фона произошли в результате испытаний ядерного и термоядерного оружия.

При взрыве ядерных боеприпасов в цепной реакции деления тяжелых радиоактивных элементов ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и др.) или в реакциях термоядерного синтеза (например, синтеза ядер трития из ядер дейтерия) выделяется огромная энергия, которая может быть использована в военных целях.

Результатом взрыва любого вида ядерного оружия является *загрязнение местности радионуклидами*.

Во время наземных испытаний ядерного оружия в результате взрыва радиоактивные вещества попадают, в основном, в нижнюю часть атмосферы — *тропосферу*. В состав продуктов взрыва входят радионуклиды с периодами полураспада от долей секунды до десятков и многих сотен лет. Радионуклиды, не успевшие подвергнуться радиоактивному распаду, постепенно выпадают на земную поверхность, загрязняя ее.

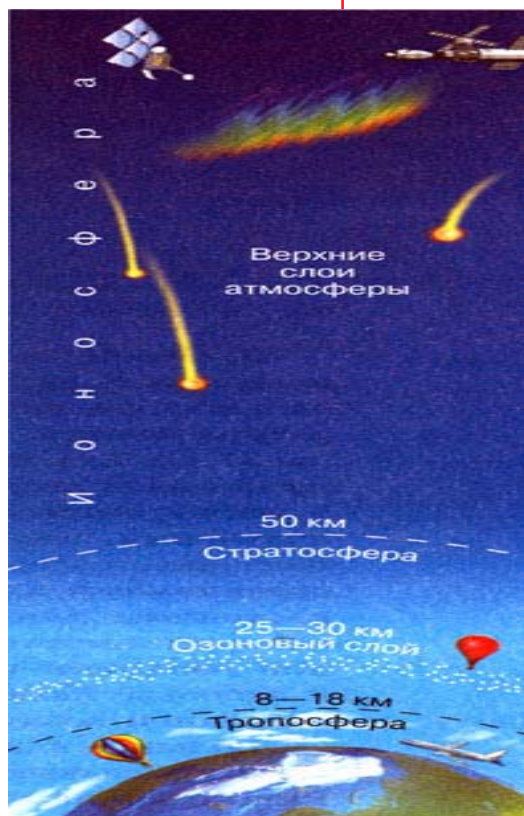
При проведении испытаний в *атмосфере*, особенно высоко над Землей, значительная часть радиоактивных продуктов, образующихся при ядерном взрыве, попадает в *стратосферу*, расположенную над *тропосферой*. В стратосфере радиоактивные вещества могут оставаться многие месяцы, медленно поступая в нижние слои атмосферы и постепенно оседая на поверхность Земли. Они рассеиваются практически по всей поверхности земного шара, и радиоактивное загрязнение приобретает *глобальный характер*. Вот почему подобные радиоактивные выпадения называют **глобальными**.

До сих пор в окружающей среде присутствуют радионуклиды, оставшиеся от испытаний ядерного оружия прошлых лет.



*Стратосфера* — это слой атмосферы, расположенный на высоте 10–50 км над поверхностью Земли.

«Глобальный» — означает «относящийся к территории всего земного шара».



Испытания ядерного оружия начались в 1945 году. Максимальное поступление радионуклидов в окружающую среду было зарегистрировано в 1961–1962 годах в результате взрывов в атмосфере бомб общей мощностью 340 Мт. В 1963 году *среднегодовая коллективная эффективная доза*, полученная жителями Земли в результате проведения ядерных испытаний в атмосфере, составляла около 7 % дозы облучения от всех источников ионизирующего излучения естественного происхождения. В этот период *средняя индивидуальная доза* облучения людей от испытания ядерного оружия превышала 0,1 мЗв в год.

Позднее, после подписания в 1963 году **Договора об ограничении испытаний ядерного оружия**, обязывающего участников соглашения *не проводить подобные испытания* в атмосфере, под водой и в космическом пространстве, поступление радионуклидов в окружающую среду значительно сократилось. К началу 80-х годов XX века *коллективная эффективная доза* облучения населения Земли от радионуклидов бомбового происхождения уменьшилась в 7 раз по сравнению с 1963 годом и составляла уже лишь 1 % дозы, получаемой людьми от всех природных источников ионизирующего излучения.

До сих пор повсеместно в окружающей среде присутствуют радионуклиды, оставшиеся от атмосферных испытаний ядерного оружия в прошлые годы. В настоящее время среди них наибольший вклад в облучение человека вносят  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . *Индивидуальная эффективная доза* облучения жителей Земли от этих радионуклидов составляет, в среднем, 0,005 мЗв в год, что соответствует примерно 0,2 % дозы, получаемой от всех естественных источников ионизирующего излучения, которая составляет 2,4 мЗв в год.

До сих пор повсеместно в окружающей среде присутствуют радионуклиды, оставшиеся от атмосферных испытаний ядерного оружия в прошлые годы. В настоящее время среди них наибольший вклад в облучение человека вносят  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . *Индивидуальная эффективная доза* облучения жителей Земли от этих радионуклидов составляет, в среднем, 0,005 мЗв в год, что соответствует примерно 0,2 % дозы, получаемой от всех естественных источников ионизирующего излучения, которая составляет 2,4 мЗв в год.

### **Атомная энергетика**

Зарождение и развитие атомной энергетики не могло ни сказаться на величине радиационного фона. Атомные станции позволяют получать электрическую энергию и тепло в тех местах, где нет других источников энергии. Они являются частью *ядерного топливного цикла*, который начинается с добычи и обогащения

урановой руды и заканчивается захоронением радиоактивных отходов. На всех этапах ядерного топливного цикла, включая добычу урана и его обогащение, изготовление ядерного топлива, работу ядерных реакторов, регенерацию топлива, хранение и захоронение радиоактивных отходов, может происходить увеличение содержания радионуклидов в окружающей среде и увеличение радиационного фона в местах расположения соответствующих предприятий.

Нормально работающие предприятия ядерного топливного цикла, в том числе атомные электростанции, практически не загрязняют окружающую среду. В целом, за исключением крупных аварий, таких как Чернобыльская, они вносят совсем небольшой вклад в формирование индивидуальной дозы облучения людей (в среднем, 0,0002 мЗв в год, что составляет 0,01 % дозы от источников ионизирующих излучений природного происхождения).

При ядерных авариях количество радиоактивных веществ, поступающих в окружающую среду, может оказаться значительно больше. В этом случае дозы облучения населения заметно возрастают.

### ***Другие источники искусственного происхождения***

К другим источникам ионизирующего излучения, влияющим на величину радиационного фона, относятся промышленные источники. Промышленные источники радиации, предназначенные для мирных целей, лишь в незначительной степени способствуют повышению радиационного фона.

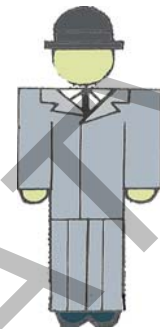
В целом, по оценкам МАГАТЭ, максимальные дозы облучения людей (включая персонал, работающий с источниками излучения невоенного назначения) от попадания радионуклидов искусственного происхождения в окружающую среду не превышают 0,14 мЗв в год, что составляет менее 6 % дозы облучения от природных источников.

### ***Состав атмосферы***

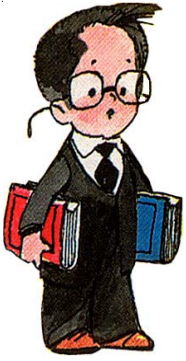
Во второй половине прошлого века наметились тенденции к изменению в составе воздушной оболочки планеты, которые, как полагают многие ученые, обусловлены деятельностью человека и могут повлиять на способность атмосферы защищать поверхность Земли от действия космического излучения.

В последние годы отмечается тенденция к снижению содержания озона в верхних слоях атмосферы. Такое

Среднегодовая индивидуальная эффективная доза жителей Земли — **2,8 мЗв**



Природные источники ионизирующего излучения — **2,4 мЗв в год**  
антропогенные источники — **0,4 мЗв в год**



снижение может уменьшить поглощение атмосферой коротковолновой части ультрафиолетового излучения и привести к неблагоприятным последствиям.

По оценкам специалистов, уменьшение содержания озона всего на 1 % может вызвать увеличение интенсивности ультрафиолетового излучения у поверхности Земли на 15 %. По официальным данным Организации Объединенных Наций (ООН), это может привести к дополнительным случаям заболевания жителей Земли катарактой и раком кожи.

Итак,

В этой главе Вы узнали, что естественный радиационный фон у поверхности Земли формируют:

- космическое излучение, достигающее поверхности Земли,
- излучение радионуклидов земной коры.

Вы проследили за эволюцией радиационного фона Земли на протяжении геологической истории планеты. Снижение радиоактивного фона в результате образования атмосферы стало важным условием развития жизни на Земле. На определенном этапе развития цивилизации началось антропогенное возрастание радиационного фона, связанное с деятельностью людей.

В настоящее время *среднегодовая индивидуальная эффективная доза* жителей Земли от всех естественных и антропогенных источников излучения составляет в среднем 2,8 мЗв. Она включает:

- 2,4 мЗв — от *природных* источников,
- 0,4 мЗв — от *антропогенных* источников ионизирующего излучения.

В случае *антропогенных* источников:

- 0,005 мЗв — от испытаний ядерного оружия в атмосфере;
- 0,0002 мЗв — от деятельности предприятий ядерной энергетики;
- остальная часть дозы облучения (примерно 0,4 мЗв) обусловлена медицинскими источниками.

Дополнительная доза облучения жителей Земли в результате проведения испытаний ядерного оружия и деятельности предприятий ядерной энергетики составляет в среднем 0,2 % дозы от всех источников ионизирующего излучения природного происхождения.

В следующей главе Вы познакомитесь подробнее с действием ионизирующих излучений на биологические объекты, путями проникновения радионуклидов

в организм человека и их распределением внутри организма. Узнаете о том, какие опасности подстерегают человека при воздействии излучения радионуклидов на его организм. Это поможет Вам оценить реальную опасность облучения и понять, как собственными силами можно уменьшить радиационный риск.

### Вопросы для самоконтроля и обсуждения:

1. Как формируется естественный радиационный фон той или иной местности на Земле?
2. Что такое космическое излучение и какова его роль в формировании радиационного фона на поверхности Земли?
3. Что такое *первичное* и *вторичное* космическое излучение?
4. Что Вы понимаете под радиационным фоном земной коры?
5. Какие изменения радиационного фона на поверхности планеты связаны с деятельностью человека?
6. Приведите примеры искусственных источников ионизирующего излучения.
7. Почему тепловые электростанции, работающие на природном органическом топливе, являются источниками локального загрязнения радионуклидами окружающей среды?
8. Какие источники ионизирующего излучения вносят основной вклад в индивидуальную дозу облучения жителей Земли?
9. Какой вклад в формирование эффективной дозы облучения населения Земли вносят искусственные источники ионизирующего излучения, используемые в мирных целях?
10. Почему опасно проведение испытаний ядерного оружия в атмосфере?



**Ключевые слова и словосочетания:** биологические молекулы, радиочувствительность, критический орган, коэффициент всасывания, эффективный период полувыведения, кратность накопления радионуклидов, радиационная безопасность, радиационное нормирование

С момента зарождения жизни и до появления человека космическое излучение и излучение радионуклидов земной коры играли важную роль в биологической эволюции Земли. Энергия излучения, поступающего на Землю из Космоса, поддерживала и продолжает поддерживать биологический круговорот вещества и обеспечивает функционирование биосферы.

Ионизирующие излучения способны вызывать нарушения в клетках живых организмов. Однако в течение многих миллионов лет в ходе эволюции живые организмы адаптировались (приспособились) к естественным излучениям.

Деятельность человека привела к загрязнению окружающей среды радионуклидами искусственного происхождения, что способствовало увеличению вероятности возникновения радиационных эффектов в живых организмах. Нарушения, возникающие в клетках, биологических тканях или органах, системах органов и организме человека в целом, зависят от дозы и характера облучения.

С целью уменьшения негативных последствий облучения принимаются меры по снижению доз облучения людей путем введения норм на содержание радионуклидов в продуктах питания, питьевой воде, воздухе, строительных и других материалах.

Изучив главу... Вы узнаете, какую роль сыграли излучения в возникновении и поддержании жизни на Земле, познакомитесь с действием ионизирующих излучений на важнейшие биологические молекулы, клетки, ткани, органы, системы органов и организм человека в целом. Узнаете, какие параметры используют для оценки дозы внутреннего облучения людей, по величине которой можно судить об опасности облучения от радионуклидов при их попадании в организм.



### 5.1. Роль излучений в зарождении и поддержании жизни на Земле

Около четырех миллиардов лет тому назад на Земле появилась качественно новая форма организации материи под названием «жизнь», которая обладает рядом удивительных свойств. До сих пор феномен происхождения жизни до конца не разгадан. Тем не менее, существует множество гипотез возникновения жизни на нашей планете.

В настоящем разделе мы не задавались целью рассмотреть все существующие гипотезы происхождения жизни. Они обсуждаются во многих литературных источниках. Мы не будем касаться здесь и религиозных воззрений, хотя исторически они были первыми гипотезами о происхождении жизни.

В учебном пособии для 11 класса по курсу «Общая биология» под редакцией Н.Д. Лисова подробно рассмотрены наиболее известные гипотезы возникновения жизни, а также основные этапы эволюции растительного и животного мира.



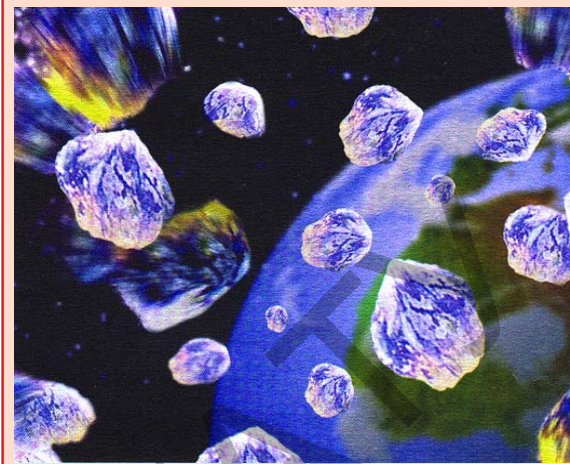
Мы постараемся показать, что излучение, поступающее на Землю из Космоса (в первую очередь, от ближайшей к нам звезды — Солнца), и излучение радионуклидов земного вещества являются важным фактором поддержания жизни на нашей планете, даже если бы она была занесена на Землю из других миров.

Постепенно, по мере накопления знаний об окружающем мире и развития научного мировоззрения, менялись взгляды на происхождение жизни, выдвигались новые научные гипотезы. Среди них наиболее известны:

- гипотеза *самозарождения* (жизнь возникла из неживого вещества самопроизвольно);
- гипотеза *стационарного состояния* (жизнь существовала всегда);
- гипотеза *панспермии* (жизнь занесена на Землю с других планет);
- *биохимическая гипотеза* (жизнь возникла в условиях Земли в результате биохимической эволюции, т. е. в результате развития процессов, подчиняющихся физическим, химическим и другим законам природы).

Среди гипотез происхождения жизни особое внимание привлекает *биохимическая гипотеза*, выдвинутая академиком А.И. Опариным в 1924 году. Ученый полагал, что определяющую роль в возникновении живой материи сыграли белковые молекулы. А.И. Опарину принадлежит и идея о возникновении биологически важных соединений (белков, нуклеиновых кислот, полисахаридов, жиров) абиогенным путем, то есть в результате химических процессов, некогда протекавших в неживой природе. Химическая эволюция — переход от простых веществ к более сложным веществам, по мнению А.И. Опарина, предшествовала биологической эволюции. Без химической эволюции вряд ли стало бы возможным появление жизни на Земле.

Ученые разных стран искали подтверждение этой гипотезе. Они пытались воспроизвести те процессы, которые могли происходить на нашей планете миллиарды лет назад и доказать возможность синтеза



Одна из гипотез о происхождении жизни на нашей планете предполагает, что ее занесли метеориты, которые упали на Землю миллиарды лет назад.

По мнению английского ученого Д. Бернала, первичные соединения углерода, из которых впоследствии образовались биополимеры, попали на Землю в составе метеоритов. Такие утверждения основываются на том, что в некоторых метеоритах найдены органические молекулы.

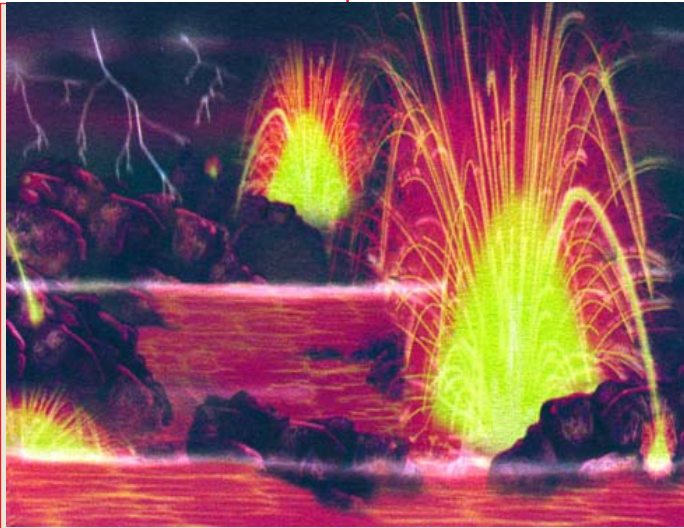
Однако эти гипотезы не объясняют, как возникла жизнь, и лишь указывают, как она могла быть принесена на Землю.



Академик А.И. Опарин  
(1894–1980)

биополимеров в условиях древней Земли. Исследователи опирались на накопленные знания о составе формировавшихся в этот период земных геосфер — земной коры, древней атмосферы, гидросферы.

Активные процессы, протекавшие в земных недрах, сопровождались разломами земной коры и извержениями вулканов, что приводило к выносу огромного количества различных веществ (в том числе и радиоактивных) на поверхность планеты.



Хаотичный вид Земли в начале ее существования

В прилетавших на Землю из Космоса метеоритах, болидах и других космических телах, наряду со стабильными изотопами элементов, присутствовали и радиоактивные.

Многие естественные радионуклиды с периодами полураспада более  $10^8$  лет (например,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) и ныне присутствуют на Земле. Радионуклиды с периодами полураспада менее  $10^8$  лет ( $^{26}\text{Al}$ ,  $^{107}\text{Pd}$  и др.) распались, и сейчас на Земле их не обнаруживают.

В первичной атмосфере Земли практически отсутствовал кислород, однако содержались аммиак, метан, водород, водяные пары и другие газы. Мощное космическое излучение (солнечное и галактическое) падало на незащищенную плотной атмосферой поверхность Земли. Очевидно, что на поверхности древней Земли не было места, свободного от излучения.

Как же могли образоваться биополимеры в условиях первобытной Земли?

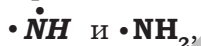
Полагают, что в процессе образования биополимеров важную роль сыграло излучение. Основными источниками энергии для осуществления химических реакций при образовании биополимеров могли быть:

- космическое излучение;
- ионизирующее излучение, сопровождавшее распад радионуклидов, присутствовавших в земных породах.

Источниками энергии могли быть и электрические разряды в первичной атмосфере Земли.

Эксперименты с воздействием разного рода излучений и электрических разрядов на простейшие неорганические и органические вещества показали, что облучение может приводить к образованию радикалов.

Исследования ученых показали, что, например, аммиак под действием излучения с длиной волны 159–170 нм образует радикалы,



а из метана под действием электрического разряда могут образоваться радикалы.



Свободные радикалы были обнаружены также и в углистых метеоритах.

Свободные радикалы — атомы, или атомные группировки, обладающие неспаренными электронами, отличаются высокой химической активностью и способствуют синтезу биологических молекул и биополимеров.

Интересны опыты М. Кальвина, показавшего, какую роль может играть ионизирующее излучение в синтезе биополимеров. Он облучал смесь аммиака, метана и водорода потоком бета-частиц. Нечто подобное, по его мнению, могло происходить и в древние времена. Источником бета-частиц в земной коре мог быть радиоактивный калий ( $^{40}\text{K}$ ), который является одним из самых распространенных естественных бета-излучателей земной коры. Его содержание на Земле миллиарды лет назад было значительно выше, чем сейчас.

В опытах М. Кальвина и его сотрудников было получено множество соединений, среди которых были и аминокислоты. Эти эксперименты показали, что еще в добиологический период в ходе химической эволюции аминокислоты могли получаться в результате химических процессов, вполне реальных для условий первобытной Земли.

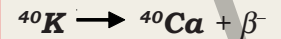
Подобные опыты с использованием энергии искрового электрического разряда, ультрафиолетового и других видов излучения проводили С. Фокс, С. Миллер, А.Г. Пасынский и другие исследователи.

По предположению С. Фокса, образующиеся в природе аминокислоты в дальнейшем, при небольшом нагревании за счет вулканического тепла или других источников тепловой энергии, могли превращаться в полипептиды, давая начало процессу синтеза белковоподобных веществ.

С. Фокс получил экспериментальное подтверждение своих предположений. Нагревая смесь аминокислот в сосуде, сделанном из остывшей вулканической лавы, он обнаружил продукты конденсации аминокислот — вещества, аналогичные белкам. Эти соединения назвали протеноидами.

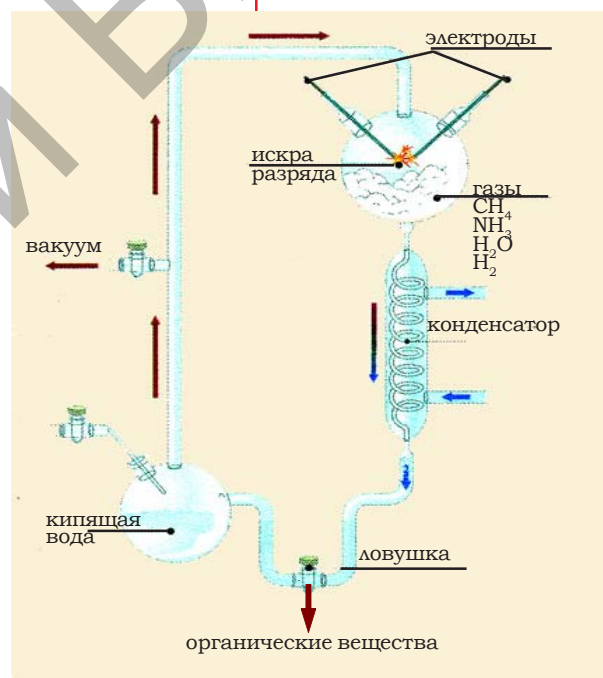
Выяснилось, что протеноиды способны образовывать замкнутые полости и формировать двухслойные оболочки, напоминающие мембраны современных клеток. Отдельные молекулы протеноидов могли соединяться и образовывать цепочки.

### Бета-распад $^{40}\text{K}$ :



$$T_{1/2}(^{40}\text{K}) = 1,28 \cdot 10^9 \text{ лет}$$

### Эксперимент Стенли Миллера



Согласно современным представлениям, в **химической эволюции**, которая предшествовала биологической эволюции, можно выделить следующие стадии образования веществ:

простейшие неорганические и органические вещества ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ )

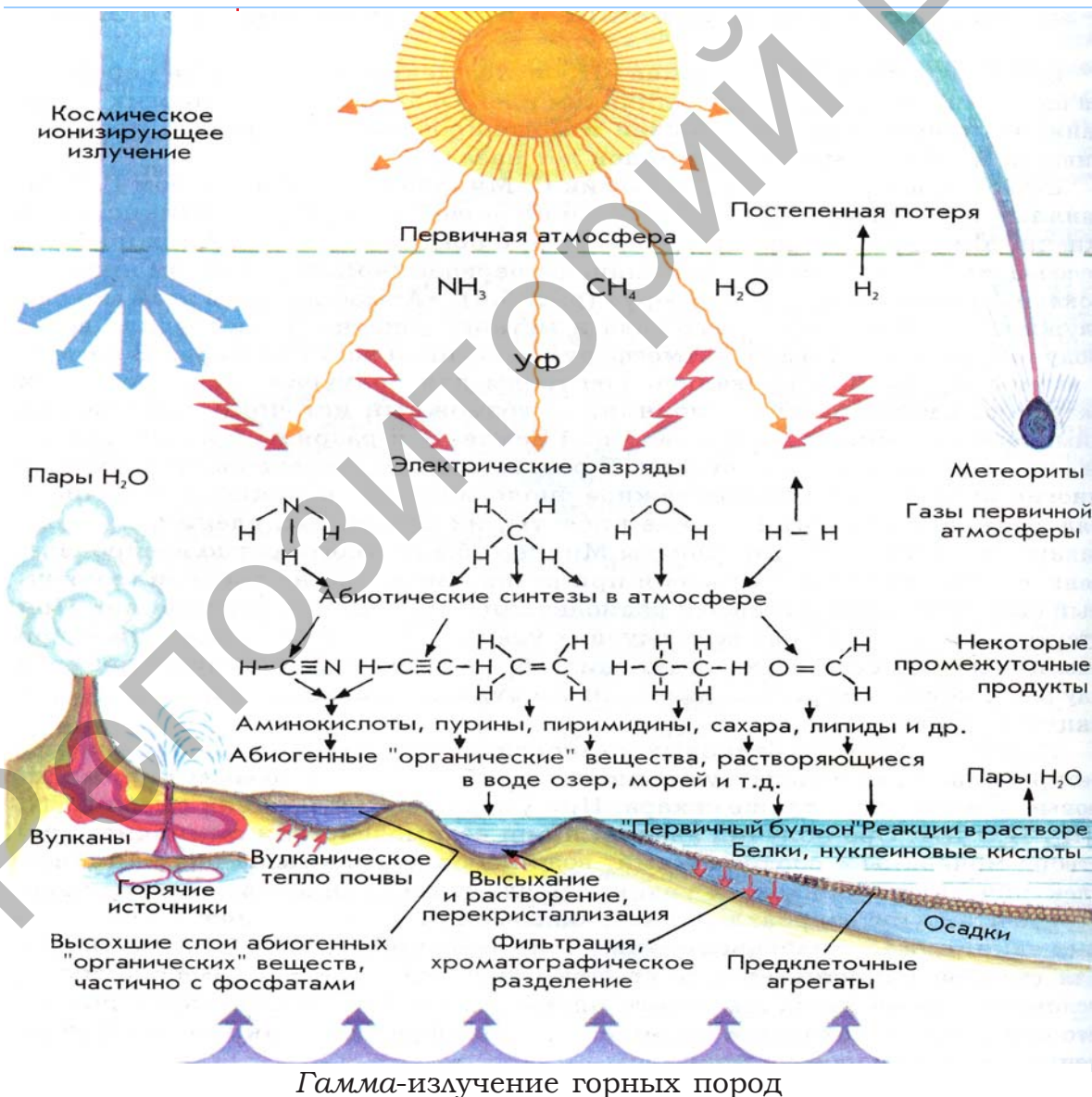
аминокислоты, карбоновые кислоты, моносахариды

белки, нуклеотиды, полисахариды

надмолекулярные системы биополимеров

Отсутствие в атмосфере первобытной Земли кислорода (восстановительная среда) было, вероятно, необходимым условием образования биополимеров.

Более подробно эти стадии представлены на знакомом многим рисунке «Возможности химической эволюции на первобытной Земле»\*.



\* См. [96] Приложение 3.

Появившиеся в условиях древней Земли биополимеры явились «исходным материалом» при образовании первичных форм живых организмов.

По мнению ученых, жизнь на Земле зародилась на дне мелких теплых морей. Первичные организмы могли появиться только в воде, поскольку

- водная среда не разрушала попадавшие в нее биополимеры;
- при отсутствии плотного слоя атмосферы только в водной среде первичные организмы были защищены от губительного для всего живого космического излучения высоких энергий.



Особая роль воды для живых организмов заключается еще и в том, что

- все ткани и клетки живых организмов включают воду;
- большинство биохимических и биофизических процессов обмена веществ может протекать в живых организмах лишь при наличии воды, растворяющей минеральные и органические вещества, в том числе и газообразные.

Первичные организмы дали начало более сложным организмам, а те, в свою очередь, — еще более сложным.

Эволюция жизни на Земле происходила в условиях постоянного влияния разнообразных факторов окружающей среды (температура, влажность, газовый режим и др.). Среди множества физических и химических параметров внешней среды особую роль играл *энергетический фактор*.

Для возникновения и поддержания жизни на Земле необходимо не только наличие определенных химических веществ и физических условий (температура, давление и др.), но и существование *источника энергии* на протяжении безграничного, по человеческим меркам, промежутка времени. Поступление необходимого количества энергии обеспечивает в основном *солнечное излучение*, хотя определенную роль играет и излучение, сопровождающее распад радионуклидов земных пород, и излучение, поступающее из космоса.



Эти излучения, в особенности солнечное, играли важную роль на всех стадиях биологической эволюции. Отметим лишь те этапы эволюции жизни на Земле, где их роль проявилась в наибольшей степени:

1. Важным этапом эволюции явилось *появление организмов, способных к фотосинтезу*.

Первичные организмы, появившиеся на Земле, питались готовыми органическими веществами либо

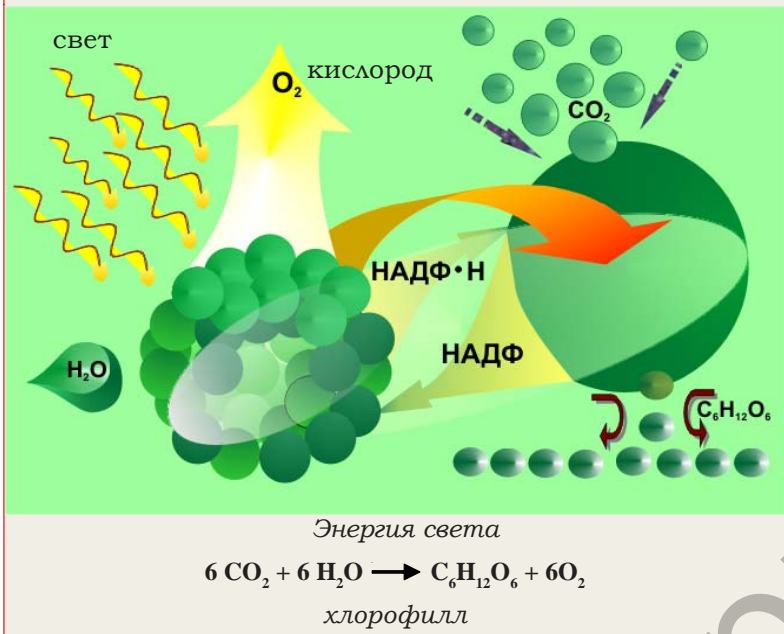
Жизнь на Земле зародилась в воде

Может быть, такими были первобытные леса?

другими организмами. С течением времени некоторые организмы приобрели способность синтезировать питательные вещества из неорганических соединений под действием ультрафиолетового излучения Солнца (*фотосинтез*). В результате, уменьшилась конкуренция живых организмов за природные источники питательных веществ.

2. Следующий важный этап связан с *усовершенствованием в ходе эволюции фотосинтетического аппарата у растительных организмов*.

Схема процесса фотосинтеза:



Развитие способности синтезировать органические продукты из диоксида углерода и воды под действием *солнечного излучения*, поглощаемого растительными пигментами, ознаменовало начало совершенно нового этапа в эволюции форм жизни на Земле.

3. С появлением растительных организмов, активно использующих энергию солнечного излучения для синтеза органических веществ, *началось обога-*

*щение атмосферы кислородом*. Резко изменились условия питания организмов, появились новые виды организмов, у которых обмен веществ стал протекать с участием кислорода.

4. Увеличение содержания свободного кислорода в атмосфере до 1 % современного уровня (так называемая точка Пастера) привело к настоящему биологическому взрыву — массовому распространению разнообразных видов живых организмов. Растительные организмы, осуществляющие синтез первичной биологической продукции с *использованием энергии солнечного излучения*, впервые появившись в воде, стали проникать и на сушу. Однако одним из препятствий завоевания живыми организмами суши являлось отсутствие в атмосфере защитного озонового слоя.

5. Накопление свободного кислорода ( $\text{O}_2$ ) в атмосфере до 10 % современного уровня и образование озона ( $\text{O}_3$ ) в верхней части атмосферы способствовали формированию озонового слоя. Этот слой надежно защитил земную поверхность от ультрафиолетового излучения высоких энергий. Образование озонового слоя вместе с приобретением в процессе

В фотосинтезе выделяют две основные стадии: световую и темновую.

В световой фазе энергия солнечного света, поглощенная хлорофиллом, используется для разложения воды на водород и кислород.

**Кислород** выделяется в атмосферу. Водород идет на восстановление НАДФ — сложной органической молекулы, которая служит переносчиком активированного водорода в форме НАДФ·Н.

Энергия света запасается в НАДФ·Н и молекуле АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты).

В темновой фазе образовавшиеся соединения АТФ и НАДФ·Н и запасенная в них энергия используются, в основном, для синтеза углеводов ( $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ ) из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

В хлоропластах синтезируются также аминокислоты, белки, липиды и другие соединения.

эволюции живыми организмами необходимых органов и свойств (например, формирование легких, возникновение семени, появление способности к внутреннему оплодотворению и др.) явилось предпосылкой для беспрепятственного выхода организмов на сушу. Защищая наземные организмы от губительной части ультрафиолетового излучения, поступающего из Космоса, озоновый слой способствовал формированию наземной флоры и фауны.

По мере развития планеты условия на Земле менялись. Появлялись и исчезали горы, возникали новые моря и океаны, изменялись температура и состав атмосферного воздуха. Однако постоянно существовали природные источники как неионизирующего, так и ионизирующего излучения.

На всех этапах эволюции жизни на Земле живые организмы подвергались воздействию излучения, поступавшего из Космоса, и излучения естественных радионуклидов, присутствовавших в окружающей среде.

Как мы увидим в следующих разделах, ионизирующее излучение способно повреждать определенные участки клеток живых организмов, ответственных за передачу наследуемых признаков (генетической информации). Необратимые изменения в клетках могут приводить к гибели организма или к его изменению и приспособлению к условиям существования.

В среде с определенным уровнем естественного радиационного фона у организмов в ходе эволюции постепенно вырабатывалась совокупность морфофизиологических, поведенческих, популяционных и других особенностей, обеспечивающих возможность их существования в специфических условиях обитания. В клетках живых организмов выработались механизмы защиты от естественного ионизирующего излучения, и клетки нормально функционировали в условиях постоянного воздействия такого излучения. Из популяций постепенно исчезали особи, наименее приспособленные к постоянному действию излучения, существующего в среде их обитания. У выживших организмов появлялись признаки устойчивости к действию естественной радиации, передающиеся по наследству. В результате, живые организмы постепенно адаптировались (приспособились) к естественному ионизирующему излучению, присутствующему в среде их обитания.



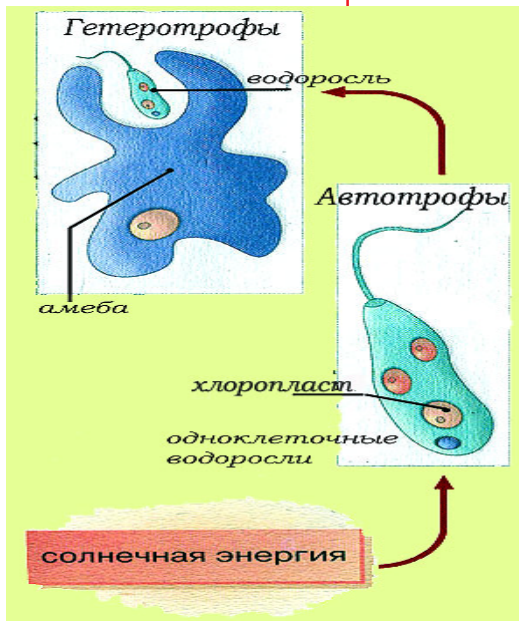
Так мог выглядеть один из древних ландшафтов

Радиоадаптация

*Радиоадаптация* — это выработка у живых организмов в процессе эволюции морфофизиологических, поведенческих, популяционных и других особенностей, обеспечивающих возможность их существования в условиях постоянного действия ионизирующего излучения, свойственного среде их обитания.

Одним из важнейших условий, необходимых для поддержания жизни на нашей планете, является постоянное перераспределение и преобразование вещества и энергии в биосфере Земли. Важнейшую роль в этих процессах играет жизнедеятельность различных видов живых организмов.

**Автотрофы и гетеротрофы**



Можно выделить две основные группы организмов, возникших в процессе эволюции:

- **автотрофы** (большинство зеленых растений, ряд микроорганизмов);
- **гетеротрофы** (небольшая часть растений и микроорганизмов, животные, человек).

*Автотрофы* существуют за счет синтезированных ими же органических веществ и обеспечивают пищей все остальные живые организмы планеты.

*Гетеротрофы* извлекают необходимую им энергию из готовых органических веществ, поступающих с пищей. Продукты их дыхания —

углекислый газ и вода могут вновь использоваться растительными организмами. В результате, в биосфере постоянно осуществляется круговорот вещества.

*Биологический круговорот вещества* — это поступление атомов химических элементов из окружающей среды в живые организмы, преобразование их в новые соединения и возвращение атомов элементов в окружающую среду в процессе жизнедеятельности или разложения организмов после отмирания.

Энергия, запасенная в потребляемой пище, не совершает круговорота. Частично она расходуется на построение новых клеток, обеспечение дыхания, обмена веществ и другие процессы. Энергия, затраченная на поддержание

**Автотрофы** — организмы, способные к самостоятельному синтезу необходимых для них органических веществ за счет энергии света (*фотосинтез*) или энергии, которая выделяется при окислении неорганических веществ (*хемосинтез*).

**Гетеротрофы** — организмы, которые используют для питания готовые органические вещества, в том числе и произведенные автотрофами.

Можно выделить также **автогетеротрофы**, которые в зависимости от условий могут осуществлять синтез органических веществ или употреблять их в готовом виде из окружающей среды.



## Круговорот азота в природе

процессов жизнедеятельности одних организмов, не может быть использована другими организмами. При передаче энергии по пищевой цепи часть энергии рассеивается в окружающей среде, и ее поток постепенно ослабевает. В связи с этим для поддержания биологического круговорота вещества необходим постоянный приток энергии извне.

Энергия непрерывно поступает на Землю из Космоса, в основном, в виде *солнечного излучения*. С помощью этой энергии поддерживается жизнедеятельность царств бактерий, растений, животных, грибов.

Кроме того, солнечное излучение существенно влияет на климатические и другие геофизические явления:

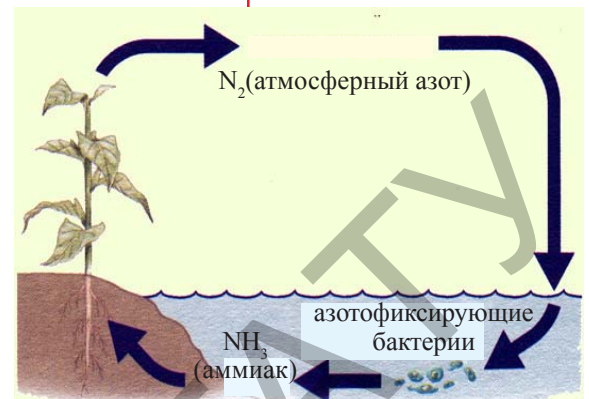
- формирование облаков;
- перемещение воздушных масс в земной атмосфере;
- перемещение водных масс в мировом океане;
- другие процессы, обеспечивающие функционирование биосферы как глобальной экосистемы планеты.

Вместе с тем, не следует забывать ту роль, которую играют в поддержании теплового равновесия планеты процессы радиоактивного распада естественных радионуклидов, содержащихся в земном веществе. В процессе движения наша планета постоянно излучает энергию, которая в виде тепла рассеивается в космическом пространстве. Ядерная энергия, освобождающаяся в процессе распада земных радионуклидов, преобразуется в тепловую энергию, которая, наряду с солнечной энергией, восполняет потери тепловой энергии Земли.

Таким образом, как неионизирующие, так и ионизирующие излучения оказали существенное влияние на формирование и эволюцию биосферы Земли.

В условиях первобытной Земли космическое излучение, а также излучение радионуклидов земной коры могли способствовать синтезу биополимеров. Эти сложные органические вещества стали «строительным материалом» для примитивных видов живых организмов.

Последующий этап эволюции привел к образованию у некоторых организмов фотосинтетического аппарата и получению углеводов и кислорода из углекислого газа и воды с использованием энергии солнечного излучения.



Образование в процессе фотосинтеза свободного кислорода способствовало появлению на Земле новых видов живых организмов.

Благодаря солнечному излучению из свободного кислорода был рожден и озон, из которого сформировался озоновый слой. До сих пор этот слой служит защитным экраном для всего живого от губительного коротковолнового ультрафиолетового излучения.

Энергия излучений, поступающих на Землю из Космоса, наряду с другими факторами, обеспечивает сохранение и устойчивость биосферы.

Существование организмов и биосферы в целом поддерживают:

- непрерывное поступление на Землю солнечного излучения,
- освобождение ядерной энергии в виде ионизирующего излучения в процессе распада радионуклидов земного вещества и преобразование этой энергии в тепловую энергию, которая помогает сохранять тепловой баланс планеты.

### **5.2. Действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки**

Радиационный фактор является лишь одним из множества факторов внешней среды, действующих на живые организмы. Однако со второй половины XX века влияние радиационного фактора заметно возросло. Испытания ядерного оружия и аварии на ядерных производствах сопровождались значительными выбросами радионуклидов искусственного происхождения в окружающую среду, что привело даже к увеличению радиационного фона на планете в целом.

Все больше искусственных источников ионизирующего излучения входит в нашу жизнь, принося пользу людям. Так, применение подобных источников для выявления причин различных заболеваний и лечения людей усовершенствовало медицинскую диагностику и терапию, подняв их на качественно новый уровень.

В то же время использование дополнительных источников ионизирующего излучения увеличивает облучение людей.

Как же рост радиационного фона отражается на жизни людей, окружающей природе и биосфере в целом? Может ли жизнь продолжаться там, где природная среда загрязнена радиоактивными веществами?

Чтобы ответить на эти вопросы, прежде всего, следует выяснить, каким же образом ионизирующее излучение действует на биологические объекты на всех уровнях организации живой материи.

Как оказалось, на практике большие дозы облучения люди получают чрезвычайно редко. В подавляющем большинстве случаев имеют дело не с *острым*, а с *хроническим* облучением при небольшой мощности эффективной дозы. В таких случаях радиационные эффекты проявляются чрезвычайно редко и через большой промежуток времени после облучения, что значительно затрудняет их изучение. Заболевания, инициированные облучением, немногочисленны, и по клиническим признакам практически невозможно достоверно определить, вызваны ли они облучением или другими причинами нерадиационного характера.

Большинство имеющихся данных по влиянию ионизирующего излучения на организм человека получено в результате медицинских наблюдений за группами людей, получивших *большие дозы* облучения при ядерных взрывах. Немаловажную роль играют и радиобиологические исследования животных после получения ими значительных доз облучения, вызывающих заметные биологические эффекты. Накопленные данные по влиянию больших и средних доз облучения на организм человека и животных экстраполируют (распространяют) на область *малых доз*.

Действие ионизирующего излучения на живую материю отличается от других видов воздействий. Так, тепловая энергия поглощается биологическими молекулами непрерывно и распределяется по их объему относительно равномерно. Энергия же ионизирующего излучения поглощается отдельными порциями в определенных местах биологических молекул.

В результате воздействия ионизирующего излучения на живую материю происходят процессы, в которых можно выделить следующие этапы:

- *физический* — поглощение энергии и возникновение возбужденных и ионизированных молекул;
- *физико-химический* — перераспределение поглощенной энергии излучения возбужденными молекулами;
- *химический* — образование свободных радикалов;

• *Острое облучение* — это кратковременное воздействие ионизирующего излучения на биологический объект с поглощением *большой дозы* излучения.

• *Хроническое облучение* — это продолжительное воздействие ионизирующего излучения на биологический объект. Как правило, подобное облучение происходит при *малых дозах, не превышающих 250 мЗв в год при общем облучении организма человека.*

*Биологические молекулы* — это органические молекулы, из которых построен живой организм и которые выполняют важную роль в жизнедеятельности организма. Различают:

- *малые биомолекулы* — молекулы аминокислот, глицерола, холина, высших карбоновых кислот, моносахаридов и т. п.
- *молекулы биополимеров* — макромолекулы, состоящие из большого числа повторяющихся звеньев — *мономеров*. К биополимерам относят *полисахариды, белки, нуклеиновые кислоты*. Соответствующие *мономеры* — *моносахариды, аминокислоты, нуклеотиды.*

- *молекулярно-биологический* — изменение в структуре биологических молекул и клеток, которые могут приводить к нарушению выполняемых ими функций.

Каждый из этих процессов происходит спустя какое-то время после воздействия излучения на организм. Ниже перечислены основные процессы, протекающие в организме при облучении, и время, прошедшее после облучения, когда реализуются эти процессы (время проявления).

**Основные процессы, протекающие при облучении организма и время их проявления**

Процесс	Время проявления
Поглощение энергии фотонного (рентгеновского, <i>гамма</i> -) и нейтронного излучений	$10^{-24}$ – $10^{-4}$ с
Поглощение энергии корпускулярного излучения, представленного потоком заряженных частиц ( <i>альфа</i> -, <i>бета</i> -, протонов и других)	$10^{-15}$ – $10^{-8}$ с
Перераспределение энергии. Возбуждение и ионизация молекул	$10^{-12}$ – $10^{-8}$ с
Химические повреждения биологических молекул в результате их ионизации и возбуждения ( <i>прямое действие излучения</i> )	$10^{-7}$ – $10^{-5}$ с
Образование свободных радикалов ( <i>косвенное действие излучения</i> )	Несколько часов
Изменения структуры молекул белков, нуклеиновых кислот после облучения в процессе обмена веществ ( <i>биомолекулярные повреждения</i> )	От нескольких микросекунд до нескольких часов
Проявление ранних биологических эффектов. Возможны: – гибель клеток, – временные функциональные нарушения, – преждевременная гибель отдельных организмов	От нескольких минут до нескольких недель
Проявление отдаленных биологических эффектов. Возможны: – стойкое нарушение физиологических функций организма, – соматические эффекты (раковые заболевания), – генетические мутации, влияющие на потомство	Годы, столетия

*Радикалы* — атомы или атомные группировки с неспаренными электронами. Отличаются высокой химической активностью.

*Время жизни* свободных радикалов составляет всего  $10^{-15}$ с.

Действие ионизирующего излучения на биологические объекты может быть *прямым* и *косвенным*.

*Прямое* (непосредственное) действие излучения приводит к возбуждению и ионизации биологических молекул, появлению радикалов. Становятся возможными химические реакции с участием образующихся под действием излучения ионов и радикалов. В результате происходит химическое преобразование биологических молекул, которое может привести к повреждению клетки.

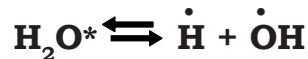
Косвенное действие излучения связано, главным образом, с радиолизом воды — ее химическим преобразованием под действием ионизирующего излучения.

Тело человека, в основном, состоит из воды. Ее содержание в отдельных видах клеток может достигать 90 % клеточной массы.

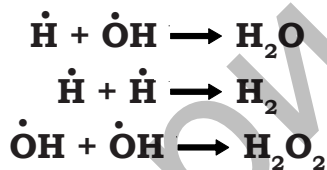
Под влиянием ионизирующего излучения молекула воды способна терять электрон с образованием положительно заряженного иона.



Освободившийся электрон, передавая энергию окружающим молекулам воды, переводит их в возбужденное состояние ( $\text{H}_2\text{O}^*$ ). Возбужденные молекулы воды диссоциируют с образованием радикалов  $\dot{\text{H}}$  и  $\dot{\text{O}}\text{H}$ :

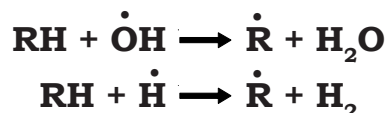


Образовавшиеся свободные радикалы  $\dot{\text{H}}$  и  $\dot{\text{O}}\text{H}$  химически активны и могут легко взаимодействовать друг с другом с образованием разнообразных продуктов (молекул воды, водорода и пероксида водорода):



Свободные радикалы могут взаимодействовать и с другими веществами, присутствующими в водной среде, в том числе и с органическими молекулами. Происходящие химические преобразования органических молекул в основном обусловлены действием высокоактивных радикалов  $\dot{\text{H}}$  и  $\dot{\text{O}}\text{H}$ , которые способны разрушать химические связи в биологических молекулах.

Если формулу органической молекулы условно представить в виде  $\text{RH}$ , где  $\text{H}$  — реакционноспособный атом водорода, а  $\text{R}$  — остальная часть молекулы, то взаимодействие с радикалами  $\dot{\text{H}}$  и  $\dot{\text{O}}\text{H}$  можно описать в таком виде:

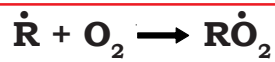


Органические радикалы  $\dot{\text{R}}$ , так же как и свободные радикалы, образуемые при радиолизе воды, могут вступать в реакции с другими молекулами, что, в конце концов, и приводит к биологическим нарушениям.

Радикалы  $\dot{\text{R}}$  могут взаимодействовать и с кислородом, поступающим в организм из воздуха в процессе дыхания. При этом образуются перекисные радикалы  $\text{RO}_2\cdot$ :

Возбужденная молекула — молекула, в которой один или несколько электронов входящих в нее атомов находятся в возбужденном состоянии, однако энергии возбуждения недостаточно для отрыва электрона от молекулы.

Биологические нарушения — изменения структуры и функций биологических молекул в живых клетках, которые приводят к биологическим, физиологическим и другим изменениям в организме.



Перекисные радикалы также могут вызывать биологические нарушения в организме.

Таким образом, инициированные излучением химические реакции в водных растворах происходят преимущественно с участием свободных радикалов. Каждый из радикалов вступает в специфические реакции с макромолекулами (биополимерами), в результате чего возникают биологические молекулы с измененными структурными и функциональными характеристиками. Эти молекулы взаимодействуют друг с другом и с окружающими молекулами, что может приводить к биологическим нарушениям, вплоть до таких, которые могут стать причиной гибели клеток.

В общем виде действие ионизирующего излучения на клетки живых организмов схематически можно представить следующим образом:



Клетка является основной структурной единицей биологической материи. Из клеток состоят все органы и ткани живого организма.

Чтобы разобраться, какие изменения может вызвать ионизирующее излучение в клетке, напомним кратко ее строение.

## Строение клетки

*Клетка* — мельчайшая структурно-функциональная единица живых организмов, наделенная всеми основными признаками живой материи. Для нее характерны обмен веществ и энергии, наследственность и изменчивость. Клетка способна к саморегуляции, она может расти, развиваться, реагировать на раздражение и размножаться.

Животная клетка состоит из цитоплазмы и ядра, которые с помощью плазматической мембраны ограждены от внешней среды. В то же время с помощью этой мембраны осуществляется контакт между соседними клетками. Вместе цитоплазма и ядро представляют собой живое содержимое клетки — протопласт.

*Ядро* клетки является главным управляющим центром клетки. Оно имеет сложное строение и совсем не похоже на ядро атома. В *ядре* хранится наследственная информация.

*Цитоплазма* представляет собой высокоорганизованную многофазную коллоидную систему сложной структуры. В *цитоплазме* находятся органоиды (рибосомы, митохондрии и т. д.), выполняющие специфические функции в процессе жизнедеятельности клеток. Схема строения животной клетки с указанием функций ее основных компонентов приведена на странице 121.

В состав клеток входят: вода, минеральные вещества и биологические молекулы сложного состава. Биологические молекулы играют чрезвычайно важную роль в жизнедеятельности клетки. К числу биологических молекул относятся *белки, липиды, углеводы, нуклеиновые кислоты*.

Молекулы *белков* образуют основной строительный материал клетки. Они состоят из *аминокислот*. Сотни тысяч присутствующих в организме белков различаются

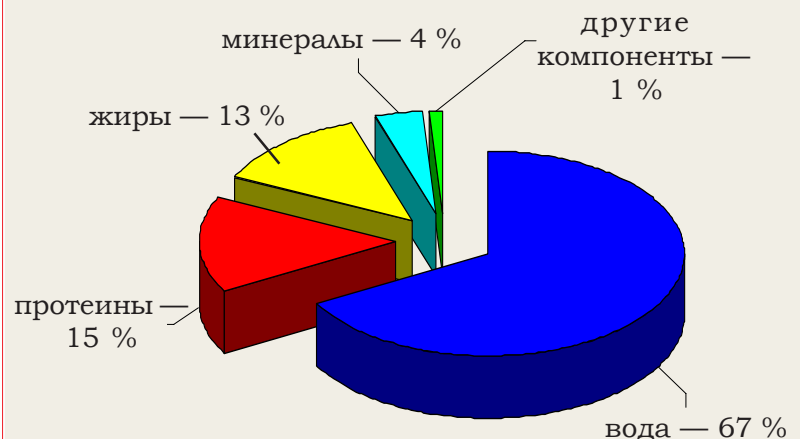
В *ядрах* клеток находятся сведения о том, какие аминокислоты и в каком порядке должны содержаться в молекуле белка.

*Хромосомы* — «сейфы для хранения рецептов образования белков».

*Хромосомы* в закодированной форме (в виде последовательности нуклеотидов ДНК) содержат информацию

- о каждой клетке,
- обо всем организме, включая его индивидуальные характеристики.

### Типичный состав животной клетки



качеством, количеством и порядком расположения составляющих их аминокислот, число которых равно 20.

Важную роль в образовании белка играют *нуклеиновые кислоты* — фосфорсодержащие биополимеры, обеспечивающие хранение и передачу наследственной информации. *Нуклеиновые кислоты* состоят из нуклеотидов — сложных веществ, в состав которых входит азотистое основание, пятиуглеродный углеводород (рибоза или дезоксирибоза) и остаток фосфорной кислоты.

Среди нуклеиновых кислот различают *дезоксирибонуклеиновую кислоту (ДНК)* и *рибонуклеиновую (РНК)*.



**ДНК** — самые крупные биологические молекулы. Их длина в развернутом виде — от 0,25 мм (у некоторых бактерий) до 40 мм (у человека).

Масса молекулы **ДНК** человека —  $6 \cdot 10^{-12}$  г.

Длина самой крупной молекулы белка не превышает 0,0002 мм.

Молекулы **ДНК**, содержащиеся, в основном, в ядрах клеток, относятся к числу наиболее важных биологических молекул. По сравнению с другими биологическими молекулами, молекулы **ДНК** огромны.

Молекула **ДНК** контролирует структуру и функцию клетки. Она способна копировать себя. Ядро клетки, благодаря наличию в нем **ДНК**, является информационным центром клетки, местом хранения наследственной информации, которая определяет все специфические признаки данной клетки и организма в целом.



## Схема строения животной клетки

## Плазматическая мембрана

Состоит из двойного слоя фосфолипидов с погруженными в него белками. Функции: защита клетки, избирательная регуляция обмена веществ между клеткой и внешней средой, обеспечение контакта между соседними клетками

## Пиноцитозные пузырьки

Возникающие внутри клетки мембранные пузырьки, содержащие капельки жидких веществ. Функции: поглощение веществ клеткой

## Эндоплазматический ретикулум (ЭР)

Система уплощенных мембранных мешочков — цистерн, полостей, трубочек, соединенных между собой и ограниченных одинарными мембранами, связанными с ядерными мембранами. Выделяют гладкий (агранулярный) и шероховатый (гранулярный) ЭР. На мембранах шероховатого ЭР находятся рибосомы, с помощью которых происходит синтез белков. Гладкий ЭР не имеет рибосом. Здесь происходит образование липидов клетке, синтез стероидных гормонов, накопление и выведение из клетки ядовитых веществ и др. процессы

## Цитоплазма

Содержимое клетки, заключенное между плазматической мембраной и ядром. Включает полужидкое вещество — гиалоплазму и внутриклеточные структуры — органоиды

## Центриоль

Система микротрубочек, построенных из белковых субъединиц. Функции: участие в образовании цитоскелета, веретена деления клетки, ресничек и жгутиков

## Вакуоль

Одномембранные цистерны. Функции: накопление воды и других неорганических веществ, осморегуляция

## Комплекс Гольджи

Система плоских одномембранных цистерн, расширенных на концах, и пузырьков, отщепляющихся или присоединяющихся к цистернам. Функции: накопление, преобразование белков и липидов, синтез полисахаридов, образование секреторных пузырьков, выведение веществ за пределы клетки, образование лизосом

## Митохондрия

Представляет собой двухмембранную структуру; внутренняя мембрана образует складки — кристы. Содержит кольцевую **ДНК**, рибосомы, множество ферментов. Функции: осуществление кислородного этапа клеточного дыхания, синтез АТФ

## Рибосома

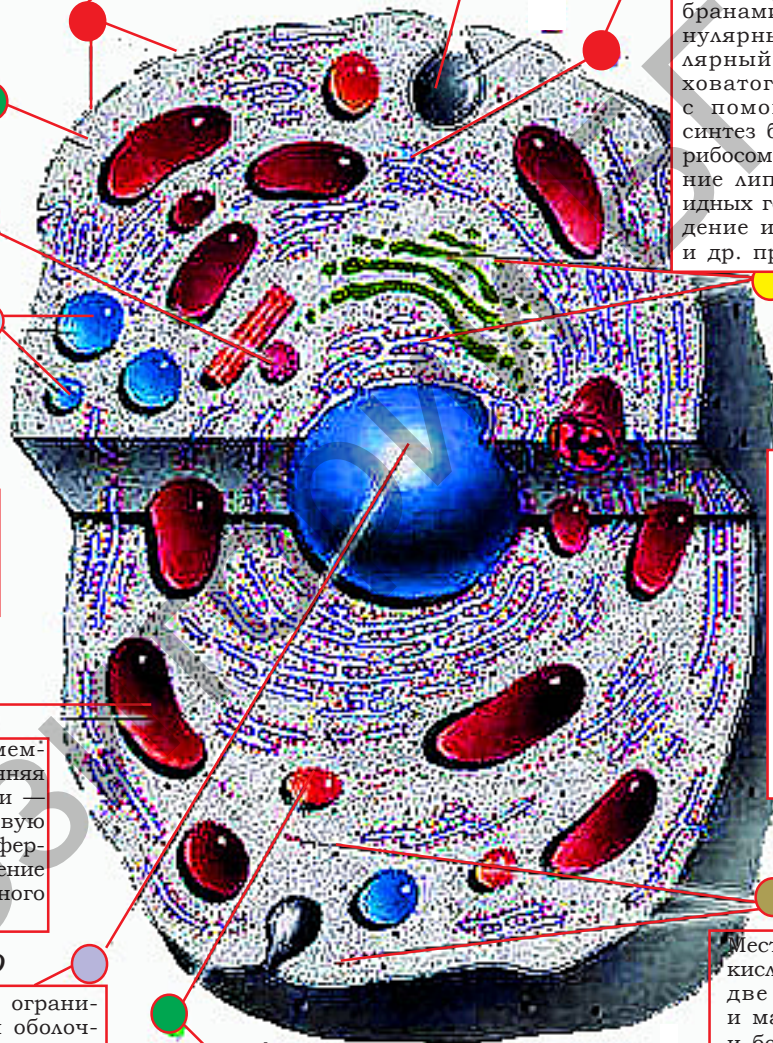
Место синтеза белков из аминокислот. В состав рибосом входят две субъединицы (большая и малая), состоящие из **рРНК** и белков

## Ядро

Составная часть клетки, ограниченная двухмембранной оболочкой, которая отделяет ее от цитоплазмы. Внутри ядра в жидкой среде (кариоплазме) расположены хроматин, одно или несколько плотных образований — ядрышек и синтезируемые в ядре структуры. При делении клетки хроматин конденсируется в хромосомы. В хромосомах (носителях генов), состоящих преимущественно из **ДНК** и белка, хранится генетическая (наследственная) информация клетки. Функции ядра: передача дочерним клеткам генетического материала в неизменном виде, регуляция клеточной активности

## Лизосома

Одномембранные пузырьки, содержащие гидролитические ферменты. Функции: внутриклеточное переваривание, расщепление поврежденных органоидов, отмерших клеток органов



До сих пор не до конца ясно, как именно происходит повреждение клетки ионизирующим излучением. Нарушения могут возникать в любой части клетки. Многие из повреждений, вызванных облучением, связаны с изменением структуры **ДНК**.

Действие ионизирующего излучения на молекулы **ДНК**

Существует два способа повреждения **ДНК** ионизирующим излучением: *прямое* и *косвенное*. При *прямом* повреждающем действии излучение может непосредственно ионизировать молекулу **ДНК**, что и приведет к изменению ее структуры. Структура молекулы **ДНК** может меняться и *косвенным* путем — при взаимодействии **ДНК** со свободными радикалами, образующимися в результате радиолитиза воды, входящей в состав клетки.

Различают следующие виды повреждения **ДНК**:

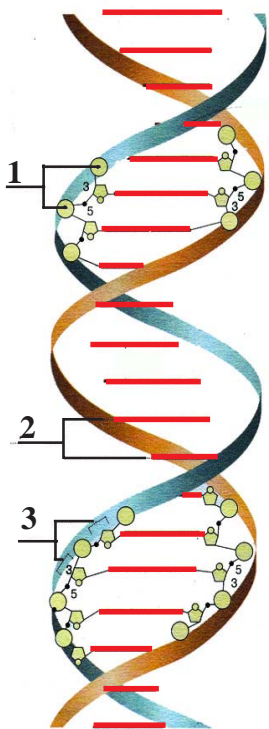
- *однонитевые разрывы* — разрыв одной из цепочек **ДНК**,
- *двунитевые разрывы* — разрыв обеих цепочек **ДНК**,
- *изменение структуры азотистых оснований*.

Под действием ионизирующего излучения чаще всего повреждается одна нить **ДНК**. В целом, повреждения **ДНК** зависят от величины поглощенной дозы. Далеко не все повреждения **ДНК** приводят к существенным генным и хромосомным изменениям, так как в клетках интенсивно идут восстановительные процессы. В ходе этих процессов до 90 % всех первичных повреждений исправляется полностью или частично.

Вероятность повреждения **ДНК** зависит от вида ионизирующего излучения. При воздействии на **ДНК** бета- и гамма-излучений вероятность повреждения обеих цепочек **ДНК** меньше, чем при воздействии альфа-излучения.

Восстановление структуры поврежденной **ДНК** называют *репарацией ДНК*. Если ущерб нанесен только одной цепочке **ДНК**, то репарация осуществляется за счет информации с неповрежденной второй цепочки. Нарушения структуры **ДНК** могут устраняться путем удаления части цепочки с поврежденными

Сегмент молекулы **ДНК**



- 1 — фосфаты;  
2 — азотистые основания;  
3 — дезоксирибоза

При большой поглощенной дозе, величиной 1 Гр в каждой облученной клетке человека, повреждается до 5000 оснований молекул **ДНК**, возникает около 1000 одиночных и от 10 до 100 двойных разрывов.

Репарация **ДНК**

звеньями **ДНК** и использования неповрежденной цепи в качестве основы для повторного синтеза нарушенного участка **ДНК**.

Репарация **ДНК** при повреждении *двух цепочек* затруднена.

Однонитевые, двунитевые разрывы **ДНК** и изменения *структуры* азотистых оснований могут привести к искажению либо утрате информации, хранящейся в *генах*.

Помимо изменений **ДНК** ионизирующее излучение может вызывать изменение и других биологических молекул.

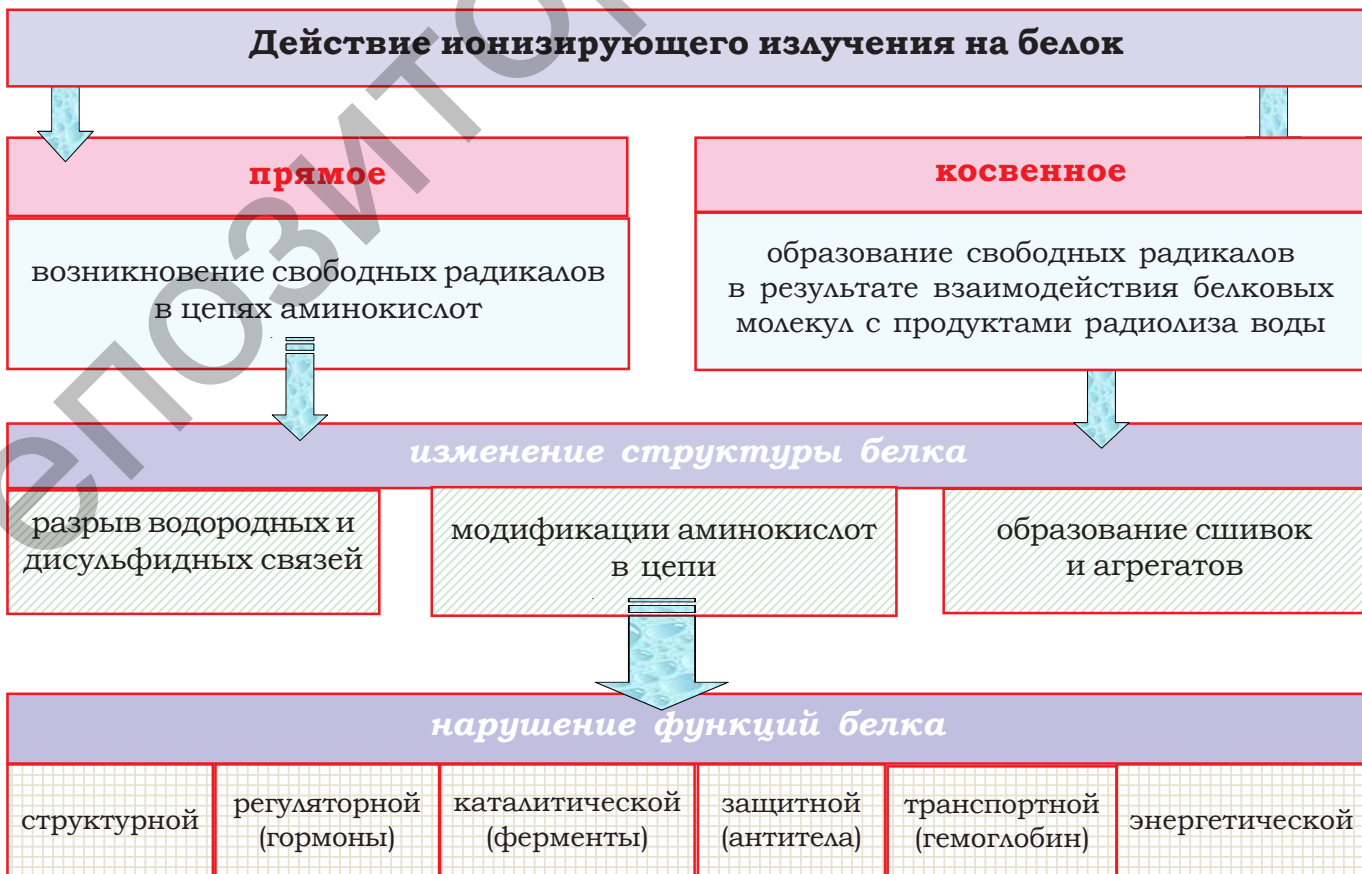
Ген — участок молекулы **ДНК**, ответственный за хранение информации по определенному наследуемому признаку организма

*Действие ионизирующего излучения на молекулы белка*

Молекулы белков отличаются огромным разнообразием. Последствия их облучения зависят от:

- типа облучаемого белка,
- вида и энергии излучения,
- продолжительности облучения.

Изменения, которые могут происходить в белковых молекулах под действием ионизирующего излучения, представлены на следующей схеме.



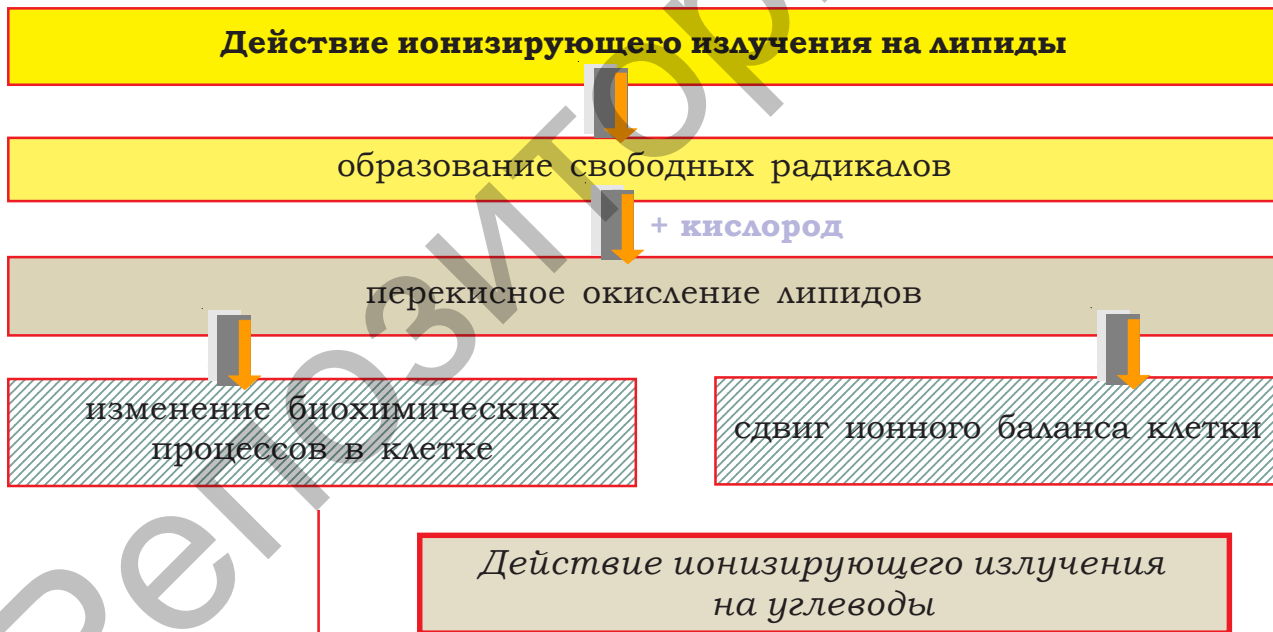
**Большое количество разнообразных белковых молекул и их постоянное обновление в организме позволяет организму противостоять воздействию радиации.**

*Действие ионизирующего излучения на липиды*

Липиды — жироподобные органические вещества, нерастворимые в воде. Они входят в состав биологических мембран, а также играют роль запасных питательных веществ в организме, накапливаясь в отдельных частях тела.

Липиды являются основой клеточных мембран. Многие процессы клеточного метаболизма происходят именно в мембранах. Поэтому перекисное окисление липидов, которое может быть вызвано облучением, влечет за собой изменение биохимических процессов в клетке, а нарушение целостности наружной мембраны — к сдвигу ионного баланса клетки.

Действие ионизирующего излучения на липиды и изменения, которые могут происходить в клетках при облучении, отражает следующая схема.



Углеводы (сахара) — источник энергии в организме. Как энергетический резерв они присутствуют в организме человека в виде гликогена. Общая формула углеводов может быть представлена в виде  $C_n(H_2O)_m$ . Большинство природных углеводов — производные циклических форм моносахаридов.

Под действием излучения возможен отрыв атома водорода от молекулы *углевода*. При этом образуются свободные радикалы, а затем перекиси. В результате облучения из продуктов распада *углеводов* возможен синтез органического вещества, которое тормозит синтез **ДНК** и *белка* и подавляет деление клеток.

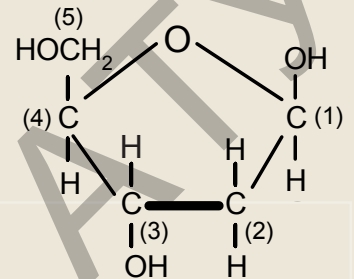
Разрушение *углеводов* сокращает запасы веществ, являющихся источниками энергии в организме, что может отразиться на функционировании многих жизненноважных систем организма.

Биологические молекулы образуют различные клеточные структуры. Изменения, возникающие в этих молекулах под действием ионизирующего излучения, могут приводить к повреждению клеточных мембран, ядра, митохондрий, лизосом, рибосом и, в итоге, нарушать функционирование клетки. На следующих двух схемах показаны основные виды нарушений, которые могут возникать в результате действия ионизирующего излучения на различные составляющие клетки. Там же отмечены нарушения, которые могут быть устранены путем восстановления (репарации) клеточных структур.

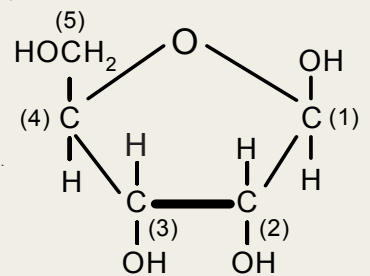
Примером моносахаридов могут служить

- дезоксиррибоза,
- рибоза.

Дезоксирибоза  
(входит в состав ДНК)



Рибоза  
(входит в состав РНК)



**Автолиз** — саморазтворение, самопереваривание тканей, клеток или их частей под действием собственных ферментов.

**Цитолиз** — полное или частичное растворение животной или растительной клетки. Происходит в норме при метаморфозе, может также происходить при патологии.



В организме человека можно выделить множество видов *клеток*, которые выполняют самые разнообразные функции.

Различают *клетки половые* и *соматические* (клетки тела). Число *хромосом* в половых клетках в два раза меньше, чем в соматических.

Период существования клетки от момента ее образования путем деления материнской клетки до собственного деления или смерти называют *клеточным циклом* или *жизненным циклом клетки*.

**Основные стадии клеточного цикла**

**Митоз** — основной способ деления ядерных клеток. При таком способе деления образуются две дочерние клетки с набором хромосом, который аналогичен набору хромосом родительской клетки. Это способ деления соматических клеток.

**Мейоз** — способ деления клеток, в результате которого *уменьшается вдвое* число хромосом в дочерних клетках.

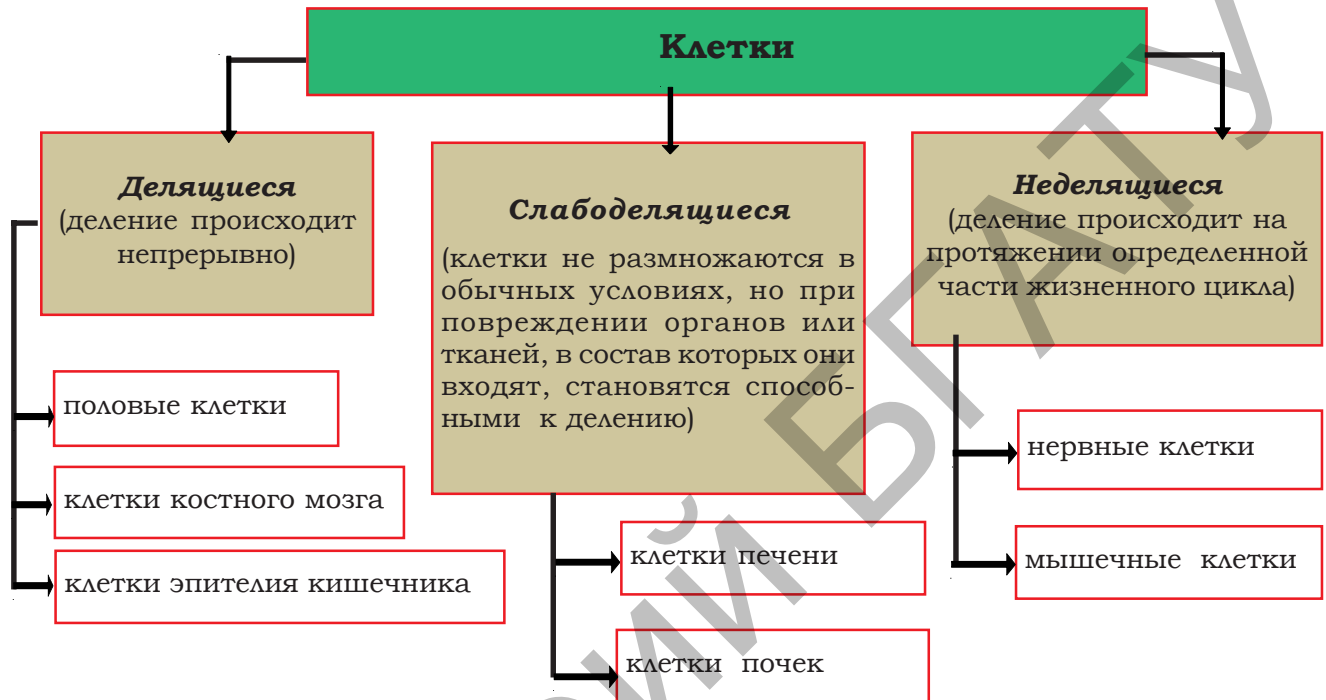
Посредством *мейоза* образуются половые клетки — *гаметы*.

После оплодотворения набор хромосом восстанавливается (удваивается).

Стадия клеточного цикла	Описание
<b>Интерфаза</b>	В интерфазе происходят процессы, связанные с ростом, подготовкой клетки к делению и репликация ДНК. Продолжительность интерфазы составляет до 90 % продолжительности всего клеточного цикла. В делящихся клетках эта стадия клеточного цикла между двумя последовательными митозами. В неделящихся клетках (например, нейронах) — это период от последнего митоза до смерти клетки.
<b>Митоз</b>	Способ деления соматических клеток. В результате митоза образуются две дочерние клетки, причем в каждой из них имеется точно такой же набор хромосом, как в родительской клетке, то есть обеспечивается равномерное распределение хромосом между двумя дочерними клетками.

Деление клеток обеспечивает непрерывное течение жизненного процесса.

По способности делиться все клетки организма человека делят на *делящиеся*, *слабоделящиеся* и *неделящиеся*.



На ранней стадии развития организма все клетки способны к делению. В процессе развития организма возникают различия между клетками, и часть клеток утрачивает способность делиться. Дифференцирование клеток приводит к возникновению специализированных клеток, из которых формируются специализированные ткани и органы.

Чувствительность клеток к ионизирующему излучению различна, но все они наиболее восприимчивы к действию излучения (радиочувствительны) в период деления.

**Делящиеся клетки менее устойчивы к действию ионизирующего излучения, чем неделящиеся.**

Следовательно, растущая ткань (в детском организме) или ткань с высокой скоростью клеточного деления, более чувствительны к действию ионизирующего излучения по сравнению с другими тканями.

Если при облучении клетки происходит нарушение структуры молекулы **ДНК**, может измениться генетический код. Это может привести к прекращению синтеза **РНК** или к появлению аномальных молекул **РНК**.

*Радиочувствительность* — это чувствительность биологических объектов к действию ионизирующих излучений. Мерой радиочувствительности является доза облучения, вызывающая гибель 50 % клеток или организмов. Чем меньше такая доза, тем более радиочувствителен биологический объект. Радиочувствительность многоклеточных организмов определяется, в основном, радиочувствительностью их клеток, в случае млекопитающих — радиочувствительностью стволовых клеток, а также кроветворных органов и желудочно-кишечного тракта.

При удвоении (репликации) **ДНК** эти изменения наследуются. В результате, могут появляться *клетки* с измененной наследственностью.

Повреждения **ДНК** могут проявляться в виде *мутаций* — наследуемых изменений генетического материала организма, которые при последующих делениях передаются новым образовавшимся *клеткам*.

Сильно поврежденные молекулы **ДНК** теряют способность к восстановлению. При этом *клетка* утрачивает способность делиться и гибнет.

Таким образом, если в результате облучения произошло повреждение генетического материала, но *клетка* сохранила способность к размножению, это может привести к появлению измененного клеточного потомства.

Если *клетка* не способна размножаться, повреждение генетического материала приводит к гибели *клетки*.

*Первичные повреждения ДНК, лежащие в основе мутаций, могут эффективно восстанавливаться с помощью репарационных систем клетки.*

Процесс репарации протекает при участии ферментативных систем *клетки*. Для репарации и поддержания последовательности оснований в **ДНК** расходуется значительное количество энергии *клетки*.

В *клетках* млекопитающих *одиночные разрывы ДНК* могут восстанавливаться в течение 15 минут.

Степень повреждения *клетки* зависит от величины поглощенной дозы и от ее распределения во времени.

При кратковременном облучении *клетки* существенные изменения в ее органоидах наблюдаются при чрезвычайно высоких значениях поглощенной дозы — до 10 Грей. К числу таких изменений относятся:

- нарушение проницаемости мембран,
- угнетение дыхания,
- необратимые изменения молекул **ДНК** в ядре *клетки*.

При *хроническом* (длительном) облучении с такой же дозой наносимый *клетке* ущерб будет меньшим. Особенно это касается *делящихся клеток*.

Даже при незначительных поглощенных дозах возможна гибель отдельных *клеток*. Однако и при заведомо смертельных дозах отдельные *клетки* могут выжить.



## Возможные виды реакции клеток на облучение

**Митотическая**  
(репродуктивная)  
**гибель клеток**

**Утрата клетками**  
**способности к**  
**размножению**

Основная причина митотической гибели клеток — повреждение ее хромосомного аппарата, приводящее к нарушению синтеза **ДНК**.

При большой дозе облучения, равной 1 Гр, в каждой клетке человека возникает до 1000 одностранных и до 100 двустранных разрывов.

**Радиационный блок**  
**митозов**

**Временная задержка**  
**деления**  
**клетки**

Длительность задержки зависит от величины поглощенной дозы. На каждый Грей поглощенной дозы клетка отвечает задержкой митоза на 1 час. С увеличением дозы облучения увеличивается продолжительность деления каждой клетки. Длительность интерфазы увеличивается, что создает благоприятные условия для работы системы восстановления **ДНК**.

В то же время задержка деления приводит к тому, что клетки, находившиеся при облучении в интерфазе, не делятся в нужный момент.

При наступлении фазы митоза часть клеток не способна разделиться. В результате, объем клеточного материала увеличится, и образуются гигантские клетки. Из-за нарушения механической прочности мембран и изменения питания они, как правило, гибнут.

Другая часть облученных клеток, вступив в фазу митоза, способна делиться. Однако после каждого процесса деления часть клеток может погибать. Чем больше митозов, тем больше число погибших клеток.

Клетки, которые сохранили способность к делению после 5 и более делений, считают выжившими.

**Интерфазная**  
**гибель клеток**

**Гибель клеток в**  
**интерфазе до**  
**вступления в**  
**митоз**

Для большинства соматических клеток человека гибель клеток в интерфазе регистрируется после облучения при дозе в *десятки и сотни Грей*.

Л и м ф о ц и т ы , относящиеся к радиочувствительным клеткам, гибнут при значительно меньших дозах.

Еще в начале XX века французские исследователи И. Бергонье и Л. Трибондо доказали, что ионизирующее излучение тем сильнее действует на клетки, чем интенсивнее они делятся и чем менее они дифференцированы.

Нарушения у делящихся клеток могут проявляться как непосредственно после облучения, так и по прошествии значительного периода времени после облучения.

Таким образом, в результате облучения клетки возможны следующие варианты:

- полное выживание клетки без всяких последствий,
- сохранение живой, но измененной клетки,
- гибель клетки.

В целом, степень воздействия ионизирующего излучения на клетки зависит от:

- дифференцированности клеток,
- способности клеток к делению,
- вида и энергии излучения,
- продолжительности облучения,
- состояния системы репарации **ДНК**,
- активности ферментов, перерабатывающих продукты радиолиза,
- интенсивности окислительно-восстановительных процессов.

### 5.3. Действие ионизирующего излучения на ткани, органы и системы органов

Группы клеток в многоклеточном организме, сходные по происхождению, строению и функциям, вместе с межклеточным веществом образуют *ткани*.

У человека выделяют четыре типа тканей: *эпителиальные, соединительные, мышечные и нервная*. Ткани образуют органы (сердце, почки, печень, желудок и т. д.). Клетки, входящие в состав ткани или органа, зависимы друг от друга и от окружающей среды.

Системы органов (скелетная, пищеварительная, кроветворная и др.) обеспечивают жизнедеятельность организма.

Реакция ткани, органа или системы органов человека на радиационное воздействие зависит от нарушений, появляющихся в клетках, из которых они построены. Однако реакция на действие ионизирующего излучения не сводится только к сумме эффектов, возникающих при облучении клеток. Величина облучаемого участка тела, особенности его строения и функционирования, интенсивность кровообращения и другие факторы также влияют на радиочувствительность ткани, органа или системы органов.

*Орган* — это часть животного или растительного организма, имеющая определенную форму, строение, местоположение в организме и выполняющая определенную функцию. Обычно в состав органа входит несколько тканей, одна из которых является основной. В каждом органе животного организма имеется нервная ткань (нервные окончания) и кровеносные сосуды.

### Радиочувствительность органов и тканей

Радиационные эффекты, возникающие в биологических тканях и органах человека, непосредственно связаны с повреждением, а иногда и с гибелью клеток, из которых они сформированы. В то же время клетки обладают уникальной способностью к самовосстановлению, и при небольших дозах облучения ткани и органы способны восстанавливать свои функции.

Относительную чувствительность тканей и органов человека к действию ионизирующих излучений (их радиочувствительность), как уже отмечалось ранее, учитывают с помощью взвешивающих коэффициентов для тканей и органов ( $W_T$ ). Напомним, что эти коэффициенты характеризуют относительный вклад биологических тканей и органов человека в возникновение стохастических радиационных эффектов при равномерном облучении тела человека, то есть когда эквивалентная доза для всех его биологических тканей и органов одинакова. В этом случае сумма взвешивающих коэффициентов для всех тканей и органов человека равна единице.

Существует зависимость между активностью деления клеток ткани или органа и их подверженностью радиационным поражениям: чем выше активность деления, тем выше риск возникновения нарушений в результате воздействия ионизирующего излучения.

Наиболее чувствительны к воздействию ионизирующего излучения ткани и органы с интенсивно делящимися клетками. Органы кроветворения (костный мозг, лимфатические узлы, селезенка) и пищеварения (слизистые оболочки желудка и кишечника), половые железы (семенники и яичники) состоят из интенсивно делящихся клеток и относятся к наиболее радиочувствительным органам. По этой же причине сформировавшийся организм более устойчив к действию радиации, чем формирующийся организм ребенка или подростка.

#### Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов человека ( $W_T$ )

Ткань или орган	$W_T$
Половые железы	0,20
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Желудок	0,12
Толстый кишечник	0,12
Пищевод	0,05
Печень	0,05
Мочевой пузырь	0,05
Щитовидная железа	0,05
Молочные железы	0,05
Кожа	0,01
Поверхность костей	0,01
Остальные органы	0,05
Все тело	1,00

Стохастические радиационные эффекты проявляются в виде раковых и генетических заболеваний и наблюдаются при поглощенных дозах менее 1 Гр.

Большие поглощенные дозы гамма-излучения наблюдали среди:

- пострадавших от атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки,
- ликвидаторов Чернобыльской катастрофы.

При *высоких уровнях* поглощенных доз в тканях и органах человека возникают серьезные нарушения. Ниже описаны нарушения, которые, в основном, наблюдались при *высоких уровнях* поглощенных доз гамма- или рентгеновского излучения в результате **однократного внешнего воздействия** радиации на организм человека.

**Реакция органов человека на действие гамма- (или рентгеновского) излучения**

**Хромосомные aberrации** — структурные перестройки хромосом, сопровождающиеся их разрывом, за которыми обычно следует соединение разорванных концов в новых сочетаниях. При этом возможна утрата части генного материала клетки.

Орган или система органов		Доза (Гр)	Эффекты
Орган или система органов		Доза (Гр)	Эффекты
<b>Печень</b>		1	Возникновение хромосомных aberrаций в 15–20 % клеток. Поскольку клетки печени практически не делятся, возникающие нарушения не ведут к гибели организма
		40	Развитие фиброза печени в течение одного месяца после облучения
<b>Костный мозг</b>		1	Возникновение хромосомных aberrаций в 15–20 % клеток
<b>Половые железы</b>	<b>семенники</b>	0,15	Временная стерильность
		2 и выше	Вероятность постоянной стерильности
	<b>яичники</b>	1–2	Возникновение временного бесплодия
		2,5–6	Развитие стойкого бесплодия
<b>Кожа</b>		5	Клетки эпидермиса (верхнего слоя кожи) могут восстанавливать повреждения
		10	Необратимые нарушения
<b>Органы зрения</b>		2	Появление воспалительных процессов
		2–6	Возникновение катаракты (помутнение хрусталика)
<b>Сердце</b>		5–10	Появления изменений в миокарде
		20	Поражение эндокарда и других структур сердца
<b>Почки</b>		30	Развитие нефросклероза
<b>Легкие</b>		50	100%-ная смертность
<b>Центральная нервная система</b>		100	Гибель клеток

Из данных, приведенных в таблице, видно, что при *высоких уровнях* дозовых нагрузок в большинстве органов и систем органов возникают значительные нарушения. Все приведенные выше радиационные

эффекты являются *детерминированными*. Они неизбежно возникают при достижении указанных уровней поглощенных доз *гамма-* или рентгеновского излучения (см. раздел 3.1).

*Радиочувствительность органов и систем органов человека различна.*

Максимальная радиочувствительность свойственна мужским половым органам. Однократное облучение семенников с поглощенной дозой 0,15 Гр приводит к временной стерильности. При поглощенной дозе от 1 до 2 Гр возможна длительная стерильность с полным восстановлением функции семенников лишь через несколько лет.

Яичники менее чувствительны к воздействию ионизирующего излучения.

Способность костного мозга и других элементов кроветворной системы нормально функционировать значительно снижается при поглощенных дозах порядка 1 Гр. Под действием ионизирующего излучения меняется проницаемость мембран эритроцитов (красных кровяных телец) и кровеносных сосудов. В результате, может нарушаться поступление кислорода и питательных веществ к клеткам различных тканей, а также удаление из них продуктов обмена. При этом возможны нарушения в развитии эритроцитов и даже гибель части эритроцитов. Недостаток же эритроцитов в организме может приводить к кислородному «голоданию» в тканях и снижению их жизне-способности.

При *больших* дозах облучения могут развиваться лейкозы. Подобные заболевания онкологического характера были выявлены у ликвидаторов после Чернобыльской катастрофы (5–7 случаев в год на 100 тыс. человек в первые годы).

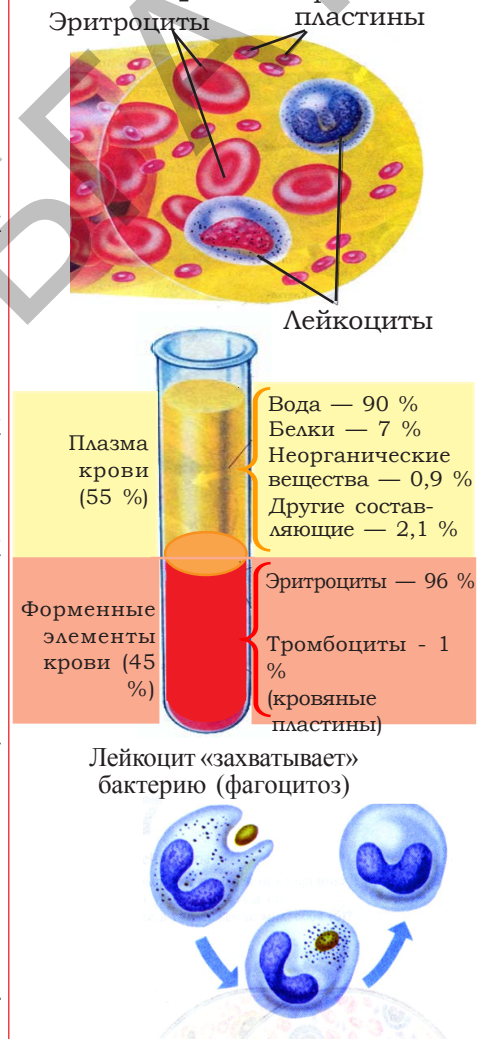
При *малых* дозах облучения повреждается лишь небольшая часть клеток, что иногда приводит к возникновению онкологических заболеваний кроветворных органов, однако подобные заболевания могут и не возникать.

При *малых* дозах облучения может снижаться сопротивляемость организма к заболеваниям бактериальной и вирусной природы. Это может быть связано с уменьшением содержания или повреждением лейкоцитов и лимфоцитов, что приводит к снижению их способности уничтожать патогенные микроорганизмы.

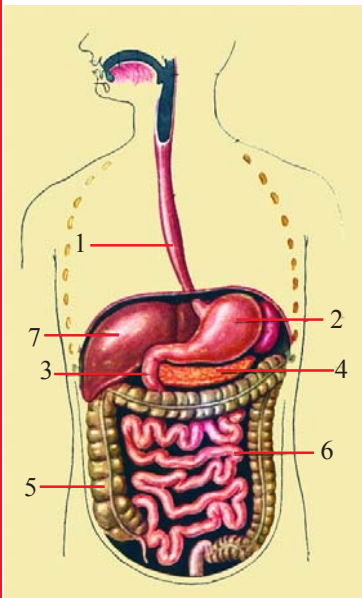
Кровь состоит из *элементов крови* и *плазмы*.

Элементы крови — это *эритроциты*, *лейкоциты* (нейтрофилы, эозинофилы, базофилы, моноциты, лимфоциты) и *тромбоциты*.

**Состав крови**



**Пищеварительная система**



- 1 — пищевод
- 2 — желудок
- 3 — двенадцатиперстная кишка
- 4 — поджелудочная железа
- 5 — толстая кишка
- 6 — тонкая кишка
- 7 — печень

Среди *органов пищеварения* наибольшей радиочувствительностью обладает тонкий кишечник.

Радиочувствительность остальных органов пищеварения снижается в ряду: полость рта — язык — слюнные железы — пищевод — желудок — прямая и ободочная кишка — поджелудочная железа — печень.

*Печень* более устойчива к действию радиации по сравнению с костным мозгом и кишечником, однако возникшие в ней нарушения могут сохраняться в течение продолжительного времени. Восстановление клеток печени происходит значительно медленнее, чем клеток костного мозга или кишечника.

*Радиочувствительность органов зависит от характера облучения (острое или хроническое, однократное или многократное).*

*Острое* радиационное воздействие вызывает более существенные нарушения в органах и тканях, чем их *хроническое* облучение при аналогичных поглощенных дозах. Если органы или системы органов подвергаются облучению в течение длительного промежутка времени, уровни доз, при которых наблюдаются такие же нарушения, как и при остром радиационном воздействии, значительно выше. В случае хронического облучения с небольшими дозами организм располагает временем для восстановления поврежденных тканей и органов.

В органах, состоящих, в основном, из неделящихся клеток, при хроническом облучении с небольшими дозами радиационные эффекты обычно проявляются через значительный промежуток времени после облучения.

В органах или системах органов, в которых процесс деления клеток протекает интенсивно, нарушения проявляются в более короткие сроки после облучения и при более низких уровнях доз.

При воздействии *гамма-* (или рентгеновского) излучения степень поражения органов человека уменьшается в следующей последовательности:

- органы кроветворения
- половые железы
- селезенка
- лимфатические железы

- желудочно-кишечный тракт
- печень
- органы дыхания

- железы внутренней секреции:
  - надпочечники
  - гипофиз
  - щитовидная железа
  - поджелудочная железа
  - паращитовидные железы

- органы выделения (почки, мочевой пузырь)
- мышечная и соединительная ткани
- хрящи
- нервная ткань

При достижении определенных, как правило, высоких уровней доз облучения, происходит поражение тех или иных систем организма, которое может приводить к возникновению *радиационных синдромов*.

### Радиационные синдромы

При значительных дозах ионизирующее излучение в разной степени поражает те или иные органы и ткани, но причиной гибели организма может быть поражение даже *одного* органа, называемого *критическим*.

**Критическим является такой жизненно важный орган (ткань или система органов), который при равномерном облучении всего тела является наиболее радиочувствительным и первым повреждается в данном диапазоне доз.**

Радиационное поражение критического органа связано с поражением или гибелью определенной части клеток, из которых сформирован этот орган.

При небольших уровнях поглощенных доз, благодаря способности клеток к восстановлению, ткани и органы способны относительно быстро восстанавливать свои функции.

Если нарушения, вызванные облучением, не устраняются, их называют *необратимыми*. Необратимое поражение *критического* органа (ткани или системы органов) наблюдается, как правило, *при высоких уровнях доз*. Такие нарушения приводят к гибели организма в определенные сроки после облучения.

В результате необратимого поражения определенных систем организма развиваются *радиационные синдромы*.

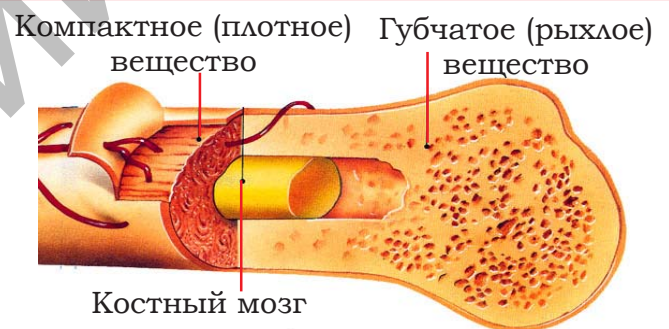
При необратимом поражении кроветворной системы развивается *костно-мозговой (кроветворный) синдром*, кишечника — *желудочно-кишечный*, центральной нервной системы — *церебральный*.

Кроветворная система и желудочно-кишечный тракт характеризуются большой скоростью клеточного обновления и поражаются при меньших уровнях поглощенных доз по сравнению с центральной нервной системой, клетки которой не делятся.

«Синдром» в переводе с греческого означает «заболевание» или «стадия заболевания».

*Равномерное облучение* — это облучение с одинаковой эквивалентной дозой для всех органов и тканей организма.

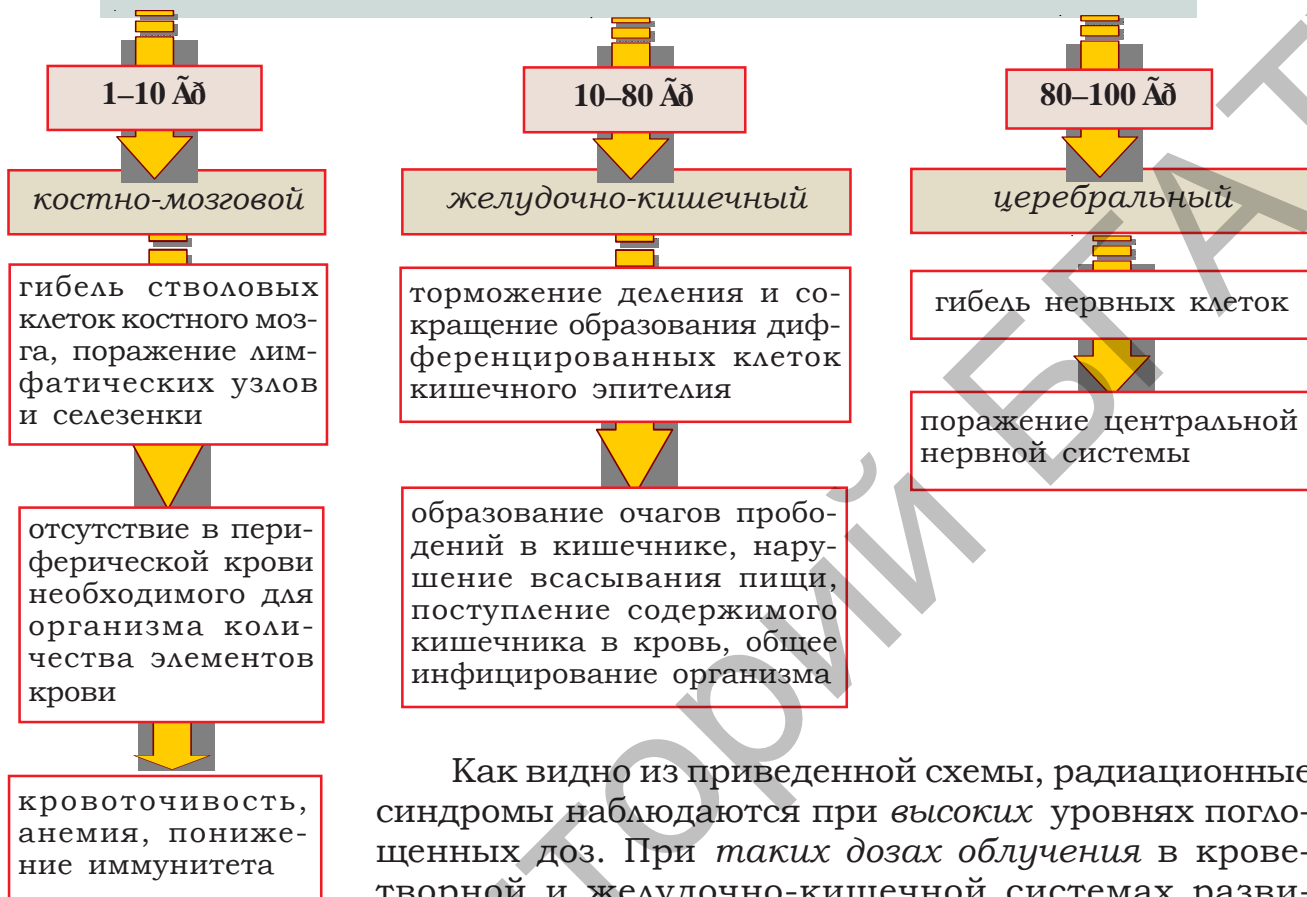
### Строение кости



*Радиационный синдром* — это необратимое повреждение жизненно важной системы органов под действием ионизирующего излучения.

Краткая характеристика основных видов радиационных синдромов, которые наблюдаются у человека при определенных уровнях поглощенных доз *гамма* (или рентгеновского) излучения, приведена на следующей схеме.

**Радиационные синдромы**



Как видно из приведенной схемы, радиационные синдромы наблюдаются при *высоких* уровнях поглощенных доз. При *таких дозах* облучения в кроветворной и желудочно-кишечной системах развиваются сходные изменения:

- происходит гибель молодых, делящихся клеток,
- прекращается клеточное деление и возобновление клеток.

Клетки, завершившие свой жизненный цикл, отмирают, и их количество перестает восполняться.

В результате, число зрелых клеток сокращается. Однако кроветворная система обладает способностью к регенерации. Поэтому, если доза облучения не вызывает повреждения *всех* стволовых клеток костного мозга, *функции* кроветворения могут *восстанавливаться*.

Радиационные синдромы наблюдаются лишь в исключительных случаях и, как правило, только при *высоких* уровнях поглощенных доз, которые на практике редко реализуются.

Находящиеся в крови клетки сами по себе не делятся. Они образуются в результате активного деления *стволовых* клеток, которые являются исходной формой всех клеток крови.



## 5.4. Действие ионизирующего излучения на организм человека

Ионизирующее излучение может вызвать поражение и организма человека в целом. Степень и характер этого поражения определяют:

- величина дозы,
- продолжительность облучения,
- способ облучения (внешнее или внутреннее),
- радиочувствительность тканей, органов и систем органов, подвергшихся воздействию излучения,
- индивидуальные особенности организма,
- другие факторы.

Организм каждого человека *обладает индивидуальной радиочувствительностью.*

Индивидуальная радиочувствительность организма зависит от:

*возраста,*  
(определяет интенсивность процессов клеточного деления в момент облучения)

*половой принадлежности*

*физиологического и психо-эмоционального состояния человека*

### Внешнее облучение

Последствия облучения зависят от радиочувствительности тканей, органов и систем органов, подвергшихся воздействию излучения.

Различные организмы по-разному реагируют на действие радиации. Поскольку млекопитающие по многим физиологическим параметрам близки человеку, результаты изучения биологических эффектов, вызванных действием ионизирующего излучения на этих животных, представляют чрезвычайную ценность.

Как показали исследования, большинство млекопитающих гибнет при получении поглощенной дозы *гамма*- (или рентгеновского) излучения, равной 10 Гр. Некоторые животные организмы (моллюски, дождевые черви, насекомые) могут выживать и при дозах облучения в десятки и даже сотни Грей. Среди млекопитающих также есть уникальные виды (например, длиннохвостый суслик и другие грызуны высокогорных пустынь), обладающие высокой устойчивостью к действию радиации.

Подобные различия связаны с биологическими особенностями облучаемых организмов.

При внешнем воздействии ионизирующего излучения последствия облучения человека, помимо перечисленных выше факторов, зависят от характера облучения:

- равномерное или неравномерное,
- острое или хроническое,
- однократное или многократное.

Равномерное облучение

### Реакция организма человека на равномерное внешнее облучение

Поглощенная доза, Гр	Реакция организма
0–0,25	Отсутствие явных повреждений
0,2–0,5	Возможное изменение состава крови
0,5–1	Изменения в крови, усталость, слабая тошнота
1–2	Изменения в составе крови, рвота, явные патологические изменения. Развитие легкой степени лучевой болезни
2–4	Кровоизлияния. Стерильность
3–5	Тяжелая степень лучевой болезни. Смертность приближается к 50 %
6	Повреждения центральной нервной системы. Смертность приближается к 100 %
> 8	Смерть практически неизбежна

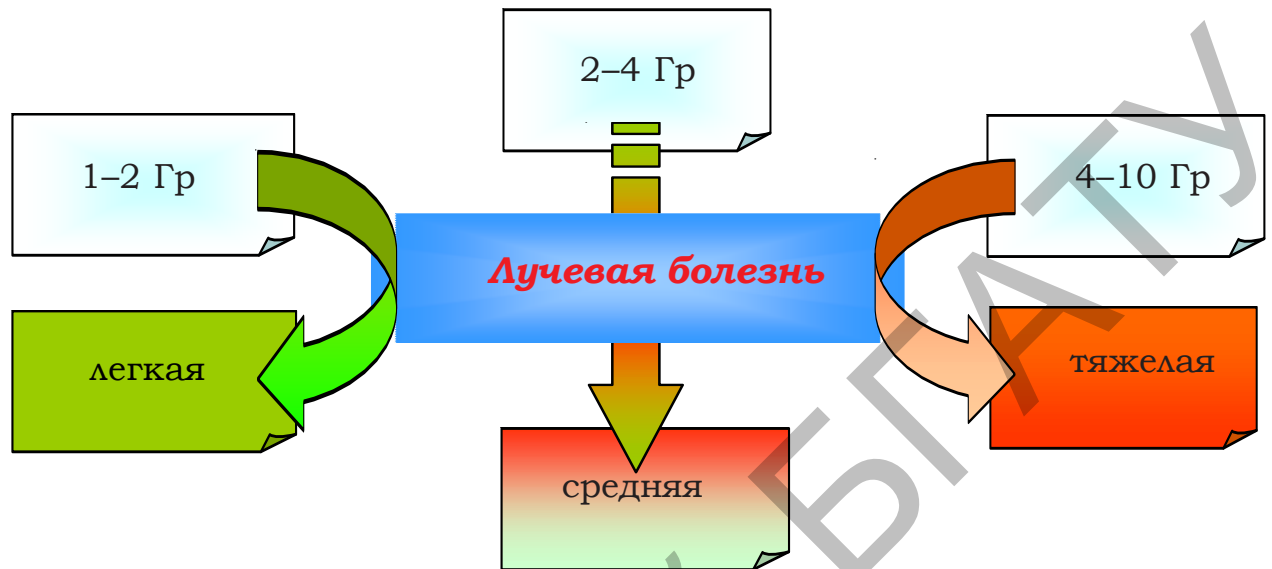
Большие дозы ионизирующего излучения приводят к лучевой болезни.

Лучевая болезнь

*Лучевая болезнь — это комплексная реакция организма на большие дозы ионизирующего излучения.*

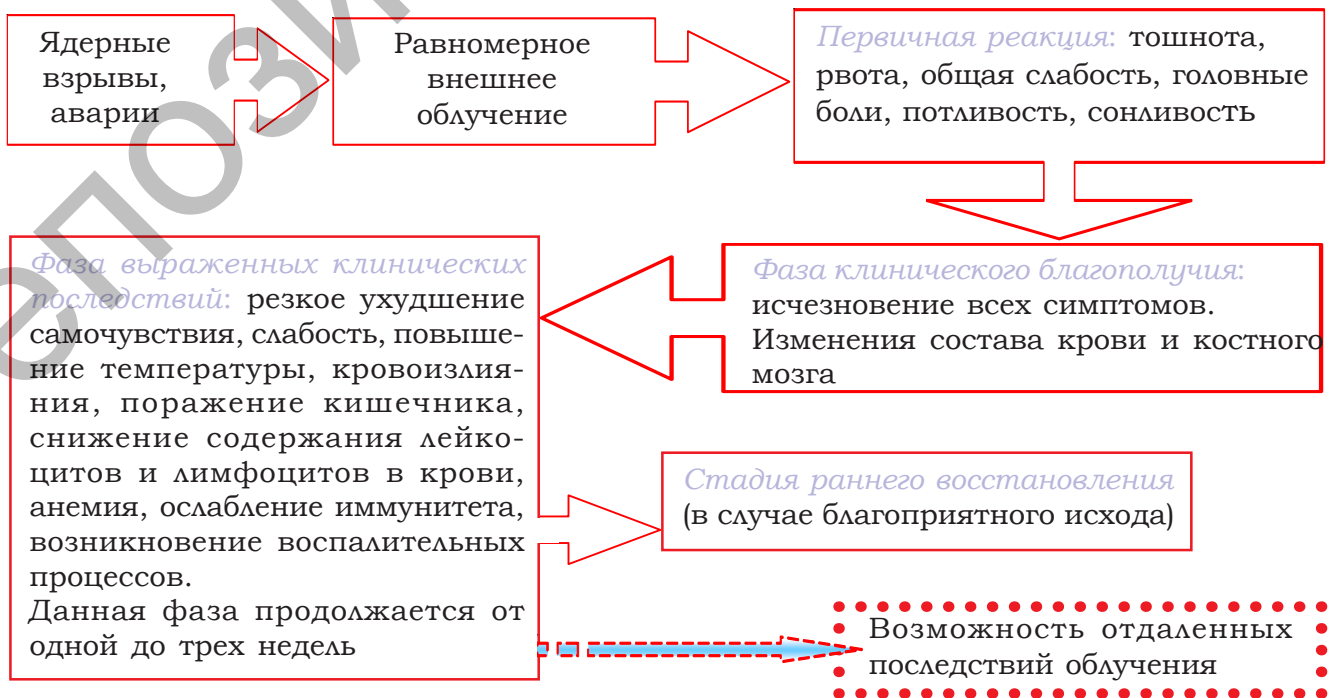
*Лучевая болезнь может быть острой и хронической. Кратковременное действие ионизирующего излучения в больших дозах может приводить к острой лучевой болезни. Например, при однократном равномерном внешнем облучении острая лучевая болезнь может возникать как реакция организма на дозу от 1 до 10 Гр и более. В зависимости от величины поглощенной дозы она может протекать в различной форме и по степени тяжести делится на легкую, среднюю и тяжелую.*

**Поглощенные дозы, при которых возникает острая лучевая болезнь (одократное равномерное внешнее облучение организма человека рентгеновскими или гамма-лучами)**



При поглощенных дозах менее 1 Гр отмечаются нарушения в отдельных органах и системах организма. При дозах выше 10 Гр развивается крайне тяжелая форма болезни с очень быстрым течением и обычно завершается гибелью организма. Подобные условия облучения могут возникать при ядерных взрывах и тяжелых ядерных авариях.

**Реакция организма человека на действие ионизирующего излучения в больших дозах**



### Неравномерное облучение

Подобные условия могут реализоваться при лечении раковых заболеваний (радиотерапия), когда, наряду с раковыми клетками, облучению подвергаются и здоровые клетки.

При *неравномерном* или *локальном* действии ионизирующего излучения в *больших дозах* последствия облучения зависят от степени повреждения критических органов, тканей или систем органов, поражение которых в наибольшей степени будет влиять на жизнедеятельность организма. Например, критическими органами могут оказаться подкожные мягкие ткани, нервная ткань или отдельные части кишечника. Так, при внешнем воздействии *бета*-излучения критическим органом является кожа. Ее поражение определяет последствия облучения для организма в целом.

*Лучевая болезнь* является следствием длительного облучения организма при накоплении поглощенной дозы до уровня 0,7–1 Гр (при ежедневном накоплении 1–5 мГр). Лучевая болезнь может также развиваться и в результате длительного *локального* облучения организма человека.

При лучевой болезни в тканях, состоящих из активно делящихся клеток, идут интенсивные процессы клеточного обновления.

В таких системах, как нервная, сердечно-сосудистая, эндокринная, которые сформированы из неделящихся или слабоделящихся клеток, хроническое лучевое воздействие приводит к медленному нарастанию дистрофических изменений. В этом случае клиническая картина лучевой болезни определяется:

- зоной облучения,
- радиочувствительностью органов или тканей в этой зоне.

### **Биологические эффекты при попадании радионуклидов в организм человека**

Внутреннее облучение человека происходит при попадании источника излучения внутрь организма.

Если в организм попадают *гамма*-излучающие радионуклиды, то значительная часть энергии излучения из-за большой проникающей способности *гамма-квантов* остается непоглощенной и выносится за пределы организма.

*Бета*- и *альфа*-излучение обладают низкой проникающей способностью, поэтому практически вся энергия *альфа*- и *бета*-частиц поглощается в организме. При этом поглощение энергии *альфа*-частиц происходит в ограниченном объеме ткани.

Попавшие в организм (инкорпорированные) радионуклиды могут накапливаться в каком-либо

*Внутреннее облучение* вызывают радионуклиды, попавшие в организм

- с пищей и водой,
- с вдыхаемым воздухом,
- через кожу.

После всасывания в кровь радионуклиды разносятся по всему организму и в результате обменных процессов частично выводятся из организма.

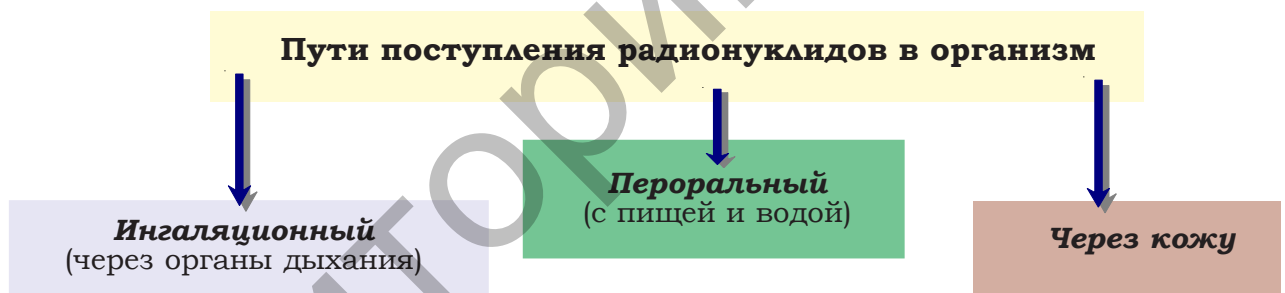
органе. **В этом случае критическими являются органы, избирательно накапливающие радионуклиды.**

Опасность радиоактивных веществ оценивают по следующим параметрам:

- величине коэффициента всасывания радионуклидов в кровь (в легких, кишечнике, коже),
- продолжительности периода полувыведения,
- кратности накопления радионуклидов в том или ином органе или ткани (или в организме человека в целом).

Все перечисленные параметры необходимы для оценки доз облучения органов, тканей, систем органов и организма человека в целом, поскольку от величины этих доз зависит степень повреждения организма.

**Радионуклиды могут попасть в организм ингаляционным путем, перорально и через кожу.**



Важным параметром, характеризующим всасывание в кровь радионуклидов, поступивших в организм через органы дыхания, пищеварения или через кожу, является коэффициент всасывания (резорбции),  $K_{ec}$ .

Различают коэффициенты всасывания (резорбции) радионуклидов в кровь

- в легких,
- в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ),
- в коже.

Коэффициент всасывания (резорбции) — это доля радионуклида, поступившего в кровь в одном из перечисленных органов или системе органов, от общего количества радионуклида, поступившего в организм с воздухом в процессе дыхания, пищей и водой или через кожу.

Коэффициент всасывания,  $K_{ec}$

При небольшой величине коэффициента всасывания радионуклиды могут и не накапливаться в легких или в коже, если они удаляются при откашливании или при промывании.

Небольшая величина коэффициента всасывания радионуклида (несколько процентов и менее) при его всасывании в кровь в ЖКТ (при поступлении радиоактивных веществ с пищей и водой) означает, что радионуклид практически не накапливается в организме. Он проходит через ЖКТ транзитом и выводится с калом.

Чем выше величина коэффициента  $K_{вс}$  радионуклида в ЖКТ, тем в большей степени он всасывается в кровь и с кровотоком перераспределяется по организму человека.

Период биологического полувыведения ( $T_B$ ) — это промежуток времени, в течение которого активность накопленного в организме (или в отдельном органе) радионуклида сокращается наполовину в результате естественных биологических процессов.

Величина периода биологического полувыведения зависит от метаболической активности ткани и свойств самих радионуклидов. Продолжительность этого периода может составлять от нескольких часов до сотен и тысяч лет, то есть значительно превышать продолжительность жизни человека.

Время, в течение которого органы и ткани подвергаются облучению, зависит не только от величины биологического периода полувыведения. С течением времени содержание попавших в организм радионуклидов уменьшается и в результате их радиоактивного распада.

Снижение содержания радионуклидов в организме за счет протекания биологических процессов, способствующих их выведению из организма, и в результате радиоактивного распада радионуклидов учитывают с помощью *эффективного периода полувыведения*.

*Эффективный период полувыведения* — это промежуток времени, в течение которого активность радионуклида в организме уменьшается вдвое за счет процессов биологического выведения и радиоактивного распада радионуклида:

$$T_{эф} = \frac{T_{1/2} \cdot T_B}{T_{1/2} + T_B},$$

где  $T_{эф}$  — эффективный период полувыведения,  
 $T_{1/2}$  — период полураспада,  
 $T_B$  — период биологического полувыведения радионуклида.

Период биологического полувыведения,  $T_B$

$^{137}\text{Cs}$  у человека меняется от **30** *пóд í ê* — в детском возрасте до **90** *пóд í ê* и более — в преклонном возрасте.

Эффективный период полувыведения,  $T_{эф}$ .

Эффективный период полувыведения ( $T_{эф}$ )

- $^{131}\text{I}$  — **7,6 суток**
- $^{137}\text{Cs}$  — **70 суток**
- $^{241}\text{Am}$  — **194 года**
- $^{90}\text{Sr}$  — **18 лет**
- $^{239}\text{Pu}$  — **198 лет**

Чем больше величина эффективного периода полувыведения, тем дольше радионуклид остается в организме и облучает его.

Для оценки содержания радионуклидов в определенном органе (ткани) или в организме человека в целом используют еще один показатель — *кратность накопления*.

**Кратность накопления радионуклида (КН)** — это отношение максимально накопленного количества радионуклида в органе (ткани) или в организме в целом к количеству радионуклида, ежесуточно поступающего в организм.

Если кратность накопления превышает единицу ( $КН > 1$ ), в органе (ткани) или в организме в целом происходит накопление радионуклида. При кратности накопления, равной единице ( $КН = 1$ ), содержание радионуклида остается постоянным. При кратности накопления меньше единицы ( $КН < 1$ ) радионуклид выводится из органа (ткани) или организма.

**Рассмотрим более подробно основные пути поступления радионуклидов в организм человека.**

### Ингаляционное поступление

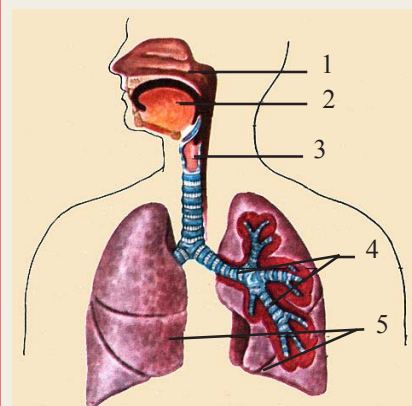
Поступление радионуклидов в организм ингаляционным путем возможно, если в воздухе присутствуют радиоактивные газы или радиоактивные аэрозоли в виде пыли, тумана, дыма. Из-за большого объема воздуха, проходящего через органы дыхания, этот путь может быть наиболее опасным. Биологические процессы с участием радионуклидов при их поступлении в легкие с вдыхаемым воздухом определяют:

- размеры частиц аэрозолей, с которыми связаны радионуклиды,
- физико-химические свойства аэрозолей и соединений, из которых состоят радиоактивные частицы;
- транспортабельность аэрозолей и соединений радионуклидов в организме.

Эти же характеристики определяют пути и скорость выведения радионуклидов из органов дыхания.

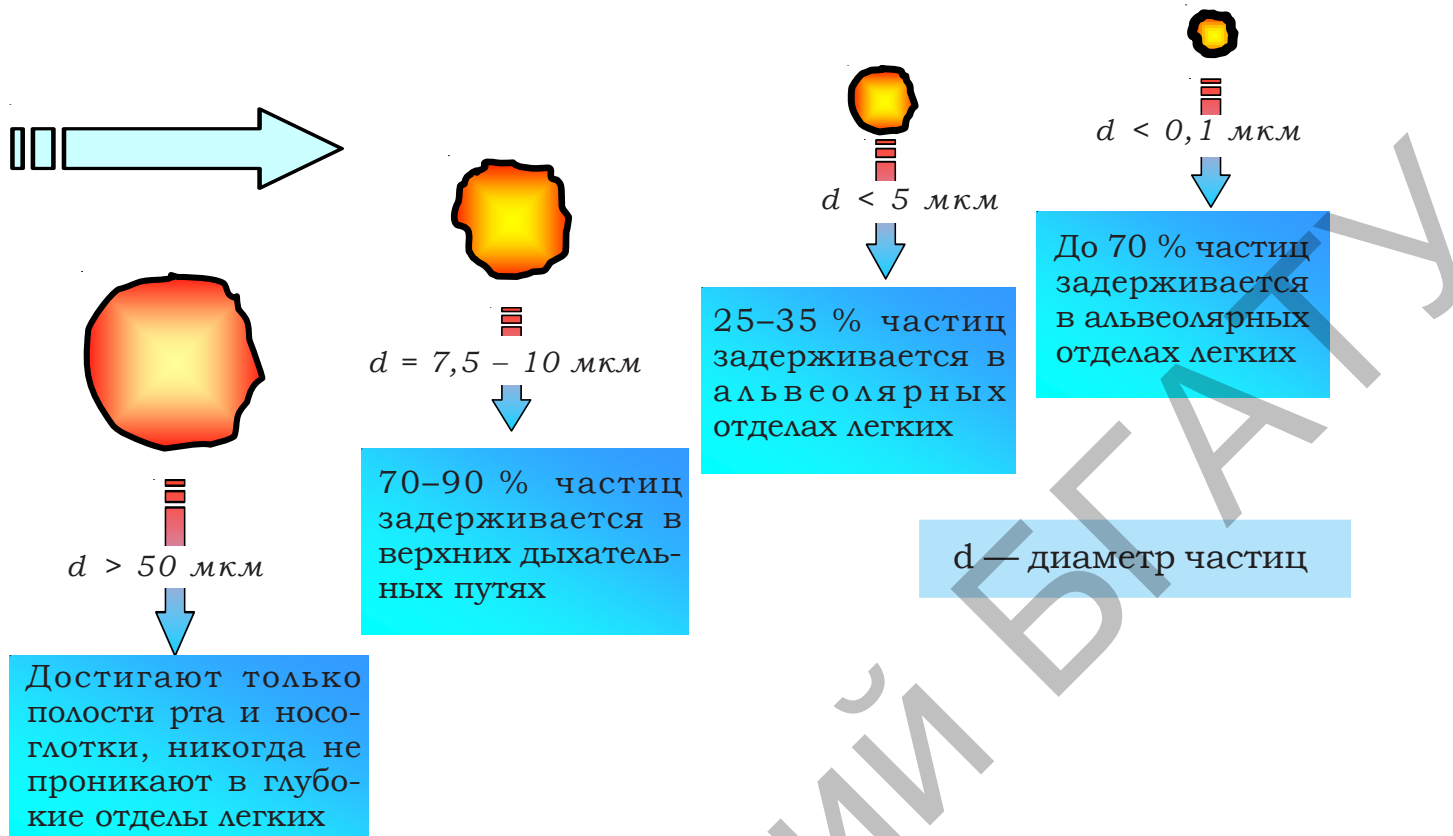
Кратность накопления, **КН**

### Система органов дыхания



- 1 — полость носа
- 2 — полость рта
- 3 — гортань
- 4 — бронхи
- 5 — легкие

Поведение радиоактивных частиц в зависимости от их размера



П о с т у п л е н и е радионуклидов в кровь характеризуют с помощью коэффициента всасывания (резорбции).

Транспортабельность

Судьба частиц, паров, газов и аэрозолей, вдыхаемых и задерживаемых в разных отделах дыхательного тракта, неодинакова.

Хорошо растворимые вещества еще в процессе дыхания могут очень быстро проникать в кровь. Широко развитая в органах дыхания сеть капилляров, через которую осуществляется газообмен, способствует этому процессу.

После проникновения в кровь радионуклиды либо выводятся из организма, либо накапливаются в определенных органах или тканях.

Малорастворимые и практически нерастворимые вещества из верхних дыхательных путей удаляются вместе со слизью и могут попасть в желудочно-кишечный тракт. Если радиоактивные частицы задерживаются легкими, то органы дыхания могут стать критическими по дозовой нагрузке.

Существует классификация радионуклидов в соответствии со скоростью их выведения из легких (транспортабельностью).

Все радионуклиды и их соединения разделяют по скорости выведения из легких на три класса — Д, Н и Г.



### Классификация радионуклидов по скорости выведения из легких (транспортбельности)

Класс транспортбельности	Биологический период полувыведения из легких	Описание
<b>Д</b>	Дни	Соединения радионуклидов, у которых коэффициент всасывания в легких максимален: 0,75 (75%)–1,0 (100%). Это соединения элементов главной подгруппы I группы и элементов I, II и, отчасти, III периодов Периодической системы. Соединения этих элементов, как правило, хорошо растворимы и быстро всасываются в кровь. В эту группу входят соединения калия ( <b>K</b> ), цезия ( <b>Cs</b> ), стронция ( <b>Sr</b> ).
<b>Н</b>	Недели	Все соединения иттрия ( <b>Y</b> ), кроме оксидов, соединения отдельных представителей лантанидов (оксиды лантана ( <b>La</b> ), соединения гадолиния ( <b>Gd</b> ) и др.
<b>Г</b>	Годы	Соединения отдельных представителей лантанидов и актинидов: оксиды церия ( <b>Ce</b> ), урана ( <b>U</b> ), плутония ( <b>Pu</b> ), америция ( <b>Am</b> ) оксиды иттрия ( <b>Y</b> ), соединения циркония ( <b>Zr</b> ) и др.

#### Пероральное поступление

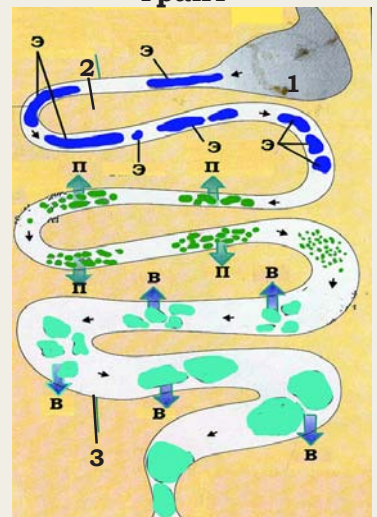
*Пероральный* (с пищей и водой) — распространенный путь поступления радионуклидов в организм человека.

Радионуклиды, попавшие в организм с продуктами питания, всасываются практически на всем протяжении желудочно-кишечного тракта. Минимальное количество радионуклидов всасывается в желудке, двенадцатиперстной и слепой кишках, максимальное — в *тонком кишечнике*. Интенсивность всасывания зависит от физиологического состояния организма и химических особенностей соединений радионуклидов (состава, формы соединений и др.).

Полностью всасываются в пищеварительном тракте соединения калия, цезия, элементов II периода (за исключением бериллия). Несколько хуже всасываются соединения кальция и стронция. Плохо всасываются соединения урана, плутония, америция и других трансураниевых элементов.

Соединения радионуклидов, коэффициент всасывания которых в пищеварительном тракте составляет менее 1% (соединения циркония, ниобия, редкоземельных элементов), довольно быстро, в течение 1–4 суток, выводятся с калом из организма. Поскольку соедине-

#### Схема прохождения пищи через желудочно-кишечный тракт



- 1** — желудок
- 2** — тонкий кишечник
- 3** — толстый кишечник
- э** — энзимы, перерабатывающие пищу
- П** — питательные вещества, всасываемые в кровь в тонком кишечнике
- В** — вода, всасываемая в кровь в толстом кишечнике

Растворимые соединения

ния, содержащие в своем составе эти элементы, непродолжительное время контактируют с организмом (только в период прохождения радионуклидов через желудочно-кишечный тракт), получаемые организмом дозы облучения незначительны. Энергия *альфа*- и *бета*-излучений радионуклидов этой группы поглощается преимущественно содержимым желудочно-кишечного тракта и в значительно меньшей степени — кишечной стенкой.

Радионуклиды, которые входят в состав хорошо *растворимых* соединений и хорошо всасываются в кровь в легких, хорошо всасываются в нее и в кишечнике. При этом в кишечнике радионуклиды всасываются лучше, чем в легких. При одинаковом поступлении радионуклидов в организм человека через органы дыхания и с продуктами питания количество радионуклидов, всасываемых в кровь в легких, составляет порядка 75 % от количества радионуклидов, всасываемых в кровь в кишечнике. Это связано с тем, что в процессе дыхания часть радионуклидов успевает покинуть организм вместе с выдыхаемым воздухом.

Радионуклиды, входящие в состав *малорастворимых* и *практически нерастворимых* соединений, ведут себя иначе. В этом случае при одинаковом поступлении радионуклидов через органы дыхания и с продуктами питания общее количество радионуклидов, всасываемых в кровь в легких, в десятки, а иногда и в сотни раз больше, чем в кишечнике. И это несмотря на то, что процесс растворения соединений радионуклидов после их отложения в верхних дыхательных путях, на слизистой трахеи и средостения протекает чрезвычайно медленно. Еще медленнее происходит поступление этих радионуклидов в кровеносные сосуды. Больше всасывание в кровь радионуклидов, поступивших через органы дыхания, объясняется тем, что время их пребывания в легких в сотни раз превышает время нахождения радионуклидов в кишечнике.

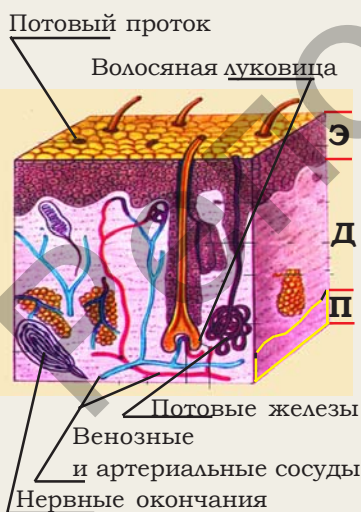
### Поступление радионуклидов через кожу

Радионуклиды могут поступать в организм через всевозможные ссадины и порезы и даже через неповрежденную кожу.

При проникновении радионуклидов через кожу важную роль играют те же факторы, которые определяют проницаемость кишечной стенки и легочной ткани. Различия заключаются лишь в размерах площади

Малорастворимые и практически нерастворимые соединения

### Строение кожи человека



Э — эпидермис

Д — дерма

П — подкожный слой

поверхности кожи, через которую радионуклиды проникают в организм, более значительной ее толщине и наличию рогового и блестящего слоев эпидермиса.

Если вещество проникло через эти слои, то остальные участки эпидермиса и дермы (слоя, расположенного под эпидермисом) практически не препятствуют дальнейшему продвижению радионуклидов.

Радионуклиды довольно быстро всасываются из кожи в кровь. Скорость их всасывания сравнима со скоростью всасывания в кишечнике. При поверхностном загрязнении радиоактивные вещества попадают в микротрещины, ссадины, потовые, сальные железы или волосяные фолликулы кожи. Там они могут либо достаточно долго оставаться, либо в результате диффузии достигать кровеносных и лимфатических сосудов и с током крови перераспределяться по организму.

### Распределение радионуклидов в организме человека



При пероральном и ингаляционном поступлении легко всасывающихся соединений радионуклидов кратность накопления (**КН**) радионуклидов в организме одинакова. С уменьшением всасывания кратность накопления радионуклидов при ингаляционном поступлении увеличивается, а при пероральном — снижается.

При хроническом пероральном поступлении подавляющее большинство радионуклидов не накапливается в организме (**КН** у них меньше единицы). Высокая кратность накопления в организме характерна для  $^{45}\text{Ca}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и всех изотопов радия (**Ra**).

При ингаляционном поступлении в организм человека (особенно при хроническом) радионуклиды могут накапливаться в легких. В этом случае кратность накопления радионуклидов в легких может значительно превышать единицу. Самая высокая крат-

#### Йод

- при любом поступлении в организм активно накапливается в щитовидной железе
- участвует в тех же метаболических процессах в организме, что и стабильный йод

#### Стронций

- по химическим свойствам близок к кальцию (является его химическим аналогом)
- при поступлении в организм включается в обмен веществ совместно с кальцием

*Плутоний и америций*

- могут поступать в организм как при дыхании, так и через желудочно-кишечный тракт и кожу
- попав в легкие в составе малорастворимых радиоактивных частиц, могут оставаться там на годы
- поступив в кровь, в основном, откладываются в печени и скелете

*Цезий*

- по своим свойствам близок к калию (является его химическим аналогом)
- хорошо всасывается в кровь независимо от путей поступления в организм
- достаточно равномерно распределяется по различным органам и тканям

ность накопления в легких (108–116) отмечена для оксидов урана (**U**), плутония (**Pu**), тория (**Th**), палладия (**Pd**) и калифорния (**Cf**).

Максимальная *кратность накопления в отдельном органе* — щитовидной железе — зарегистрирована для радиоактивного йода, независимо от способа поступления элемента в организм человека.

Радиоактивный стронций в значительной степени накапливается в костной ткани (**КН** для  $^{90}\text{Sr}$  — 91).

Радиоактивный цезий может в несколько большей степени, по сравнению с другими тканями и органами, накапливаться в мышцах (**КН** для  $^{137}\text{Cs}$  — 2,6).

Кратность накопления радионуклида в организме в целом или в конкретном органе зависит от периода полураспада радионуклида и может быть различной для радиоактивных изотопов одного и того же химического элемента. Например, при поступлении в организм радиоактивного йода кратность накопления в щитовидной железе  $^{129}\text{I}$ , период полураспада которого составляет  $1,57 \cdot 10^7$  лет, может достигать 3000, а при поступлении  $^{131}\text{I}$ , имеющего период полураспада 8,0 суток, — около 160. Это означает, что при одинаковом поступлении радиоактивных изотопов йода в организм  $^{129}\text{I}$  значительно в большей степени накапливается в щитовидной железе человека по сравнению с  $^{131}\text{I}$ .

Далее приведены некоторые характеристики основных дозообразующих радионуклидов чернобыльского выброса.

**Периоды полураспада ( $T_{1/2}$ ), биологического полувыведения ( $T_b$ ) и эффективные периоды полувыведения ( $T_{эф}$ ) некоторых радионуклидов из организма человека**

Радионуклид	Место накопления	$T_{1/2}$	$T_b$	$T_{эф}$
$^{131}\text{I}$	Все тело Щитовидная железа	8,0 суток	138 суток 138 суток	7,6 суток 7,6 суток
$^{40}\text{K}$	Все тело	$1,28 \cdot 10^9$ года	58 суток	58 суток
$^{137}\text{Cs}$	Все тело	30,0 лет	70 суток	70 суток
$^{90}\text{Sr}$	Кости	28,5 года	49,3 года	18 лет
$^{238}\text{Pu}$	Кости	87,7 года	200 лет	61 год
$^{239}\text{Pu}$	Кости	$2,41 \cdot 10^4$ года	200 лет	198 лет
$^{240}\text{Pu}$	Кости	6540 лет	200 лет	194 года
$^{241}\text{Am}$	Кости	432,2 года	200 лет	137 лет
$^{226}\text{Ra}$	Кости	1600 лет	44,9 года	44 года

К основным факторам, влияющим на величину поглощенной дозы в тканях и органах при внутреннем облучении организма, относятся:

- способ поступления радионуклидов в организм,
- продолжительность поступления радионуклидов,
- распределение радионуклидов в организме,
- время пребывания радионуклидов в организме (продолжительность эффективного периода полувыведения),
- вид ионизирующего излучения, испускаемого при радиоактивном распаде радионуклидов,
- содержание радионуклидов в органе или ткани,
- масса облучаемой ткани,
- отношение массы облучаемой ткани к массе всего тела.

Анализ всех этих факторов позволяет определить дозы облучения отдельных органов и тканей при поступлении радионуклидов в организм с вдыхаемым воздухом, потребляемыми продуктами питания и питьевой водой.

### 5.5. Последствия облучения организма человека

Действие ионизирующего излучения на организм человека может приводить к *острым* и *отдаленным* последствиям.

***Острые последствия являются результатом кратковременного поглощения большой дозы ионизирующего излучения при облучении значительной части тела или местном облучении критических органов, тканей или систем органов, повреждение которых в наибольшей степени влияет на жизнедеятельность организма.***

*Острые последствия* проявляются сразу или в короткие сроки после облучения (в течение нескольких часов, дней, недель).

Полученная практически мгновенно большая поглощенная доза (порядка 5 Гр и более) при воздействии ионизирующего излучения на все тело человека с большой степенью вероятности приведет к летальному исходу в течение нескольких недель. Это связано с тем, что подобное облучение приводит к серьезным нарушениям в костном мозге и пищеварительной системе.

Острые  
последствия

Усилиями врачей можно спасти жизнь человека, получившего дозу до 5 Гр. Однако, если поглощенная организмом доза достигает нескольких десятков Грей (например, 60 Гр), никакие усилия медицинского персонала не помогут человеку избежать летального исхода.

*Острые последствия* облучения обычно проявляются в органах и тканях с *быстро делящимися клетками* и в большинстве случаев приводят к гибели значительного числа клеток.

В органах и тканях, сформированных из медленно делящихся и неделящихся клеток, в результате *кратковременного поглощения большой дозы ионизирующего излучения* происходят изменения, которые могут привести к заболеваниям через значительный промежуток времени (иногда через 10–20 лет) после облучения. Подобные эффекты называют *отдаленными последствиями облучения*.

**Отдаленные последствия облучения — это заболевания, вызванные действием ионизирующего излучения на организм и возникающие спустя длительное время после облучения.**

Последствием дополнительного облучения людей сверх облучения от естественного радиационного фона в обычной среде их обитания может являться сокращение жизни людей такой популяции. Основанием для такого заключения послужили результаты наблюдений за подопытными животными, которые по многим физиологическим параметрам близки человеку.

Оценка, сделанная на основе результатов исследования подобного эффекта у мышей (с поправкой на особенности организма человека), показала, что при *однократном* внешнем облучении каждые 0,01 Гр поглощенной дозы *гамма-излучения* сокращают жизнь человека на 1–15 суток, а при *хроническом* облучении — на 0,08 суток.

Чтобы выяснить, к каким последствиям может приводить действие ионизирующего излучения на организм человека, проводили медицинские наблюдения в больших группах облученных людей. В основном это были жертвы атомных бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки. Наблюдали также за состоянием здоровья шахтеров урановых рудников, жертвами радиационных аварий и катастроф, включая участников ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы, больными, которые подвергались терапевтическому облучению, работниками атомной энергетики и промышленности.

Эпителий кишечника, костный мозг состоят из *быстро делящихся* клеток.

Легкие, сердце, почки, печень, соединительная, нервная и костная ткани состоят из *медленно делящихся и неделящихся* клеток.

Отдаленные последствия

*Заболеваемость или частота заболеваний* — число заболевших людей в группе определенной численности.

Например, 2 заболевания на 100 000 человек.

Кроме того, проводили радиобиологические исследования животных, которых подвергали облучению в лабораторных условиях. Такие же наблюдения велись в контрольных группах, члены которых не подвергались облучению. По численности и составу группы облученных и необлученных людей (или животных) были максимально близки. Результаты наблюдений по заболеваемости в тех и других группах сравнивали между собой.

Как показали наблюдения, при средних и малых дозах облучения сокращение жизни, в основном, связано с увеличением частоты заболеваний крови (лейкозов) и раковых заболеваний отдельных органов и тканей. Первое место в этой группе заболеваний занимают лейкозы. Так, при медицинском обследовании выживших после бомбардировок в Хиросиме и Нагасаки, после двухлетнего скрытого (латентного) периода наблюдали развитие лейкозов, а в среднем через 6–7 лет после облучения регистрировали максимальную частоту лейкозов.

Действие ионизирующего излучения на человека может также вызывать рак молочной и щитовидной желез. Попадание радионуклидов с воздухом в организм человека может приводить к развитию рака легких. Облучение может вызывать и рак кожи. Все эти заболевания, вызванные действием ионизирующего излучения на организм человека, являются *отдаленными последствиями облучения*.

Эффекты, возникающие в результате действия ионизирующего излучения на организм человека, разделяют на *детерминированные* (предопределенные, закономерные) и *стохастические* (случайные, вероятностные).

### **Детерминированные эффекты**

*Детерминированные эффекты* неизбежно возникают при превышении определенных пороговых уровней доз и обычно характерны для больших поглощенных доз ионизирующего излучения (чаще всего 1 Гр и выше).

К *детерминированным эффектам* относятся все острые последствия облучения (радиационные ожоги, лучевая болезнь и др.), а также эффекты, вызванные хроническим облучением при накоплении доз до определенных уровней (например, радиационная катаракта). После достижения порогового значения дозы радиационные эффекты проявляются тем раньше, чем больше доза, и усиливаются по мере увеличения дозы или мощности дозы облучения.

*Латентный период* — промежуток времени после облучения, в течение которого нет никаких видимых признаков заболевания.

*Детерминированные эффекты* обычно возникают в том случае, когда в результате облучения погибло или стало неспособным к воспроизведению значительное число клеток ткани или органа человека. Это может привести к нарушению функции ткани или органа. Нарушения становятся все более серьезными по мере увеличения числа клеток, подвергшихся воздействию ионизирующего излучения. В том случае, когда в результате облучения число погибших клеток в биологической ткани или органе человека превышает число вновь образующихся, это ведет к полной утрате функции ткани или органа. Если серьезно повреждена ткань (или орган), играющая важную роль в жизнедеятельности организма, то конечным результатом может стать смерть человека. Детерминированные эффекты наблюдаются при облучении всего тела человека или локальном облучении критических органов.

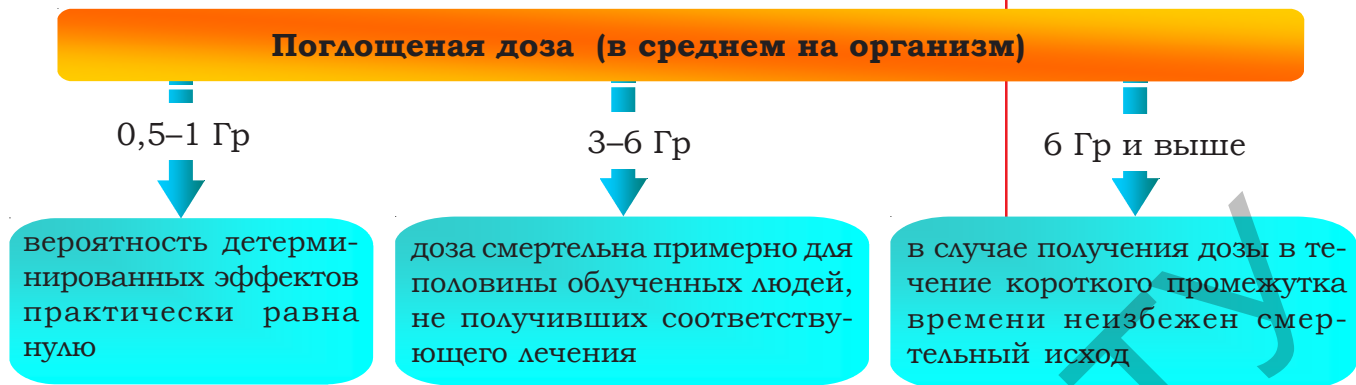
### **Детерминированные эффекты облучения могут вызывать следующие нарушения в организме человека:**



Каждому человеку свойственна индивидуальная чувствительность к действию ионизирующего излучения. У людей с неодинаковой радиочувствительностью сходные детерминированные эффекты могут проявляться при разных дозах облучения.

Это означает, что пороговые значения доз, при которых проявляются детерминированные эффекты облучения, зависят от индивидуальной радиочувствительности человека.





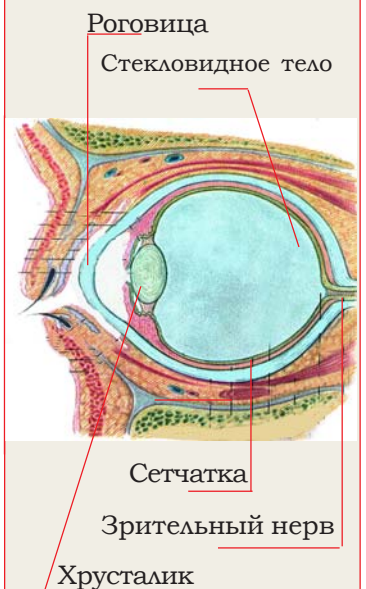
Если организм человека подвергается облучению многократно, поглощенная доза накапливается поэтапно, и величины пороговых доз, при которых возникают детерминированные эффекты, как правило, возрастают. Это свидетельствует о том, что за период времени между облучениями организм человека способен устранять нарушения, вызванные ионизирующим излучением. Благодаря этому организм может ликвидировать негативные последствия облучения. Правда, компенсация бывает неполной, и после многократного облучения в организме могут накапливаться необратимые изменения. В результате, человек, получивший большую дозу облучения, спустя некоторое время после выздоровления может вновь заболеть (отдаленные последствия облучения).

Некоторые детерминированные эффекты проявляются через продолжительное время после облучения. В этом случае могут нарушаться функции отдельных частей тела или возникать незлокачественные новообразования. Такие эффекты обычно не приводят к смерти, однако они могут причинить человеку страдания и сделать его недееспособным.

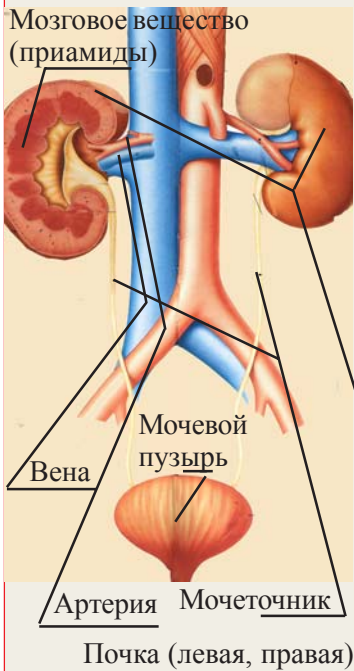
К подобным *детерминированным эффектам* относится и катаракта, вызванная действием ионизирующего излучения в больших дозах (обычно в несколько Грэй) на органы зрения. Облучение глазного яблока может привести к повреждению клеточных волокон, составляющих хрусталик. В результате, происходит помутнение хрусталика и, как следствие, ухудшение зрения.

Возникновение катаракты наблюдается при превышении определенного порогового уровня дозы облучения. При однократном воздействии *гамма*-излучения минимальная доза, вызывающая помутнение хрусталика, составляет 2 Гр. Если получение дозы растянуто во времени, то заболеваемость катарактой сокращается. При поглощенной дозе *гамма*-излучения, равной 6 Гр, катаракта возникает у большинства облученных людей.

#### Строение глаза



**Органы выделения**



В процессе выведения радионуклидов из организма сосуды почек и почечная ткань подвергаются облучению. При больших поглощенных дозах в органах выделения возможно возникновение нефросклероза, когда пораженные участки утрачивают функциональную активность и заменяются соединительной тканью.

Ионизирующее излучение может снижать естественную сопротивляемость организма инфекциям. Основной причиной подавления иммунитета является радиационное поражение костного мозга и, как следствие, сокращение числа лейкоцитов крови, изменение их свойств. Ослабление иммунитета может наблюдаться и в результате хронического облучения в малых дозах. При больших дозах одновременно гибнет большое число клеток, при малых дозах резкого сокращения клеток крови не происходит.

**Стохастические эффекты**

*Стохастические эффекты* характерны для более низких доз, чем детерминированные эффекты, и наблюдаются при средних (от 0,2 до 1 Гр) и малых (менее 0,2 Гр) дозах облучения. Обычно они наблюдаются в тех случаях, когда доза накапливается в течение продолжительного периода времени и в организме нет признаков ранних радиационных нарушений. Тогда организм располагает возможностью самостоятельно устранять некоторые нарушения, возникающие в клетках в результате облучения. Стохастические эффекты проявляются в виде раковых и генетических (наследственных) заболеваний, которые могут возникать через значительный промежуток времени после облучения (в некоторых случаях — через десятилетия, а иногда даже у потомков человека, подвергшегося облучению).

*Стохастические эффекты* — это эффекты, о которых невозможно определенно сказать, реализуются они у конкретного лица или нет. Можно лишь оценить вероятность их возникновения, пользуясь *статистическими методами*.

Известно, что даже единичный акт ионизации биологической молекулы способен вызвать нарушение биологических процессов в клетке. Это событие носит вероятностный (случайный) характер. К каким последствиям приведет единичный акт ионизации, практически невозможно предсказать.

*Стохастические эффекты* возникают в том случае, когда облученная клетка не гибнет, а *изменяется*. Изменившаяся, но жизнеспособная клетка может дать

*Статистические методы* — математические методы, позволяющие

- анализировать случайные явления,
- оценивать надежность и точность выводов, сделанных на основе ограниченного числа данных.

в результате деления новое поколение измененных клеток. Если эти клетки не будут уничтожены защитной системой организма, то после продолжительного латентного периода может развиваться раковое заболевание. При изменениях в половых клетках могут проявиться генетические (наследственные) нарушения у некоторых представителей последующих поколений.

Латентный (скрытый) период, когда заболевание никаким образом не проявляется, может быть различным. Тяжесть заболевания не зависит от величины полученной дозы, но по мере увеличения дозы возрастает вероятность возникновения заболевания.

В настоящее время полагают, что *стохастические эффекты* (в отличие от детерминированных эффектов) являются *беспороговыми*, то есть могут возникать при любых сколь угодно малых дозах облучения.

Пока у ученых нет убедительных доказательств того, что риск заболеваний раком возрастает или снижается при малых дозах облучения организма человека. Несколько случаев заболеваний раком, наблюдаемых в большой группе исследуемых, растворяются в большом количестве случаев аналогичных заболеваний, вызванных другими причинами. Тем не менее, в настоящее время полагают, что при малых дозах облучения нельзя полностью исключить возможность возникновения отдаленных *стохастических эффектов* в виде раковых и генетических заболеваний.

У персонала, работавшего с источниками ионизирующих излучений и получавшего в течение многих лет эффективные дозы до 50 мЗв в год, не было выявлено каких-либо соматических заболеваний. Это вовсе не означает, что подобные эффекты при малых дозах не имеют места. Просто ощутимые изменения в состоянии здоровья не возникают сразу. Они могут проявиться спустя многие годы после облучения, хотя могут и вовсе не проявиться.

Таким образом, действие ионизирующего излучения на организм человека может приводить к *острым* и *отдаленным последствиям*.

*Острые последствия* являются результатом кратковременного поглощения большой дозы ионизирующего излучения при облучении значительной части тела или локальном облучении критического органа человека и проявляются сразу или в течение нескольких часов, дней, недель после облучения.

*Отдаленные последствия* — это заболевания, вызванные действием ионизирующего излучения на организм человека и возникающие спустя длительное время (иногда многие годы) после облучения.

Радиационные эффекты, возникающие в результате действия ионизирующего излучения на организм человека, разделяют на *детерминированные* и *стохастические*.

*Детерминированные эффекты* (предопределенные, закономерные) неизбежно возникают при *превышении определенных (пороговых) уровней поглощенных доз* и приводят к различным заболеваниям (радиационные ожоги, лучевая болезнь, радиационная катаракта и др.). Детерминированные эффекты характерны для больших доз облучения (обычно 1 Гр и выше).

Стохастические эффекты (случайные, вероятностные) проявляются в виде раковых и генетических заболеваний и могут возникать через значительный период времени после облучения. Подобные эффекты не являются неизбежными. Можно говорить лишь о вероятности их проявления в течение жизни человека. Они характерны для средних (от 0,2 до 1 Гр) и малых (менее 0,2 Гр) поглощенных доз ионизирующего излучения.

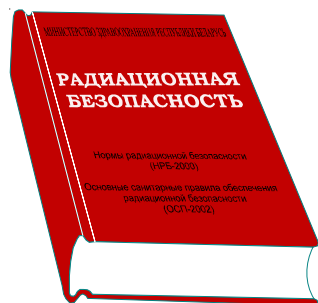
### 5.6. Принципы радиационной безопасности

Деятельность человека по созданию и использованию искусственных источников ионизирующих излучений привела к загрязнению биосферы радионуклидами искусственного происхождения и перераспределению природных радионуклидов в окружающей среде. В результате, увеличилась концентрация радионуклидов в живых организмах и среде их обитания. Массовое получение радионуклидов в искусственных условиях началось лишь в XX веке в связи с развитием ядерных технологий военного и гражданского назначения. При этом многие из искусственно полученных человеком радионуклидов практически не встречались ранее в природной среде и чужеродны живым организмам.

На протяжении всей истории существования человека как биологического вида его организм постоянно подвергался воздействию ионизирующих излучений естественного происхождения. За сотни тысяч лет пребывания на Земле человек приспособился к жизни в подобных условиях, и его организм выработал определенные механизмы защиты от естественной радиации.

За относительно короткий период жизни в атомном веке появилось множество созданных человеком источников ионизирующего излучения, которые подвергают его организм дополнительному облучению по сравнению с облучением от естественного радиационного фона.

Накопленная к настоящему времени информация о действии ионизирующего излучения на организм человека свидетельствует о том, что при определенных условиях ионизирующее излучение может представлять опасность для здоровья и жизни людей. Поэтому создание и широкое применение в современной жизни искусственных источников ионизирующего излучения требует постоянного совершенствования средств и способов защиты от их излучения. Этими вопросами и занимается *радиационная безопасность*.



**Радиационная безопасность населения определяется степенью защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья действия ионизирующего излучения.**

Радиационная безопасность должна быть обеспечена комплексом научно обоснованных мероприятий, защищающих человека и объекты окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения.

Главной целью радиационной безопасности является охрана здоровья людей (включая и тех, кто работает с источниками ионизирующих излучений) от вредного воздействия ионизирующего излучения без неоправданного ограничения их полезной деятельности, приводящей к облучению. Эта цель достигается путем введения определенных пределов (норм) на облучение людей, выше которых не допускается полезная деятельность людей в условиях облучения.

Специалисты в области радиационной безопасности разрабатывают рекомендации по использованию источников ионизирующего излучения. При этом учитывают не только опыт, накопленный в нашей стране, но и опыт специалистов других стран, применяющих подобные источники.

Что же понимают под радиационной защитой?

**Радиационная защита — это комплекс методов и средств, направленных на обеспечение безопасных условий труда персонала и жизни населения в условиях возможного воздействия ионизирующего излучения.**

Цель радиационной защиты:

- предупредить возникновение *детерминированных эффектов* путем поддержания доз ниже соответствующих пороговых уровней,
- обеспечить приемлемые меры для уменьшения вероятности возникновения *стохастических радиационных эффектов* при осуществлении *необходимых* видов деятельности, которые могут привести к облучению.

Радиационная безопасность руководствуется определенными принципами. Основные принципы, лежащие в основе современной радиационной безопасности, представлены на следующей схеме.

Основные принципы радиационной безопасности

**Основные принципы радиационной безопасности**

Принцип оправданности практической деятельности

Никакая практическая деятельность, связанная с облучением, не должна предприниматься, если польза от нее для облученных лиц или общества в целом не превышает ущерба от вызванного ею облучения.

Принцип оптимизации

Дозы облучения должны поддерживаться на разумных уровнях, достижимых с учетом существующих экономических и социальных факторов.

Принцип нормирования

Эффективная доза облучения отдельных лиц не должна превышать предела, рекомендуемого для соответствующих условий.

Одним из важнейших принципов радиационной безопасности является принцип радиационного нормирования, под которым подразумевается нормирование доз облучения людей.

*Нормировать дозы облучения* — это значит устанавливать определенные пределы для доз, которые рекомендуется не превышать в тех или иных условиях облучения людей.

**Представления, лежащие в основе радиационного нормирования**

Концепция предотвращения детерминированных эффектов

Гипотеза порогового действия радиации

До конца 70-х годов XX века в основе радиационного нормирования лежала концепция предотвращения детерминированных эффектов облучения. Эта концепция опиралась на гипотезу порогового действия ионизирующего излучения. Гипотеза порогового действия излучения предполагает, что существует определенный уровень дозовой нагрузки, ниже которого в организме человека радиационные эффекты не возникают.

С 40-х по 60-е годы XX века происходило бурное развитие исследований, связанных, главным образом, с разработкой ядерных технологий военного назначения. Недостаток знаний о биологическом действии ионизирующих излучений и несовершенство ядерных технологий приводили тогда к облучению людей в значительных дозах.

По мере развития ядерной энергетики и других направлений использования искусственных источников ионизирующего излучения, с расширением знаний о биологическом действии радиации возникла потребность в новых подходах к обеспечению радиационной безопасности.

В конце 70-х годов XX века в основу радиационного нормирования была положена *концепция ограничения вероятности возникновения стохастических радиационных эффектов*. Эта концепция опиралась на гипотезу о беспороговом действии излучения, то есть представлении об отсутствии в области малых доз определенного уровня дозы (порога), ниже которого стохастические радиационные эффекты не возникают. Эта гипотеза допускает возникновение стохастических радиационных эффектов при любых сколь угодно малых дозах облучения.

С уменьшением эффективной дозы и ее мощности опасность возникновения раковых заболеваний в результате облучения не устраняется. Увеличивается лишь скрытый период до проявления заболевания, и заболевание может не проявиться за оставшуюся часть жизни конкретного человека.

С 90-х годов XX века в основу нормирования положена *концепция ограничения ущерба* в результате возникновения *стохастических радиационных эффектов*, которая также опирается на гипотезу о беспороговом действии ионизирующего излучения.

«Ущерб» — это сложное понятие, которое в данном случае подразумевает только вред, наносимый здоровью людей и их потомства в результате облучения.

Ущерб учитывает:

- вероятность возникновения радиационных эффектов,
- степень тяжести радиационных эффектов,
- время их проявления.

*Ущерб выражают количеством лет полноценной жизни человека, утраченных в результате заболевания или преждевременной смерти, вызванных облучением.*

При определении ущерба учитывают:

- вероятность преждевременной смерти в результате смертельного заболевания раком за оставшееся время жизни человека (это время зависит от возраста человека);
- вероятность тяжелого генетического нарушения, которое приводит к преждевременной гибели потомков облученных людей в первых двух поколениях;
- вероятность излечиваемых случаев раковых заболеваний.

Концепция ограничения вероятности стохастических эффектов

Гипотеза о беспороговом действии радиации

Принятие гипотезы о беспороговом действии ионизирующего излучения на организм человека означает отказ от представления об отсутствии радиационных эффектов при дозах облучения ниже определенного уровня.

Концепция ограничения ущерба от стохастических радиационных эффектов

Полагают, что при эффективной дозе облучения населения 1 мЗв дополнительно к дозе облучения от естественного радиационного фона продолжительность жизни человека, в среднем, сокращается на 0,4 дня.

### Как оценивают вероятность возникновения стохастических эффектов при малых дозах облучения

В настоящее время установлено, что вероятность *стохастических радиационных эффектов* зависит от величины дозы облучения. Однако до сих пор достоверно не известно, как вероятность возникновения стохастических эффектов зависит от величины дозы в диапазоне *малых доз*.

Для описания этой зависимости Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) было предложено использовать, так называемую, *линейно-беспороговую гипотезу* возникновения стохастических радиационных эффектов. Согласно этой гипотезе, существует линейная зависимость между вероятностью возникновения стохастических радиационных эффектов и величиной эффективной дозы облучения человека (линейная модель).

Одним из наиболее важных стохастических эффектов является онкологическое заболевание (рак). Это всегда серьезное заболевание и нередко смертельное. Хотя причины многих раковых заболеваний до сих пор не выявлены, известно, что действие некоторых факторов, например, табачного дыма, асбеста, коротковолнового ультрафиолетового излучения, а также ионизирующего излучения может индуцировать некоторые виды раковых заболеваний.

Как уже отмечалось, радиация может вызывать некоторые виды мутаций **ДНК** в клетках биологических тканей. Эти мутации могут приводить к аномальному росту клеток, которые иногда ведут к развитию злокачественных новообразований, то есть к заболеванию раком.

Каким же образом можно оценить риск возникновения раковых заболеваний, вызванных облучением, если по клиническим признакам мы не можем отличить их от раковых заболеваний, вызванных другими причинами? На практике для этого используют результаты эпидемиологических исследований, то есть статистических исследований тех или иных нарушений в определенных группах людей.

Предположим, мы располагаем информацией о группе облученных людей: численности людей в этой группе и дозах облучения, которые они получили. В процессе наблюдения устанавливают число случаев раковых заболеваний и сопоставляют их с дозой облучения. Затем определяют число ожидаемых подобных заболеваний в другой группе людей, которые не подвергались дополнительному облучению. Путем сравнения этих данных можно установить увели-

МКРЗ — Международная комиссия по радиологической защите

Линейно-беспороговая гипотеза

Сведения о стохастических эффектах облучения получены в результате обследования:

- людей, переживших ядерные атаки в Хиросиме и Нагасаки,
- пациентов, подвергшихся облучению при лечении и диагностике,
- групп лиц, подвергшихся облучению во время работы.



чение риска возникновения раковых заболеваний в расчете на единицу дозы дополнительного облучения. Обычно эту величину называют *фактором риска*.

Чтобы оценки были как можно точнее, необходимо сравнивать большие группы людей, учитывать такие факторы, как возраст и пол, которые оказывают влияние на спонтанное развитие заболевания. Но даже если исследуемая группа велика (до 80 тыс. чел.), достоверно обнаружить увеличение числа заболеваний раком в результате облучения можно лишь при средних уровнях доз облучения, превышающих 0,2 Зв.

### Предполагаемая линейная зависимость вероятности возникновения раковых заболеваний от величины эффективной дозы облучения



Рисунок иллюстрирует связь между заболеванием раком и облучением, которую характеризует значительный уровень спонтанных раковых заболеваний в популяции и относительно небольшая вероятность возникновения дополнительных заболеваний под действием излучения. Под спонтанными случаями подразумеваются раковые заболевания, индуцированные действием всех факторов, которые вызывают подобные болезни в современных условиях жизни людей, включая и облучение от естественного радиационного фона, поскольку разделить влияние естественной радиации и других факторов на возникновение раковых заболеваний пока невозможно. Ниже уровня 2,4 мЗв в год находится область доз, где не известно, как вероятность возникновения раковых заболеваний зависит от величины эффективной дозы облучения человека.

ВОЗ — Всемирная организация здравоохранения

*НКДАР* — научный комитет по действию атомной радиации, образованный Генеральной Ассамблеей ООН в 1955 году.

В 2000 году Научный комитет по действию атомной радиации (НКДАР) проанализировал все имеющиеся данные по биологическим эффектам при низких дозах ионизирующего излучения. Комитет пришел к заключению, что *линейно-беспороговая гипотеза* является наиболее научно обоснованной современной гипотезой, которая согласуется с имеющимися данными по возникновению раковых заболеваний у человека.

По линейной зависимости, которая установлена на основе данных, полученных при средних уровнях эффективных доз, экстраполировав (распространив) ее на область малых доз, можно оценивать вероятность возникновения раковых заболеваний при облучении в области *малых доз*.

В то же время, поскольку количество данных в области малых доз до сих пор остается ограниченным, по мнению НКДАР, существующие неопределенности не позволяют считать, что линейная зависимость имеет место во всех случаях.

Так, при облучении организма *альфа*-частицами линейная модель позволяет адекватно оценивать риск возникновения раковых заболеваний у человека. В случае же *бета*- и *гамма*-излучений линейная модель, по-видимому, ведет к завышенной оценке риска для большинства видов рака у человека. Однако эта модель может быть использована для определения верхнего предела риска возникновения раковых заболеваний в результате воздействия *бета*- и *гамма*-излучений.

### **Как получают информацию о стохастических эффектах облучения**

Сведения о стохастических эффектах облучения получены в результате обследования людей, переживших ядерные атаки в Хиросиме и Нагасаки, пациентов, подвергшихся облучению при лечении и диагностике, а также групп лиц, подвергшихся облучению во время работы. При изучении отдаленных последствий облучения человека самой многочисленной наблюдаемой группой была группа лиц, пострадавших от атомных бомбардировок в Японии. Она включала 280 тыс. человек.

Более 50 лет назад при взрыве атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки люди, находившиеся неподалеку от места взрыва, в доли секунды получили смертельные дозы в тысячи Зиверт. Около 90 тыс. человек, находившихся вдали от места взрыва, получили дозу до 1 Гр и выжили. Их до сих пор наблюдают в японских кли-

никах. У многих из них были обнаружены детерминированные эффекты облучения: радиационные ожоги, катаракты, поражения половой системы. При небольших дозах облучения наблюдались и случаи онкологических (раковых) заболеваний. Однако до настоящего времени не было зарегистрировано ни одного случая появления генетических дефектов в последующих поколениях.

Тем не менее, окончательные выводы делать еще рано, поскольку генетические изменения могут накапливаться в виде мутаций, усиливаясь с каждым новым поколением. В конце концов, их постепенное накопление может привести к такому сочетанию мутантных генов, которое проявится в виде генетических нарушений в последующих поколениях.

### **Нормы радиационной безопасности**

При разработке показателей (норм), ограничивающих облучение людей, специалисты в области современной радиационной безопасности учитывали, что даже при малых дозах облучения могут возникать эффекты, вредные для здоровья людей. Поскольку детерминированные эффекты возникают при превышении определенных уровней доз (порогов), их можно избежать, ограничив дозы облучения отдельных лиц. В то же время стохастические эффекты нельзя полностью устранить, поскольку для них не существует дозовых порогов. Однако можно предпринять разумные меры, чтобы снизить вероятность появления стохастических эффектов.

В процессе разработки и утверждения норм радиационной безопасности Национальная комиссия по радиационной защите (НКРЗ) Республики Беларусь исходила из основных принципов радиационной защиты и принятых международных норм по радиационной безопасности. При этом учитывался опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты населения, и отечественный опыт.

*Радиационное нормирование — это регламентирование дозовых нагрузок людей.*

При практической деятельности людей в условиях воздействия ионизирующего излучения для разных категорий облучаемых лиц (населения и персонала) установлено *три класса нормативов*:

- основные пределы доз (ПД),
- допустимые уровни воздействия излучения, являющиеся производными от основных пределов доз

(пределы годового поступления радионуклидов (ПГП); допустимые среднегодовые объемные активности (ДОВА) веществ, допустимые удельные активности (ДУА) веществ и др.);

- контрольные уровни (дозы, активности и др.), значения которых должны учитывать достигнутый уровень радиационной безопасности и обеспечить условия, при которых радиационное воздействие будет ниже допустимого.

**Предел дозы (ПД) — величина годовой эффективной или эквивалентной дозы техногенного облучения, которая не должна превышать в условиях нормальной работы источников ионизирующего излучения.**

При соблюдении предела годовой дозы для профессионалов предотвращается возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов для населения обеспечивается на приемлемом уровне.

При установлении предела дозы выбирается такой уровень эффективной дозы, при котором равномерное облучение тела человека (с одинаковой эквивалентной дозой во всех органах и тканях) не может вызвать неблагоприятных изменений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами:

- для персонала — в течение 50 лет трудовой деятельности,
- для населения — в течение 70 лет жизни.

Согласно закону Республики Беларусь «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС», на территории, где трудовая деятельность не требует никаких ограничений, среднегодовая эффективная доза облучения населения от чернобыльских радионуклидов может превышать соответствующую дозу облучения от естественного радиационного фона не более чем на 1 мЗв, в среднем, за любые 5 лет.

Если среднегодовая доза облучения населения превышает установленные пределы доз, на территории, загрязненной радионуклидами, должны проводиться защитные мероприятия, вплоть до отселения людей.

Чтобы контролировать поступление радионуклидов в организм человека, вводят такую характеристику, как *предел годового поступления радионуклида*.

Предел дозы

**Эффективная доза облучения**

не должна превышать:

- для населения — 70 мЗв за период жизни 70 лет;
- для персонала в нормальных условиях эксплуатации источников ионизирующего излучения — 1 000 мЗв за период трудовой деятельности 50 лет.

*Предел годового поступления радионуклида в организм человека*

**Предел годового поступления (ПГП) радионуклида — это суммарная активность радионуклида (в Беккерелях), поступление которого в организм условного человека в течение года может привести к получению эффективной дозы, равной пределу годовой дозы.**

Целью регламентирования содержания радионуклидов в продуктах питания, воде и вдыхаемом воздухе является снижение дозы внутреннего облучения людей.

Пределы годового поступления радионуклидов в организм человека с пищевыми продуктами для населения составляют:

$^{137}\text{Cs}$	— 77 кБк
$^{90}\text{Sr}$	— 13 кБк
$^{239}\text{Pu}$	— 2,4 кБк
$^{240}\text{Pu}$	— 2,4 кБк
$^{241}\text{Am}$	— 2,7 кБк.

### Ограничение облучения людей от излучения промышленных и природных источников

Чтобы ограничить облучение населения от промышленных источников ионизирующего излучения, предпринимают меры, обеспечивающие:

- сохранность источников излучения,
- контроль за их применением.

При облучении населения в процессе проведения *медицинских исследований* контроль доз является обязательным.

Ограничения на облучение населения введены также и в случае существования отдельных *природных источников излучения*.

Нормируется:

- содержание радона в питьевой воде, минеральных и лечебных водах;
- содержание радона и продуктов его распада в помещениях жилого и производственного назначения,
- содержание некоторых природных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{40}\text{K}$ ) в строительных материалах, фосфорных удобрениях, мелиорантах и др.

Нормируется также содержание природных и искусственных радионуклидов в *питьевой воде*. При этом устанавливаются предельные уровни удельных активностей проб воды по сумме *альфа-излучающих* (0,1 Бк/кг) и сумме *бета-излучающих* (1,0 Бк/кг) радионуклидов.

Установленные нормы позволяют оценивать существующий уровень радиационной безопасности. Кроме того, нормирование служит основой для принятия мер, обеспечивающих создание условий, при которых радиационное воздействие на человека будет ниже допустимого уровня.

Радиационное воздействие может сочетаться с воздействием физических, химических и биологических агентов.

### Биологические агенты

отдельные виды вирусов, гормоны

### Химические агенты

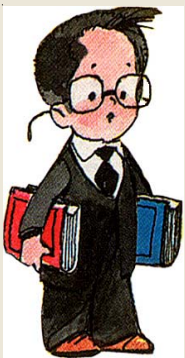
оксиды азота, углерода, серы, нитраты, хлорорганические соединения, углеводороды, пестициды, соединения тяжелых металлов и др.

### Физические агенты

инфракрасное излучение, ультразвук, вибрация, магнитные, электрические и тепловые поля

Следует отметить, что сочетание радиационного и других факторов может ослаблять (антагонизм) или усиливать (синергизм) воздействие ионизирующего излучения на организм человека.

Итак,



В настоящей главе Вы узнали, что

- солнечное и космическое излучения, а также излучения радионуклидов, входящих в состав земного вещества, оказали существенное влияние на формирование и эволюцию биосферы Земли,
- непрерывное поступление на Землю энергии солнечного излучения обеспечивает сохранение и устойчивость биосферы. Освобождение ядерной энергии в процессе распада радионуклидов земного вещества и преобразование этой энергии в тепловую энергию помогает поддерживать тепловой баланс планеты,
- вместе с тем, ионизирующее излучение способно вызывать нарушения структуры биологических молекул в клетках, из которых сформированы ткани, органы человека, и приводить к детерминированным или стохастическим радиационным эффектам,
- в процессе эволюции в организмах выработались биохимические, физиологические и популяционные механизмы защиты от повреждающего действия естественных излучений. Дополнительное облучение, связанное с поступлением в окружающую среду радионуклидов искусственного происхождения, увеличивает вероятность возникновения стохастических радиационных эффектов, проявляющихся в виде онкологических и наследственных заболеваний,
- степень повреждения организма зависит от величины дозы и характера облучения,
- с целью уменьшения негативных последствий действия ионизирующего излучения на организм

человека устанавливают верхний *предел эффективной дозы облучения* от чернобыльских радионуклидов дополнительно к облучению от естественного радиационного фона. В Республике Беларусь *величина этой эффективной дозы составляет 1 мЗв в год* (в среднем, за любые последовательные 5 лет),

- на основе установленной величины предела годовой эффективной дозы регламентируют пределы годового поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания, водой и вдыхаемым воздухом.

### Вопросы для самопроверки и обсуждения:

1. Какова, согласно современным гипотезам, роль естественного излучения в образовании на Земле первых биологических молекул и биополимеров?
2. Где на Земле, по мнению ученых, могли возникнуть первичные организмы? Как Вы думаете, почему?
3. Какова роль солнечного излучения в поддержании жизни на нашей планете?
4. Как может действовать ионизирующее излучение на клетки живых организмов?
5. Чем отличается прямое действие ионизирующего излучения на биологические объекты от его косвенного действия?
6. Какие органы и ткани человека наиболее чувствительны к действию радиации?
7. Перечислите возможные пути проникновения радионуклидов в организм человека?
8. Что такое детерминированные и стохастические эффекты облучения? Приведите примеры тех и других.
9. Что такое радиационная защита населения, каковы ее цели?
10. Какая предельная величина годовой эффективной дозы облучения населения установлена в Республике Беларусь?
11. Что такое предел годового поступления радионуклидов?
12. Какие нормативные документы регламентируют содержание радионуклидов в продуктах питания и в питьевой воде?



**Ключевые слова и словосочетания:** радиоактивные изотопы, ядерное деление, ядерный реактор, ядерное топливо, атомная электростанция, тепловыделяющие элементы, радиоактивные отходы, ядерная авария

Достигая новых вершин научного знания и используя достижения технического прогресса, изобретательный ум человека открывает новые возможности применения источников ионизирующего излучения, получения и использования ядерной энергии. Одним из наиболее важных достижений научно-технического прогресса является разработка способов получения и использования ядерной энергии в мирных целях. Благодаря источникам ионизирующего излучения можно вовремя распознать болезни и эффективно лечить людей, укротив энергию ядерного деления, обеспечить свет и тепло в домах людей, с помощью радиоактивных нуклидов — изучать протекание самых разнообразных процессов. Источники ионизирующего излучения помогают получать уникальную промышленную продукцию, повышать и сохранять урожай сельскохозяйственных культур.

Изучив главу...



Вы познакомитесь с применением радионуклидов и других источников ионизирующего излучения в медицине, науке, промышленности, сельском хозяйстве. Вы узнаете, что такое ядерный топливный цикл, как устроен и действует ядерный реактор, каким образом получают электрическую энергию на атомной электростанции. Вы также узнаете, с какими проблемами приходится сталкиваться в ядерной энергетике.

### 6.1. Использование источников ионизирующего излучения в медицине, промышленности, науке и сельском хозяйстве

Изотопы химического элемента отличаются друг от друга числом нейтронов в атомном ядре. При одинаковом количестве протонов в ядре и одинаковом строении электронных оболочек стабильные и радиоактивные изотопы одного и того же химического элемента практически одинаковы в химическом отношении. При этом, в отличие от стабильных, радиоактивные изотопы элементов в процессе радиоактивного распада испускают излучение, характерное для каждого радионуклида, и имеют определенные величины периода полураспада. Современные методы детектирования ионизирующего излучения позволяют определять ничтожно малые количества радионуклидов путем измерения интенсивности их излучения.

Химическое сходство стабильных и радиоактивных изотопов элемента и высокая чувствительность методов определения радиоактивных нуклидов позволяют использовать их для изучения поведения атомов химических элементов в различных процессах.



Это открывает широкие возможности для применения радионуклидов в медицине, науке, промышленности, сельском хозяйстве.

Радионуклиды, используемые для изучения поведения атомов химических элементов в различных процессах, называют *радиоактивными индикаторами*, а метод, основанный на их применении, *методом «меченых» атомов*.

### **Факторы, определяющие возможность применения радионуклидов**

- Одинаковые химические свойства стабильных и радиоактивных изотопов химического элемента
- Определенная продолжительность и постоянство периода полураспада конкретного радионуклида
- Определенный вид излучения, испускаемого при радиоактивном распаде каждого радионуклида
- Наличие приборов, регистрирующих предельно малые количества радионуклидов по их излучению
- Различная степень поглощения излучения в средах разного состава и плотности
- Высокая проникающая способность *гамма*- и рентгеновского излучений

Особенности радионуклидов позволяют с высокой точностью определить их количество и места нахождения. Особенности ионизирующего излучения позволяют изменять физические и химические свойства веществ при облучении.

### **Медицина**

Источники ионизирующего излучения широко используются в медицине. Можно выделить следующие области их применения:

- лучевая диагностика,
- радиоизотопная диагностика,
- радиационная терапия.

### **Лучевая диагностика**

Ежегодно большая часть населения проходит рентгенологическое обследование. Рентгеновские лучи обладают высокой проникающей способностью и дают возможность врачам «заглянуть» внутрь организма. При прохождении через тело рентгеновские лучи в большей степени поглощаются плотным веществом костной ткани и значительно слабее — мягкими тканями.

Если позади тела расположить фотоматериал, чувствительный к действию рентгеновских лучей,

*Эффективные дозы облучения жителей Земли от источников ионизирующего излучения, применяемых в медицине, составляют, в среднем, 0,4 мЗв в год.*

*Доза облучения, получаемая человеком при рентгенографии грудной клетки, — 0,1 мЗв.*

*Компьютерный томограф* представляет собой устройство, внутри которого по периметру кольцеобразного держателя расположены источник излучения и детекторы излучения. Пациент размещается на горизонтальной плоскости, которая при томографическом анализе медленно вдвигается внутрь вращающегося кольца. Узкий пучок лучей многократно проходит через тело человека, пересекая его в различных направлениях, и на выходе регистрируется детекторами.



*Компьютерная томография* позволяет

- обнаруживать невидимые на обычных рентгеновских снимках детали анатомического строения органов,
- выявлять патологические изменения в организме (травмы, опухоли, поражение лимфатических узлов, расширение сосудов), которые при обычном рентгеновском обследовании не удастся установить.

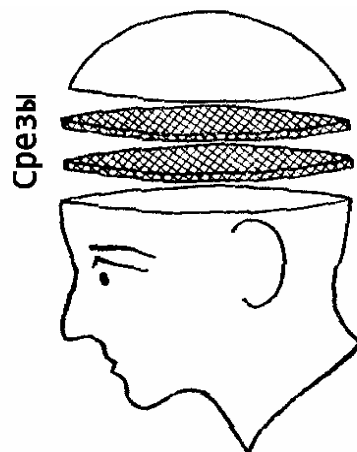
по интенсивности потемнения фотопленки после проявления можно судить о внутреннем строении органов, которые «просвечиваются» рентгеновскими лучами. Степень потемнения фотоматериала зависит от интенсивности рентгеновских лучей, прошедших через организм. На рентгеновском снимке кости, пропускающие меньшую часть рентгеновского излучения, выглядят светлыми, а мягкие ткани, через которые проходит большая часть излучения, — темными.

С помощью рентгеновского снимка можно выявить трещины и переломы костей, обнаружить камни в почках или желчном пузыре, выявить опухоли в органах и тканях.

Величайшим достижением явилась разработка такого метода диагностики заболеваний, как компьютерная томография. В 1979 году А. Кормаку и Г. Хаунсфильду, создателям метода компьютерной томографии, была присуждена Нобелевская премия.

*Томография — метод неразрушающего послойного исследования внутренней структуры объекта посредством просвечивания его в различных направлениях (так называемое «сканирующее просвечивание»).*

Первоначально компьютерный рентгеновский томограф был разработан для исследования головного мозга. Вся процедура компьютерной томографии занимает несколько минут. Источник рентгеновского излучения вращается вокруг головы пациента и узкий пучок лучей многократно проходит через головной мозг, пересекая его в различных направлениях. После прохождения через голову пациента лучи регистрируются детектирующим устройством. В регистрирующей системе, частью которой является детектор, возникает электрический сигнал.



С помощью компьютера получают изображение внутренней структуры головного мозга. На изображении можно детально рассмотреть определенные участки мозга

Электрические сигналы считываются и информация поступает в компьютер. В результате, с помощью компьютерной обработки получают изображение тонких слоев головного мозга на экране дисплея. Одновременно получают и общий вид исследуемой области с указанием положения отдельных слоев.

В настоящее время существует несколько разновидностей метода томографии:

- рентгеновская,
- ядерно-магнитнорезонансная (ЯМР),
- протонная,
- ультразвуковая,
- гамма-томография.

Постоянно разрабатываются новые усовершенствованные модели томографических установок. Современные томографы позволяют получать изображение тонких слоев любой части человеческого тела. У врачей появилась возможность исследовать анатомическую структуру внутренних органов и частей тела человека размером до нескольких миллиметров.

### Радиоизотопная диагностика

Радиоактивные изотопы широко используются в медицине в диагностических целях. Радиоизотопная диагностика основана на регистрации излучения от введенных в организм человека радиоактивных препаратов (*in vivo*) или радиометрии взятых у пациента биологических проб при добавлении к ним радиоактивных веществ (*in vitro*).

В диагностических целях используют радионуклиды, наименее опасные для организма человека и обладающие непродолжительным периодом полураспада.

Диагностика *in vivo* может быть использована для определения состояния различных органов и тканей, их функций, а также для изучения протекания важных биологических процессов в организме человека. Благодаря высокой чувствительности современных детекторов ионизирующего излучения, обследования проводятся при введении в организм человека небольших количеств радиоактивных веществ (около 1 мкг), что обуславливает получение относительно низких доз облучения органами или тканями.

При использовании метода компьютерной томографии пациенты получают в 10 раз более высокие дозы облучения, чем при обычной рентгенографии, поэтому ее используют лишь в тех случаях, когда обычная рентгенография неэффективна.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) — резонансное поглощение электромагнитного излучения ядрами вещества, находящегося в магнитном поле.

Эффективная доза облучения пациента при некоторых диагностических процедурах может достигать 10 мЗв.

Диагностика *in vivo*

По времени накопления и выведения радиоизотопов органами человека, а также равномерности их распределения в ткани можно получить важную информацию о функционировании организма.

Использование радионуклидов для диагностики *in vivo*

Радионуклид	Что помогает установить?
$^{131}\text{I}$	Состояние щитовидной железы
$^{75}\text{Se}$	Функционирование поджелудочной железы
$^{24}\text{Na}$	Скорость кровотока и проницаемость кровеносных сосудов
$^{42}\text{K}$	Нарушения биологических процессов с участием калия
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	Опухоли головного мозга, патологию слюнных желез, крупных сосудов, скелета, почек, печени, сердца

Диагностика *in vitro*

Диагностика *in vitro* основана на радиометрии биологических проб пациента (образцов крови, желудочного сока, тканей и т. п.). Широкое распространение приобрел радиоиммунный анализ — высокочувствительный метод определения содержания в организме человека самых разнообразных гормонов (поджелудочной железы, щитовидной железы, гипофиза и др.), белков сыворотки крови и ферментов.

При проведении радиоиммунного анализа используется радиоактивное вещество, которое не вводят в организм человека, а добавляют к исследуемому биологическому образцу.

При осуществлении радиоиммунного анализа

- пациент не подвергается риску облучения,
- тест можно многократно повторять с целью наблюдения за эффективностью лечения.

Метод позволяет диагностировать заболевания, связанные с нарушением гормонального обмена и деятельности иммунной системы.

Ионизирующее излучение используют в медицине для стерилизации

- хирургических инструментов,
- систем переливания крови,
- аппаратов «сердце», «легкие», «искусственная почка» и др.

Метод основан на способности ионизирующего излучения убивать болезнетворные микроорганизмы.

Радиационная терапия

Широкое распространение получила лучевая терапия в онкологии. Терапевтическое действие радиации основано на способности ионизирующего излучения угнетать процессы деления клеток и, в конце концов, приводить к их гибели, что используется для уничтожения раковых клеток в организме пациента.

Облучение злокачественных новообразований с помощью гамма- и рентгеновских лучей, ускоренных электронов, протонов, альфа-частиц позволило добиться хороших результатов при лечении людей с онкологическими заболеваниями.

Часто облучение опухолей осуществляют с помощью кобальтовой «пушки», которая является источником гамма-квантов высокой энергии. Гамма-кванты непосредственно излучает радиоактивный кобальт ( $^{60}\text{Co}$ ), помещенный в свинцовый сферический контейнер, который служит радиационной защитой прибора.

Иногда в качестве излучателей используют радиоактивные источники в виде

- металлической проволоки, содержащей радиоактивный йод ( $^{132}\text{I}$ );
- зерен, содержащих радионуклид  $^{132}\text{I}$ ;
- игл, содержащих изотоп  $^{226}\text{Ra}$ .

В радиационной терапии радионуклиды иногда вводят и внутрь организма. Так, при хирургическом удалении опухолей в организме может оставаться пораженная ткань. Чтобы избежать появления метастазов (разрастания раковых клеток), в организм вводят радионуклиды, которые концентрируются в больном органе, вызывая гибель раковых клеток.

Ионизирующее излучение применяют также при лечении людей с другими заболеваниями. Так, для лечения больных суставов и нервной системы используют радоновые ванны. Людей с кожными и глазными заболеваниями лечат с помощью аппликаторов, содержащих радиоактивный стронций ( $^{85}\text{Sr}$ ).

### Промышленность

Источники ионизирующего излучения применяют в горнодобывающей промышленности, строительстве, машиностроении, химическом производстве, металлургии, целлюлозно-бумажной, стекольной промышленности и других отраслях производства.

### Примеры использования источников ионизирующего излучения в промышленности

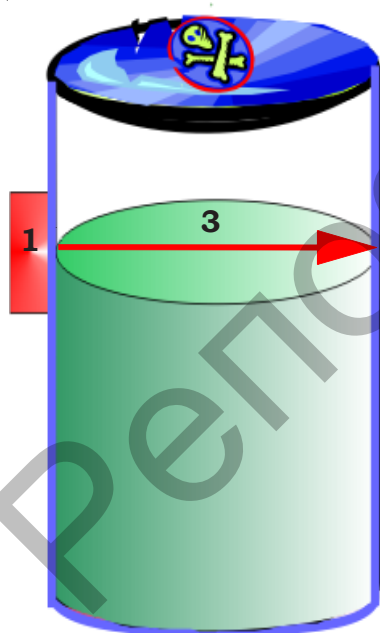
- Обнаружение дефектов в промышленных изделиях.
- Контроль толщины различных материалов.
- Определение уровня жидкости в резервуарах.
- Контроль качества полупроводниковых кристаллов.

*Поглощенные дозы при терапевтических процедурах достигают 20–60 Гр. Чтобы убить только раковые клетки, необходимо очень точно оценивать требуемые дозы и облучать только места локализации раковых клеток.*

*Радиоактивные тулий ( $^{170}\text{Tm}$ ) или европий ( $^{155}\text{Eu}$ ) применяют для обнаружения алмазов в кимберлитовой породе. Под влиянием гамма-излучения этих радионуклидов увеличивается блеск алмазных кристаллов, и они отчетливо выделяются на фоне пустой породы, что облегчает их извлечение.*

- Синтез новых веществ:
  - фенола из бензола,
  - бромэтилена из этилена и бромистого водорода.
- Изменение структуры и свойств материалов:
  - получение композиционных материалов (древяно-, бетоно-, стекло-, цементополимеров);
  - вулканизация полибутадиена и других эластомеров при производстве шин и резинотехнических изделий;
  - нанесение лакокрасочных покрытий на бумагу, дерево, металл, шифер, полимерные пленки;
  - имплантирование (внедрение) примесей в монокристаллы кремния с целью получения полупроводниковых материалов с заданными свойствами.
- Контроль распределения легирующих добавок в сплавах.
- Определение равномерности распределения добавок при варке стекла.
- Контроль утечки токсичных веществ.
- Определение степени износа металлических деталей и истирания поверхностей механических устройств.

**Схема устройства для контроля уровня токсичных жидкостей в замкнутых резервуарах**



- 1 — источник излучения  
 2 — детектор  
 3 — уровень жидкости

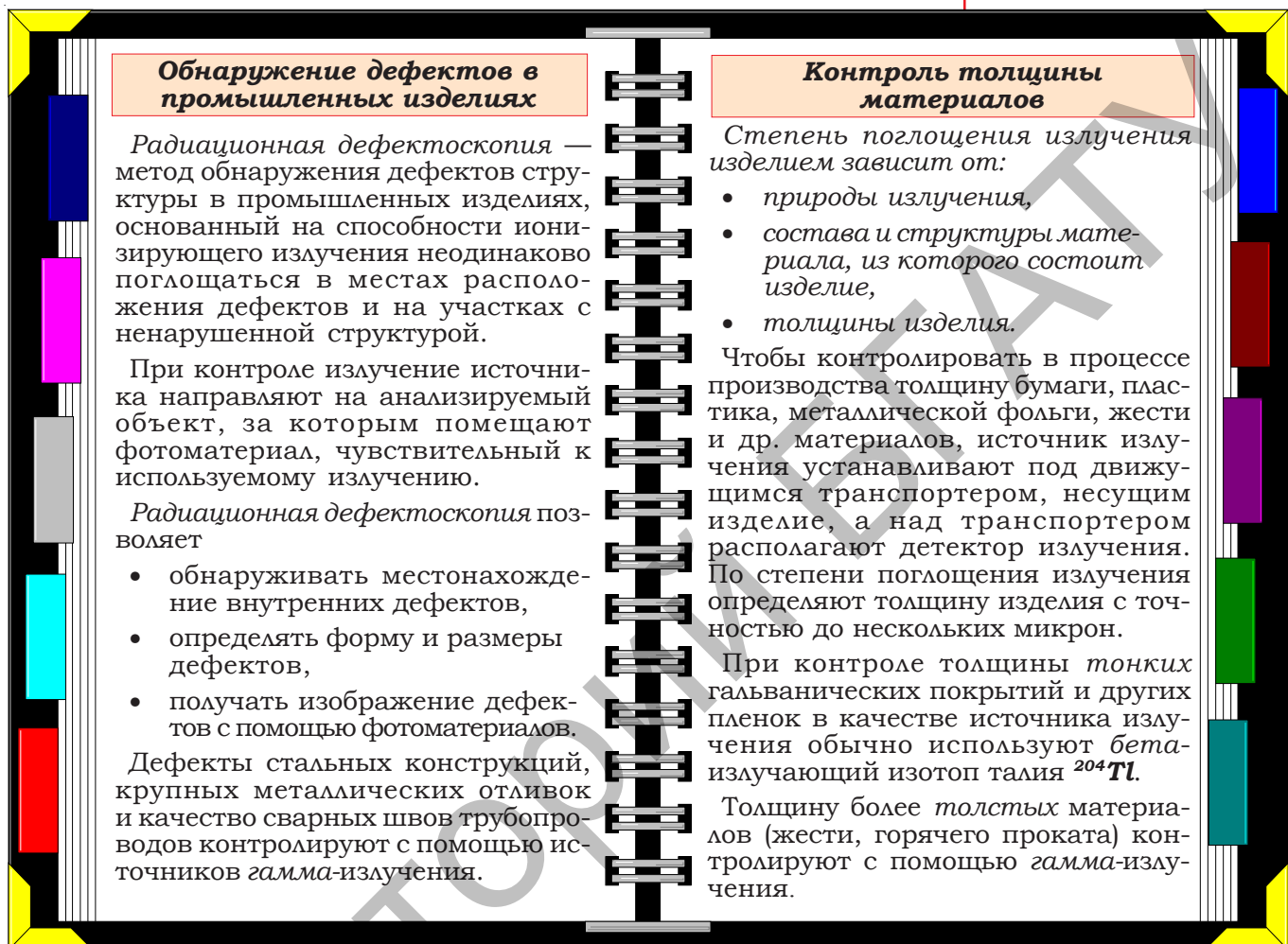
При заполнении емкостей токсичными веществами на химических предприятиях для контроля уровня жидкости в замкнутых резервуарах используют источники ионизирующего излучения. Для осуществления контроля источник излучения и детектор устанавливают на внешней стороне емкости друг против друга. Как только жидкость поднимается выше определенного уровня, интенсивность излучения из-за поглощения жидкостью резко падает и заполнение резервуара автоматически прекращается.

Радионуклиды применяют и для определения герметичности емкостей, заполняемых токсичными веществами. В случае утечки этих веществ, детекторы регистрируют их по излучению радиоактивных добавок, внесенных в токсичное вещество.

Радионуклиды широко используют для контроля производственных технологических процессов. Так, в стекольном производстве процесс варки стекла контролируют с помощью радио-

активного натрия  $^{24}\text{Na}$ , добавляемого в исходное сырье.

Обнаружение дефектов в промышленных изделиях и контроль толщины материалов также осуществляют с помощью источников ионизирующего излучения.



С помощью источников ионизирующего излучения можно изменять свойства материалов (полимеров, лаковых покрытий, резины) и синтезировать новые вещества.

Можно привести множество примеров радиационной обработки материалов с целью изменения их свойств.

- Облучение повышает термостойкость полиэтилена. Температура его размягчения поднимается от  $\sim 373$  до  $623$  К, что позволяет использовать трубы из облученного полиэтилена в системе горячего водоснабжения.
- Радиационная обработка при вулканизации полибутадиена и других эластомеров используется в производстве шин и резинотехнических изделий с целью увеличения их прочности и износостойкости.

В облученных материалах могут происходить *химические изменения*:

- образование поперечных связей между молекулами,
- деструкция (разрушение) макромолекулы,
- появляются «перекрестные» химические связи и образуется своеобразная сетчатая структура. Это приводит к увеличению механической прочности, теплостойкости и др. полезным изменениям свойств материалов.

Рентгеноструктурный анализ

Активационный анализ

Геологические часы

- Источники ионизирующего излучения применяют для улучшения качества композиционных материалов. Метод заключается в способности ионизирующего излучения вызывать полимеризацию мономеров, пропитывающих пористые материалы. Таким способом получают древо-, бетоно-, стекло- и цементополимеры, обладающие повышенной прочностью, упругостью, водо- и морозостойчивостью.
- Радиационную полимеризацию применяют для увеличения адгезии при нанесении лакокрасочных покрытий на бумагу, дерево, металл, стекло, шифер и полимерные пленки.

### Научные исследования

Примером использования ионизирующего излучения в прикладных исследованиях является *рентгеноструктурный анализ*, в ходе которого с помощью рентгеновского излучения определяют особенности структуры кристаллических веществ.

Широкое применение в геологии, геохимии, космохимии имеет *активационный анализ*. О присутствии атомов различных элементов в веществе (без нарушения целостности образца) судят по так называемой *наведенной активности* образца, которая возникает при его облучении. Например, при воздействии нейтронного излучения стабильные ядра атомов золота становятся радиоактивными и испускают *гамма-кванты* определенной энергии, которые можно регистрировать с помощью радиометра или спектрометра и тем самым судить о содержании золота в породе.

Метод *активационного анализа* позволяет определить содержание золота в золотосодержащих рудах порядка  $10^{-4}$  %. Созданы также установки для экспресс-анализа веществ на содержание серебра, алюминия, меди, кремния и других элементов.

По содержанию долгоживущих радионуклидов естественного происхождения и продуктов их распада определяют возраст природных образований. В этом случае радионуклиды используют в качестве «геологических часов». Для определения возраста природных образований используются *свинцово-урановый, калиево-аргоновый, радиоуглеродный* и другие методы.

*Свинцово-урановый метод* заключается в определении содержания в горной породе  $^{238}\text{U}$  и стабильного свинца  $^{206}\text{Pb}$ , являющегося конечным продуктом его



распада. Период полураспада  $^{238}\text{U}$  составляет около  $4,47 \cdot 10^9$  лет. Чем больше  $^{206}\text{Pb}$  накопилось в уран-содержащей горной породе, тем больше ее возраст.

*Калиево-аргоновый метод* состоит в определении соотношения радиоактивного калия ( $^{40}\text{K}$ ) природного происхождения и стабильного аргона ( $^{40}\text{Ar}$ ), являющегося продуктом его распада. Период полураспада  $^{40}\text{K}$  составляет  $1,28 \cdot 10^9$  лет. Этот метод позволяет оценить возраст минералов, содержащих относительно большие количества калия, таких как, например, слюда и полевой шпат.

*Радиоуглеродный метод* основан на определении содержания радиоактивного углерода  $^{14}\text{C}$  в образцах органического происхождения. Период полураспада радионуклида составляет 5 730 лет. Радиоактивный углерод  $^{14}\text{C}$  постоянно образуется в верхних слоях атмосферы и вместе со стабильными изотопами  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  участвует в природном круговороте углерода. На протяжении последних 50 тыс. лет содержание радионуклида  $^{14}\text{C}$  в атмосфере сохраняется относительно постоянным.

Изотопы углерода, в основном, присутствуют в атмосфере в виде диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ) и в результате процесса фотосинтеза переходят в состав более сложных углеродсодержащих органических молекул растительных организмов. Далее по пищевой цепи углерод попадает в организмы животных и человека.

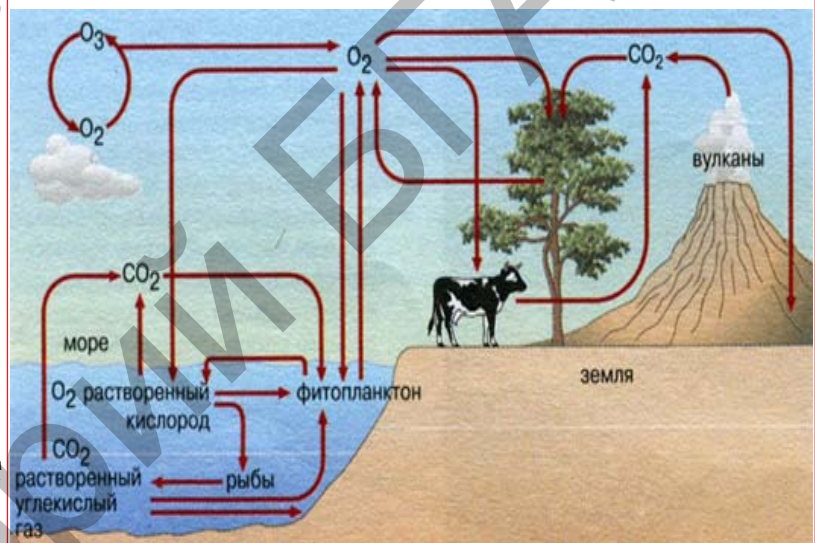
На протяжении жизни концентрация радиоактивного углерода в тканях растений и животных остается такой же, как в атмосфере, поскольку уменьшение содержания изотопа  $^{14}\text{C}$  вследствие радиоактивного распада компенсируется его поступлением из окружающей среды. Однако со смертью организма поступление углерода прекращается, и содержание радионуклида  $^{14}\text{C}$  непрерывно уменьшается.

По изменению в образце содержания радиоактивного углерода определяют промежуток времени, прошедший с момента гибели организма. Этот проме-

С помощью свинцово-уранового метода установлено:

- наиболее древние породы нашей планеты существуют около **4 млрд. лет**
- возраст Земли составляет порядка **4,6 млрд. лет.**

**Круговорот кислорода и углерода**  
Оба элемента постоянно циркулируют в биосфере



Удельная активность образца растительной ткани по радионуклиду  $^{14}\text{C}$ , в среднем, составляет **0,2 Бк/г.**

Современный радиоуглеродный метод позволяет:

- учитывать небольшие изменения во времени содержания радионуклида  $^{14}\text{C}$  в атмосфере,
- определять возраст образцов органического происхождения вплоть до **50 000 лет.**

жуток времени и считают возрастом органического материала, который когда-то был живым организмом.

Радионуклиды широко используют в научных исследованиях в качестве радиоактивных индикаторов (метод «меченых» атомов).

Метод «меченных» атомов

### Применение метода «меченых» атомов

Область научных знаний	Что исследуется?
Физика и химия	Строение химических соединений Механизмы и скорость химических реакций Растворимость веществ Процессы испарения, диффузии, сорбции
Биохимия	Обмен веществ в живом организме Строение и механизмы синтеза белков, нуклеиновых кислот, жиров и углеводов Скорость протекания биохимических реакций
Физиология	Процессы кровообращения, всасывания питательных веществ из желудочно-кишечного тракта, перераспределения различных соединений по организму Выявление роли микроэлементов в физиологических процессах
Фармакология и токсикология	Механизмы всасывания лекарственных препаратов, токсических веществ и их накопление в различных органах и тканях
Микробиология, иммунология и вирусология	Биохимические особенности жизнедеятельности микроорганизмов Механизмы протекания ферментативных и иммунологических реакций
Экология	Процессы миграции веществ в экосистемах

### Сельское хозяйство

В сельском хозяйстве ионизирующее излучение от источников искусственного происхождения используют для:

- повышения урожайности сельскохозяйственных культур,
- выведения новых сортов растений — радиоселекции,
- радиационной стерилизации продуктов питания;
- обеззараживания стоков животноводческих комплексов.

Гамма-излучение применяют для выведения новых сортов пшеницы, фасоли, овса, картофеля, гречихи, фруктовых деревьев, чая, декоративных цветов и других видов растений. Новые сорта растений, полученные путем искусственно вызванных мутаций в растительном организме под действием облучения, относят к генетически модифицированным.

В последнее время все более широкое распространение приобретает радиационная обработка пищевых продуктов с целью уничтожения бактерий, грибков, насекомых-вредителей, предупреждения порчи и уменьшения потерь продуктов при длительном хранении.

Традиционные методы стерилизации основаны на нагревании и химической обработке продуктов, что зачастую приводит к разрушению витаминов, ухудшению вкусовых качеств. Радиационная стерилизация обладает высокой эффективностью, может проводиться для упакованного продукта, не меняет его цвета, запаха, вкуса. Поэтому облучение используют для продления сроков хранения мяса, рыбы, фруктов, овощей, грибов, ягод, приправ и специй. Благодаря радиационной стерилизации, жители северных районов мира могут наслаждаться экзотическими фруктами из тропической Африки.

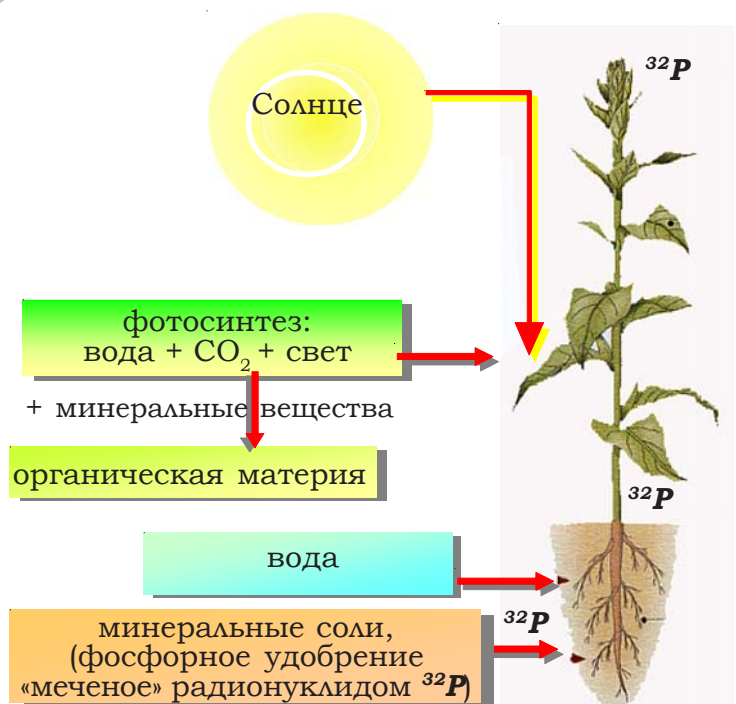
К проведению радиационной стерилизации подходят осторожно. Доказательства безвредности облученных продуктов всегда предшествуют применению на практике подобного способа обработки. Многочисленные исследования свидетельствуют о безопасности для человека пищевых продуктов, подвергнутых радиационной стерилизации.

Кроме использования внешнего облучения, в сельском хозяйстве применяют метод «меченых» атомов. Особенно широко его используют в аграрной науке. С помощью этого метода изучают:

- распределение элементов питания в растительных и животных организмах,

Радиационная стерилизация насекомых, разведенных в неволе, и их внедрение в «дикую» популяцию приводит к потере способности насекомых к размножению. Подобный метод был применен против средиземноморской плодовой мухи.

#### Использование радиоактивного фосфора ( $^{32}\text{P}$ ) для изучения распределения фосфора в растении



- влияние удобрений на развитие растений в зависимости от состава, формы и времени их внесения.

Например, чтобы выяснить, из каких фосфорных удобрений фосфор лучше усваивается растениями, удобрения «помечают» радиоактивным фосфором, добавляя в них радионуклид  $^{32}\text{P}$ . Исследуя затем содержание радионуклида  $^{32}\text{P}$  в растениях, подкормленных разными удобрениями, можно судить о количестве усвоенного ими фосфора.

### 6.2. Принцип действия ядерных реакторов и их типы



Отто Ган  
(1879–1968)



Фриц Штрассман  
(1902–1980)

#### Из истории открытия деления ядер

1938 год

Выдающиеся немецкие радиохимики *Отто Ган* и *Фриц Штрассман*, облучая уран медленными нейтронами, обнаружили барий, который мог быть только продуктом деления ядер  $^{235}\text{U}$ .

Фактически, они открыли, что

- ядра  $^{235}\text{U}$  под действием нейтронов способны делиться,
- реакция деления сопровождается выделением огромного количества энергии.

#### Ядерное деление

Помимо рассмотренных ранее ядерных превращений, сопровождающихся *альфа*-, *бета*- и *гамма*-излучениями, возможны ядерные реакции, при которых происходит *деление тяжелых атомных ядер*.

Способность ядра делиться зависит от соотношения кулоновских сил отталкивания положительно заряженных протонов и ядерных сил связывания нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре, которые действуют лишь на ограниченном расстоянии ( $0,2-1,4 \text{ ф}$ ) и не зависят от заряда нуклонов.

В ядрах тяжелых нуклидов с атомными номерами более 82 силы кулоновского отталкивания возрастают настолько, что ядра становятся крайне неустойчивыми. Подобные ядра подвержены *альфа*-распаду с выделением энергии до 10 МэВ на каждый акт ядерного распада. Однако в некоторых случаях тяжелому ядру энергетически выгоднее не испускать *альфа*-частицу, а разделиться на ядра меньших размеров, поскольку при этом выделяется значительно больше энергии — до 200 МэВ на каждый акт ядерного деления.

**Деление атомного ядра — это вид ядерной реакции, в результате которой тяжелое атомное ядро делится на более легкие ядра, называемые осколками деления.**

Существует *критический размер* ядра, при достижении которого ядро становится способным к самопроизвольному (спонтанному) делению. Критический размер характерен для ядер, содержащих  $\sim 110-120$  протонов. Подобные сверхтяжелые ядра практически мгновенно делятся и не могут существовать в природных условиях. Несмотря на то, что постоянно проводятся успешные эксперименты по их искусствен-

ному получению, до сих пор Периодическая система завершается элементом с атомным номером 109.

Критического размера могут достигать тяжелые ядра и с меньшим количеством протонов, если они получают дополнительное количество энергии и переходят в возбужденное состояние. Возбуждение ядер приводит к увеличению их размеров.

Получить дополнительную энергию, необходимую для возбуждения, тяжелые ядра с размером меньше критического могут при захвате ядерной частицы или кванта электромагнитного излучения.

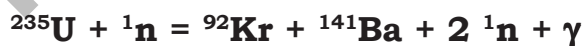
Некоторые виды ядер ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и др.) приобретают способность делиться при облучении нейтронами, протонами, дейтронами, альфа-частицами, гамма- и даже рентгеновскими лучами.

Из всех реакций ядерного деления наиболее широкое применение нашла реакция деления, вызываемая нейтронами. Это связано с тем, что при столкновении с тяжелыми положительно заряженными ядрами нейтронам не приходится преодолевать кулоновское отталкивание протонов. Им легче проникать в ядра атомов тяжелых элементов и инициировать их деление.

Ядро, поглотившее нейтрон, переходит в возбужденное состояние. Оно увеличивается в размере, меняет форму и может разделиться. Чаще всего в процессе деления тяжелое атомное ядро распадается на 2 неодинаковых ядра-осколка разной массы. Гораздо реже образуется 3 или 4 осколка деления.

В процессе ядерного деления и сопровождающих его других ядерных превращений образуется множество разнообразных продуктов.

Типичным примером реакции ядерного деления является расщепление ядра  $^{235}\text{U}$  на ядро криптона ( $^{92}\text{Kr}$ ) и бария ( $^{141}\text{Ba}$ ):



Однако это не единственный способ деления ядра  $^{235}\text{U}$ . В результате деления ядра  $^{235}\text{U}$  образуются и другие осколочные ядра атомов элементов с порядковыми номерами от 30 (цинк) до 65 (тербий).

Часть ядер  $^{235}\text{U}$  и ядер атомов других тяжелых элементов, образующихся в зоне реакции за счет захвата свободных нейтронов, подвергается не только делению, но и альфа-распаду.

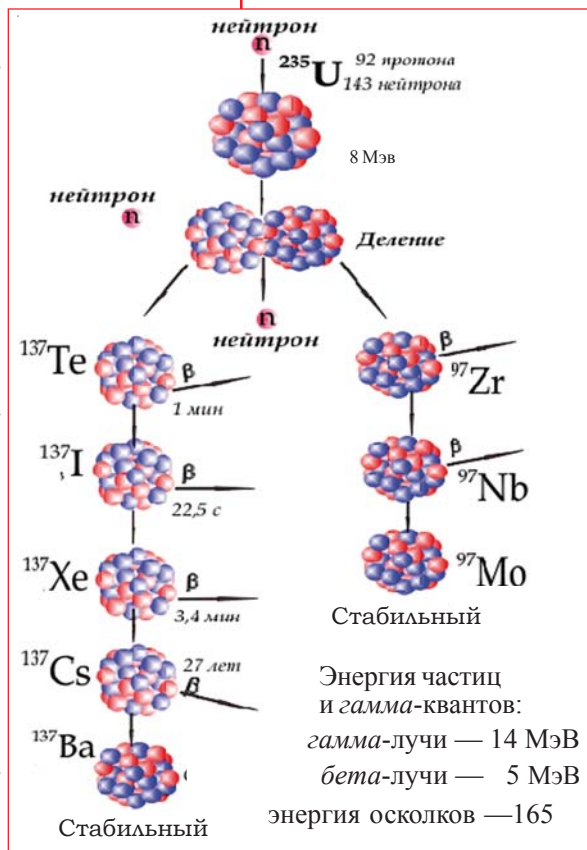
**Из истории открытия деления ядер**

**1939 год**

Фредерик Жолио-Кюри и его коллеги, Лео Сцилард и Энрико Ферми, доказали:

- при распаде атомного ядра  $^{235}\text{U}$  освобождается несколько нейтронов,
- каждый из этих нейтронов способен расщеплять ядра соседних атомов  $^{235}\text{U}$ ,
- при определенных условиях возможна цепная реакция деления ядер  $^{235}\text{U}$ .

**Одна из наиболее вероятных схем деления  $^{235}\text{U}$**



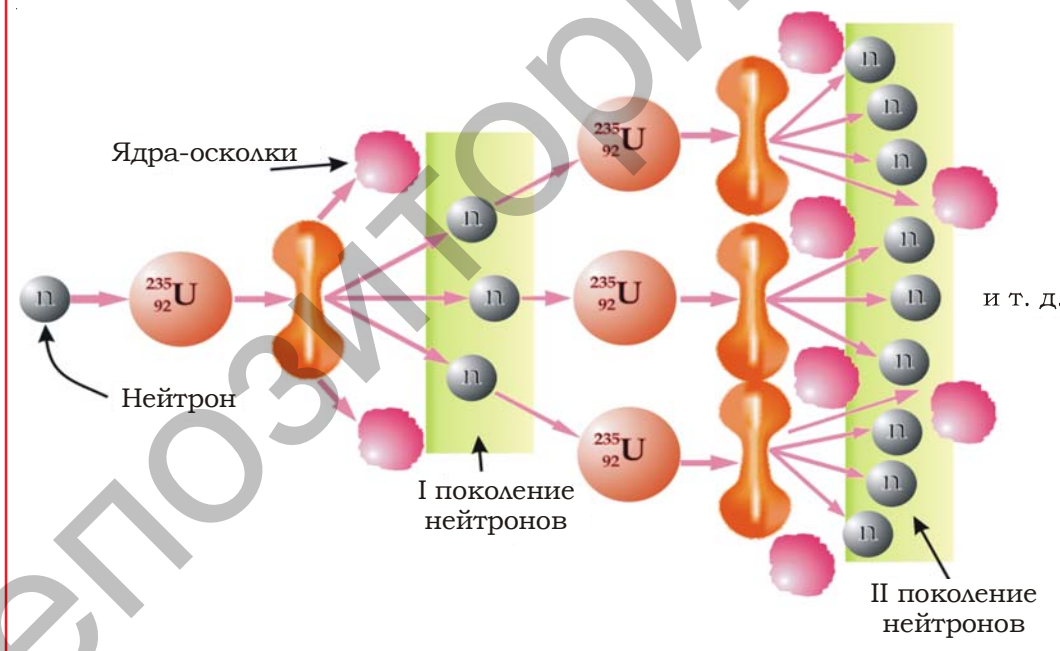
Ядра-осколки, которые образуются при делении ядер атомов тяжелых элементов, как правило, содержат избыточные нейтроны и поэтому неустойчивы (радиоактивны). Они переходят в устойчивое состояние посредством последовательных *бета*-распадов, причем цепочка *бета*-распадов продолжается вплоть до образования стабильных атомных ядер.

Реакция названа *цепной* по аналогии с цепными химическими реакциями, в которых продукты, образующиеся в результате химического превращения, могут взаимодействовать с другими молекулами исходных веществ.

Процессы ядерного деления, ядерных превращений осколков деления и других продуктов сопровождаются также выделением энергии в виде *гамма*-излучения.

Каждый акт деления ядер  $^{235}\text{U}$  происходит с освобождением 2–3 нейтронов. Эти нейтроны могут взаимодействовать с другими ядрами  $^{235}\text{U}$  и, в свою очередь, вызывать их деление. В результате, число актов деления возрастает и становится возможным протекание *цепной реакции* ядерного деления.

Схема цепного процесса ядерного деления



Если бы процесс деления протекал в таких условиях, когда каждый образующийся нейтрон вызывал деление другого тяжелого ядра, через пятьдесят последовательных актов деления, вместо одного нейтрона, начавшего процесс деления, образовалось бы порядка  $10^{25}$  свободных нейтронов.

В действительности, не все свободные нейтроны способны вызывать деление тяжелых ядер.

- Только нейтроны определенных энергий могут приводить к делению ядер. Например, ядра  $^{238}\text{U}$  могут делиться только при взаимодействии с быстрыми нейтронами, энергия которых выше 1100 эВ, тогда как ядра  $^{235}\text{U}$  могут делиться при взаимодействии с медленными (так называемыми *тепловыми*) нейтронами, энергия которых ниже 1 эВ.
- Часть нейтронов может захватываться атомными ядрами, не способными к делению, но присутствующими в том месте, где протекает реакция деления.
- Часть нейтронов вылетает за пределы пространства, где возможно столкновение с ядром, способным делиться.

**Область пространства, где происходит цепная реакция ядерного деления, называют активной зоной реакции ядерного деления.**

**Развитие цепной реакции ядерного деления** зависит от:

- количества нейтронов, освобождающихся в каждом акте деления;
- размеров активной зоны реакции;
- количества взаимодействий свободных нейтронов с тяжелыми ядрами, приводящих к ядерному делению;
- количества взаимодействий свободных нейтронов с неделяющимися ядрами примесей.

Для поддержания цепной реакции необходимо, чтобы, по крайней мере, один нейтрон, образовавшийся в процессе деления, вызывал расщепление другого тяжелого ядра.

О возможности протекания цепной реакции деления можно судить по величине *коэффициента размножения нейтронов (K)*.

**Коэффициент размножения нейтронов — это отношение количества нейтронов, освобождающихся в актах деления на определенном этапе развития цепного процесса, к количеству нейтронов, освобождающихся в актах деления предшествующего этапа.**

- Если  $K < 1$ , то цепная реакция ядерного деления невозможна;
- при  $K = 1$  возможна *самоподдерживающаяся* цепная реакция деления, которая протекает с постоянной скоростью;
- если  $K > 1$ , то число свободных нейтронов и число актов деления возрастает с каждым новым поколением нейтронов, освобождающихся при

Цепная реакция ядерного деления возможна при условии  $K \geq 1$

делении ядер. Это приводит к быстрому развитию цепного процесса ядерного деления, который протекает с нарастающей скоростью.

Условием, необходимым для осуществления цепной реакции ядерного деления, является наличие определенной массы делящегося вещества.

**Минимальная масса делящегося вещества, при которой возможно развитие цепной реакции ядерного деления, называется критической массой делящегося вещества.**

Если масса делящегося вещества *меньше критической (подкритическая масса)*, то часть освобождающихся в процессе ядерного деления нейтронов может вылетать за пределы делящегося вещества прежде, чем столкнется с другими ядрами, способными делиться. В этом случае количество нейтронов, покидающих делящееся вещество, превосходит количество нейтронов, освобождающихся в новых актах деления, и *цепная реакция ядерного деления прекращается*.

Если масса делящегося вещества *больше критической (надкритическая масса)*, число нейтронов в последующих актах деления быстро увеличивается, и процесс деления *развивается лавинообразно*. Подобный процесс характеризуется большим коэффициентом размножения нейтронов и завершается *взрывом* огромной силы с выделением колоссального количества энергии. В этом случае реакция ядерного деления является *неуправляемой (нерегулируемой)*.

Реакция подобного типа лежит в основе действия ядерного оружия.

Неуправляемая цепная реакция деления

*Управление цепной реакцией ядерного деления заключается в регулировании скорости ее протекания, то есть в регулировании числа актов ядерного деления в единицу времени.*

Управляемая цепная реакция деления

*Управляемая цепная реакция деления осуществляется в специальных устройствах — ядерных реакторах, где поддерживаются условия, при которых коэффициент размножения нейтронов  $K = 1$ . Реакцию этого типа используют для получения энергии в промышленных масштабах.*

Ядерная энергия выделяется при любом самопроизвольном ядерном распаде. Однако для получения тепловой и электрической энергии в промышленных масштабах используют лишь *управляемые цепные реакции ядерного деления*. Это связано с тем, что

- в результате цепной реакции деления выделяется



значительно больше энергии, чем при самопроизвольном ядерном распаде;

- при проведении реакции деления в специально сконструированных устройствах количество свободных нейтронов и их энергию можно регулировать;
- поддерживая количество вызывающих деление нейтронов на определенном уровне, можно сохранять цепной характер процесса, то есть его непрерывное протекание;
- ядерная энергия, выделяющаяся в результате процесса деления ядер, может быть преобразована в тепловую и электрическую энергии.

Способностью спонтанно (самопроизвольно) делиться обладают ядра  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и некоторых других трансурановых элементов.

$^{235}\text{U}$  встречается в природе. При бомбардировке природной смеси атомов урана нейтронами цепной процесс ядерного деления не происходит, поскольку не достигается критическая масса природного радионуклида урана  $^{235}\text{U}$ , способного подвергаться делению тепловыми нейтронами, всегда присутствующими в природном уране.

Наличие критической массы — необходимое, но не достаточное условие для осуществления реакции деления с целью получения энергии. Не умея управлять цепной реакцией ядерного деления, вместо тепла и электрической энергии можно получить атомную бомбу.

*В конечном итоге, управление цепной реакцией ядерного деления сводится к регулированию коэффициента размножения нейтронов, то есть поддержанию в активной зоне реакции определенного количества нейтронов, способных вызывать ядерное деление.*

В результате реакции деления тяжелое атомное ядро распадается на ядра-осколки, которые уносят основную часть энергии, выделяющейся в процессе деления. Например, осколки деления ядер  $^{235}\text{U}$  обладают кинетической энергией ( $E_k$ ) ~ 200 МэВ на каждый акт ядерного деления.

Ядра-осколки в столкновениях с другими ядрами передают им часть своей энергии, при этом кинетическая энергия осколков ( $E_k$ ) преобразуется в тепловую энергию ( $E_m$ ).

Полная энергия, выделяющаяся в процессе ядерного деления, включает:

- кинетическую энергию осколков ядерного деления;
- энергию гамма-излучения, сопровождающего деление ядер;

Природный уран является смесью изотопов  $^{238}\text{U}$  (99,28 %),  $^{235}\text{U}$  (0,71 %) и  $^{234}\text{U}$  (0,006 %)

- кинетическую энергию нейтронов, освобождающихся в результате ядерного деления;
- энергию *гамма*-, *бета*- и *альфа*-излучений, сопровождающих распад осколков деления и ядерные превращения исходных и промежуточных продуктов деления.

Энергию, выделяющуюся в процессе ядерного деления, можно преобразовать в тепловую и электрическую.

Практическое использование ядерной энергии в мирных целях стало возможным лишь после создания ядерных реакторов.

### Основные элементы ядерных реакторов

В ядерном реакторе происходит преобразование ядерной энергии, освобождающейся в процессе регулируемой цепной реакции деления ядер атомов тяжелых элементов, в тепловую энергию.

Основными элементами ядерного реактора являются:

- активная зона,
- замедлитель,
- управляющие (контрольные) стержни,
- отражатель,
- теплоноситель.

Активная зона

Активной зоной в ядерных реакторах является та его часть, в которой происходит реакция ядерного деления. В этой части реактора размещается ядерное топливо.

По способу размещения топлива реакторы делят на *гетерогенные* и *гомогенные*. В гетерогенных реакторах ядерное топливо распределено по активной зоне неравномерно — в виде отдельных блоков. Топливо находится в герметичной защитной оболочке из термостойкого циркониевого сплава. Такие элементы конструкции получили название *тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов)*.

В гомогенных реакторах ядерное топливо равномерно распределяется по активной зоне.

Ядерное топливо представляет собой смесь веществ, содержащих как делящиеся ядра (чаще всего  $^{235}\text{U}$ ), так и ядра  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$ , которые в результате взаимодействия с нейтронами могут образовывать делящиеся ядра  $^{233}\text{U}$  или  $^{239}\text{Pu}$ .

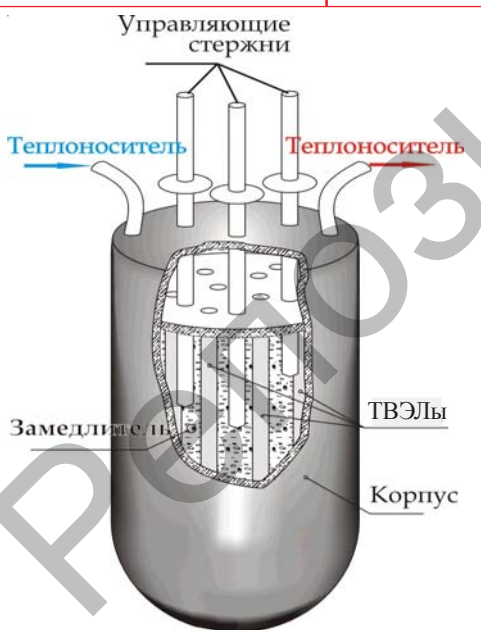


Схема гетерогенного ядерного реактора

Исследования показали, что наиболее целесообразно использовать в качестве ядерного горючего  $^{235}\text{U}$ , делящийся при взаимодействии с тепловыми нейтронами, получить которые технически несложно. Однако для обеспечения *цепного* процесса необходимо, чтобы содержание  $^{235}\text{U}$  в природном уране было повышено, по крайней мере, до 2 %.

В настоящее время в качестве топлива для ядерных реакторов, в основном, используют урановое топливо в виде диоксида урана ( $\text{UO}_2$ ), в котором содержание  $^{235}\text{U}$  достигает 2–4 %.

В процессе работы реактора образуется около 200 осколочных радионуклидов, преимущественно с атомными массами от 88 до 110 и от 125 до 150. Под действием нейтронного потока, помимо ядерного деления, происходят и другие виды радиоактивных превращений ядер атомов тяжелых элементов, входящих в состав ядерного топлива. Образуются неустойчивые атомные ядра плутония, америция, кюрия. В результате, *состав ядерного топлива в реакторе постоянно меняется.*

Нейтроны, образующиеся в результате процесса ядерного деления уранового топлива, в зависимости от величины их энергии ( $E_n$ ) делят на:

- *тепловые* —  $E_n$  менее 1 эВ;
- *промежуточные* —  $E_n$  от 1 эВ до 10 000 эВ;
- *быстрые* —  $E_n$  более 10 000 эВ.

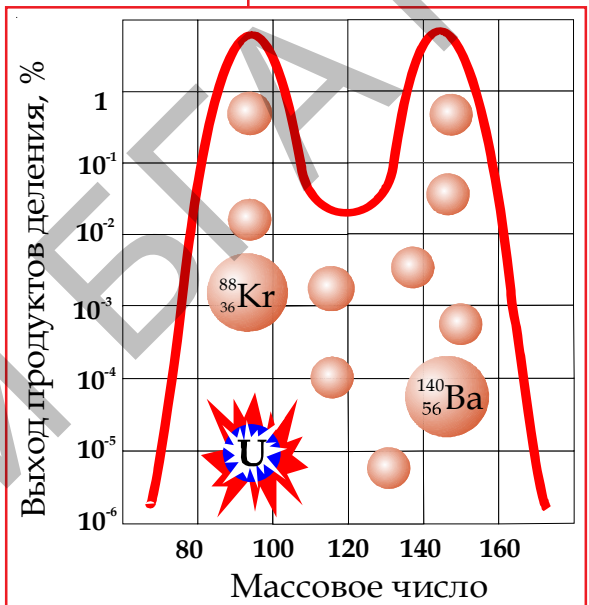
Делящиеся ядра  $^{235}\text{U}$  наиболее эффективно захватывают тепловые нейтроны. Чтобы получать тепловые нейтроны в количестве, достаточном для поддержания цепной реакции деления ядер урана, в реакторе применяют *замедлители*.

*Замедлители* — это вещества, которым *быстрые* высокоэнергетические нейтроны и *промежуточные* нейтроны средних энергий передают часть своей кинетической энергии, превращаясь в медленные *тепловые* нейтроны.

В качестве замедлителей используют графит (**C**), воду (**H<sub>2</sub>O**) и тяжелую воду, в которой атомы обычного водорода — протия (**<sup>1</sup>H**) заменены атомами тяжелого водорода дейтерия (**<sup>2</sup>H** или **D**). В гетерогенных реакторах замедлитель расположен между ТВЭЛами. В гомогенных реакторах замедлитель смешан с ядерным топливом и равномерно распределен по активной зоне.

Ядерное топливо

Продукты деления урана



Осколки деления:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{91}\text{Kr}$ ,  $^{126}\text{I}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{91}\text{Y}$  и др.

Замедлители

В зависимости от состава используемого замедлителя реакторы подразделяют на

- графитовые,
- водные,
- тяжеловодные.

*Управляющие (контрольные) стержни* состоят из

Управляющие стержни

В качестве материалов, поглощающих нейтроны, используют бор, кадмий, карбид бора

веществ, которые хорошо поглощают нейтроны. С их помощью регулируют процесс ядерного деления. Они поддерживают определенное содержание нейтронов в активной зоне, обеспечивая протекание цепной реакции ядерного деления, препятствуя чрезмерно активному прохождению процесса деления и перегреву активной зоны реактора, который может привести к серьезной аварии.

Отражатели

Пластины-отражатели изготавливают из тяжелых металлов (урана, тория и др.)

*Отражатели* применяют для уменьшения потерь нейтронов, участвующих в делении. Отражатели изготавливают из тяжелых металлов и располагают по периферии активной зоны. Они возвращают нейтроны в активную зону, увеличивая число нейтронов, участвующих в делении.

Теплоносители

*Теплоноситель* используют для отвода из активной зоны реактора тепловой энергии, в которую преобразуется энергия ядерного деления и сопутствующих ядерных превращений. В качестве теплоносителей применяют воду, жидкие металлы (калий, натрий и др.), газы (воздух, азот, диоксид углерода, гелий и др.), и даже некоторые органические вещества. В зависимости от типа теплоносителя реакторы подразделяют на:

- водяные,
- жидкометаллические,
- газовые,
- органические.

В процессе работы ядерного реактора вода и графит, которые применяют в качестве замедлителей, облучаются нейтронами. В результате, образуются тритий (**T** или  $^3\text{H}$ ) и радиоактивный углерод ( $^{14}\text{C}$ ). Ядерные превращения под действием нейтронов претерпевают и атомы элементов, которые входят в состав конструкционных материалов реактора.

Поскольку все происходящие в реакторе ядерные превращения сопровождаются гамма-излучением, любой реактор является источником проникающей радиации. Чтобы обеспечить безопасность персонала и нормальное функционирование контрольно-измерительной аппаратуры, ядерный реактор имеет систему защиты от излучения.

Система защиты ядерного реактора выполняет следующие функции:

- снижает мощность излучения до уровня, допустимого для работы персонала (*биологическая защита*);
- предохраняет ответственные элементы конструкции ядерного реактора от чрезмерного перегрева и радиационных повреждений (*радиационно-тепловая защита*).

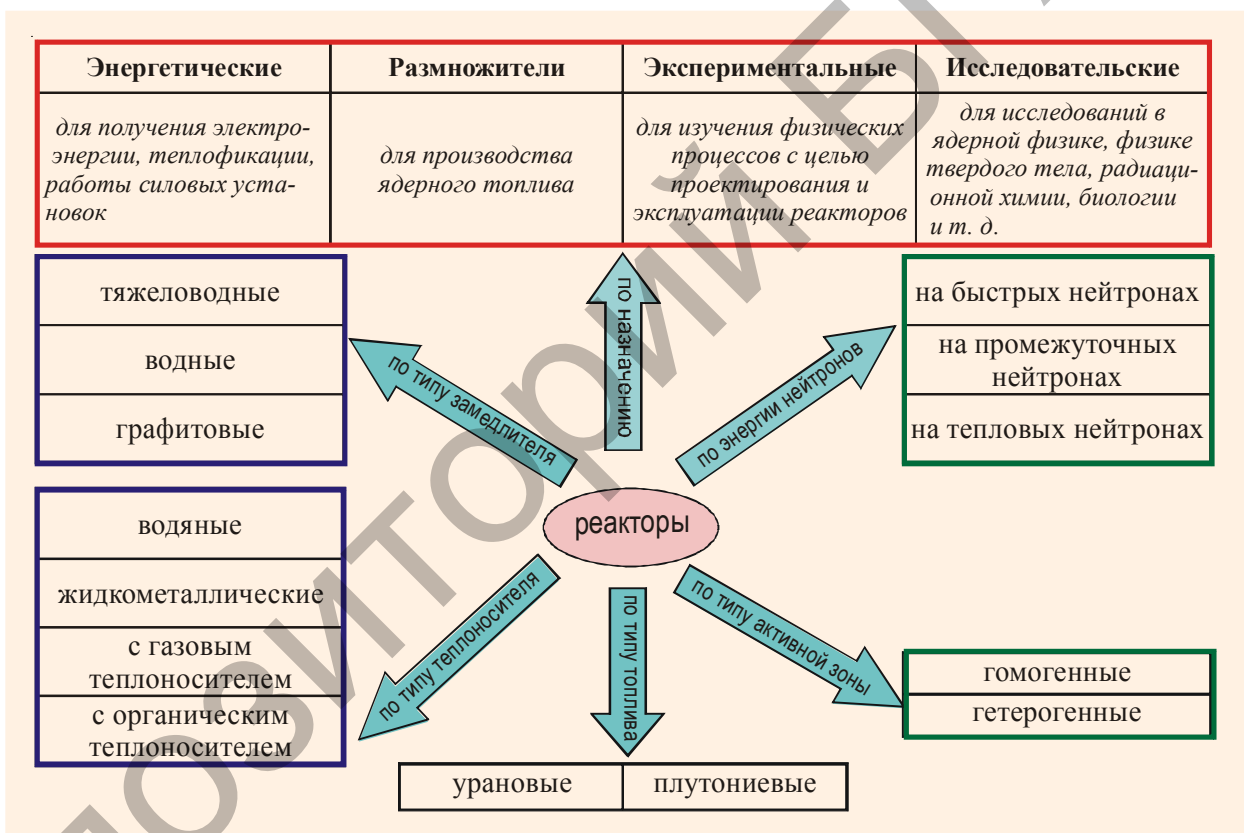
Ниже приведена классификация реакторов в зависимости от их назначения, типа используемого топлива, активной зоны, замедлителя, теплоносителя, величины энергии нейтронов, вносящих основной вклад в общее число ядерных делений.

Система защиты

В качестве материала биологической защиты используют жаропрочный бетон.

Радиационно-тепловая защита корпуса может быть выполнена из чугуна или стали.

### Типы ядерных реакторов



### 6.3. Атомные электростанции

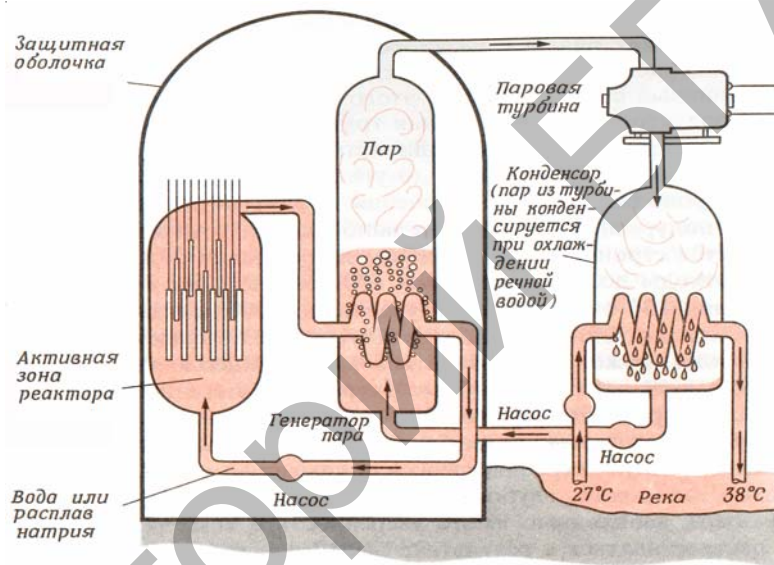
При современном уровне потребления энергии невозполняемые запасы органического топлива (угля, нефти, природного газа, торфа, сланцев) интенсивно сокращаются.

Энергетические установки, потребляющие возобновляемые ресурсы — энергию Солнца, ветра, воды (гидроэнергию), тепловую энергию земных недр (геотермальную) и другие виды энергии, пока используются в ограниченном масштабе. Современные энергетические

установки не смогут удовлетворить растущие потребности жителей Земли в электрической энергии, когда запасы органического топлива окажутся истощенными. Если человечество не усовершенствует энергетические установки, потребляющие возобновляемые ресурсы, или не освоит альтернативные источники энергии, со временем его ожидает энергетический голод.

Одной из современных отраслей энергетики является ядерная энергетика, основанная на использовании энергии ядерных превращений для получения тепла и электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС).

### Принципиальная схема атомной электростанции



Первая в мире атомная электростанция, созданная в г. Обнинске Калужской области в 1954 году, стала символом новой эры в истории человечества, хотя ее мощность была всего 5 МВт

$$1 \text{ МВт} = 1 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

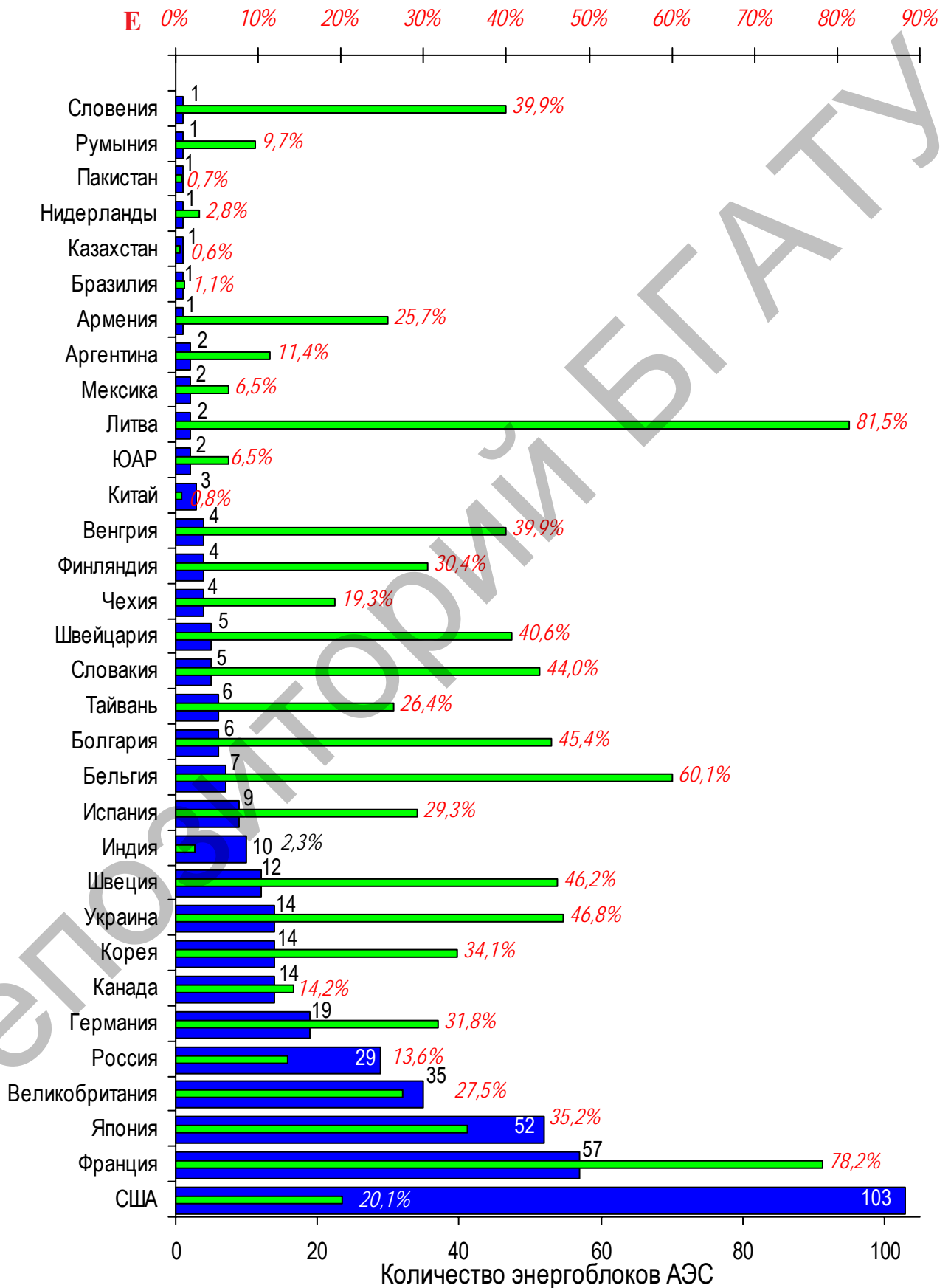
Работа АЭС во многом аналогична работе тепловой электростанции, только здесь вместо тепловой энергии, получаемой путем сжигания органического топлива, используют энергию, выделяющуюся при осуществлении управляемой цепной реакции деления ядер атомов тяжелых элементов. Энергия, выделяющаяся в процессе деления ядерного «горючего», преобразуется в реакторе в тепловую энергию, которая идет на нагревание воды и ее превращение в пар. Водяной пар вращает турбину, связанную с генератором, вырабатывающим электрическую энергию.

Мощность современных атомных электростанций достигает нескольких гигаватт (ГВт). В таких странах, как Бельгия, Франция и Литва, значительная часть электроэнергии (60–82 % от общего производства) вырабатывается на атомных электростанциях.

Об уровне развития мировой ядерной энергетики в конце XX века можно судить по данным, представленным на следующей диаграмме.

$$1 \text{ ГВт} = 1 \cdot 10^9 \text{ Вт}$$

**Относительное количество электроэнергии, вырабатываемой АЭС (Е, %), и количество энергоблоков АЭС в разных странах**



На территории Республики Беларусь нет атомных электростанций. Однако вблизи ее границ располагается четыре АЭС: Игналинская в Литве, которую предполагается вывести из эксплуатации в ближайшее время, Чернобыльская (выведена из эксплуатации в 2000 году) Ровенская в Украине и Смоленская в России.

После Чернобыльской катастрофы до 2006 года в Республике Беларусь действовал мораторий на строительство АЭС. Однако уже сейчас, анализируя перспективы использования различных источников энергии, рассматривают возможность строительства АЭС и в нашей стране.

### Типы серийных ядерных реакторов для АЭС

Наиболее простым в техническом отношении является *уран-графитовый реактор с водяным охлаждением*. Реакторы этого типа использовали на первой в России АЭС в г. Обнинске, а позднее на Белоярской и Выборгской АЭС. На их основе был сконструирован серийный реактор типа *РБМК (реактор большой мощности канальный)*.

Активная зона реактора РБМК представляет собой большой графитовый цилиндр с отверстиями для каналов, среди которых выделяют:

- технологические каналы (ТК),
- каналы системы управления и защиты (СУЗ).

Технологический канал — это конструкция в виде сварной трубы, внутри которой размещаются ТВЭЛы и пропускается поток теплоносителя (воды) для отвода тепла из активной зоны. ТВЭЛы представляют собой цирконий-ниобиевые стержни, заполненные урановым топливом в виде таблеток  $UO_2$ , слабо обогащенным  $^{235}U$ .

В каналах СУЗ размещают поглотитель и замедлитель нейтронов. В качестве поглотителя нейтронов используют бор (**В**), в качестве замедлителя — графит (**С**).

Система охлаждения РБМК является *одноконтурной*. Вода внутри реактора нагревается до температуры, близкой к температуре кипения, и превращается в пар непосредственно в активной зоне реактора. Образовавшийся пар поступает к турбине, на валу которой размещается электрогенератор, и приводит ее в движение. Вращение турбины запускает генератор, вырабатывающий электрический ток.

Реактор типа РБМК

Реакторы типа РБМК были установлены на Ленинградской, Курской, Смоленской, Игналинской и Чернобыльской АЭС

### Одноконтурная система охлаждения

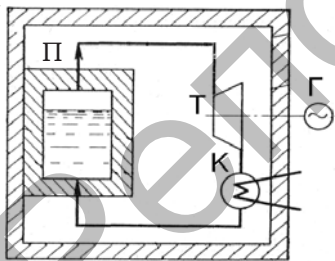


Схема одноконтурной АЭС:

- П — пар
- Т — турбина
- Г — генератор
- К — конденсатор



Отработанный пар конденсируется и вновь подается в реактор.

В странах СНГ для получения электрической энергии, наряду с реакторами типа РБМК, мощностью до 1 500 МВт (РБМК-1 000, РБМК-1 500), используют и различные модификации водо-водяного энергетического реактора, в основном, мощностью 440 (ВВЭР-440) и 1 000 МВт (ВВЭР-1 000).

В активной зоне реактора типа ВВЭР размещают топливные сборки ТВЭЛов. В качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в реакторе ВВЭР используют воду (именно поэтому его и называют водо-водяным).

Система охлаждения реактора является *двухконтурной*. Первый контур проходит через активную зону. Вода, циркулирующая в этом контуре, находится под высоким давлением, поэтому при прохождении через активную зону она нагревается, но в пар не превращается. Нагретая вода поступает в парогенератор, где отдает тепло воде второго контура, превращая ее в пар, и вновь направляется в активную зону.

Пар, образовавшийся в парогенераторе, подается на турбину, вращение которой запускает электрический генератор. Отработанный пар второго контура конденсируется, и жидкая вода возвращается в парогенератор.

В двухконтурной системе содержимое первого и второго контуров изолировано друг от друга, поэтому радиоактивные вещества не попадают во второй контур и не вызывают загрязнения радионуклидами паротурбинной зоны АЭС.

### Достоинства и недостатки атомных электростанций

Современные АЭС проектируются таким образом, чтобы

- не допускать опасных и вредных выбросов в окружающую среду,
- обеспечивать радиационную безопасность персонала и населения.

При нормальной работе АЭС значительно меньше загрязняют окружающую среду по сравнению с тепловыми электростанциями.

### Реакторы ВВЭР

Реакторы ВВЭР установлены на Ново-Воронежской, Ровенской, Кольской, Билибинской АЭС

### Двухконтурная система охлаждения

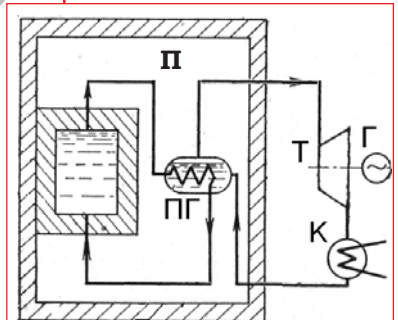


Схема двухконтурной АЭС:

- П — пар
- Т — турбина
- Г — генератор
- К — конденсатор
- ПГ — парогенератор

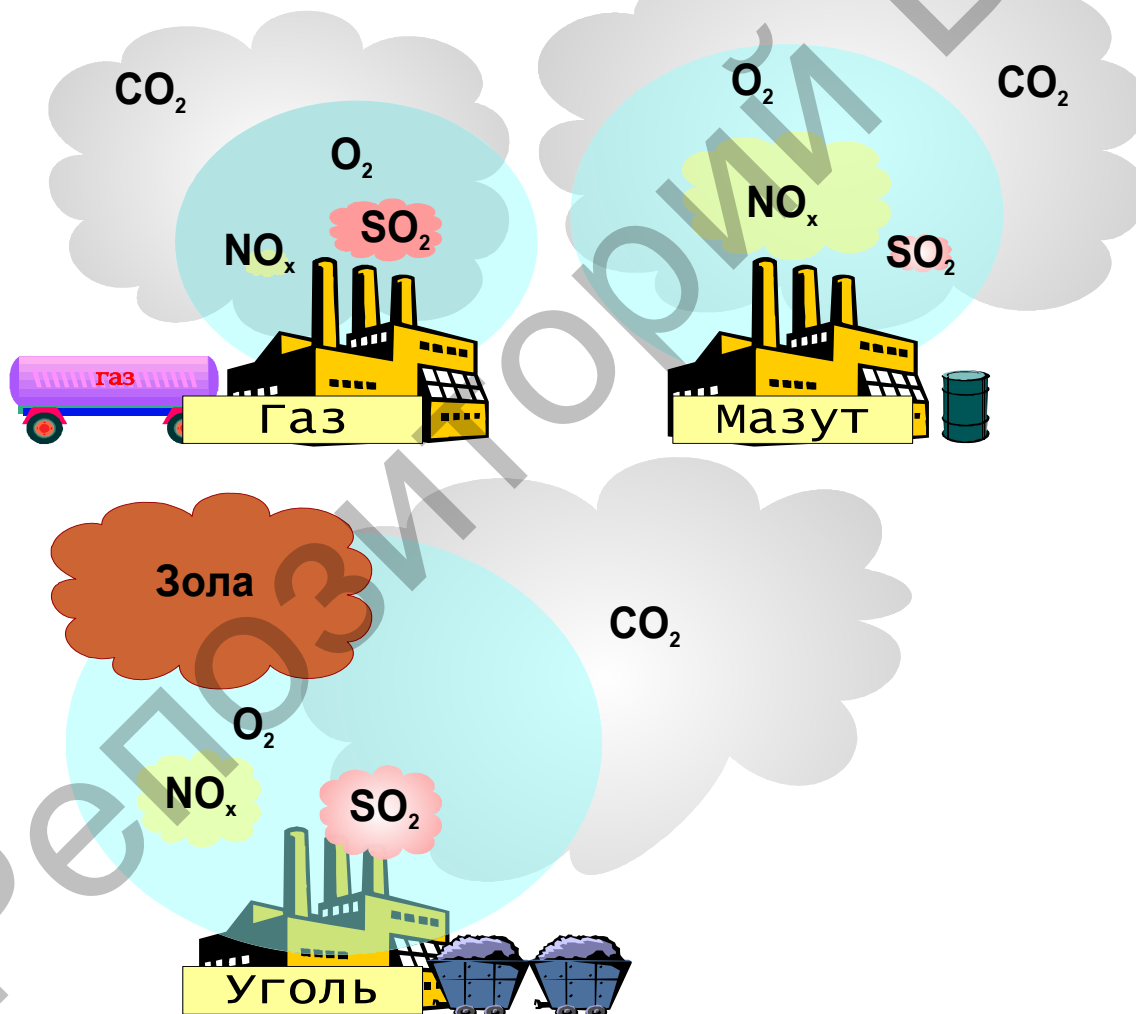
Основные недостатки традиционных тепловых электростанций:

- значительный расход кислорода для сжигания топлива;
- выброс в атмосферу большого количества веществ, способных причинить ущерб как человеку, так и среде его обитания;
- кислотные дожди, возникающие в результате выбросов в атмосферу оксидов азота и серы.

Выбросы вредных веществ в окружающую среду при нормальной работе атомной электростанции примерно в 100 раз меньше, чем при работе обычной тепловой электростанции.

Так, современная тепловая электростанция мощностью 1 ГВт в течение года потребляет около 3 млн. тонн угля и выбрасывает в атмосферу около 165 тыс. тонн различных отходов. В каменном угле содержатся естественные радиоактивные нуклиды ( $^{210}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  и др.), которые концентрируются в золе и шлаках.

**Выбросы газообразных продуктов и потребление кислорода при работе тепловых электростанций**



Выбросы:  
 углекислого газа  $\text{CO}_2$  ●, оксидов азота  $\text{NO}_x$  ● и оксида серы  $\text{SO}_2$  ● и потребление кислорода  $\text{O}_2$  ● тепловыми электростанциями.

По сравнению с тепловыми электростанциями, использующими разное органическое топливо (уголь, мазут, природный газ), при работе АЭС не потребляется атмосферный кислород ( $O_2$ ), не образуются оксиды углерода, азота и серы ( $CO_2$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ), не остается зола.

Достоинством АЭС является и сравнительно небольшой объем необходимого ядерного горючего. Так, АЭС мощностью 1 ГВт потребляет за год 100 тонн ядерного топлива, а тепловая электростанция такой же мощности — около 3 млн. тонн угля.

Однако, наряду с достоинствами, ядерной энергетике свойственны и недостатки. При использовании ядерной энергии возникают проблемы, связанные с

- тепловым загрязнением окружающей среды,
- переработкой высокоактивных отходов и их длительным хранением и/или захоронением.

В настоящее время особое внимание уделяется:

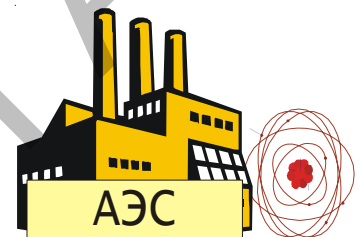
- разработке способов эффективного использования сбрасываемого тепла, например, путем создания агробиологических и рыбо-водческих комплексов для производства сельскохозяйственной и рыбной продукции;
- усовершенствованию методов переработки радиоактивных отходов и их изоляции в течение длительного времени, вплоть до полного распада радионуклидов.

Тем не менее, ядерная энергетика, подобно другим видам промышленного производства, остается потенциально опасной для человека и окружающей среды. На существующих предприятиях ядерной энергетике по тем или иным причинам неоднократно возникали аварийные ситуации, в том числе и с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду.

*Предотвращение загрязнения окружающей среды радиоактивными отходами является одной из важнейших проблем ядерной энергетики.*

Для безаварийной работы АЭС требуется обеспечить:

- надежность ядерных реакторов и систем их защиты;
- подготовку квалифицированных специалистов;
- соблюдение обслуживающим персоналом правил техники безопасности.



радиоактивные отходы



Ошибки и просчеты в работе персонала АЭС, нарушения ими правил безопасной работы недопустимы, так как могут привести к разгерметизации активной зоны реактора, выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду и облучению людей.

### **Перспективы развития ядерной энергетики**

Человечество не может себе позволить отказаться от развития ядерной энергетики. Такой вывод сделан на основе анализа общей энергетической ситуации, сложившейся в современном мире. Потребности человечества в электроэнергии неуклонно возрастают.

Оценки международных экспертов показывают:

*в настоящее время в развитых странах прирост внутреннего валового продукта (ВВП) непосредственно зависит от увеличения потребления электроэнергии.*

Подобная тенденция, скорее всего, сохранится и в будущем.

В последние десятилетия для удовлетворения энергетических потребностей ежегодно в мире сжигают десятки миллиардов тонн органического топлива. Не менее половины из них приходится на долю нефти и газа, которые являются ценнейшим сырьем для производства новых материалов, удобрений, лекарственных препаратов и другой необходимой людям продукции.

Поскольку наиболее доступные и дешевые источники этих природных органических материалов, в основном, исчерпаны, человечеству приходится осваивать все более труднодоступные месторождения. Приходится затрачивать все больше усилий для добычи и доставки нефти и газа в промышленно развитые регионы. Однако запасы даже этих месторождений, по мнению многих специалистов, ограничены.

*Ядерное «горючее» позволяет сохранять нефть и природный газ в качестве ценного сырья для химической промышленности.*

Из других видов традиционных органических энергоносителей можно рассчитывать лишь на уголь, однако и его запасов хватит не более чем на несколько сотен лет.

В настоящее время в ряде стран существенный вклад в получение электрической энергии вносит гидроэнергетика. Однако гидроэнергетические ресурсы также ограничены и в перспективе могут быть использованы для решения энергетических проблем лишь в отдельных регионах. Если же учитывать возникающие при этом экологические проблемы, вряд ли стоит в значительной мере рассчитывать на гидроэнергетические ресурсы в будущем.

Большие надежды нередко возлагают на *нетрадиционные* способы получения энергии, основанные на использовании возобновляемых природных энергетических ресурсов — *энергии Солнца, ветра, морских и океан-*

ских приливов, внутреннего тепла Земли. Не отказываясь от использования этих способов получения энергии, следует отдавать себе полный отчет в том, что с их помощью можно решать лишь локальные энергетические проблемы.

Критически оценивая возможности и опасности ядерной энергетики, приходится признать, что было бы весьма неразумно отказываться от использования ядерной энергии.

Освоение энергии, выделяющейся в процессе ядерного деления — это лишь один из способов обеспечения человечества необходимой энергией. Ученые продолжают поиски новых, более совершенных и безопасных методов получения ядерной энергии.

*Перспективы развития ядерной энергетики большинство специалистов связывает с освоением ядерной энергии, выделяющейся при синтезе атомных ядер, — в реакции термоядерного синтеза.*

Человечество уже вплотную приблизилось к осуществлению управляемой реакции термоядерного синтеза.

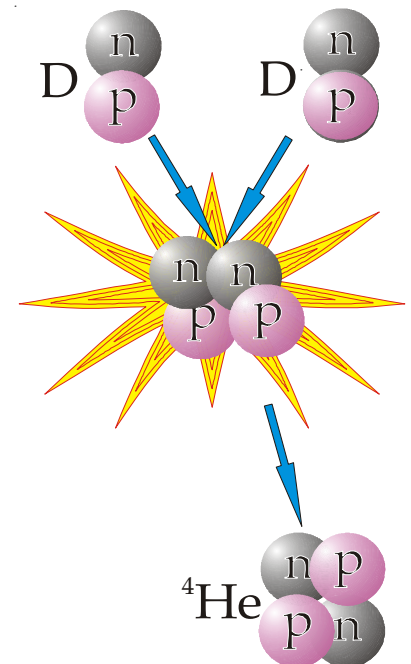
Новый способ основан на использовании энергии, выделяющейся при слиянии ядер атомов легких элементов, расположенных в самом начале Периодической системы, в ядра атомов более тяжелых элементов. Примером реакции такого типа является, так называемый, дейтерий-тритиевый топливный цикл, то есть синтез гелия ( ${}^4\text{He}$ ) из изотопов водорода дейтерия ( $D$ ) и трития ( $T$ ) при температуре порядка  $10^8$  К.

Еще более перспективен дейтерий-дейтериевый цикл, основанный на реакции синтеза гелия ( ${}^4\text{He}$ ) из ядер дейтерия ( $D$ ).

Чтобы начать процесс термоядерного синтеза, необходимо огромное количество энергии, однако энергия, выделяющаяся в результате осуществления подобной ядерной реакции, значительно превосходит первоначальные энергетические затраты.

Например, при ядерном синтезе 1 кг гелия ( ${}^4\text{He}$ ) из дейтерия ( $D$ ) выделяется  $35,6 \cdot 10^{26}$  МэВ энергии. Чтобы получить такую энергию, нужно сжечь около 13 600 т бензина. Для сравнения, в реакции ядерного деления 1 кг  ${}^{235}\text{U}$  выделяется примерно в 7 раз меньше энергии, чем при синтезе 1 кг гелия из дейтерия.

Синтез ядер гелия ( ${}^4\text{He}$ ) из ядер дейтерия ( $D$  или  ${}^2\text{H}$ )



Слияние двух ядер дейтерия ( $D$ ) в ядро гелия ( ${}^4\text{He}$ ) возможно лишь при температуре порядка 200 млн. градусов К, когда любое вещество находится в виде плазмы.

Реакции термоядерного синтеза гелия непрерывно происходят на Солнце и других подобных ему звездах, являясь основным источником их энергии.

Плазма – это особое физическое состояние вещества, существующее при температуре  $\sim 10^6 - 10^9$  К. В этом состоянии атомы вещества полностью или частично утрачивают электроны. Ядра, ионы и электроны движутся с огромной скоростью.

В состоянии плазмы находится большая часть вещества во Вселенной (звезды, галактические туманности, межзвездная среда).

Плазмой можно управлять с помощью электрических и магнитных полей.

Освоение энергии термоядерного синтеза позволит значительно повысить энерговооруженность человечества. Решить проблему *управляемого* термоядерного синтеза — это значит научиться управлять процессами, происходящими в высокотемпературной плазме на основе элементов, расположенных в самом начале Периодической системы Д.И. Менделеева (в первую очередь, водорода, а в перспективе и гелия).

Термоядерная энергетика более безопасна по сравнению с ядерной энергетикой, основанной на делении тяжелых ядер. В термоядерном реакторе, в принципе, невозможно неконтролируемое ускорение процессов, приводящих к катастрофическим разрушениям. Намного ниже и радиационная опасность.

Напомним, что в реакторе, основанном на делении тяжелых ядер, кроме самого ядерного топлива, присутствует большое количество разнообразных радиоактивных продуктов, накапливающихся в процессе ядерного деления. В конструкционных материалах реактора возникает также и наведенная радиоактивность, являющаяся результатом воздействия потока нейтронов, образующихся в процессе деления.

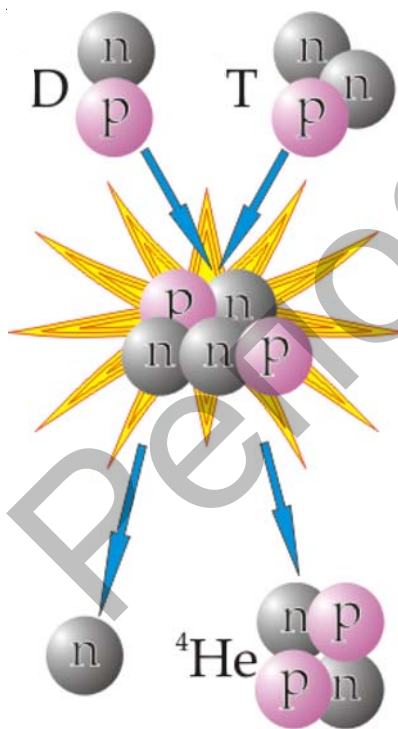
При осуществлении *дейтерий-тритиевого* цикла основная опасность связана лишь с применением большого количества радиоактивного трития (**T**) и с возникновением наведенной радиоактивности в результате взаимодействия образующегося в процессе реакции потока нейтронов с конструкционными материалами реактора.

В случае *дейтерий-дейтериевого* цикла радиационная опасность еще меньше. Она обусловлена образованием небольшого количества радиоактивного трития и нейтронов, которые взаимодействуют со стенками реактора ( $D + D \rightarrow T + n + E$ )

Если же удастся реализовать процесс термоядерного синтеза с участием ядер  ${}^3\text{He}$ , можно практически полностью избавиться от радиационной опасности, поскольку в этом случае и реагенты, и продукты реакции нерадиоактивны.

Новые методы получения ядерной энергии находятся на разных стадиях разработки. Одни уже достигли уровня промышленного испытания, другие находятся на стадии проектирования или создания демонстрационных установок, третьи — на

**Синтез ядер гелия ( ${}^4\text{He}$ ) из ядер дейтерия и трития**



стадии научного изучения физических явлений, перспективных с точки зрения получения и практического использования ядерной энергии.

Такие исследования требуют огромных затрат, поэтому они, как правило, проводятся в рамках международных проектов. Это позволяет объединять экономические и научные потенциалы стран-участниц и добиваться более ощутимых результатов.

В 2001 году объединенными усилиями ученых разных стран была завершена разработка технического проекта первого в мире международного экспериментального термоядерного реактора. Планируется построить такой реактор на территории Франции (Кадараш) в течение 9 лет. На его основе будут отрабатываться технологии для создания коммерческой термоядерной электростанции.

Одним из перспективных направлений развития энергетики является также разработка способов использования ядерной энергии для получения водорода — идеального топлива с экологической точки зрения. Реализация этой идеи предусматривает замену органического топлива водородом во многих сферах человеческой деятельности:

- в металлургии — для производства металлов из руды путем их восстановления;
- в химии — для синтеза аммиака и метана;
- на транспорте — в качестве авиационного и автомобильного топлива.

Таким образом, развитие ядерной энергетики — это лишь одна из возможностей обеспечения мировых потребностей в энергии. В перспективе развитие энергетики предполагает освоение различных источников энергии. Использование новых и сравнительно безопасных методов получения ядерной энергии поможет успешно решить проблему обеспечения человечества необходимой энергией.

#### **6.4. Ядерный топливный цикл и проблема радиоактивных отходов**

Ядерная энергетика — это не только атомные электростанции, составляющие лишь верхушку айсберга обширной отрасли энергетического производства. Его подводная часть — это добыча и обогащение урановых руд, получение ядерного топлива, его транспортировка и использование на АЭС, а также регенерация отработанного ядерного топлива на специальных заводах, хранение и захоронение радиоактивных отходов.

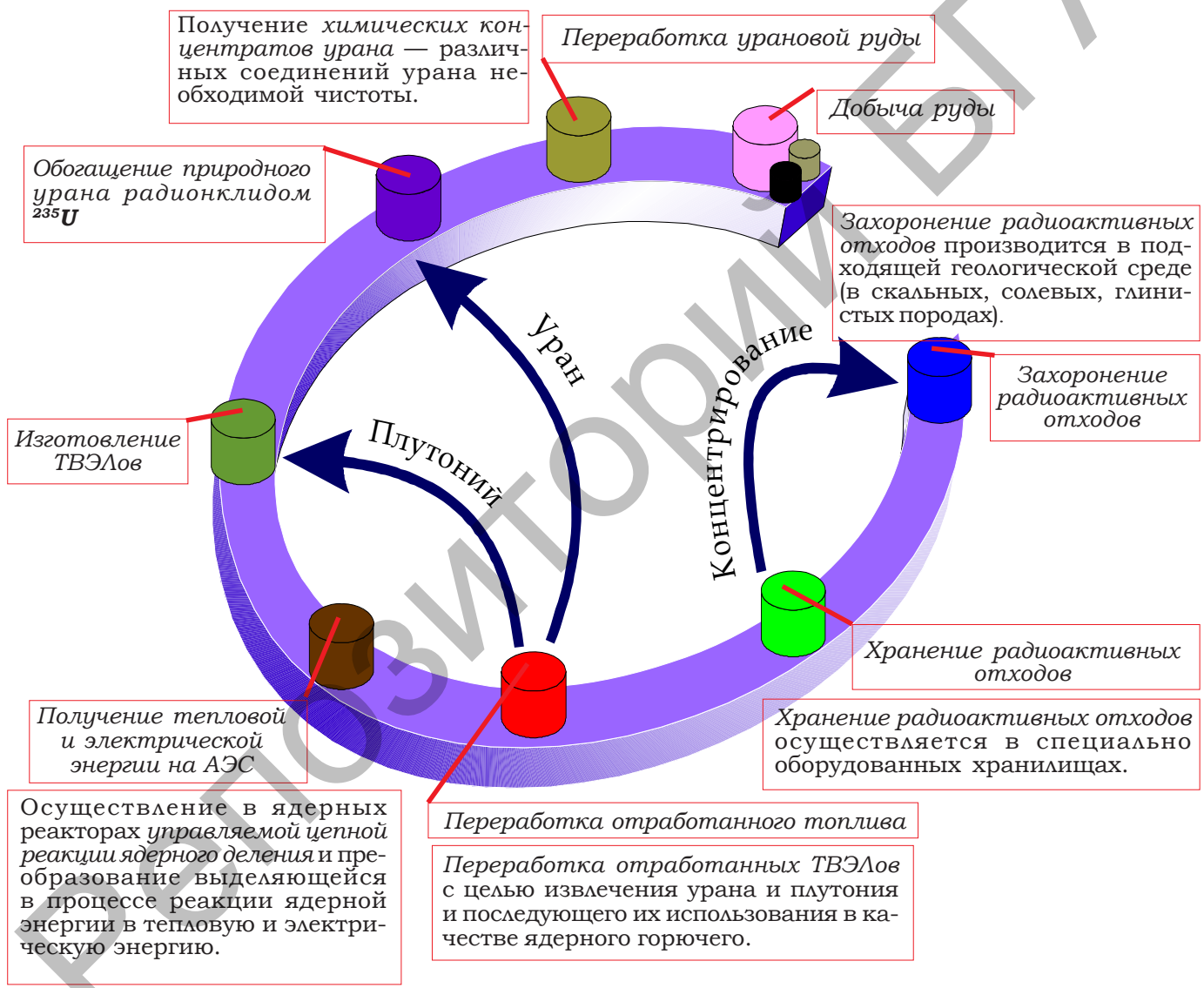
В проекте по созданию международного экспериментального термоядерного реактора участвуют США, Россия, Япония, Китай, Южная Корея, Европейский Союз, Казахстан и Канада.

Радиоактивные отходы — побочные продукты, образующиеся на всех стадиях получения, использования и регенерации ядерного топлива с содержанием радионуклидов выше установленных норм.

Весь процесс получения тепловой и электрической энергии за счет деления тяжелых атомных ядер — от разработки урановой руды до утилизации радиоактивных отходов — называют *ядерным топливным циклом (ЯТЦ)*.

Типичный пример ядерного топливного цикла с основными видами предприятий, которые в него входят, схематически представлен ниже.

**Схема ядерного топливного цикла на основе  $^{235}\text{U}$**



По оценке МАГАТЭ, обширные территории земного шара (не менее 12 млн. км<sup>2</sup>), которые расположены, главным образом, в развивающихся странах, перспективны с точки зрения обнаружения в них урана, и, возможно, в будущем они могут быть использованы для его добычи.



Урановая руда содержит, как правило, от 0,1 до 3,0 % собственно урана. Согласно расчетам МАГАТЭ, производство урана в 2000 году составляло 35–55 тыс. тонн.

Добыча урановой руды может осуществляться как шахтным, так и карьерным способом. В последние годы начали применяться методы подземной переработки руды с концентрированием урановой породы непосредственно в местах ее добычи.

Переработка урановой руды включает:

- отделение пустой породы, не содержащей урана;
- извлечение урана из руды и получение уранового концентрата — определенного химического соединения урана, состав которого зависит от способа извлечения урана;
- очистка уранового концентрата от примесей.

Выбор способа извлечения урана и очистки полученного соединения определяется составом руды. В процессе очистки отделяются сопутствующие элементы и накопившиеся продукты распада природных изотопов урана.

В подавляющем большинстве энергетических ядерных реакторов используется уран, в котором содержание делящегося радионуклида  $^{235}\text{U}$  гораздо выше (2–4 %), чем в природном уране (0,7 %), состоящем преимущественно из  $^{238}\text{U}$ .

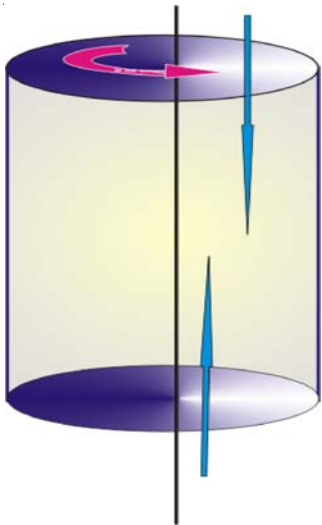
На обогатительных заводах по разделению изотопов урана концентрация  $^{235}\text{U}$  увеличивается до необходимой величины. Ранее использовали метод, основанный на разной скорости диффузии молекул газообразного соединения урана — гексафторида урана  $\text{UF}_6$ , содержащего атомы тяжелого радионуклида  $^{238}\text{U}$  и более легкого радионуклида  $^{235}\text{U}$ , через различные материалы. При однократном пропускании гексафторида урана через газодиффузионную ячейку газовая смесь обогащается более легкими молекулами, и содержание  $^{235}\text{U}$  увеличивается в 1,0043 раза. Чтобы повысить степень обогащения, газовую смесь последовательно пропускали через множество подобных ячеек и довели степень обогащения урана радионуклидом  $^{235}\text{U}$  до нужной величины.

В настоящее время разделение изотопов осуществляют методом центрифугирования газовой смеси, состоящей из тяжелых ( $^{238}\text{UF}_6$ ) и более легких ( $^{235}\text{UF}_6$ ) молекул, во встречных газовых потоках.

Чтобы получить 1 кг урана, содержащего 3,0 % по массе  $^{235}\text{U}$ , необходимо переработать 6,5 кг природного урана.

Поток газа, состоящий из смеси молекул с различными изотопами урана, пускается вниз по периферии вращающейся системы, а восходящий поток поднимается вверх вблизи оси ее вращения. В результате центрифугирования газовой смеси восходящий поток обогащается легкими молекулами, а нисходящий — тяжелыми. Коэффициент разделения изотопов зависит от относительной разницы масс изотопов (отношение разности масс изотопов к массе одного из них) и не зависит от молекулярной массы газов.

Схема разделения изотопов урана методом центрифугирования газовой смеси



Стрелками указано направление движения газовых потоков

Обогащенный уран поступает на завод по изготовлению тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). ТВЭЛ является важнейшей частью ядерного реактора. С его помощью в ядерный реактор вводится ядерное топливо и отводится тепло от делящегося материала к теплоносителю. Чаще всего, уран поступает на завод в виде таблеток, спрессованных из порошка  $UO_2$ . При изготовлении ТВЭЛов эти таблетки помещают в специальную металлическую оболочку цилиндрической формы. В качестве оболочки используются материалы, которые слабо поглощают нейтроны, сохраняют механическую прочность и геометрические размеры изделия при воздействии высоких температур, нейтронного и мощного *гамма*-излучения. Полученные тепловыделяющие элементы могут быть объединены в пакеты, кассеты и т. д., содержащие десятки ТВЭЛов.

Заключительная часть ядерного топливного цикла включает:

- хранение отработанного топлива;
- транспортировку отработанного топлива от АЭС на радиохимические заводы для его переработки;
- переработку отработанного топлива с целью регенерации (восстановления);
- хранение и захоронение радиоактивных отходов.

Существующие технологии регенерации позволяют восстановить до 90 % урана и плутония, содержащегося в отработанных ТВЭЛов. Ежегодно из таких ТВЭЛов извлекают около 20 т плутония. Общее накопление плутония к 2000 году превысило 1 500 т.

В процессе добычи и переработки урановой руды, получения ядерного топлива, производства электро-

Образующийся в ТВЭЛов плутоний используют в качестве топлива на АЭС и в производстве ядерного оружия. Использование в качестве ядерного горючего 1 кг плутония экономит примерно 140 кг природного урана.

энергии на атомных электростанциях и регенерации отработанного топлива образуются радиоактивные отходы и отходы, которые условно считают нерадиоактивными.

*Побочные вещества, образующиеся в процессе любого вида деятельности, которые обладают низкой активностью и не требуют обработки, отличной от обработки обычных отходов, условно считают нерадиоактивными отходами.*

### **Влияние предприятий ядерного топливного цикла на окружающую среду**

Функционирование ядерного топливного цикла (ЯТЦ) может оказывать влияние на окружающую среду, приводя к ее химическому и тепловому загрязнению, а также к загрязнению радионуклидами.

*Химическое загрязнение* окружающей среды возможно при переработке руды и отработанного ядерного топлива, поскольку на этих этапах используется большое количество токсичных химических реагентов.

*Тепловое загрязнение* биосферы происходит вследствие неполного преобразования на атомных электростанциях тепловой энергии в электрическую. В результате, до 70 % тепловой энергии, выделившейся в реакторе, поступает в окружающую среду.

*Локальное загрязнение* биосферы радионуклидами природного происхождения может происходить при добыче и переработке урановой руды. Источниками загрязнения являются урановые рудники и заводы по переработке урановой руды. Образующиеся на производстве радиоактивные отходы, содержащие полоний (**Po**), радий (**Ra**) и другие радионуклиды, могут попасть в окружающую среду в результате ветровой и водной эрозии, при этом в атмосферу также выделяется газообразный радон (**Rn**).

При работе реактора могут быть незначительные утечки газообразных продуктов деления, таких как

- криптон,
- ксенон,
- йод,
- активированный нейтронами аргон, входящий в состав воздуха.

Перевозка урановой руды, уранового концентрата, гексафторида урана и оксида урана не представляет особой опасности для окружающей среды. Урановые руды характеризуются низким содержанием урана, поэтому их перевозят в обычных самосвалах и вагонах. Обогащенные руды и урановые концентраты — вещества с более высоким содержанием урана — перевозят в специальных контейнерах.

Для защиты персонала и окружающей среды ядерное топливо в виде ТВЭЛов транспортируют на АЭС в специальных контейнерах.

При нормальной работе ядерного реактора радиоактивные вещества

- защищены прочными оболочками ТВЭЛов
- не выделяются в окружающую среду в опасных количествах.

Если в процессе регенерации ядерного топлива радиоактивные вещества попадают в морскую воду, люди, которые потребляют в пищу местные морепродукты, накапливающие актиниды, могут получать дозы облучения до  $0,14 \text{ мЗв}$  в год.

В процессе работы атомных электростанций в ядерных реакторах образуется большое количество радиоактивных веществ искусственного происхождения. При нормальной работе АЭС выбросы радионуклидов в окружающую среду незначительны, однако в аварийных ситуациях радиоактивные вещества, содержащиеся в реакторе, могут представлять большую опасность для окружающей среды.

Высокой радиационной опасностью характеризуются все операции с отработанным ядерным топливом.

Отработанное топливо в течение 3–4 лет выдерживают на АЭС в специальных бассейнах-хранилищах. За это время часть содержащихся в топливе радионуклидов распадется и его радиоактивность уменьшается. Оставшиеся радиоактивные продукты помещают в защитные контейнеры из нержавеющей стали и отправляют на перерабатывающий завод.

При эксплуатации ядерного реактора могут возникать дополнительные проблемы, связанные с его ограниченным сроком службы (~ 20–40 лет). Подобные ограничения являются следствием ухудшения со временем физических свойств конструкционных материалов, из которых изготовлен реактор, в результате постоянного воздействия ионизирующего излучения.

В процессе выведения реактора из эксплуатации вначале его обычно консервируют (оставляют в нерабочем состоянии), а на завершающем этапе ядерное топливо извлекают из активной зоны, а сам реактор демонтируют.

При функционировании ЯТЦ на этапах, связанных с добычей, обогащением, переработкой урановой руды, получением ядерного топлива, работой ядерного реактора и процессом регенерации ядерного топлива, радионуклиды могут попадать в окружающую среду в газообразном, жидком и твердом состоянии.

$^{90}\text{Sr}$  и другие радионуклиды, попадающие в атмосферу при работе АЭС, приводят к получению местным населением индивидуальных доз облучения менее  $0,05 \text{ мЗв}$  в год.

В основном, эти дозы облучения обусловлены потреблением в пищу местного молока и овощей.

По оценкам Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР), местная и региональная коллективные дозы облучения людей при производстве на АЭС 1 миллиарда Ватт (1 ГВт) электроэнергии составляет примерно 0,9 человеко-зиверт (чел.-Зв).

В настоящее время АЭС ежегодно производят около 250 ГВт, что составляет около 20 % мирового производства электрической энергии.

Общая коллективная доза, получаемая населением в результате производства электроэнергии на всех действующих в мире АЭС, достигает 200 чел.-Зв. При этом индивидуальные дозы облучения людей незначительны и составляют менее 0,001 мЗв в год. Однако отдельные индивидуумы, в зависимости от того, где они живут и чем питаются, могут получать и более высокие дозы облучения (до 0,3 мЗв в год).

Радиационная безопасность при работе предприятий ЯТЦ обеспечивается путем изолирования радиоактивных веществ от внешней среды на всех стадиях ядерного топливного цикла, включая захоронение радиоактивных отходов.

### Проблема радиоактивных отходов

В зависимости от удельной активности радиоактивные отходы подразделяются на 3 категории:

- *низкой активности* — менее  $3,7 \cdot 10^5$  Бк/кг (л),
- *средней активности* —  $3,7 \cdot 10^5$  –  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк/кг (л),
- *высокой активности* — более  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк/кг (л).

Отходы *низкой* и *средней активности* образуются при добыче и переработке урановой руды, а отходы *высокой активности* — при работе АЭС и регенерации отработанного топлива на радиохимических заводах.

В зависимости от агрегатного состояния отходы подразделяют на:

- *газообразные,*
- *жидкие,*
- *твердые.*

Обычно радиоактивные отходы переводят в форму, удобную для хранения и транспортировки.

Классификация радиоактивных отходов



**Способы обращения с радиоактивными отходами в зависимости от их агрегатного состояния**

Радиоактивные отходы	Способ обращения с отходами
<p>Газообразные:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• инертные газы (ксенон, криптон, аргон),</li> <li>• тритий,</li> <li>• диоксид углерода и др.</li> </ul>	<p><i>Газообразные радиоактивные вещества</i> улавливают при пропускании через специальные фильтры. Часть радиоактивных веществ, которая не улавливается Фильтрами, рассеивается в атмосфере через вентиляционные трубы на высоте 100 м и более.</p>
<p>Жидкие:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• высокоминерализованные растворы, образующиеся в процессе переработки отработанного топлива;</li> <li>• вода, применяемая в качестве теплоносителя;</li> <li>• вода в бассейнах для хранения отработанных ТВЭЛов.</li> </ul>	<p><i>Жидкие радиоактивные отходы</i> концентрируют путем упаривания или осаждают содержащиеся в них радионуклиды в виде труднорастворимых соединений. Полученные радиоактивные продукты направляют на длительное хранение в специально оборудованные хранилища. Для захоронения отходы переводят в твердое состояние посредством</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• цементирования,</li> <li>• смешивания с химически инертными веществами (битумом, бетоном, полимерами),</li> <li>• остекловывания (покрытия стеклообразной массой), помещения в пористые керамические материалы.</li> </ul>
<p>Твердые</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• отработавшее оборудование, использованные фильтры вентиляционных систем,</li> <li>• загрязненные строительные материалы,</li> <li>• загрязненная ветошь, спецодежда и др.</li> </ul>	<p><i>Горючие материалы</i> сжигают, собирая золу и очищая дымовые газы.  <i>Негорючие материалы</i> прессуют, при этом их объем Уменьшается в 3–10 раз.          Крупногабаритное оборудование разбирают, разрезают и прессуют.          Твердые отходы преимущественно помещают в специальные подземные хранилища.</p>

В прошлом, некоторые страны использовали моря и океаны для захоронения радиоактивных отходов. С течением времени защитные оболочки контейнеров разрушаются, и, в конечном итоге, радионуклиды попадают в гидросферу.

С 1967 года по 1972 год в Атлантический океан было сброшено около 30 тонн отходов. В районе сбросов наблюдается повышенное содержание радионуклидов в воде, в морской флоре и фауне.

В настоящее время Лондонской Конвенцией запрещено сбрасывать в воды морей и океанов радиоактивные отходы.

Существуют два подхода к захоронению радиоактивных отходов:

- *локальный,*
- *региональный.*

*Локальный* подход предполагает захоронение радиоактивных отходов в местах их образования. Это удобно во многих отношениях, но приводит к увеличению размеров опасных зон.

*Региональный* подход предусматривает выбор наиболее подходящих мест для захоронения радиоактивных отходов и создание централизованных хранилищ. Подобный способ стоит дороже и требует обеспечения безопасности при транспортировке отходов к местам захоронения.

Размещение высокоактивных отходов в глубоких подземных хранилищах является основным способом захоронения отходов. При создании таких хранилищ используют как искусственно созданные

защитные барьеры (толстая прочная оболочка емкостей для отходов, изоляция хранилища от окружающей среды с помощью глинистых материалов), так и природные барьеры, уменьшающие возможность выхода радионуклидов в окружающую среду (глинистые, известняковые горизонты, залежи каменной соли, гранитные и другие скальные формации).

Поскольку радиоактивные вещества, подлежащие захоронению, находятся в наиболее устойчивом физико-химическом состоянии, это ограничивает их взаимодействие с окружающей средой и вынос радионуклидов за пределы мест захоронения отходов.

*Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) контролирует деятельность предприятий ядерной энергетики и обращение с радиоактивными отходами. Эта межправительственная организация оказывает содействие всем странам в развитии ядерной энергетики и помогает обеспечивать ее безопасность.*

### **6.5. Аварии на ядерных установках и предприятиях ядерного топливного цикла**

АЭС является сложным техническим объектом, на котором одновременно функционирует множество систем различного назначения, обслуживаемых и управляемых людьми.

При любой производственной деятельности существует определенная вероятность возникновения тех или иных технических нарушений и сбоев в функционировании отдельных систем. На АЭС может сгореть трансформатор, выйти из строя турбина, лопнуть паропровод. Подобные случаи, если они не связаны с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, не могут ухудшить радиоэкологическую ситуацию в районе расположения действующей АЭС и в регионе в целом.

На АЭС нет больших количеств горючих и взрывоопасных органических веществ, таких как нефть, газ, мазут, каменный уголь. Требования к качеству оборудования и квалификации персонала повышены, поэтому «обычные» аварии на предприятиях ЯТЦ, как показывает практика, происходят значительно реже, чем на других производствах. Тем не менее, аварии при работе предприятий ЯТЦ все же имеют место. Эти аварии разделяют по степени воздействия на здоровье людей и окружающую среду.

Термин «авария» произошел от арабского «авар», что означает «выход из строя, повреждение, ущерб».

### Международная шкала ядерных событий (INES\*)

Особые шкалы разработаны для оценки последствий природных явлений:

*воздействия ветра* — 12-балльная шкала,  
*землетрясений* — 9-балльная шкала.

Для производств, не относящихся к ЯТЦ, подобные шкалы не разработаны.

В 1989–1990 годах под руководством МАГАТЭ была разработана международная шкала ядерных событий (INES) для классификации происшествий на АЭС и других предприятиях ЯТЦ по тяжести последствий. Эта шкала позволяет классифицировать аварийные ситуации по единым критериям — радиационной опасности для людей и окружающей среды. Первоначально шкала применялась для классификации происшествий, имевших место на атомных электростанциях. В 1992 году подобная классификация была распространена на все ядерные объекты, связанные с гражданской ядерной промышленностью, и на все события, происходящие во время перевозки радиоактивных материалов.

Шкала INES оценивает события на предприятиях ЯТЦ по трем критериям:

- изменение радиационной обстановки и облучение персонала *на территории предприятия,*
- изменение радиационной обстановки и облучение населения *за пределами территории предприятия,*
- *разрушение системы защиты* ядерного реактора или емкостей для хранения радиоактивных веществ.

С помощью первого критерия учитывают последствия событий *на территории АЭС или хранилища радиоактивных веществ.* При этом учитывают все последствия, начиная от загрязнения территории радионуклидами и/или дополнительного облучения персонала, до расплавления активной зоны ядерного реактора.

Второй критерий учитывает выброс радиоактивных продуктов *за пределы территории предприятия* и возможность облучения населения выше допустимого уровня ( $1/10$  годового предела дозы).

Третий критерий учитывает происшествия на ядерной установке, ведущие к ухудшению *системы защиты* реактора или хранилища радиоактивных продуктов.

\* INES — International Nuclear Event Scale (Международная Шкала Ядерных Событий).



## Международная шкала ядерных событий

Классификация	Критерии опасности
7. Авария крупная (катастрофа)	Разрушение активной зоны и системы защиты реактора. Крупномасштабное (глобальное) загрязнение окружающей среды, облучение персонала и населения выше допустимых уровней. Долговременные последствия для окружающей среды. Требуется широкомасштабное проведение мероприятий по защите населения, охватывающее обширные территории.
6. Авария серьезная	Разрушение системы защиты реактора или хранилища радиоактивных продуктов. Региональное загрязнение окружающей среды, облучение персонала и населения выше допустимых уровней. Долговременные последствия для окружающей среды. Требуется проведение мероприятий по защите населения в рамках пострадавшего региона.
5. Авария, сопровождаемая риском для территории, прилегающей к АЭС, а также для персонала и населения	Повреждение активной зоны и системы защиты ядерного реактора. Значительный выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду на территории, прилегающей к АЭС, облучение персонала и населения выше допустимых уровней. Требуется проведение местных мероприятий по защите населения на территории, прилегающей к АЭС (эвакуация из пострадавшей местности).
4. Авария, не сопровождаемая значительным риском для населения и окружающей среды за пределами предприятия	Повреждение активной зоны и системы защиты ядерного реактора или хранилища радиоактивных продуктов. Выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду на ограниченной территории за пределами АЭС или хранилища радиоактивных продуктов. Получение персоналом индивидуальных доз облучения более 1 Зв, а населением прилегающих территорий — порядка нескольких миллизиверт. Требуется проведение всех мероприятий по защите персонала и населения на ограниченной территории.
3. Инцидент серьезный	Частичное повреждение системы защиты ядерного реактора или хранилища радиоактивных продуктов. Выброс радиоактивных продуктов, приводящий к облучению населения выше установленных пределов доз. Индивидуальные дозы облучения персонала превышают 50 мЗв. Не требуется проведения мероприятий по защите населения и территории за пределами объекта. Необходимо проведение мероприятий по защите персонала и очистке территории объекта от радиоактивных продуктов.
2. Инцидент	Небольшой выброс радиоактивных продуктов, обуславливающий облучение персонала и населения ниже установленных пределов доз. Не требуется проведение мероприятий по защите персонала и населения. Необходимо усилить контроль за соблюдением требований радиационной безопасности.

1. Аномалия	Отклонение от нормальной работы установки, выходящее за рамки разрешенного режима эксплуатации.
0. Отклонение	Незначимо с точки зрения радиационной опасности.
Событие, выходящее за рамки шкалы	Не связано с радиационной опасностью.

Шкала INES позволяет оценивать все события на предприятиях ЯТЦ по восьмибальной шкале — от 0 до 7. События, несущественные с точки зрения радиационной опасности, классифицируют как события *нулевого уровня*. Их называют *отклонениями*.

Остальная часть шкалы разделена на две части. Нижняя часть, охватывающая три уровня (1–3), соответствует инцидентам (происшествиям), а верхняя часть, охватывающая четыре уровня (4–7) — авариям.

Группа событий в нижней части шкалы представляет собой лишь потенциальную угрозу для населения и окружающей среды. Появление таких событий свидетельствует об ухудшении работы АЭС.

События уровней 4–7 представляют непосредственную опасность для населения и окружающей среды. К этой группе относятся аварии, которые приводят к превышению допустимых уровней облучения населения. До настоящего времени самый высокий балл по уровню радиационной опасности для населения и окружающей среды получила только Чернобыльская авария.

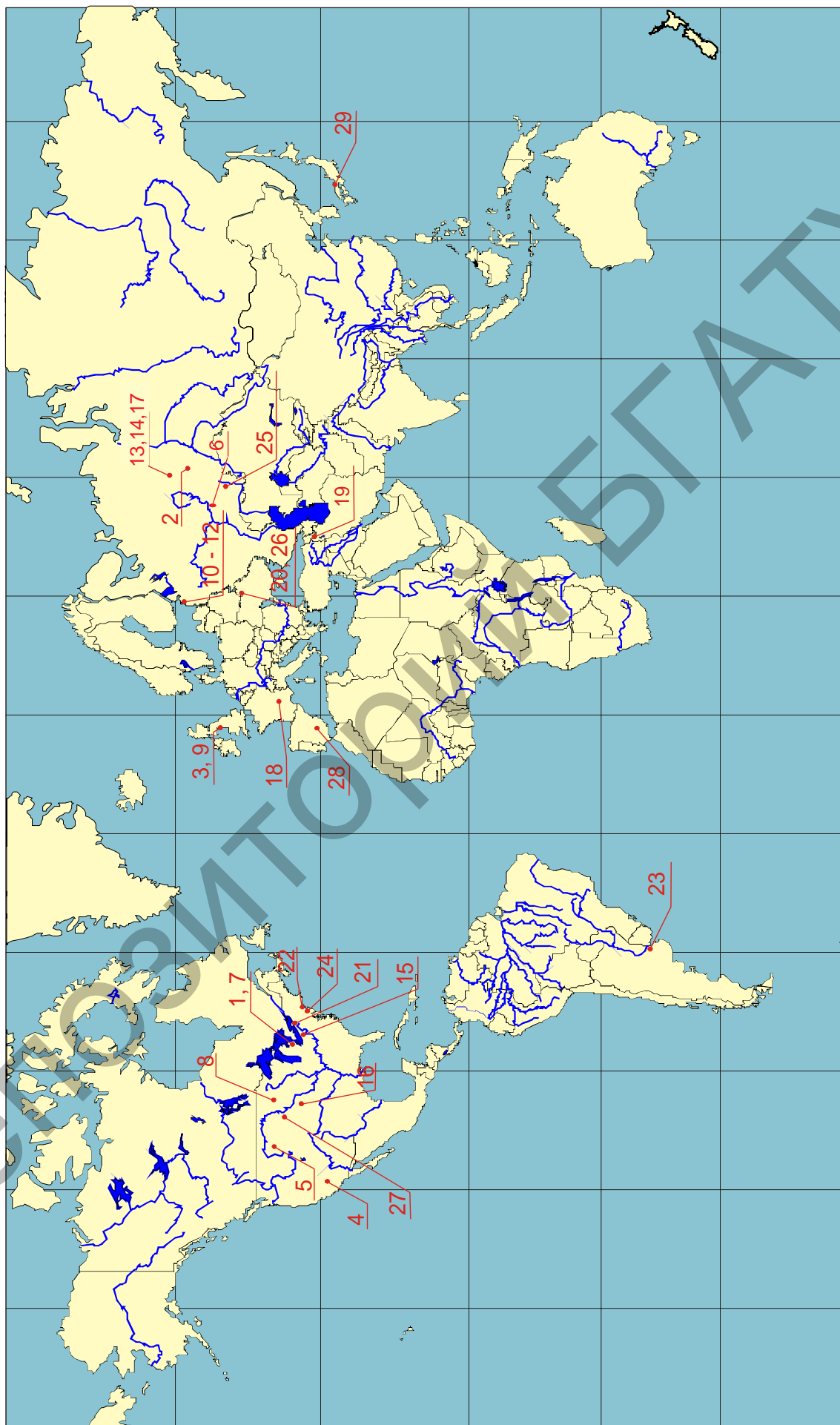
События, влияющие лишь на эксплуатационные возможности турбины или генератора, рассматривают как *выходящие за рамки шкалы*.

С 1944 года по настоящее время в мире произошло более 300 радиационных аварий и инцидентов на предприятиях ЯТЦ. Место и время основных событий указаны на карте-схеме и в комментариях к ней. Четыре наиболее крупномасштабные аварии были сопряжены с риском для прилегающих территорий и населения.

**1957 год.** Авария на Кыштымском заводе по переработке топлива в Челябинской области (Россия) привела к мощному выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду. В целях ограничения серьезных воздействий на здоровье людей были приняты аварийные меры, включая эвакуацию населения. По шкале INES это была *серьезная авария* уровня 6.

Крупномасштабные аварии

Карта-схема происшествий на предприятиях ЯТЦ (1951–1999 годы)



## Комментарии к карте-схеме происшествий на предприятиях ЯТЦ (1951–1999 годы)

- 1 — 1951 г. Авария исследовательского реактора. Детройт, США.
- 2 — 1957 г. Авария на заводе по переработке топлива. Кыштым, СССР.
- 3 — 1957 г. Авария реактора. Лаборатория Уиндскейл (Селлафилд), Великобритания.
- 4 — 1959 г. Авария экспериментального энергетического реактора. Санта-Сюзана, США.
- 5 — 1961 г. Взрыв на экспериментальном реакторе. Айдахо-Фолс, США.
- 6 — 1966 г. Авария на АЭС с кипящим ядерным реактором. Мелекесс, США.
- 7 — 1966 г. Частичное расплавление активной зоны реактора «Энрико Ферми». Детройт, США.
- 8 — 1971 г. Выброс жидких радиоактивных отходов из хранилища. Монгжелло, США.
- 9 — 1973 г. Авария на заводе по переработке топлива. Уиндскейл (Селлафилд), Великобритания.
- 10 — 1974 г. Взрыв газгольдера. Ленинградская АЭС, СССР.
- 11 — 1974 г. Разрыв контура охлаждения и выброс радиоактивной воды в окружающую среду. Ленинградская АЭС, СССР.
- 12 — 1975 г. Частичное разрушение активной зоны и выброс радиоактивных веществ в окружающую среду. Ленинградская АЭС, СССР.
- 13 — 1977 г. Частичное расплавление активной зоны. Белоярская АЭС, СССР.
- 14 — 1978 г. Пожар на АЭС, нарушение системы контроля реактора. Белоярская АЭС, СССР.
- 15 — 1979 г. Расплавление активной зоны, выброс радиоактивных веществ в окружающую среду. АЭС Тримайл Айленд, США.
- 16 — 1979 г. Выброс высокообогащенного урана на заводе по производству ядерного топлива. Эрвинг, Теннесси, США.
- 17 — 1964 – 1979 гг. Неоднократное разрушение топливных сборок. Белоярская АЭС, СССР.
- 18 — 1980 г. Частичное повреждение активной зоны реактора без выброса радиоактивных веществ. АЭС Сен-Лоран, Франция.
- 19 — 1982 г. Взрыв генератора, пожар, нарушение системы охлаждения и электроснабжения. Армянская АЭС, СССР.
- 20 — 1982 г. Разрушение центральной топливной сборки, выброс радиоактивных веществ. Чернобыльская АЭС, СССР.
- 21 — 1982 г. Разрыв трубы парогенератора, выброс радиоактивного пара в атмосферу. Реактор Джина, Рочестер, США.
- 22 — 1982 г. Нарушение системы охлаждения реактора, утечка радиоактивных веществ в атмосферу. АЭС Онтарио, Нью-Йорк, США.
- 23 — 1983 г. Авария без выброса радиоактивных веществ в окружающую среду. Буэнос-Айрес, Аргентина.
- 24 — 1985 г. Утечка радиоактивной воды за пределы АЭС, Индиан-Пойнт-2. Нью-Йорк, США.
- 25 — 1985 г. Авария паропровода. Балаковская АЭС, СССР.
- 26 — 1986 г. Авария на Чернобыльской АЭС, СССР.
- 27 — 1986 г. Взрыв резервуара с радиоактивным газом на заводе обогащения урана. Уэбберс Фол, США.
- 28 — 1989 г. Повреждение систем безопасности реактора без выброса радиоактивных веществ. Вандельос, Испания.
- 29 — 1999 г. Увеличение радиационного фона в результате выброса нейтронов из емкости с урановым топливом. Токаймура, Япония.

Сразу после войны в Челябинской области был создан первый промышленный объект по получению плутония для производства ядерного оружия. В 1948 году в этом регионе был введен в эксплуатацию промышленный реактор. В 1949 году на основе плутония, полученного в этом реакторе, была сделана и вскоре испытана первая советская атомная бомба. В непосредственной близости от реактора с целью переработки топлива и извлечения плутония был построен радиохимический завод.

В первые годы работы подобных предприятий вопросам охраны здоровья персонала и окружающей среды не уделялось должного внимания. Не хватало опыта работы, не проводились научные исследования в области радиационной безопасности.

С 1949 по 1952 год сброс радиоактивных отходов производили в реку Теча и озеро Карачай. Помимо внешнего облучения, жители населенных пунктов в прибрежных районах подвергались и внутреннему облучению за счет поступления в организм радионуклидов с речной водой и рыбной продукцией.

В дальнейшем для жидких радиоактивных отходов были созданы бетонные емкости с толщиной стенок около 1,5 м и покрытием из нержавеющей стали. Эти емкости, оборудованные системой охлаждения, называли «банками вечного хранения».

В 1957 году в одной из емкостей отказала система охлаждения. В результате, на дне емкости накопилось несколько десятков тонн взрывной смеси солей нитрата и ацетата натрия. Мощный взрыв привел к разгерметизации емкости и выбросу  $7,4 \cdot 10^{16}$  Бк радиоактивных продуктов в окружающую среду. Поскольку дул сильный ветер, радиоактивное облако начало быстро распространяться в направлении движения воздушных потоков. Через 10 часов облако продвинулось на расстояние около 300 км. По пути его движения на земной поверхности образовался Восточно-Уральский радиоактивный «след» шириной 8–9 км, который протянулся через Челябинскую, Свердловскую и Тюменскую области. В составе выпавших радиоактивных продуктов преобладали соединения  $^{90}\text{Sr}$ .

Загрязненную зону оградил колючей проволокой, вокруг нее построили дренажный канал. Население эвакуировали. Загрязненный грунт сняли, скот уничтожили и захоронили.

**1957 год.** Авария на реакторе в Уиндскейле (сейчас Селлафилд, Великобритания) привела к выбросу в окружающую среду радиоактивных продуктов деления (преимущественно  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ). По шкале INES эта авария соответствует уровню 5.

**1979 год.** На АЭС в Тримайл Айленде (США) в результате расплавления активной зоны реактора произошел выброс радиоактивных газов в атмосферу (в основном,  $^{133}\text{Xe}$  и  $^{135}\text{Xe}$ ) и жидких радиоактивных отходов в реку Сакуахана. Была проведена эвакуация населения из зоны бедствия. По шкале INES эта авария соответствует уровню 5. Она заставила пересмотреть принципы надежности и безопасности атомных реакторов. Из-за мощного движения «зеленых» энергетическим компаниям пришлось пойти на значительные затраты, связанные с совершенствованием систем контроля и защиты на АЭС.

**1986 год.** Авария на Чернобыльской АЭС привела к крупномасштабному загрязнению окружающей среды. В соответствии со шкалой INES эта авария самого высокого 7 уровня. Подробно об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях будет рассказано в последующих главах.

Исследование причин ядерных аварий позволило экспертам сделать следующие выводы:

- большая часть аварий произошла из-за технических недостатков в конструкции оборудования и по вине операторов;
- в большинстве случаев аварии произошли во время технического обслуживания или испытаний оборудования;
- в некоторых случаях аварии произошли во время остановки ядерного реактора;
- почти все аварии могли быть предотвращены операторами при своевременном распознавании сигналов контрольно-измерительных приборов.

*Чтобы эффективно использовать опыт, накопленный более чем за 60 лет эксплуатации ядерных реакторов, для организации мероприятий по предотвращению подобных аварий в будущем, необходимо:*

- изучать последствия имевших место аварий и инцидентов;
- выяснять их причины;
- систематизировать происходившие события на основе анализа степени их воздействия на людей и окружающую среду.



Итак, →

Материал, рассмотренный в этой главе, показал Вам, что познание тайн атомного ядра значительно ускорило темпы научно-технического прогресса. Вы узнали, как широко и успешно используется явление радиоактивности в медицине, промышленности, сельском хозяйстве, науке и технике на протяжении уже многих десятилетий.

В настоящее время ядерная энергетика во многом определяет уровень научно-технического прогресса, экономическое развитие общества, его благосостояние. Однако, как показывает современная история, явление радиоактивности использовалось не только в мирных целях, но и при создании крайне опасного и разрушительного оружия. В следующей главе Вы более подробно познакомитесь с принципом действия ядерного и термоядерного оружия, узнаете, к каким экологическим последствиям может привести его применение.

**Вопросы для самоконтроля и обсуждения:**

1. Где применяют радиоактивные изотопы в промышленности?
2. В каких научных методах исследования используют радиоактивные вещества?
3. На чем основана радиоизотопная диагностика в медицине?
4. Как используют метод «меченых» атомов в сельском хозяйстве?
5. Как классифицируются ядерные реакторы по назначению?
6. Изложите принцип работы атомной электростанции.
7. Что такое ядерный топливный цикл? Из каких частей он состоит?
8. В чем заключается проблема радиоактивных отходов?
9. Какие ядерные аварии Вы знаете?
10. Назовите основные причины аварий на атомных электростанциях.
11. Сравните экологические последствия работы атомных и тепловых электростанций.
12. В чем заключены достоинства и недостатки ядерной энергетики?



**Ключевые слова и словосочетания:** ядерное и термоядерное оружие, испытательный ядерный полигон, ядерный взрыв

*Открытие цепной реакции ядерного деления послужило толчком для поиска путей практического использования энергии, выделяющейся в результате осуществления этой реакции, причем, в военных целях ее стали использовать даже раньше (ядерное оружие), чем в мирных (атомные электростанции). В основе действия наиболее распространенных видов ядерного оружия лежит неуправляемая цепная реакция ядерного деления или реакция термоядерного синтеза. Энергия, которая выделяется в результате реакций подобного типа, может приводить к мощному взрыву, несущему катастрофические последствия.*

Изучив главу...



Вы познакомитесь с историей создания, принципом действия и разнообразными видами ядерного оружия. Узнаете, какие страны имеют ядерное оружие и где расположены полигоны, на которых проводятся его испытания. Вы поймете, какую угрозу для всего человечества представляет это разрушительное оружие массового поражения.

### 7.1. Что такое ядерное оружие

В 1939 году экспериментальным путем была доказана возможность цепного процесса ядерного деления урана, в результате которого выделяется огромное количество энергии.

Было установлено, что при определенных условиях развитие цепной реакции деления неизбежно приведет к мощному взрыву. Ученые осознали, что на основе цепного процесса ядерного деления может быть создано оружие огромной разрушительной силы.

Исторически сложилось так, что результаты многих научных исследований не всегда использовались во благо человечества. Цепную реакцию ядерного деления также, в первую очередь, использовали в военных целях. Мы знаем, что первая атомная электростанция появилась лишь в 1954 году в г. Обнинск (СССР), а испытание первой атомной бомбы произошло еще в 1945 году в штате Нью-Мехико (США).

После открытия реакции ядерного деления урана в различных научных центрах мира начались работы по изучению условий ее протекания, которые и привели к созданию ядерного оружия.

В начальный период все исследования в этой области были засекречены, да и сами ученые еще не до конца понимали, насколько огромна энергия, таящаяся



в недрах атома, и какими могут быть последствия применения нового оружия.

### Дневник событий

Дата		Что произошло?
<b>1943 год</b>		Начались работы по созданию ядерного оружия в США. В этом же году И.В. Курчатову было поручено возглавить первый атомный научный центр в бывшем Советском Союзе.
<b>16 июля 1945 года</b>		Проведено испытание первой атомной бомбы в пустыне Аламогордо (штат Нью-Мехико, США).
<b>Август 1945 года</b>		Осуществлены взрывы атомных бомб над японскими городами Хиросима и Нагасаки. Последствия катастрофичны.
Дневник событий	<i>6 августа 1945 года, 8 часов 14 минут</i>	<i>Американская атомная бомба «Малыш» сброшена на Хиросиму, через 47 секунд произошел взрыв.</i>
	<i>7 августа 1945 года, утро</i>	<i>Стало известно, что Хиросима полностью уничтожена одной единственной бомбой, площадь разрушений — 13 км<sup>2</sup>, число погибших — 45 тысяч человек.</i>
	<i>9 августа 1945 года, 11 часов 02 минуты</i>	<i>Вторая американская атомная бомба «Толстяк» взорвана над Нагасаки, площадь разрушений — 7 км<sup>2</sup>, число погибших — 22 тысячи человек.</i>
	<i>Конец 1945 года</i>	<i>От последствий ядерных взрывов в Хиросиме умерло 12 тысяч человек, в Нагасаки — 80 тысяч человек.</i>
	<i>Конец 1950 года</i>	<i>От последствий ядерных взрывов в Хиросиме умерло 20 тысяч человек, в Нагасаки — 100 тысяч человек.</i>
<b>Октябрь 1945 года</b>		В штате Нью-Мехико началось строительство завода для массового производства атомных бомб.
<b>5 августа 1963 года</b>		В Москве подписан Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой.
<b>10 октября 1963 года</b>		Вступил в силу Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой.

Ядерное оружие было создано в США, бывшем Советском Союзе, Великобритании, Франции. Затем к этим странам присоединились Китай, Индия и Пакистан. По мнению ряда специалистов, ядерное оружие имеют также Израиль и ЮАР. Это оружие явилось мощным инструментом ядерных держав в их взаимном противоборстве для установления контроля над другими странами и влияния на процесс мирового развития.

Наибольшее число испытаний ядерного оружия приходится на периоды:

1954–1958 год  
1961–1962 год

×то такое ядерное оружие?

Когда исследования, проведенные учеными многих стран, показали, что использование ядерного оружия и ядерная война поставят под сомнение вопрос о дальнейшем существовании человечества и вообще жизни на Земле, в 1963 году был подписан Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой.

В последующие годы Франция и Китай, не подписавшие этот Договор, провели серию ядерных взрывов в атмосфере. Тем не менее, испытания проводились уже значительно реже, а по мощности ядерные боезаряды уступали использовавшимся ранее. К сожалению, подземные и подводные испытания ядерного оружия проводятся до сих пор.

*Троtilовый эквивалент* — это количество обычного взрывчатого вещества тротила (тринитротолуола), которое потребовалось бы взорвать, чтобы взрыв по энергии соответствовал (был эквивалентен) взрыву атомной бомбы.

Его величина выражается в килограммах, тоннах, килотоннах, мегатоннах.

Так, при бомбардировке японских городов были применены сравнительно маломощные ядерные боезаряды (15–20 килотонн тротилового эквивалента).

**Ядерное оружие — оружие массового поражения, действие которого основано на использовании внутриядерной энергии атомов.**

Источником энергии в ядерном оружии служит цепная реакция деления тяжелых ядер либо термоядерная реакция синтеза атомных ядер из более легких ядер.

В широком смысле слова под ядерным оружием подразумевают не только ядерные боеголовки (боевые части ракет, авиационные бомбы, артиллерийские снаряды, мины), но и средства доставки их к цели (ракеты, самолеты), а также средства управления, обеспечивающие попадание боеприпасов в цель.

Мощность ядерного боеприпаса оценивают по тротиловому эквиваленту.

### Основные виды ядерного оружия

Оружие на основе реакций ядерного деления

**Атомная бомба**

Оружие на основе реакций термоядерного синтеза (термоядерное оружие)

**Водородная бомба**

**Нейтронная бомба**

Рассмотрим принцип действия различных видов ядерного оружия.

## Оружие на основе реакций ядерного деления Атомная бомба

В атомной бомбе источником энергии является *неуправляемая цепная реакция деления* тяжелых атомных ядер. Чтобы начать цепную реакцию деления, достаточно 1 нейтрона.

Напомним, что цепная реакция ядерного деления возможна лишь в том случае, когда достигается *критическая масса* делящегося вещества. Иными словами, условия протекания реакции деления тяжелых атомных ядер должны быть такими, чтобы нейтроны, образующиеся при ядерном делении, не покидали делящееся вещество еще до столкновения с другими тяжелыми ядрами и процесс деления мог продолжаться.

Если количество делящегося вещества меньше *критической массы*, процесс ядерного деления и выделение энергии прекращается. Если же масса делящегося вещества достигает величины критической массы или превосходит ее, развивается цепной процесс ядерного деления, который и приводит к взрыву колоссальной силы.

Основными элементами атомной бомбы являются *ядерный заряд и заряд обычного взрывчатого вещества*, помещенные в *корпус бомбы*. В качестве ядерного горючего в атомной бомбе используют  $^{235}\text{U}$  или  $^{233}\text{U}$ , а также  $^{239}\text{Pu}$ .

В зависимости от способа достижения условий, при которых начинается цепная реакция ядерного деления, атомные бомбы могут быть двух типов — *пушечного* и *имплозивного*.

### Принципиальная схема устройства атомной бомбы пушечного типа



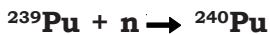
Атомные бомбы *пушечного типа* производили в США. Некоторые страны, такие как Советский Союз и Великобритания, никогда не создавали ядерное оружие подобного типа.

Активная часть атомной бомбы *пушечного типа* включает два образца делящегося вещества. Масса каждого из них меньше критической (*подкритическая*), а суммарная масса двух образцов превышает критическую (*надкритическая*).

Образцы делящегося вещества, имеющие *подкритическую* массу, пространственно разделены, и развитие цепной реакции в них невозможно. Чтобы началась цепная реакция ядерного деления, образцы *подкритической* массы необходимо *как можно быстрее соединить*. С этой целью используют взрывчатое вещество, в качестве которого в атомной бомбе обычно применяют сплав тротила с гексогеном.

Под действием ударной волны, возникающей при запале взрывчатого вещества, **два образца делящегося вещества подкритической массы с огромной скоростью летят навстречу друг другу и объединяются в один. В делящемся веществе, масса которого с этого момента становится выше критической (надкритической), мгновенно начинается цепная реакция деления, которая примерно через миллионные доли секунды заканчивается взрывом.**

Плутониевый ядерный заряд в основном состоит из  $^{239}\text{Pu}$ . Однако  $^{239}\text{Pu}$  всегда содержит некоторое количество  $^{240}\text{Pu}$ , который образуется в процессе производства  $^{239}\text{Pu}$  по реакции:

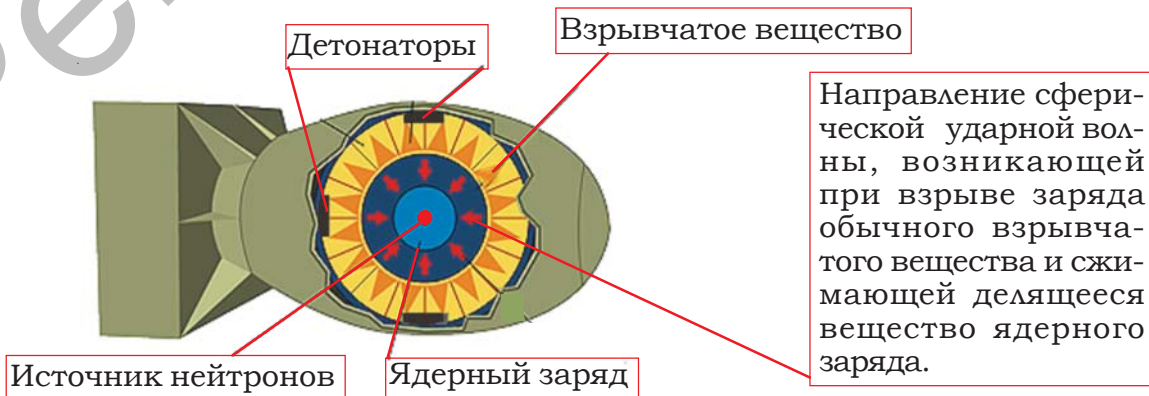


Вероятность спонтанного деления  $^{239}\text{Pu}$  без примеси  $^{240}\text{Pu}$  низка, а  $^{240}\text{Pu}$  — значительно выше. Поэтому присутствие  $^{240}\text{Pu}$  увеличивает вероятность начала реакции ядерного деления.

Критическая масса  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  составляет 10–30 кг в зависимости от плотности используемого ядерного заряда.

В атомных бомбах *пушечного типа* не исключена возможность процесса спонтанного (самопроизвольного) ядерного деления еще до объединения образцов делящегося вещества подкритических масс (например, в бомбе на основе  $^{239}\text{Pu}$  из-за примеси 1%  $^{240}\text{Pu}$ ). Поэтому такие бомбы небезопасны при хранении и транспортировке. Подобных недостатков лишены более совершенные и сложные по конструкции атомные бомбы *имплозивного типа*.

### Принципиальная схема устройства атомной бомбы имплозивного типа



В атомной бомбе имплозивного типа ядерное горючее разделено не на две части, как в бомбе пушечного типа, а на большее число частей, которые объединяются при взрыве окружающего их обычного взрывчатого вещества, инициирующего ядерный взрыв.

Условия, при которых начинается цепная реакция ядерного деления, достигаются под действием сферической ударной волны, возникающей при детонации обычного взрывчатого вещества. В результате резкого увеличения давления возрастает плотность объединенного делящегося вещества и достигается его *надкритическая* масса. Практически мгновенно начинается цепная реакция ядерного деления, которая приводит к ядерному взрыву.

За счет увеличения плотности делящегося вещества под действием высокого давления в бомбах имплозивного типа

- «критическая масса» достигается при меньшем количестве делящегося вещества, чем в бомбах пушечного типа;
- существенно увеличивается коэффициент размножения нейтронов (**K**), что приводит к быстрому развитию цепного процесса ядерного деления и увеличению эффективности атомной бомбы.

В бомбах имплозивного типа сведена к минимуму возможность самопроизвольной детонации ядерного вещества, и их можно безопасно хранить длительное время.

Независимо от конструкции и мощности бомбы цепная реакция ядерного деления заканчивается очень быстро — через  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  секунд. При этом в реакцию вступает около 1 кг ядерного горючего, остальная его часть рассеивается в окружающем пространстве. За счет рассеивания осколков деления и остатков ядерного горючего, не подвергшегося делению, происходит загрязнение местности радионуклидами.

Количество энергии, которое выделяется в процессе реакции ядерного деления, в среднем, составляет 1 МэВ в расчете на 1 нуклон делящегося вещества. Поэтому мощность атомной бомбы ограничена и обычно не превышает 100 тыс. тонн тротилового эквивалента.

Гораздо больше энергии, по сравнению с энергией, выделяющейся в реакциях *ядерного деления*, можно получить в результате реакций *ядерного синтеза*. Реакции подобного типа служат источником энергии в термоядерном оружии.

В бомбах имплозивного типа для начала цепного процесса требуется меньше ядерного горючего, чем в бомбах пушечного типа.

Термоядерное оружие

В основе действия термоядерного оружия лежат реакции ядерного синтеза атомных ядер химических элементов, расположенных в самом начале системы Д.И. Менделеева.

Взаимное отталкивание атомных ядер тем больше, чем больше их заряд, поэтому ядра с малым электрическим зарядом взаимодействуют значительно легче, чем ядра с большим электрическим зарядом.

Все атомные ядра имеют положительный электрический заряд, и поэтому при сближении между ними действуют силы кулоновского отталкивания. Для того, чтобы произошла реакция синтеза нового ядра, взаимодействующие ядра должны обладать энергией, достаточной для преодоления сил взаимного отталкивания.

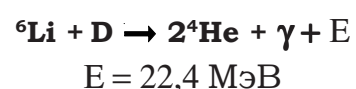
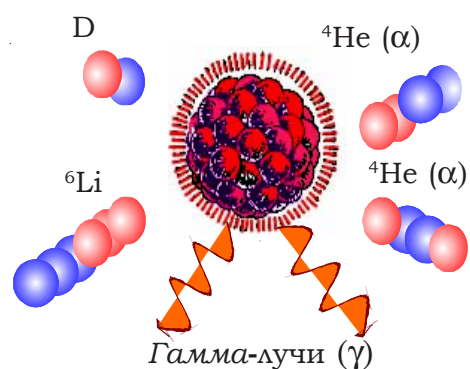
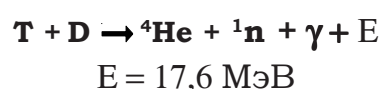
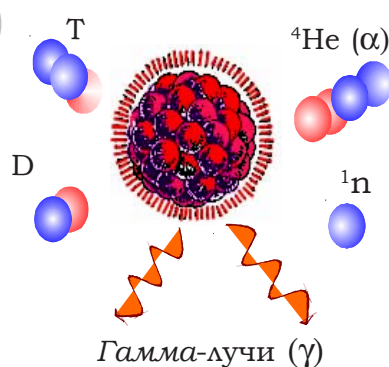
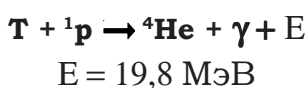
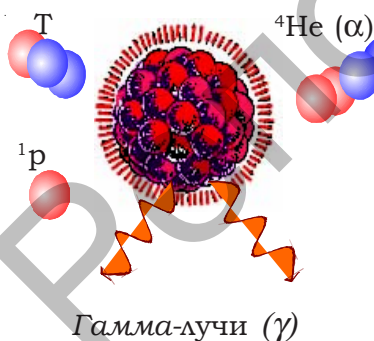
Проще всего осуществить сближение двух легких атомных ядер с небольшим содержанием протонов в ядре. При слиянии легких ядер им приходится преодолевать меньшее кулоновское отталкивание. Однако даже в этом случае взаимодействующие ядра должны обладать огромной энергией. Такую энергию ядра приобретают при сверхвысоких температурах (десятки и сотни миллионов градусов). Поэтому реакции ядерного синтеза и получили название *термоядерных реакций*.

Ученые установили, что каждую секунду на Солнце 630 млн. т водорода превращается в гелий. Огромная энергия, которая выделяется в результате подобных ядерных превращений, компенсирует энергетические потери Солнца на излучение.

Сам процесс ядерного синтеза сопровождается выделением энергии, величина которой значительно превосходит энергетические затраты на инициирование ядерной реакции.

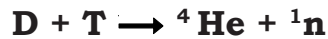
Именно такого типа реакции осуществляются в недрах Солнца и других звезд.

Термоядерный синтез



### Водородная бомба

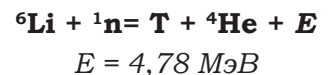
В водородной бомбе источником энергии является неуправляемая реакция термоядерного синтеза ядер гелия из ядер изотопов водорода — дейтерия (**D**) и трития (**T**):



Высокая температура, необходимая для осуществления этой реакции, может быть достигнута только при взрыве атомной бомбы. Поэтому составной частью водородной бомбы является пусковой ядерный заряд (фактически, атомная бомба). Взрыв атомной бомбы приводит к мгновенному нагреву термоядерного горючего до сверхвысокой температуры, и становится возможным синтез ядер гелия. Реакция сопровождается выделением значительного количества энергии — в среднем, 6,7 МэВ на 1 нуклон. Это намного больше, чем количество энергии, выделяющейся при осуществлении реакции деления тяжелых атомных ядер. Процесс ядерного синтеза сопровождается вторым, еще более мощным взрывом.

Мощность водородной бомбы практически не ограничена. Взрыв водородной бомбы, как правило, приводит к более существенным разрушениям объектов в районе взрыва по сравнению с разрушениями при взрыве атомной бомбы. Наличие в водородной бомбе пускового ядерного заряда способствует значительному загрязнению окружающей среды осколками деления и остатками ядерного горючего, не подвергшегося делению.

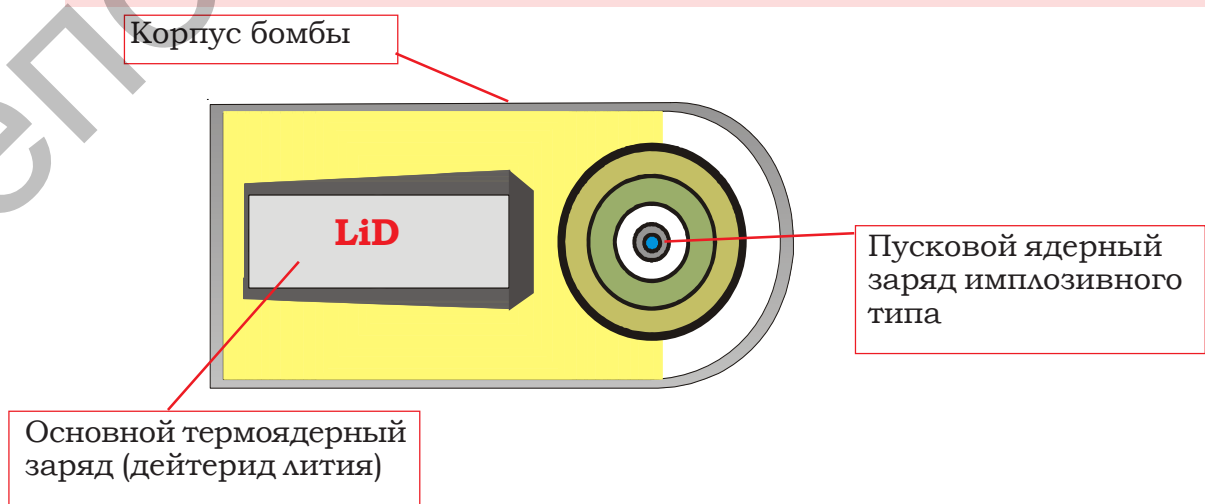
С целью повышения эффективности действия водородной бомбы в качестве горючего используют дейтерид лития ( ${}^6\text{LiD}$ ). В результате облучения лития нейтронами образуется тритий и гелий:



Образующийся тритий взаимодействует с дейтерием, содержащимся в исходном термоядерном горючем, с образованием ядер гелия:



### Принципиальная схема устройства водородной бомбы



## Нейтронная бомба

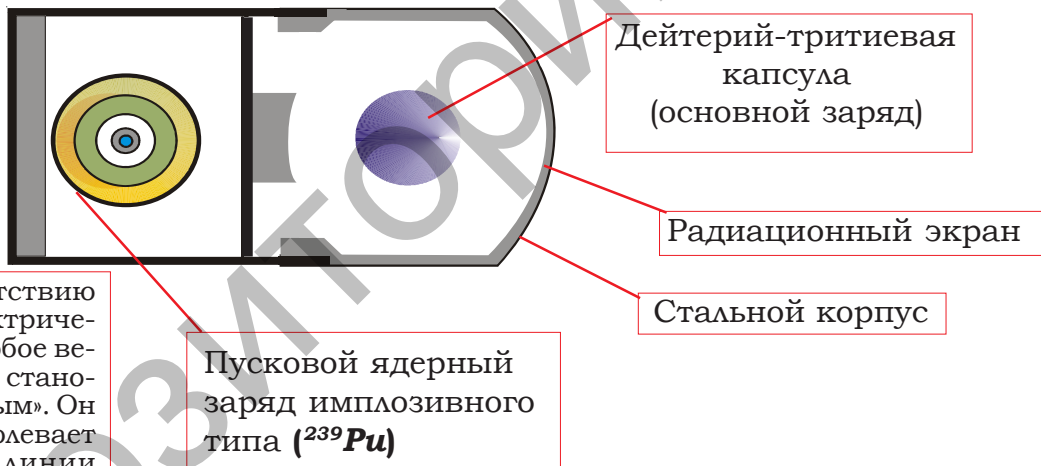
В 60–70-е годы XX века внимание разработчиков ядерного оружия было обращено на тот факт, что, несмотря на огромную разрушительную силу существовавших ядерных боезарядов, оно мало эффективно против бронетехники. Бронированный корпус машин надежно защищает экипаж от действия ионизирующего излучения, возникающего при обычных ядерных взрывах. С легкостью проникать через толстую стальную броню и поражать людей способно только нейтронное излучение. Это свойство нейтронного излучения было использовано при создании *нейтронной бомбы* — тактической боеголовки нового поколения.

Нейтронная бомба предназначена для максимального поражения всего живого в эпицентре взрыва при минимальном, по сравнению с другими видами ядерного оружия, разрушении зданий, дорог и других подобных объектов, а также значительно меньшем загрязнении местности радионуклидами.

### Нейтронная бомба



### Принципиальная схема устройства нейтронной бомбы



Благодаря отсутствию у нейтрона электрического заряда, любое вещество для него становится «прозрачным». Он спокойно преодолевает все защитные линии атома: и внешнюю электронную оболочку, с большой силой отталкивающую любую отрицательно заряженную частицу, и внешнюю границу атомного ядра, отталкивающего даже движущуюся с огромной скоростью тяжелую альфа-частицу. Поглотив нейтрон, ядра большинства атомов приходят в возбужденное состояние, а затем распадаются, испуская при этом другие частицы и гамма-кванты.

Принцип действия нейтронной бомбы подобен принципу действия водородной бомбы, однако конструкционные особенности нейтронной бомбы обеспечивают выход в окружающую среду мощного потока нейтронов. Мощные потоки высокоэнергетических нейтронов возникают при протекании реакции термоядерного синтеза гелия в дейтерий-тритиевой плазме:



По сравнению с водородной бомбой, используемой для решения иных боевых задач, нейтронная бомба имеет свои особенности.



Устройство нейтронной бомбы обеспечивает максимальный (до 97 %) выход нейтронов в окружающую среду и минимальное их поглощение конструкционными материалами бомбы и атомными ядрами делящегося вещества.

В пусковом ядерном заряде используют минимальное количество делящегося  $^{239}\text{Pu}$ , которого достаточно для осуществления ядерного взрыва и инициирования реакции ядерного синтеза. Из-за небольшого ядерного запала радиоактивное загрязнение окружающей среды после взрыва нейтронной бомбы существенно меньше, чем после взрыва атомной и водородной бомб. В то же время небольшой ядерный запал не позволяет создавать боезаряды большой мощности.

В результате использования нейтронной бомбы появляется дополнительный источник ионизирующего излучения — так называемая *наведенная радиоактивность*. При взаимодействии нейтронов с атомными ядрами образуются короткоживущие радионуклиды, распад которых сопровождается испусканием ионизирующего излучения. Это излучение может быть настолько мощным, что люди, находящиеся в районе взрыва, даже внутри танка могут получить летальную дозу облучения в течение нескольких часов.

Таким образом, на основе неуправляемых реакций ядерного деления и термоядерного синтеза были созданы различные виды ядерного оружия. В следующей таблице приведены основные характеристики рассмотренных видов ядерного оружия.

Распределение энергии, выделяющейся при воздушном взрыве обычного ядерного (Я) и нейтронного (Н) боеприпасов.

Ударная волна:

Я — 50 %

Н — 40 %

Световое излучение и электромагнитный импульс:

Я — 30–35 %

Н — 25 %

Проникающая радиация:

Я — 10 %

Н — 30 %

Загрязнение местности радионуклидами:

Я — 5–10 %

Н — 5 %

Эти данные приведены для нейтронной бомбы, в которой инициирующий и основной заряд вносят одинаковый вклад в образование энергии.

### Характеристики основных видов ядерного оружия

Вид бомбы	Ядерное горючее	Особенности оружия
<b>Атомная бомба</b>	$^{235}\text{U}$ , $^{233}\text{U}$ $^{239}\text{Pu}$	<p><b>Используется реакция деления тяжелых атомных ядер</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Чтобы инициировать цепную реакцию ядерного деления, достаточно 1 нейтрона.</li> <li>• В реакциях деления выделяется энергия 1 МэВ в расчете на 1 нуклон.</li> <li>• Максимальная мощность ядерных боеприпасов соответствует 100 тыс. тонн тротилового эквивалента.</li> <li>• Температура в эпицентре взрыва достигает <math>10^7</math>–<math>10^8</math> К, давление — <math>10^{14}</math> Па.</li> </ul>

<p><b>Термо-ядерное оружие</b></p>	<p>Смесь дейтерия (<math>D</math>) и трития (<math>T</math>) или дейтерид лития (<math>{}^6LiD</math>)</p>	<p><b>Используется реакция синтеза ядер гелия</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Чтобы инициировать процесс термоядерного синтеза, требуются температуры в десятки и сотни миллионов градусов, которые достигаются при взрыве пускового заряда (атомной бомбы). После разогрева в основном заряде начинается термоядерная реакция.</li> <li>• Ядерный синтез гелия из ядер изотопов водорода сопровождается выделением энергии <math>6,7 \text{ МэВ}</math> в расчете на <math>1</math> нуклон, которая по количеству превышает энергию, выделяющуюся в результате деления тяжелых атомных ядер.</li> </ul> <p>Разновидности термоядерного оружия:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <b>Водородная бомба</b> Мощность боеголовок не ограничена.</li> <li>➤ <b>Нейтронная бомба</b> Максимальная мощность боеголовок — около 10 тыс. т тротилового эквивалента.</li> </ul>
------------------------------------	--	--

В зависимости от места проведения ядерных взрывов различают *воздушные, наземные, подземные, подводные и высотные взрывы*. На следующих схемах указаны их основные особенности, а на с. 228 приведены фотографии взрывов разного типа.

### Ядерные взрывы

воздушные

наземные

подземные

подводные

высотные

#### Что происходит при взрыве?

Все вещества, из которых была создана бомба, вместе с осколками деления под воздействием мощного источника тепла переходят в газообразное состояние. В первоначальный момент эти газы создают давление в сотни тысяч раз больше атмосферного и образуют огненный шар.

При охлаждении огненного шара в результате конденсации и коагуляции испарившегося вещества

- конструктивных материалов,
- нерасцепленного ядерного горючего,
- продуктов ядерного деления

образуются радиоактивные частицы. Перемещение и оседание этих частиц на земную поверхность определяется их размерами.

Огненный шар касается поверхности Земли. Тысячи тонн испарившегося грунта вовлекаются в область огненного шара.

Около половины радиоактивных веществ оседает на земную поверхность, образуя «радиоактивный след», который может достигать нескольких сотен и тысяч квадратных километров. Остальные радиоактивные вещества, находящиеся в мелкодисперсном состоянии, уносятся в верхние слои атмосферы и выпадают на Землю так же, как и при воздушном взрыве.

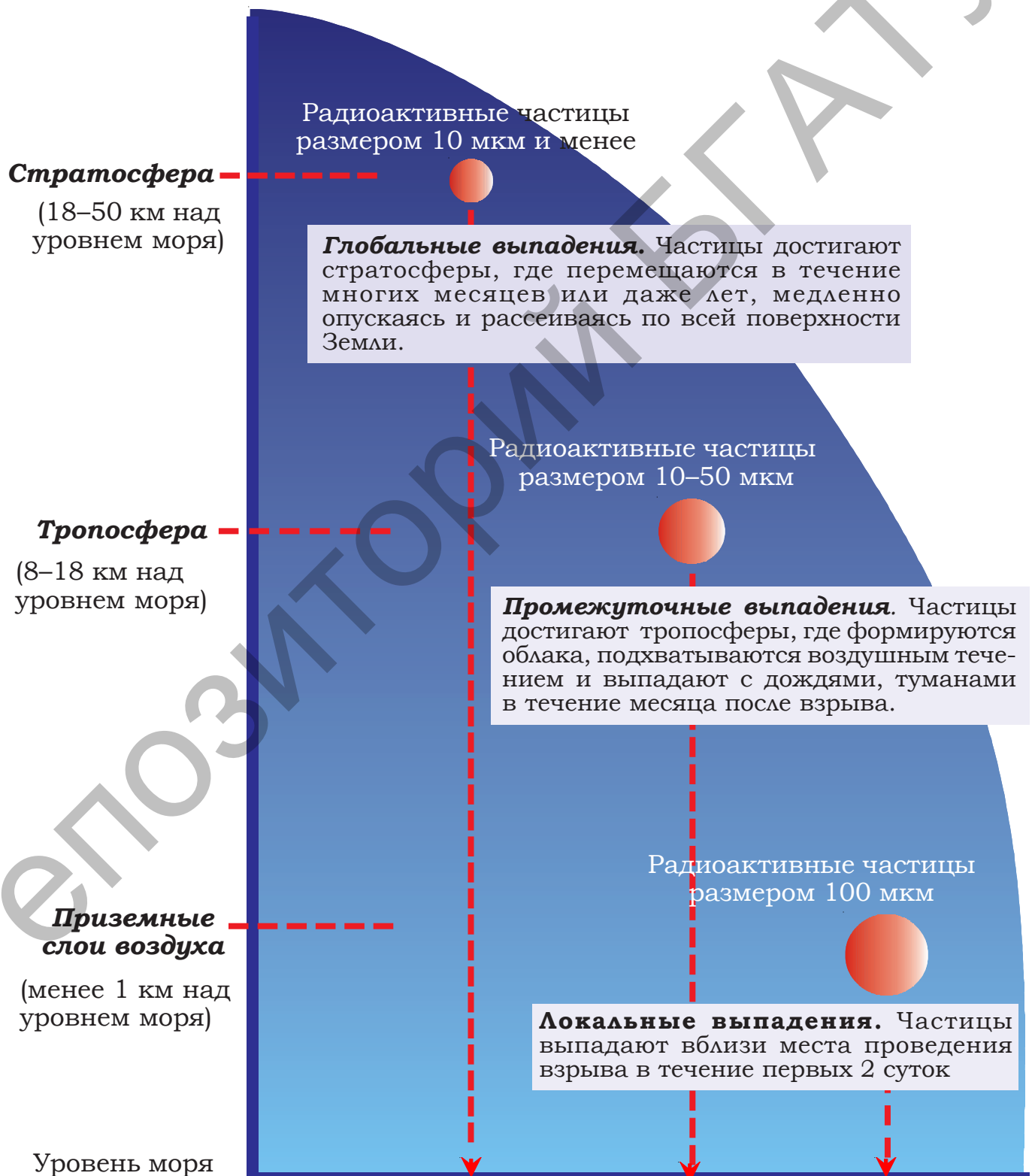
В верхних слоях атмосферы образуются обширные области с повышенным содержанием ионизированных атомов и молекул.

Образуется огромный газовый пузырь и водяной столб, увенчанный водяным облаком (султаном). Взрыв завершается образованием базисной волны и серии гравитационных волн.

Грунт либо не выбрасывается (камуфлетный взрыв), либо частично выбрасывается наружу с образованием воронки. Выделяющаяся энергия поглощается грунтом вблизи эпицентра взрыва.

Наиболее широкомасштабное загрязнение земной поверхности происходит при *воздушных* взрывах большой мощности. Перемещение радиоактивных частиц в атмосфере воздушными потоками и их выпадение на поверхность Земли определяется размерами частиц, образующихся при взрыве.

### Перемещение радиоактивных частиц при воздушных взрывах



Фотографии ядерных взрывов \*

подводные (1-3)



1

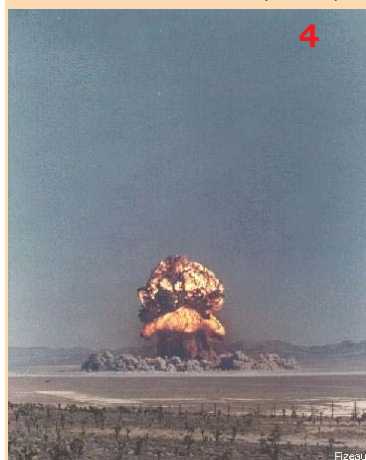


2



3

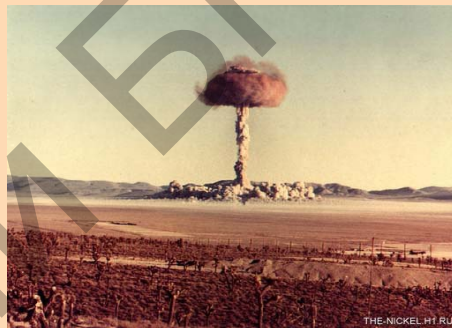
наземные (4-6)



4



5



6

подземные (7-9)



7



8



9

воздушные (10-12)



10



11



12

\* <http://mina.ru/weapon/nuclear>

## 7.2. Испытательные ядерные полигоны

Испытания ядерного оружия, проводившиеся в разные годы, были направлены на:

- исследование действия ядерных боеприпасов и возможности их совершенствования;
- изучение процессов, сопровождающих ядерный взрыв;
- совершенствование методов обнаружения мест проведения ядерных взрывов;
- создание средств защиты и др.

Большинство взрывов при испытаниях ядерного оружия ведущие ядерные державы проводят на специально созданных полигонах. Испытательные полигоны обычно расположены на территориях с низкой плотностью населения, вдали от крупных промышленных центров.

В 1947 году на территории Казахстана для испытаний ядерного оружия был построен **Семипалатинский полигон**. В 1949 году здесь было проведено первое испытание ядерного оружия, созданного в СССР, а в 1953 году впервые в мире было испытано термоядерное оружие. Всего на Семипалатинском полигоне проведено 86 воздушных испытаний, 30 наземных и 340 подземных. В 1991 году этот полигон был закрыт, а с 1995 года на его территории были начаты работы по ликвидации последствий испытаний ядерного оружия.

Еще один крупный ядерный полигон на территории бывшего Советского Союза — **Северный полигон** был основан в 1954 году на островах Новая Земля. На полигоне был произведен 131 ядерный взрыв, в том числе 87 взрывов — в атмосфере. Последнее испытание ядерного оружия на Северном полигоне было осуществлено в 1990 году.

В Советском Союзе ядерное оружие испытывали также на полигонах

- **Капустин Яр** (Астраханская область) — 10 высотных взрывов;
- **в районе г. Аральска** (Казахстан) — наземный взрыв мощностью 0,3 кт тротилового эквивалента;

При проведении подземных испытаний обычно заранее бурится скважина глубиной более 600 м. После размещения ядерного боеприпаса скважина «запечатывается» на всю глубину смесью щебня и песка. На Семипалатинском полигоне до сих пор можно увидеть воронку от ядерного взрыва, осуществленного в 1965 году на глубине 120 м. Воронку заполнила грунтовая вода и образовалось озеро. Примерно через 10 лет в это озеро запустили сазанов и рыба прижилась.

*Наиболее известные места проведения ядерных испытаний:*

**США** — Невадский полигон, акватория Тихого и Атлантического океанов, Полинезия.

**Великобритания** — острова Монте-Бело (Австралия).

**Франция** — острова Муроруа и Фангатауфа, полигон Реганн в Алжире.

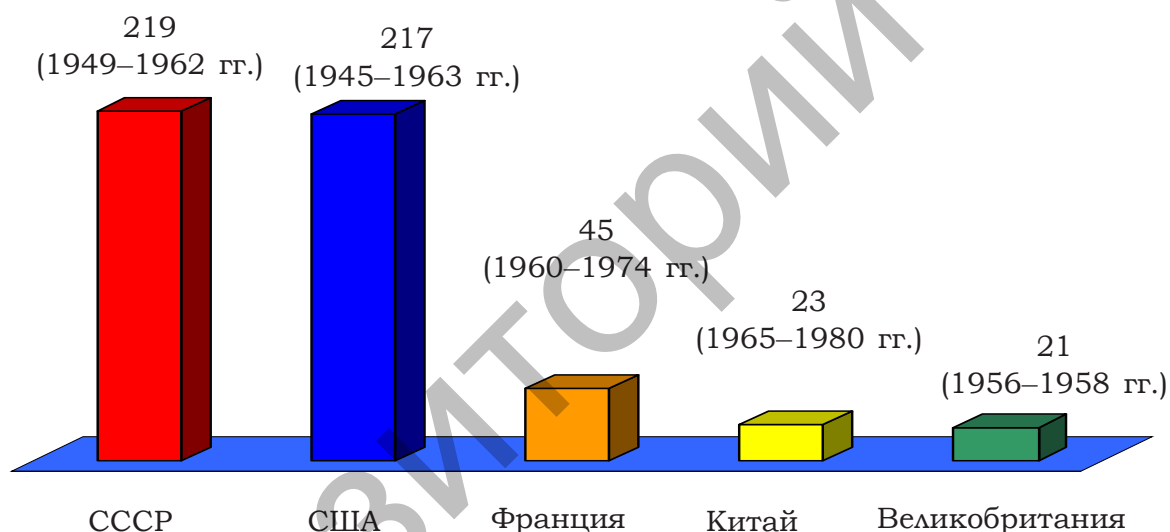
**Китай** — полигон Лобнор.

- **в районе г. Тоцка** (Оренбургская область) — воздушный взрыв мощностью 40 кт тротилового эквивалента.

Самым крупным испытательным ядерным полигоном в США является **Невадский полигон**, который находится в пустыне Невада. На его территории было произведено 834 ядерных взрыва, в том числе 100 — в атмосфере.

В разные периоды времени ядерными державами мира было осуществлено более 2 000 ядерных испытаний в различных природных средах, включая 525 взрывов в атмосфере. Кроме государств — «членов ядерного клуба», ядерные испытания проводили Индия и Пакистан, причем каждая из этих стран осуществила по несколько подземных взрывов.

**Количество ядерных взрывов в атмосфере, осуществленных ядерными державами в разные периоды времени**



Кроме ядерных взрывов, проводимых на испытательных ядерных полигонах, их осуществляли и в других местах. Так например, по заказам различных министерств и ведомств, проводились подземные ядерные взрывы в «мирных целях». Они применялись для измельчения скальных пород и добычи руды, для сейсмозондирования земной коры, ликвидации газовых фонтанов, извлечения больших объемов грунта, для интенсификации притока нефти и газа, разведки и промышленного освоения месторождений, создания подземных емкостей и т. д. На территории бывшего Советского Союза было проведено более 70 подобных взрывов.

### 7.3. Последствия ядерных взрывов

Специфика ядерного оружия и процессов, происходящих при ядерном взрыве, определили поражающие свойства оружия подобного типа. Особый характер поражающего действия ядерного оружия обуславливают:

- значительно большее количество выделяемой при взрыве энергии по сравнению с традиционными видами оружия;
- наличие проникающего излучения, сопровождающего взрыв;
- выпадение значительного количества радионуклидов на земную поверхность и загрязнение обширных территорий.

**Основными поражающими факторами ядерного оружия являются:**

- световое (тепловое) излучение,
- ударная волна,
- проникающая радиация,
- электромагнитный импульс,
- загрязнение местности радионуклидами.

В результате ядерного взрыва формируется «огненный шар» — зона, в которой температура достигает нескольких тысяч градусов, откуда часть энергии взрыва выносится в виде *светового (теплового) излучения*.

Значительная часть энергии взрыва переносится в атмосфере воздушной *ударной волной*. Ударная волна представляет собой область сильно сжатого воздуха, распространяющуюся со сверхзвуковой скоростью во все стороны от места взрыва. Ударная волна вызывает наибольшие разрушения объектов, находящихся в районе взрыва.

Процессы ядерного деления и термоядерного синтеза, наряду с другими видами ионизирующего излучения, обычно сопровождаются образованием избыточных свободных нейтронов. Нейтронное излучение обладает значительной проникающей способностью и при осуществлении ядерного взрыва является дополнительным источником облучения объектов. Оно может распространяться на расстояние до 2–3 км от места взрыва.

Часть нейтронов взаимодействует с конструкционными материалами объектов, находящихся в эпицентре

Под действием *ударной волны* и интенсивного *светового излучения* может происходить возгорание горючих материалов и повреждение нефтепроводов и газопроводов, находящихся в районах нанесения ядерных ударов. Пожары могут охватить огромные площади лесов, торфяников и населенных пунктов и привести к огненному урагану. Дым от подобных пожаров способен поглощать значительную часть солнечного излучения, и в случае крупномасштабной ядерной войны это может привести к охлаждению земной поверхности и наступлению «ядерной зимы».

Световое (тепловое) излучение

Ударная волна

Проникающая радиация

взрыва. Это приводит к образованию радионуклидов, испускающих *дополнительное гамма-излучение*, которое сопровождается взрывом. Потоки нейтронов и *гамма-квантов*, возникающие в момент взрыва атомных и термоядерных бомб, называют *проникающей радиацией*.

Электромагнитный импульс

Под действием проникающей радиации происходит ионизация атомов и молекул окружающей среды. Возникают потоки ионов и электронов, порождая электромагнитные поля. Эти поля называют *электромагнитным импульсом*. *Возникающие поля способны выводить из строя системы электроснабжения и электронное оборудование.*

Загрязнение территорий радионуклидами

В результате ядерного взрыва из образовавшихся продуктов формируется *радиоактивное облако*, которое может перемещаться на большие расстояния. Направление и скорость его перемещения зависят от метеорологических условий (направление и скорость ветра, атмосферные осадки и т. д.). По пути движения радиоактивного облака на земной поверхности остается «след», образованный выпавшими на земную поверхность радиоактивными продуктами.

В зависимости от уровня загрязнения радионуклидами пострадавшую территорию делят на 4 зоны. Размеры и форма образовавшихся зон зависят от мощности взрыва и местных метеорологических условий.

### Формирование зон загрязнения радионуклидами в результате наземных и воздушных ядерных взрывов





Источниками загрязнения местности радионуклидами являются:

- *осколки деления ядер урана или плутония*, которые представляют собой смесь от 200 до 300 различных радионуклидов 36 химических элементов с периодом полураспада от долей секунды до миллионов лет;
- *наведенная радиоактивность*, возникающая в материалах под действием нейтронного излучения;
- *оставшаяся часть ядерного горючего* —  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , которая не подверглась ядерному делению при взрыве.

В состав продуктов, выпавших на земную поверхность сразу после взрыва, входят *короткоживущие радионуклиды* с периодами полураспада от нескольких суток до нескольких месяцев ( $^{131}\text{J}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  и др.) и *долгоживущие радионуклиды* с периодами полураспада от нескольких лет до нескольких тысяч лет ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $\text{T}$ , *трансурановые элементы* и др.).

**Непосредственно после взрыва основной вклад в дозу облучения человека вносят короткоживущие радионуклиды. После их распада наиболее опасными становятся долгоживущие радионуклиды.**

В результате проведенных испытаний ядерного оружия в окружающую среду поступили:

- $\text{T}$  —  $10^{20}$  Бк ( $\beta$ -излучатель,  $T_{1/2} = 12,3$  года)  
 $^{14}\text{C}$  —  $10^{17}$  Бк ( $\beta$ -излучатель,  $T_{1/2} = 5\,730$  лет)  
 $^{90}\text{Sr}$  —  $10^{17}$  Бк ( $\beta$ -излучатель,  $T_{1/2} = 28,6$  года)  
 $^{137}\text{Cs}$  —  $10^{17}$  Бк ( $\beta$ - и  $\gamma$ -излучатель,  $T_{1/2} = 30$  лет)

Кроме того, при ядерных испытаниях в окружающую среду были выброшены и трансурановые элементы:

- $^{238}\text{Pu}$  —  $10^{14}$  Бк ( $\alpha$ -излучатель,  $T_{1/2} = 87,7$  года)  
 $^{239}\text{Pu}$  —  $10^{15}$  Бк ( $\alpha$ -излучатель,  $T_{1/2} = 24\,100$  лет)  
 $^{240}\text{Pu}$  —  $10^{15}$  Бк ( $\alpha$ -излучатель,  $T_{1/2} = 6\,540$  лет)  
 $^{241}\text{Pu}$  —  $10^{17}$  Бк ( $\beta$ -излучатель,  $T_{1/2} = 14,4$  года)  
 $^{241}\text{Am}$  —  $10^{15}$  Бк ( $\alpha$ -излучатель,  $T_{1/2} = 432$  года)

При определении зон загрязнения вокруг центра взрыва проводят окружность.

Радиус окружности зависит от мощности взрыва:

- 20 кт — 0,77 км,  
 50 кт — 0,90 км,  
 100 кт — 1,00 км,  
 2000 кт — 1,12 км.

К окружности параллельно среднему направлению ветра в период распространения радиоактивного облака проводят две касательные.

Зоны загрязнения расположены в секторе, границы которого шире сектора, образованного касательными. Границы зоны располагаются под углом  $20^\circ$  к внешней стороне касательных.

*Для сравнения:*  
 в биосфере под действием нейтронов космического излучения ежегодно образуется:

- $\text{T}$  —  $10^{16}$  Бк  
 $^{14}\text{C}$  —  $10^{15}$  Бк

**Тотальное уничтожение животного и растительного мира** на территории, подвергшейся воздействию поражающих факторов ядерного оружия.



**Резкое изменение состава и свойств атмосферы** в результате выброса продуктов ядерного взрыва:

- оксидов азота и углерода
- огромного количества мелких частиц, обладающих высокими светопоглощающими свойствами.

**Возможные последствия широкомасштабного применения ядерного оружия**



**Разрушение озонового слоя**, обеспечивающего естественную защиту животных и растительных организмов от вредного воздействия ультрафиолетового излучения Солнца.



**Серьезные изменения климата:**

- существенное понижение среднегодовой температуры
- резкие суточные и сезонные колебания температуры и другие изменения)

В сентябре 1996 года был открыт для подписания Договор о всеобщем запрещении ядерных испытаний. В настоящее время его подписали более 155 государств и более 20 государств ратифицировали. В соответствии с договором, каждое государство-участник обязуется *не производить никаких взрывов ядерного оружия, а также запрещать и предотвращать любой ядерный взрыв.*

Итак, →

Принцип действия ядерного оружия основан на реакции деления тяжелых атомных ядер либо на реакции термоядерного синтеза новых атомных ядер из более легких ядер атомов химических элементов, расположенных в самом начале Периодической системы.

В настоящее время ядерным оружием владеют многие страны мира. Запас оружия достигает 50 тыс. Мт тротилового эквивалента. Это в 10 тыс. раз больше, чем было взорвано боеприпасов за весь период Второй Мировой войны.

Если бы бомба, аналогичная сброшенной на Хиросиму, была применена против одного из таких крупных городов, как Москва или Нью-Йорк, то количество жертв могло составить от 500 тыс. до 1 млн. человек.



До сих пор в окружающей среде присутствуют радионуклиды, оставшиеся от испытаний ядерного оружия. В настоящее время среди них наиболее значимы с точки зрения облучения человека  $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ . Индивидуальная эффективная доза облучения жителей Земли от этих радионуклидов составляет, в среднем, 0,005 мЗв в год, что соответствует примерно 0,2 % дозы, получаемой от всех естественных источников ионизирующего излучения (2,4 мЗв/год).

Использование ядерной энергии атомов в военных целях угрожает существованию людей и других обитателей Земли. Понимание того, к каким последствиям может привести использование ядерного оружия, делает необходимым изменение политики ядерных держав. Следует прекратить производство, испытание и дальнейшее распространение ядерного оружия.

#### Вопросы для самопроверки и обсуждения:

1. Что такое ядерное оружие? Назовите основные виды ядерного оружия.
2. Каков принцип действия основных видов ядерного оружия?
3. Что такое испытательный ядерный полигон? Укажите на карте, где находятся известные Вам испытательные ядерные полигоны.
4. К каким последствиям для окружающей среды может привести использование ядерного оружия?



## ЧАСТЬ II

# КАТАСТРОФА НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: ПРИЧИНЫ, ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ПОСЛЕДСТВИЯ

Катастрофа на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) была самой крупной ядерной аварией за весь период развития ядерной энергетики. Она затронула практически все уголки планеты, отразилась на жизни многих людей. Наибольший урон был нанесен Республике Беларусь.

После произошедшей катастрофы жизнь многих людей в Беларуси, России и Украине изменилась. Население этих стран до сих пор ощущает последствия Чернобыльской катастрофы. Случившееся показало, каким опасным может стать «мирный атом» при неумелом обращении с ним. Тем не менее, это событие не заставило человечество отказаться от использования ядерной энергии, и в ряде стран доля электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, по-прежнему остается высокой. Однако Чернобыльская катастрофа изменила отношение к ядерной энергетике в мировом масштабе. Были пересмотрены международные нормы и правила радиационной защиты, национальные стратегии развития ядерной энергетики, обеспечения ядерной безопасности и обращения с радиоактивными отходами.

Чтобы не допустить в будущем подобных событий, человечество должно извлечь уроки из случившегося в Чернобыле.

## Глава 8

### Загрязнение биосферы радионуклидами чернобыльского выброса

**Ключевые слова и словосочетания:** Чернобыльская катастрофа, причины катастрофы, аварийный выброс радионуклидов, радиоактивное облако, загрязнение радионуклидами воздушной среды, почвы, водоемов, растительности, животного мира, продуктов питания

*Нарушение правил техники безопасности и условий эксплуатации ядерного реактора привели к катастрофическому увеличению мощности реактора IV блока Чернобыльской АЭС. В результате, 26 апреля 1986 года последовало два тепловых взрыва, вызвавших пожар и выброс радиоактивных веществ из активной зоны реактора в окружающую среду.*

*Образовавшееся радиоактивное облако перемещалось воздушными потоками, что способствовало распространению радиоактивных веществ по территории стран Европы и других частей света. Больше всего оказались загрязненными территории Беларуси, Украины и России. По масштабам произошедшая катастрофа превзошла все известные ядерные аварии.*

*Изучив главу...* Вы узнаете, как развивались события на Чернобыльской АЭС и что явилось причиной произошедшей катастрофы. Познакомитесь с масштабами загрязнения территории Беларуси и других стран. Вы поймете, как менялась со временем радиационная обстановка в пострадавших районах. Вы узнаете, в какой степени были загрязнены воздушная и водная среды, почва,



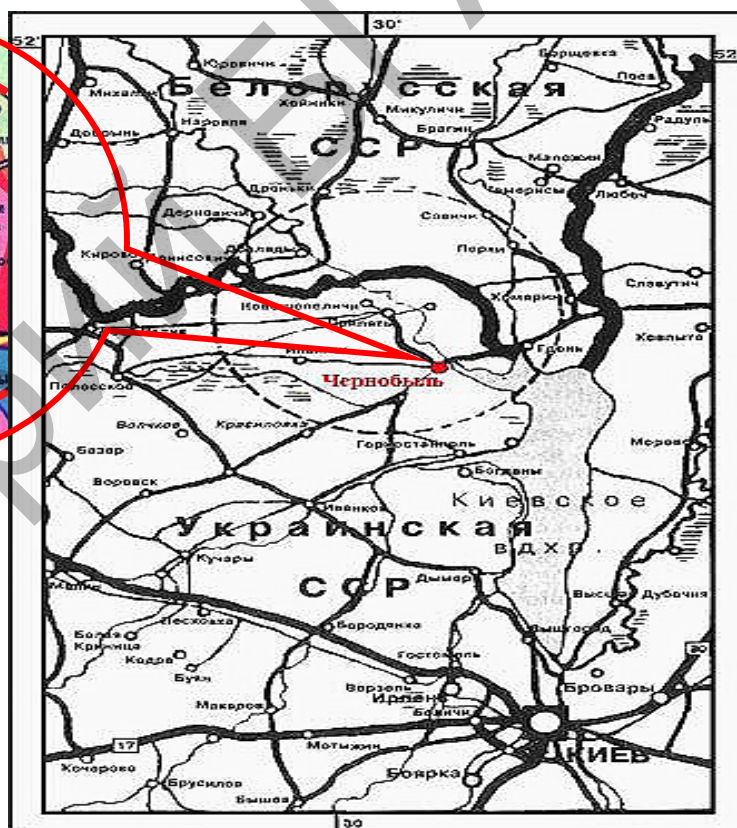
растительность, каковы последствия катастрофы для животного мира. Вы поймете, какие радионуклиды определяли дозу облучения населения в различные периоды времени после катастрофы, узнаете, какие уровни загрязнения пищевых продуктов допустимы в настоящее время в нашей стране.

### 8.1. Почему произошла Чернобыльская катастрофа?

Атомная электростанция является сложным техническим объектом и, чтобы обеспечить безопасную работу станции, требуется не только высокая квалификация обслуживающего персонала, но и строгое соблюдение условий ее эксплуатации и правил техники безопасности.

#### Местоположение Чернобыльской АЭС

Чернобыльская АЭС расположена в восточной части Белорусско-Украинского Полесья в 110 км на север от Киева и в 12 км на северо-запад от Чернобыля, на расстоянии 12 км от границы с Беларусью и 140 км от границы с Россией.



Непосредственно перед катастрофой на ЧАЭС работало четыре ядерных реактора типа РБМК, каждый электрической мощностью 1 000 МВт. К началу 1986 года в бывшем Советском Союзе действовало 14 реакторов подобного типа. В реакторах РБМК-1 000 в качестве топлива используют природный уран в виде диоксида урана  $UO_2$ , слабо (на 2 %) обогащенный  $^{235}U$ . В качестве замедлителя нейтронов в подобных реакторах применяют графит, а в качестве теплоносителя — воду.

Четвертый блок станции, на котором произошла катастрофа, был запущен в декабре 1983 года. После двух лет работы его готовили к остановке для планового ремонта. Воспользовавшись остановкой реактора, дирекция станции приняла решение провести испытания одного из турбогенераторов. Ранее эксперименты, не затрагивающие активную зону реактора, уже дважды проводили на Чернобыльской АЭС. Целью подобного рода

испытаний являлось обеспечение безопасной работы энергетического блока АЭС.

В ходе эксперимента персонал станции допустил ряд нарушений правил эксплуатации ядерного реактора, нарушив работу системы охлаждения реактора и заблокировав систему его аварийной защиты.

В результате, 26 апреля 1986 года в 01 ч 23 мин 40 с по московскому времени началось катастрофически быстрое увеличение мощности реактора.

Последовало два тепловых взрыва, которые привели к пожару и выбросу радиоактивных продуктов из активной зоны реактора в окружающую среду.

В период с 1986 по 1990 год была проведена большая работа по уточнению причин произошедшей катастрофы. Сейчас с точностью до минуты известно о действиях всего персонала, дежурившего на станции в ночь с 25 на 26 апреля, и о тех ошибках, которые привели к трагедии. Расходясь в деталях, специалисты единодушны в одном: причины катастрофы — в техническом несовершенстве конструкций реактора и ошибочных действиях персонала вплоть до нарушения им правил эксплуатации реактора.

Среди основных *недостатков конструкции* реактора выделяют два:

- в системе безопасности не были предусмотрены средства, позволяющие предотвратить аварию при умышленных отключениях автоматического управления работой реактора и нарушениях правил его эксплуатации;
- нестабильная работа реактора при низкой мощности — способность на неожиданные «всплески» мощности при этих условиях (а именно в таком режиме проводились испытания).

По масштабам выброса радиоактивных продуктов и последствиям Чернобыльская катастрофа намного превзошла предыдущие крупные ядерные аварии: в Уиндскейле (Великобритания, 1957 год), на промышленном комплексе «Маяк» (СССР, 1957 год) и в Три Майл Айленде (США, 1979 год).

**Вид IV блока ЧАЭС непосредственно после катастрофы**



Вначале катастрофа на Чернобыльской АЭС воспринималась как роковая случайность. В наши дни преобладает мнение о неизбежности и даже закономерности случившегося.

## 8.2. Как чернобыльские радионуклиды попали в окружающую среду?

Выброс радиоактивных продуктов из разрушенного реактора Чернобыльской АЭС продолжался примерно 20 суток, причем наиболее интенсивно — в течение первых 10 суток. Перемещение образовавшегося радиоактивного облака определялось направлением ветра, поэтому погодные условия оказали существенное влияние на распространение радиоактивных веществ в окружающей среде. Поскольку выброс был длительным, а метеорологические условия неоднократно менялись, радиоактивные вещества распространялись в различных направлениях.

**26–27 апреля** радиоактивные продукты выпали на территории Украины, Беларуси и России.

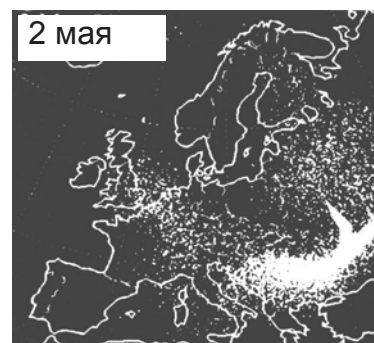
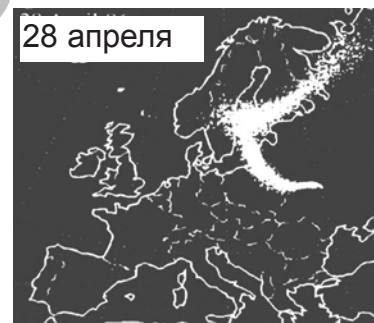
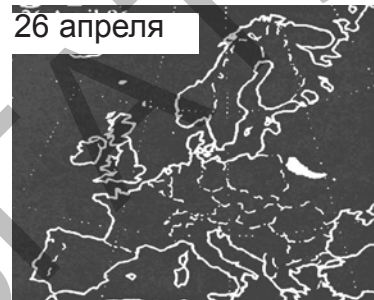
К вечеру **27 апреля** радиоактивное облако достигло Скандинавии. В последующие два дня оно оказалось уже в странах Центральной Европы, а после очередной смены направления ветра — на Балканах. Его влияние проявилось даже в таких далеких от нас странах, как Великобритания, Турция, Израиль.

**29 апреля** ветер повернул на юг, и радиоактивное облако стало перемещаться в направлении Киева.

После **2 мая** ветер сменился вначале на юго-западный, затем на северо-западный и северный. Это вновь привело к загрязнению территории Беларуси чернобыльскими радионуклидами. В начале мая повышенный уровень радиации был зарегистрирован даже в Японии.

Вследствие смены направления воздушных потоков образовалось три радиоактивных «следа»: *северный, западный и южный*. Наиболее загрязненными после чернобыльского выброса оказались территории Беларуси, Украины и России. Территории других стран подверглись загрязнению в значительно меньшей степени.

На формирование выброса радиоактивных веществ и их распространение в окружающей среде существенное влияние оказали физические свойства веществ, находившихся в реакторе.



Распространение радиоактивного облака в период выброса

- **Температура плавления (испарения) радиоактивных веществ.**

Чем ниже температура плавления (испарения) вещества, тем легче оно переходит в газообразное состояние. Поэтому вещества с относительно низкой температурой плавления и испарения (соединения йода, цезия, теллура) легче покидали реактор и распространялись на большее расстояние по сравнению с тугоплавкими и трудноиспаряющимися веществами (соединения урана, плутония, церия, циркония).

- **Размеры и масса радиоактивных частиц**

Распространение *твердых радиоактивных частиц*, образовавшихся в результате взрыва и горения графита, определялось размерами и массой частиц. Чем крупнее и тяжелее были выброшенные из реактора радиоактивные частицы, тем ближе к месту катастрофы они выпадали.

При разгерметизации реактора в атмосферу, в первую очередь, устремились летучие продукты деления ядерного топлива. В их состав входили радиоактивные инертные газы (криптон —  $^{85}\text{Kr}$  и ксенон —  $^{133}\text{Xe}$ ), тритий ( $\text{T}$ ), радионуклиды углерода ( $^{14}\text{C}$ ), йода ( $^{131}\text{I}$ ), цезия ( $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ), теллура ( $^{132}\text{Te}$ ) и других элементов. Одновременно из активной зоны реактора было выброшено измельченное топливо вместе с обломками конструкционных материалов.

В результате горения графита, продолжавшегося на протяжении нескольких суток, температура в активной зоне реактора достигла  $\sim 2\,270\text{ K}$ , а в отдельных местах —  $3\,300\text{ K}$ , превысив температуру плавления топлива. Это привело к частичному плавлению таких тугоплавких веществ, как соединения церия, циркония, плутония, урана, а также к заметному испарению легкоплавких и летучих соединений.

Содержание в выбросе летучих веществ, подобных соединениям йода, составило десятки процентов, а труднолетучих, подобных соединениям плутония, — единицы процентов.

Температура плавления  $\text{UO}_2 = 3\,113\text{ K}$

Большинство крупных и тяжелых частиц топлива не могло подняться на большую высоту и выпало преимущественно в 30-км зоне Чернобыльской АЭС. Самые легкие компоненты выброса (газы, аэрозоли и мелкие частицы) поднялись на большую высоту и достигли стратосферы. Медленно оседая, радиоактивные частицы успели несколько раз обогнуть земной шар и распространиться по всему Северному полушарию. Соединения таких элементов, как йод и цезий, распространились на многие сотни и даже тысячи километров от места Чернобыльской катастрофы, что и обусловило ее глобальный характер.



### Основные радионуклиды, накопившиеся в активной зоне реактора к моменту катастрофы

Группа радиоактивных веществ	Радионуклид	Период полураспада	Доля активности радионуклида в выбросе*, %
Радиоактивные инертные газы	$^{133}\text{Xe}$	5,3 суток	100
Относительно легкоплавкие (летучие) соединения	$^{131}\text{I}$	8,0 суток	38–56
	$^{134}\text{Cs}$	2,06 года	24–30
	$^{137}\text{Cs}$	30,17 года	26–30
	$^{132}\text{Te}$	3,26 суток	37–44
Соединения промежуточной летучести	$^{89}\text{Sr}$	50,6 суток	3,5–5,2
	$^{90}\text{Sr}$	28,5 года	4–6
	$^{103}\text{Ru}$	39,4 года	3,5
	$^{106}\text{Ru}$	367,0 суток	1 - > 3,5
	$^{140}\text{Ba}$	12,8 суток	3,5–5
Тугоплавкие (низколетучие) соединения	$^{95}\text{Zr}$	64,0 суток	3,0–3,6
	$^{99}\text{Mo}$	2,75 суток	4,4
	$^{141}\text{Ce}$	35,2 суток	3,5–3,6
	$^{144}\text{Ce}$	285 суток	3,6–4,2
	$^{239}\text{Np}$	2,35 суток	2–3,5
	$^{238}\text{Pu}$	87,7 года	3,5
	$^{239}\text{Pu}$	24 100 лет	3,5
	$^{240}\text{Pu}$	6 540 лет	3,5–3,7
	$^{241}\text{Pu}$	14,4 года	3,5
$^{242}\text{Cm}$	162,8 суток	3,5	

\*В процентах от содержания радионуклида в реакторе непосредственно перед катастрофой

В результате катастрофы в окружающую среду были выброшены радионуклиды с периодами полураспада от нескольких суток до нескольких десятков тысяч лет.

Непосредственно после катастрофы наибольшую радиационную опасность представляло излучение радионуклидов, выброшенных из реактора в составе легколетучих продуктов деления ядерного топлива ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и др.). На начальной стадии аварии особенно опасно было мощное гамма-излучение только что образовавшегося радиоактивного облака.

Йод является биологически важным элементом. Он необходим щитовидной железе для синтеза гормонов.

**Вид IV блока ЧАЭС  
после  
строительства  
саркофага**



В первые дни после катастрофы существенный вклад в облучение населения вносил радиоактивный йод (в основном,  $^{131}\text{I}$ ). Радиоактивным йодом были загрязнены обширные территории, включая страны Прибалтики, Венгрию, Грузию.

Во время катастрофы существовала опасность, что оставшееся в реакторе расплавленное ядерное топливо может сконцентрироваться до критической массы и начнется неуправляемая цепная реакция ядерного деления.

Пожар и выброс радионуклидов, а также начало цепной реакции ядерного деления пытались предотвратить, постоянно сбрасывая с вертолетов материалы, поглощающие нейтроны (в частности, оксид бора), а также вещества, поглощающие тепло (доломит, песок, глина).

Прекратить горение графита удалось только к 9 мая. Была засыпана шахта реактора, что снизило выброс радиоактивных веществ в окружающую среду почти в 100 раз. Позднее под реактором был проделан туннель для охлаждения реактора с помощью жидкого азота. Следующим шагом, позволившим уменьшить выброс радиоактивных веществ в окружающую среду, явилось строительство над разрушенным реактором укрытия — саркофага, которое было завершено к ноябрю 1986 года. Однако сложные условия строительства не позволили добиться герметичности конструкции саркофага. Через щели и вентиляционные отверстия радионуклиды в небольших количествах продолжали поступать в окружающую среду.

По оценкам специалистов, примерно 3,5–5,0 % общего количества радионуклидов, находившихся в реакторе непосредственно перед катастрофой, было выброшено в окружающую среду.

### **8.3. Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь**

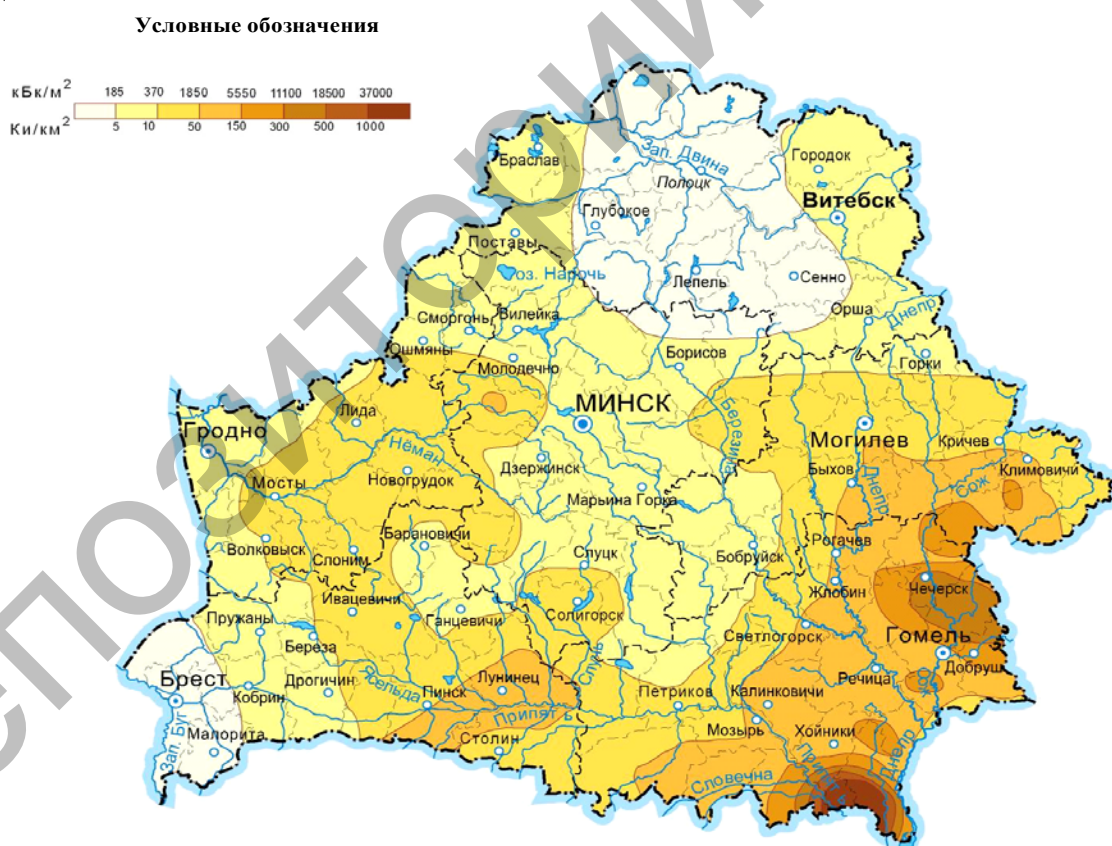
В июле-августе 1986 года на основе данных, полученных специалистами Госкомгидромета, Министерства обороны, Министерства здравоохранения и Академий наук Беларуси, Украины и России, были выпущены первые карты загрязнения черновыльскими радионуклидами территории трех республик бывшего СССР. Вначале эти карты были секретными и предназначались только для правительственных служащих. В мае 1989 года карты были опубликованы в открытой печати и стали доступны широкой общественности.

В первые часы катастрофы основной вклад в эффективную дозу облучения населения вносили гамма- и бета-излучающие радионуклиды, выброшенные из реактора в составе легколетучих продуктов деления ядерного топлива ( $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $\text{T}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и др.). В этот период население в зоне катастрофы получило значительные дозы внешнего и внутреннего облучения.

Очень скоро наибольшую радиационную опасность стал представлять радиоактивный йод (в основном  $^{131}\text{I}$ , а также  $^{132}\text{I}$ , образующийся при распаде  $^{132}\text{Te}$ ). В первые дни катастрофы вклад  $^{131}\text{I}$  в суммарную активность выброшенных радионуклидов достигал 25 %.

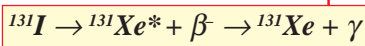
Практически вся территория Беларуси в различной степени подверглась загрязнению радиоактивным йодом.

### Загрязнение территории Беларуси $^{131}\text{I}$ (1986 год)



В апреле-мае 1986 года наибольшие уровни выпадения  $^{131}\text{I}$  отмечались в ближней зоне ЧАЭС: в Брагинском, Хойникском и Наровлянском районах Гомельской области. На территории этих районов загрязнение почвы

$^{131}\text{I}$



$^{131}\text{Xe}^*$  — ядра атомов ксенона в возбужденном (*метастабильном*) состоянии, из которого они могут самопроизвольно перейти в основное, более устойчивое состояние посредством излучения *гамма-квантов*.

$$T_{1/2} (^{131}\text{I}) = 8,0 \text{ суток}$$

$$T_{1/2} (^{131}\text{Xe}^*) = 11,9 \text{ суток}$$

$^{131}\text{I}$  достигало 37 000 кБк/м<sup>2</sup> (1 000 Ки/км<sup>2</sup>) и более. Значительному загрязнению подверглись юго-западные и северные районы Гомельской области, а также отдельные районы Могилевской и Брестской областей.

При попадании в атмосферный воздух радиоактивный йод становится источником внешнего и внутреннего облучения организма человека.

Как уже отмечалось, йод является важнейшим элементом, необходимым при выработке гормонов щитовидной железой. Почвы многих регионов Беларуси (особенно Полесья) характеризуются пониженным содержанием этого элемента, поэтому у жителей республики нередко наблюдается недостаток йода в организме. При появлении в окружающей среде радиоактивного йода происходит его интенсивное накопление в организме.

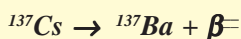
Радиоактивный йод находился в воздухе в аэрозольном состоянии. Оседая на землю, он загрязнял почву, растительность, водоемы. Он поступал в организм человека вместе с вдыхаемым воздухом по цепи «атмосферный воздух–человек», а также с загрязненными продуктами питания, в основном по цепи «растительный корм–молочный скот–молоко–человек», и накапливался в щитовидной железе.

Дозы облучения, полученные щитовидной железой, зависели от уровня загрязнения местности радиоактивным йодом. Накопление радиоактивного йода в организме людей и облучение щитовидной железы в первые месяцы после катастрофы привели впоследствии к увеличению частоты заболеваемости этого органа.

Период полураспада  $^{131}\text{I}$  равен 8,0 суткам, поэтому примерно через 2 месяца после катастрофы выброшенный из реактора радионуклид практически полностью распался.

### $^{137}\text{Cs}$

Данный радионуклид распадается двумя путями. С вероятностью около 5 % происходит *бета-распад* с энергией испускаемого электрона около 1,17 МэВ и образованием стабильного ядра бария:



В остальных 95 % случаев после испускания электрона с энергией

Со временем распались и другие короткоживущие радионуклиды. Основную опасность стали представлять долгоживущие радионуклиды, в первую очередь,  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30$  лет). Соединения цезия, как правило, легкоплавки и легколетучи, поэтому загрязнение радиоактивным цезием затронуло многие страны Европы.

Распад  $^{137}\text{Cs}$  сопровождается испусканием *бета-* и *гамма-излучения*.  $^{137}\text{Cs}$  является основным источником внешнего облучения населения, а при попадании в организм служит источником внутреннего облучения органов и тканей. В первые годы после

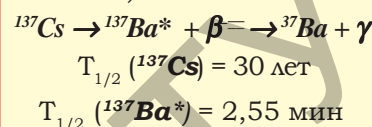
катастрофы существенную роль в формировании дозы облучения населения одновременно с  $^{137}\text{Cs}$  играл и короткоживущий гамма-излучающий радионуклид  $^{134}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 2,06$  года).

Цезий является щелочным элементом и по своим химическим свойствам подобен калию, участвующему во многих жизненно важных процессах. При попадании в организм радиоактивный цезий способен замещать калий и вместе с ним включаться в процессы обмена веществ. Это приводит к распределению радиоактивного цезия по всему организму и внутреннему облучению органов и тканей человека.

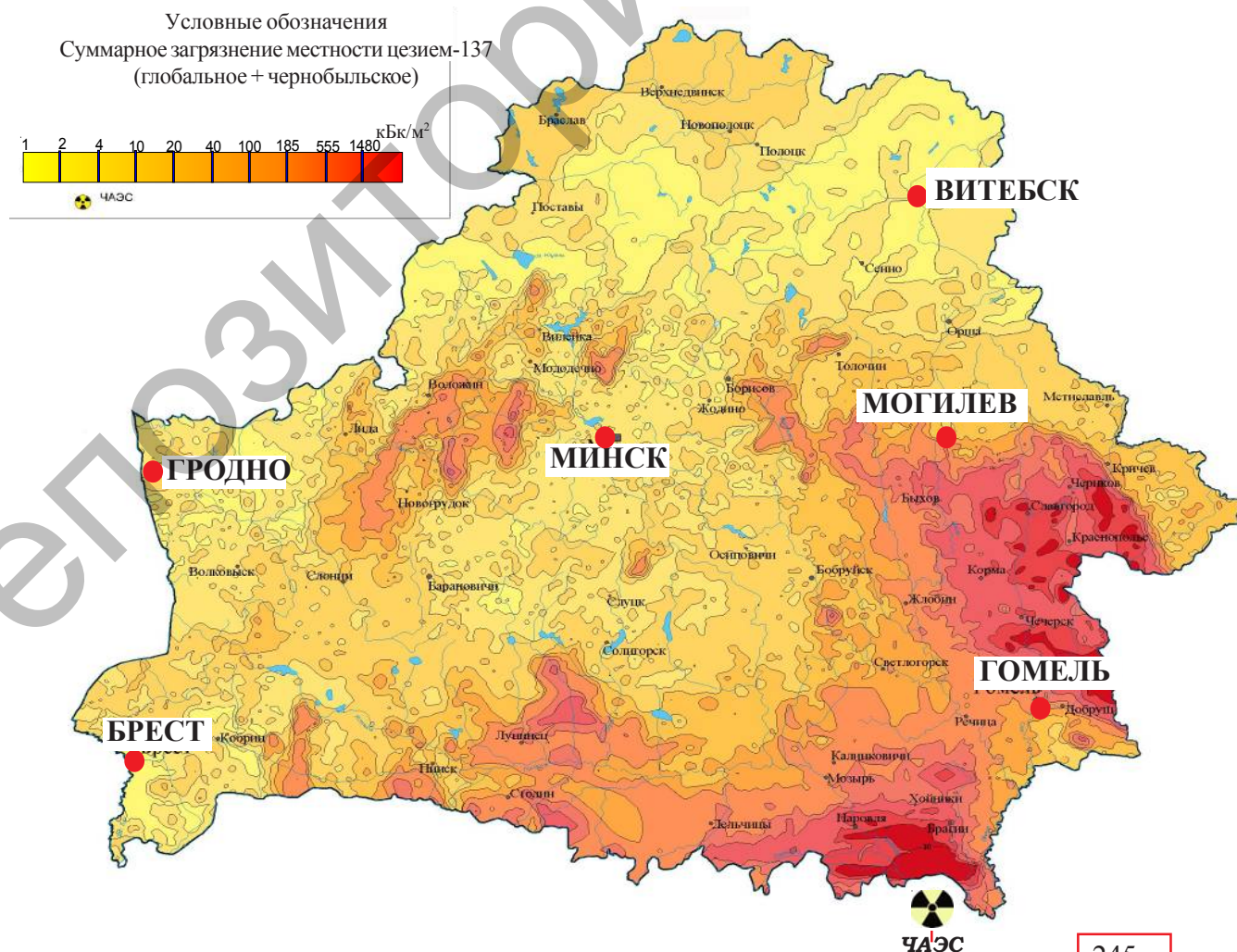
Первоначально вклад радионуклидов цезия в дозу облучения населения был невелик. Лишь около 10 % дозы внешнего облучения было обусловлено ими. После распада короткоживущих радионуклидов, в том числе  $^{134}\text{Cs}$ , основной вклад в дозу внешнего и внутреннего облучения населения стал вносить долгоживущий  $^{137}\text{Cs}$ .

Около 35 %  $^{137}\text{Cs}$ , выпавшего в Европе в результате Чернобыльской катастрофы, осело на территории Беларуси.

около 0,51 МэВ образуется ядро бария в возбужденном (метастабильном) состоянии. Его переход в основное состояние происходит путем испускания гамма-кванта с энергией около 0,66 МэВ:



### Загрязнение территории Беларуси $^{137}\text{Cs}$ (1986 год)



В пределах республики выделяется четыре пятна, где загрязнение представлено преимущественно  $^{137}\text{Cs}$ :

- *центральное* (западнее и северо-западнее Минска),
- *юго-западное* (южная часть Припятского Полесья),
- *восточное* (север Гомельской области и юг Могилевской области),
- *юго-восточное* (южные и юго-восточные районы Гомельской области).

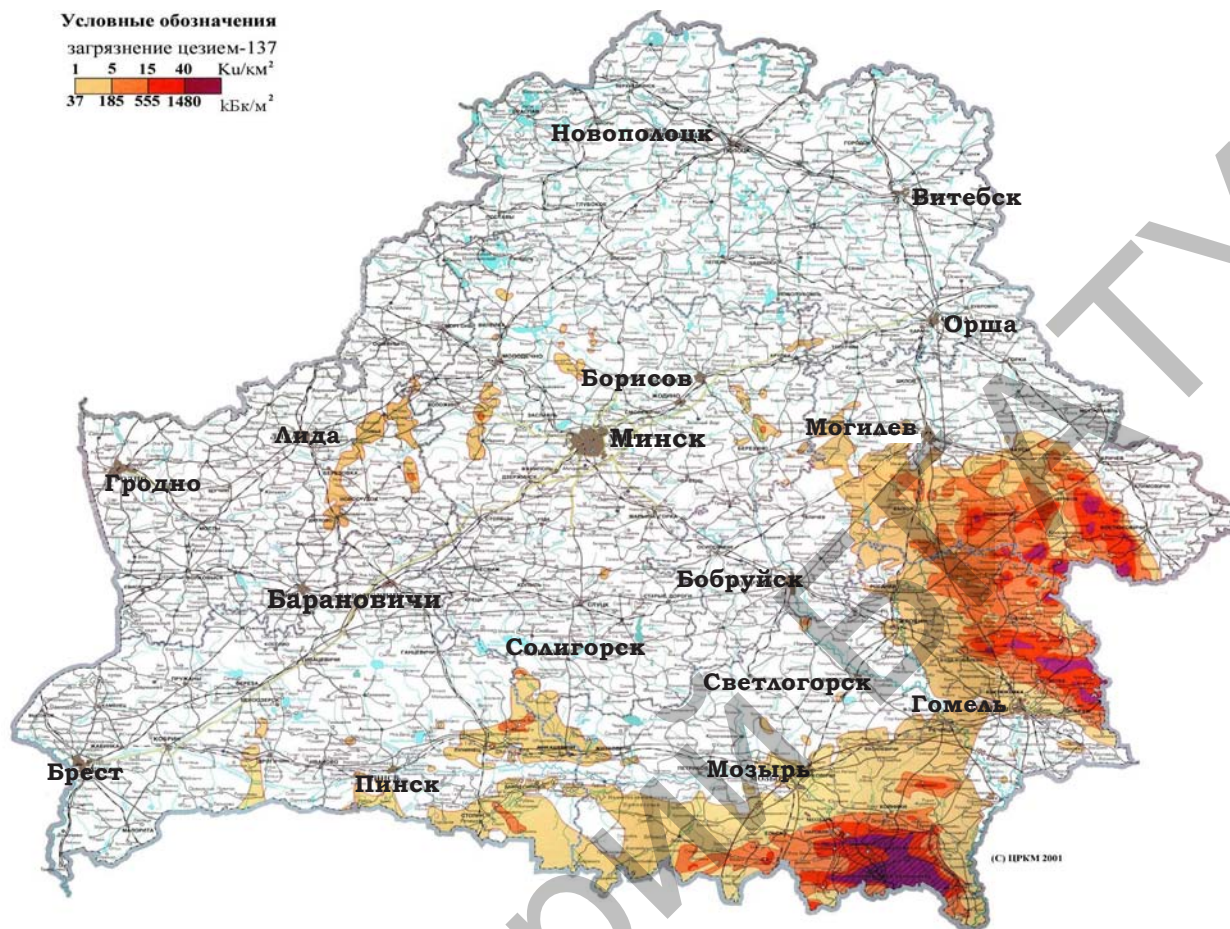
Загрязнению  $^{137}\text{Cs}$  подверглись Гомельская и Могилевская области, 10 районов Минской области, 6 районов Брестской, 6 районов Гродненской и 1 район Витебской области.

До катастрофы территория Беларуси уже была загрязнена  $^{137}\text{Cs}$  глобальных выпадений в результате испытаний ядерного оружия в атмосфере. Плотность загрязнения составляла 1,5–3,7 кБк/м<sup>2</sup> (0,04–0,1 Ки/км<sup>2</sup>).

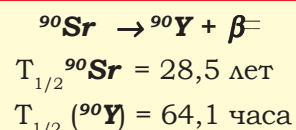
Согласно действующему законодательству, если плотность загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$  превосходит 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>), территорию относят к зоне загрязнения. На 23 % площади республики плотность загрязнения почв радиоактивным цезием оказалась выше этого уровня. В некоторых местах максимальный уровень загрязнения достигал 60 000 кБк/м<sup>2</sup> (1 600 Ки/км<sup>2</sup>). В качестве сравнения отметим, что площади с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  более 37 кБк/м<sup>2</sup> в Украине составляют 7 % территории, а в России — 1,5 % европейской части территории.

В 1986 году в зоне загрязнения оказалось более 3 600 населенных пунктов (в том числе 27 городов), в которых проживало 2,2 млн. человек, то есть свыше  $\frac{1}{5}$  всего населения Беларуси. Последствия Чернобыльской катастрофы для Беларуси оказались чрезвычайно сложными и тяжелыми.

С течением времени в результате распада радионуклида уровень загрязнения территории республики  $^{137}\text{Cs}$  снизился. В январе 2004 года площадь с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , превышающей 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>), занимала 19,75 % территории Беларуси, при этом максимальная плотность загрязнения составляла 37 000 кБк/м<sup>2</sup> (1 000 Ки/км<sup>2</sup>).

Загрязнение территории Беларуси  $^{137}\text{Cs}$  (2001 год)

В настоящее время в зависимости от характера загрязнения местности, наряду с  $^{137}\text{Cs}$ , определенный вклад в дозу облучения населения могут вносить и другие долгоживущие радионуклиды. В основном, это  $^{90}\text{Sr}$ , а также выпавшие в составе так называемых «горячих» топливных частиц изотопы трансурановых элементов и продукты их распада.

 $^{90}\text{Sr}$ 

$^{90}\text{Sr}$  является бета-излучателем, его вклад в формирование дозы внешнего облучения сравнительно небольшой. Основную опасность он представляет при попадании внутрь организма.

Установлено, что радиоактивный стронций относительно легко поступает из почвы в природные воды, растения и попадает в организмы животных и человека преимущественно с пищей.

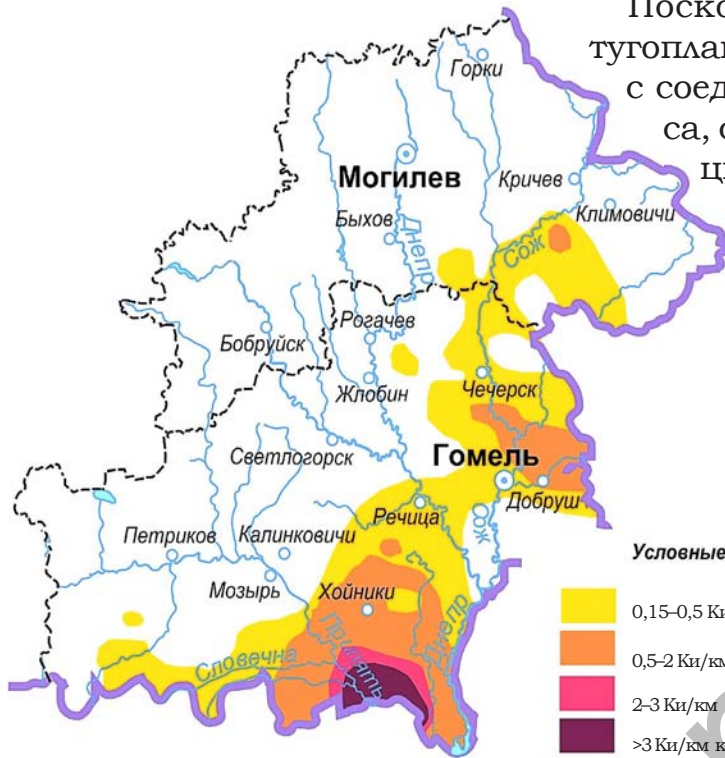
«Горячие» частицы — это частицы высокой удельной активности. К ним относятся

- выброшенные из реактора частицы измельченного топлива (топливные частицы),
  - частицы, образовавшиеся в результате испарения и последующей конденсации паров летучих радиоактивных веществ на частицах тугоплавких материалов — топлива, конструкционных и других материалов (конденсационные частицы).
- Крупные и тяжелые топливные частицы выпали вблизи ЧАЭС, а легкие конденсационные частицы распространились на большие расстояния от места катастрофы.

В природных условиях «горячие» частицы постепенно разрушались, и в настоящее время их можно обнаружить лишь в непосредственной близости от места катастрофы.

Стронций является щелочноземельным элементом и по своим химическим свойствам подобен кальцию. Радиоактивный стронций может замещать кальций в костной ткани и других тканях организма человека.

### Загрязнение территории Беларуси $^{90}\text{Sr}$ (2001 год)



Условные обозначения

Yellow	0,15–0,5 Ки/км кв. (5,55–18,5 кБк/мкв.)
Orange	0,5–2 Ки/км кв. (18,5–74 кБк/мкв.)
Pink	2–3 Ки/км кв. (74–111 кБк/мкв.)
Dark Purple	>3 Ки/км кв. (>111 кБк/мкв.)

Поскольку соединения стронция более тугоплавки и менее летучи по сравнению с соединениями цезия, продукты выброса, содержащие радиоактивный стронций, не могли распространяться на большие расстояния от места катастрофы. Поэтому загрязнение территории  $^{90}\text{Sr}$  носит более локальный характер по сравнению с загрязнением  $^{137}\text{Cs}$ .

Основная часть радиоактивного стронция сосредоточена в 30-км зоне ЧАЭС. Площади, загрязненные этим радионуклидом с уровнем выше  $5,5 \text{ кБк/м}^2$  ( $0,15 \text{ Ки/км}^2$ ), занимают примерно 10 % территории республики. Они расположены

в Гомельской и Могилевской областях.

В 1986 году в пределах 30-км зоны ЧАЭС (Хойникский район Гомельской области) плотность загрязнения местности  $^{90}\text{Sr}$  в некоторых местах достигала  $1800 \text{ кБк/м}^2$  ( $50 \text{ Ки/км}^2$ ). Для сравнения: перед катастрофой в начале апреля 1986 года плотность загрязнения почвы  $^{90}\text{Sr}$  глобальных выпадений в результате испытаний ядерного оружия составляла  $1,2 \text{ кБк/м}^2$  ( $0,03 \text{ Ки/км}^2$ ).

Наряду с цезием и стронцием серьезную опасность для человека могут представлять и трансурановые элементы (ТУЭ): радионуклиды плутония и америция —  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ . Все перечисленные радионуклиды, за исключением  $^{241}\text{Pu}$ , являются альфа-излучателями, и, в основном, влияют на формирование дозы внутреннего облучения человека. При этом наибольшую опасность представляет их поступление в организм вместе с вдыхаемым воздухом.

Попадание трансурановых элементов в организм с пищей, как правило, не столь существенно, поскольку эти элементы, в основном, входят в состав малорастворимых соединений и отличаются низкой подвижностью

ТУЭ



и биологической доступностью. Обычно они в незначительных количествах переходят из почвы в растительность и далее по пищевым цепочкам поступают в организм животных и человека.

В результате катастрофы на ЧАЭС тугоплавкие соединения трансурановых элементов выпали преимущественно в радиусе 30 км от ЧАЭС. По сравнению со  $^{90}\text{Sr}$ , загрязнение территории изотопами этих элементов носит еще более локальный характер.

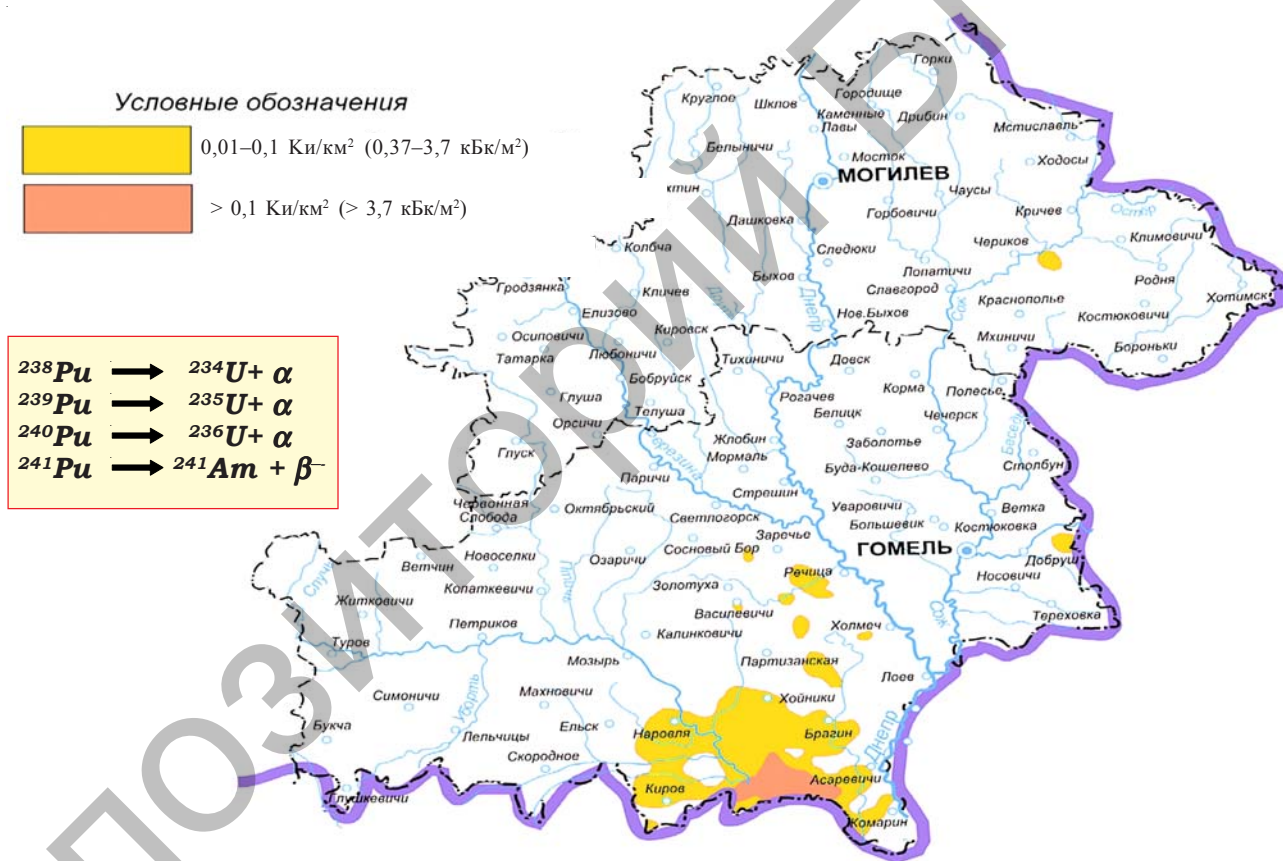
Площади с плотностью загрязнения изотопами плутония  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ , превышающей 0,37 кБк/м<sup>2</sup> (0,01 Ки/км<sup>2</sup>), занимают примерно 2 % территории Беларуси.

Трансурановые элементы (ТУЭ) — элементы, расположенные в периодической системе за ураном.

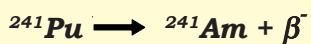
Основные ТУЭ чернобыльского выброса, присутствующие в настоящее время на территории Беларуси:

- $^{238}\text{Pu}, T_{1/2} = 87,7$  года
- $^{239}\text{Pu}, T_{1/2} = 24\,100$  лет
- $^{240}\text{Pu}, T_{1/2} = 6\,550$  лет
- $^{241}\text{Pu}, T_{1/2} = 14,4$  года

### Загрязнение территории Беларуси $^{238}\text{Pu}$ , $^{239}\text{Pu}$ и $^{240}\text{Pu}$ (2001 год)

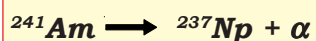


Соединения трансурановых элементов выпали на территории Брагинского, Наровлянского, Хойникского, Речицкого, Добрушского и Лоевского районов Гомельской области и Чериковского района Могилевской области. Самые высокие уровни загрязнения плутонием (более 111 кБк/м<sup>2</sup> или 3 Ки/км<sup>2</sup>) обнаружены в пределах 30-км зоны ЧАЭС в Хойникском районе Гомельской области. Для сравнения: до катастрофы в начале апреля 1986 года плотность загрязнения почвы  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$  в результате испытаний ядерного оружия составляла 55 Бк/м<sup>2</sup> (0,0015 Ки/км<sup>2</sup>), а  $^{238}\text{Pu}$  — 1,5 Бк/м<sup>2</sup> (0,00004 Ки/км<sup>2</sup>).



$$T_{1/2}(^{241}\text{Pu}) = 14,4 \text{ года}$$

$$T_{1/2}(^{241}\text{Am}) = 432 \text{ года}$$



После катастрофы около 46 % активности выпавших изотопов плутония приходилось на бета-излучающий  $^{241}\text{Pu}$ . Радиоактивный распад этого радионуклида приводит к образованию альфа-излучающего  $^{241}\text{Am}$ . Со временем количество  $^{241}\text{Pu}$  уменьшается, а  $^{241}\text{Am}$ , наоборот, увеличивается. В 2006 году активности этих радионуклидов сравнялись. По оценкам специалистов, содержание америция достигнет максимальной величины к 2058 году.

В соответствии со статьей 4 Закона «О правовом режиме территорий, подвергшихся загрязнению после катастрофы на Чернобыльской АЭС», территория Республики Беларусь разделена на 5 зон в зависимости от уровня загрязнения почв и величины среднегодовой эффективной дозы облучения населения от чернобыльских радионуклидов.

### 1. Зона эвакуации (отчуждения)

1. Территория, прилегающая к ЧАЭС (в основном, в радиусе 30 км), с которой в 1986 году в соответствии с существующими нормами радиационной безопасности было эвакуировано население;

Позже на территории Беларуси в этой зоне был создан Полесский государственный радиационно-экологический заповедник для наблюдения за состоянием природной среды в условиях загрязнения радионуклидами.

2. Территория, с которой было проведено дополнительное отселение людей в связи с высоким уровнем загрязнения почв радионуклидами стронция и плутония. Уровни загрязнения почв этими радионуклидами составляют:

- $^{90}\text{Sr}$  — более 111 кБк/м<sup>2</sup> (3 Ки/км<sup>2</sup>), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$  — более 3,7 кБк/м<sup>2</sup> (0,1 Ки/км<sup>2</sup>).

### 2. Зона первоочередного отселения

Территория с уровнем загрязнения почв:

- $^{137}\text{Cs}$  — 1 480 кБк/м<sup>2</sup> (40 Ки/км<sup>2</sup>) и более, или
- $^{90}\text{Sr}$  — 111 кБк/м<sup>2</sup> (3 Ки/км<sup>2</sup>) и более, или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$  — 3,7 кБк/м<sup>2</sup> (0,1 Ки/км<sup>2</sup>) и более.

### 3. Зона последующего отселения

Территория с уровнем загрязнения почв:

- $^{137}\text{Cs}$  — от 555 до 1480 кБк/м<sup>2</sup> (от 15 до 40 Ки/км<sup>2</sup>), или
- $^{90}\text{Sr}$  — от 74 до 111 кБк/м<sup>2</sup> (от 2 до 3 Ки/км<sup>2</sup>), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$  — от 1,85 до 3,7 кБк/м<sup>2</sup> (от 0,05 до 0,1 Ки/км<sup>2</sup>),

а также территория с более низким уровнем загрязнения почвы вышеуказанными радионуклидами, где среднегодовая эффективная доза облучения населения от чернобыльских радионуклидов может превышать 5 мЗв/год.

#### 4. Зона с правом на отселение

Территория с уровнем загрязнения почв:

- $^{137}\text{Cs}$  — от 185 до 555 кБк/м<sup>2</sup> (от 5 до 15 Ки/км<sup>2</sup>) или
- $^{90}\text{Sr}$  — от 18,5 до 74 кБк/м<sup>2</sup> (от 0,5 до 2 Ки/км<sup>2</sup>), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$  — от 0,74 до 1,85 кБк/м<sup>2</sup> (от 0,02 до 0,05 Ки/км<sup>2</sup>),

а также территория с более низким уровнем загрязнения почвы вышеуказанными радионуклидами, где среднегодовая эффективная доза облучения населения от чернобыльских радионуклидов может превышать 1 мЗв/год.

#### 5. Зона проживания с периодическим радиационным контролем

Территория с уровнем загрязнения почв:

- $^{137}\text{Cs}$  — от 37 до 185 кБк/м<sup>2</sup> (от 1 до 5 Ки/км<sup>2</sup>) или
- $^{90}\text{Sr}$  — от 5,55 до 18,5 кБк/м<sup>2</sup> (от 0,15 до 0,5 Ки/км<sup>2</sup>), или
- $^{238,239,240}\text{Pu}$  — от 0,37 до 0,74 кБк/м<sup>2</sup> (от 0,01 до 0,02 Ки/км<sup>2</sup>).

Среднегодовая эффективная доза облучения населения от чернобыльских радионуклидов на этой территории не должна превышать 1 мЗв/год.

В результате длительного выброса радиоактивных продуктов из реактора и меняющихся погодных условий в этот период загрязнение территории республики радионуклидами оказалось чрезвычайно неравномерным. Даже в разных местах одного и того же населенного пункта уровень загрязнения почв чернобыльскими радионуклидами может сильно отличаться.

Последствия катастрофы на ЧАЭС для нашей страны оказались настолько серьезными, что Верховный Совет БССР в июле 1990 года объявил территорию республики зоной экологического бедствия. Государство до сих пор принимает меры по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы. В основном, эти меры направлены на ограничение облучения населения, а также на уменьшение экологических и экономических последствий катастрофы.

Чтобы лучше понять, с какими трудностями пришлось столкнуться населению республики, рассмотрим, к какому загрязнению природной среды привела Чернобыльская катастрофа.

#### 8.4. Загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред

В апреле-мае 1986 года после катастрофы на Чернобыльской АЭС загрязнение воздуха радионуклидами на всей территории БССР многократно возросло по сравнению с доаварийным уровнем. Воздух был обогащен наиболее летучими радиоактивными продуктами, содержащими главным образом радионуклиды йода ( $^{131}\text{I}$ ) и цезия ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{134}\text{Cs}$ ).

Допустимые для населения среднегодовые объемные активности радионуклидов во вдыхаемом воздухе:

$^{131}\text{I}$	–	7,3 Бк/м <sup>3</sup>
$^{137}\text{Cs}$	–	27 Бк/м <sup>3</sup>
$^{239,240}\text{Pu}$	–	0,0025 Бк/м <sup>3</sup>

В первые дни и недели катастрофы в пробах воздуха, отобранных на прилегающей к АЭС территории, были также обнаружены  $^{239}\text{Np}$ ,  $^{99}\text{Mo}$ ,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{125}\text{Sb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{140}\text{La}$ ,  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{103}\text{Ru}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$ .

Максимальные концентрации радионуклидов в воздухе наблюдали 27–28 апреля 1986 года. Даже в Березинском заповеднике, расположенном на расстоянии 400 км севернее Чернобыля, объемная активность воздуха по  $^{131}\text{I}$  в эти дни достигала 150–200 Бк/м<sup>3</sup>, по  $^{137}\text{Cs}$  — 9,9 Бк/м<sup>3</sup>, по  $^{239,240}\text{Pu}$  — 0,0007 мБк/м<sup>3</sup>.

В результате катастрофы содержание радионуклидов в воздухе в районах, прилегающих к АЭС, возросло в миллионы раз, а на остальной территории республики — в тысячи раз по сравнению с 1985 годом. Загрязнение воздуха начало заметно уменьшаться во второй половине мая 1986 года. Быстрое снижение продолжалось до конца 1986 года, а затем темпы его резко упали.

Содержание радионуклидов в воздухе, в основном, уменьшалось в результате оседания выброшенных в атмосферу радиоактивных частиц на земную поверхность, а также за счет распада короткоживущих радионуклидов, в том числе и  $^{131}\text{I}$ .

В настоящее время загрязнение воздуха радионуклидами в большинстве населенных пунктов Беларуси практически такое же, как до катастрофы. Более высокие уровни загрязнения воздуха отмечаются лишь в зоне отчуждения и на прилегающих к ней территориях.

Уровень загрязнения воздуха зависит от множества факторов, важнейшими из которых являются следующие:

- уровень загрязнения почвы и содержание в ней мелких частиц, поднимаемых ветром;
- характер растительного покрова;
- хозяйственная деятельность человека;
- природные явления (засуха, пылевые бури, пожары).

Так, по мере увеличения степени запыленности приземного слоя воздуха содержание в нем радионуклидов возрастает. В свою очередь, запыленность воздуха повышается с увеличением в почве содержания легких пылевидных частиц, поднимаемых в воздух воздушным потоком или в результате хозяйственной деятельности человека.

Наибольшую опасность представляет попадание в воздух вместе с пылью *альфа*-излучающих изотопов трансурановых элементов, которые через дыхательные пути могут поступать в организм человека. Даже в районах с относительно низкими уровнями загрязнения почв трансурановыми элементами в период проведения сельскохозяйственных работ локальная объемная активность плутония в воздухе может повышаться до  $0,01 \text{ Бк/м}^3$ , а вблизи источников пылеобразования (работающая сельскохозяйственная техника, движущийся автотранспорт) — до  $0,08 \text{ Бк/м}^3$ .

Уровень загрязнения воздуха радионуклидами может увеличиваться и при сжигании в печах загрязненного радионуклидами топлива.

При зарастании территории растительностью запыленность воздуха снижается, причем тем в большей степени, чем обильнее и плотнее растительный покров.

На загрязнение воздуха радионуклидами заметно влияют стихийные природные явления: пылевые бури, лесные и торфяные пожары. Во время таких событий радиоактивные вещества могут переноситься на большие расстояния.

Перераспределение радионуклидов происходит и в водных системах. Начальное загрязнение *поверхностных водоемов* (рек, озер и др.) произошло в результате выпадения на водную поверхность радиоактивных продуктов, выброшенных в атмосферу из разрушенного реактора. В дальнейшем радиоактивные вещества смывались в водоемы с водосборных территорий, питающих реки, озера, водохранилища.

Особенно важную роль в переносе радионуклидов играют *реки*. Наибольшему загрязнению радионуклидами в результате Чернобыльской катастрофы подверглись Днепр, Сож и Припять, в меньшей степени — Неман и Западная Двина.

До Чернобыльской катастрофы содержание  $^{90}\text{Sr}$  в воде р. Припять составляло  $0,0033\text{--}0,0085 \text{ кБк/м}^3$ , а  $^{137}\text{Cs}$  —  $0,005\text{--}0,010 \text{ кБк/м}^3$ . В первые дни после катастрофы суммарная объемная активность воды по *бета*-излучающим радионуклидам в р. Припять в районе ЧАЭС превышала  $3\,000 \text{ кБк/м}^3$ , и только к концу мая 1986 года она снизилась до  $150\text{--}200 \text{ кБк/м}^3$ . Максимальная удельная активность воды по  $^{239}\text{Pu}$  в р. Припять составляла  $0,37 \text{ кБк/м}^3$ .

Перенос радионуклидов в водоемах происходит как в растворенном виде, так и на частицах взвесей, которые удерживают радионуклиды.

Предельно допустимое поступление в организм человека *альфа*-излучающих изотопов плутония ( $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ ) с воздухом составляет  $20 \text{ Бк в год}$  (НРБ-2000).

Объем вдыхаемого воздуха у взрослого человека составляет, в среднем,  $8\,100 \text{ м}^3/\text{год}$ .

При объемной активности воздуха  $0,001 \text{ Бк/м}^3$  активность *альфа*-излучающих изотопов плутония, поступающих в организм человека, составляет  $81 \text{ Бк в год}$ , что значительно превышает предельно допустимый уровень, а при объемной активности  $0,08 \text{ Бк/м}^3$  —  $648 \text{ Бк в год}$ . В обоих случаях значительно превышает предельно допустимый уровень.

#### Загрязнение поверхностных водоемов

Республиканские допустимые уровни (РДУ-99) содержания радионуклидов в воде:

$^{137}\text{Cs}$  —  $10 \text{ кБк/м}^3$

$^{90}\text{Sr}$  —  $0,37 \text{ кБк/м}^3$

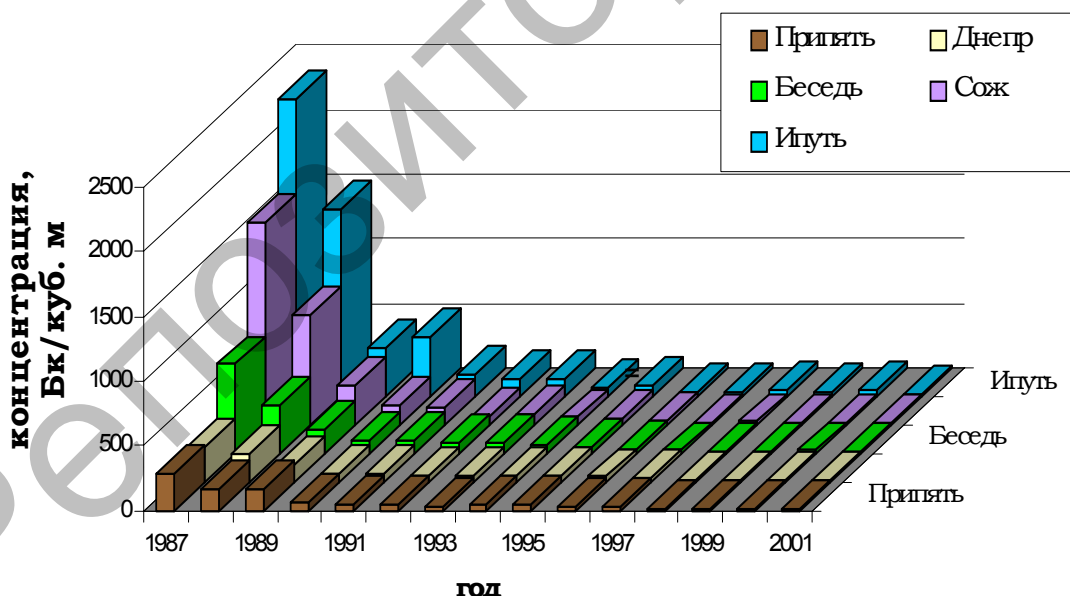
Воды рек и проточных озер, благодаря постоянной смене воды и оседанию взвешенных радиоактивных частиц на дно водоема, обладают способностью к самоочищению. При этом радионуклиды накапливаются в донных отложениях.

В периоды половодий происходит обратный процесс — донные осадки взмучиваются и переходят во взвешенное состояние. При этом уровень загрязнения воды радионуклидами увеличивается. Например, в отдельные годы в реке Брагинка (у г. Брагина) в такие периоды объемная активность воды по  $^{137}\text{Cs}$  возрастала с 0,26 до 0,33 кБк/м<sup>3</sup>, а по  $^{90}\text{Sr}$  — с 0,09 до 0,17 кБк/м<sup>3</sup>.

Концентрация радионуклидов в речной воде зависит от количества воды, которое переносится рекой. Чем больше объем воды в реке, тем ниже концентрация радионуклидов в речной воде. В 2000 году в засушливый летний период уровень воды в некоторых реках Беларуси был ниже среднего многолетнего уровня, поэтому концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в речных водах заметно увеличилась.

За годы, прошедшие после катастрофы, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в больших и средних реках Беларуси значительно снизилось. Это связано с уменьшением уровня загрязнения водосборных территорий в результате распада  $^{137}\text{Cs}$  и с уменьшением смыва радионуклида с этих территорий в речные воды.

Изменение среднегодового содержания  $^{137}\text{Cs}$  в реках Беларуси



В настоящее время содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в водах рек не превышает Республиканских допустимых уровней (РДУ-99). Лишь в периоды половодий возможно превышение этих уровней на территориях с высокой плотностью загрязнения чернобыльскими радионуклидами.

Существенный вклад в загрязнение водоемов радионуклидами вносят донные отложения и гидробионты — водные организмы растительного и животного происхождения. Как правило, самыми загрязненными являются *донные отложения*. По уровню загрязнения радионуклидами *гидробионты* уступают им. Самым чистым компонентом водоема является *вода*.

В замкнутых и слабопроточных озерах, расположенных на загрязненных территориях, концентрации в воде  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  и запас радионуклидов в донных отложениях больше, чем в реках, протекающих на этих территориях. Значительную роль в накоплении радионуклидов в таких водоемах играет смыв радиоактивных продуктов с водосборных территорий.

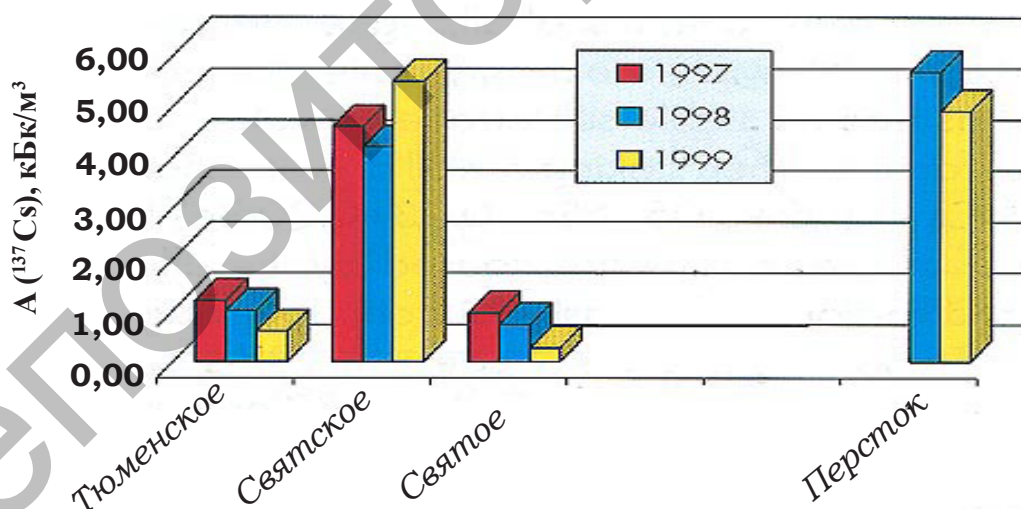
Замкнутые и слабопроточные озера могут вносить некоторый вклад в формирование дозы облучения населения, поскольку обычно являются зонами отдыха и рыболовства.

За первые 3–4 года после Чернобыльской катастрофы уровень загрязнения озерных вод резко снизился в результате распада короткоживущих радионуклидов, а также за счет закрепления радиоактивного цезия на взвешенных в воде частицах, вместе с которыми он оседал на дно водоемов.

**Замкнутые (непроточные) водоемы** — это водоемы, не имеющие впадающих и вытекающих ручейков или рек, за счет которых происходит смена воды в водоеме.

**Слабопроточные водоемы** — это водоемы, имеющие впадающие и вытекающие ручейки или реки, но которые обеспечивают настолько слабый приток и отток воды, что смена воды происходит лишь в незначительной степени.

Изменение среднегодовой активности  $^{137}\text{Cs}$  в воде белорусских озер (кБк/м<sup>3</sup>)



Озеро Персток расположено в 30-км зоне ЧАЭС на территории с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  3 700 кБк/м<sup>2</sup> (100 Ки/км<sup>2</sup>)

Остальные озера расположены на территории с уровнями загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ :

Тюменское	—	480 кБк/м <sup>2</sup> (13 Ки/км <sup>2</sup> )
Святое	—	1 370 кБк/м <sup>2</sup> (37 Ки/км <sup>2</sup> )
Святское	—	770 кБк/м <sup>2</sup> (21 Ки/км <sup>2</sup> )

**Фитопланктон** — совокупность микроскопических растительных организмов (главным образом, водорослей), обитающих в толще вод и перемещающихся под влиянием водных течений.

В непроточных озерах отмечается периодическое накопление радионуклидов в водной растительности (включая фитопланктон), которая ежегодно отмирает. Продукты разложения оседают на дно озера. Все это приводит к значительному накоплению радионуклидов в донных отложениях — до 90 %  $^{137}\text{Cs}$  и 70–90 %  $^{90}\text{Sr}$  от их содержания в озере.

В настоящее время на территории Гомельской и Могилевской областей объемная активность озерной воды по  $^{137}\text{Cs}$  находится в пределах от 0,2 до 7,2 кБк/м<sup>3</sup> и не превышает РДУ.

В мелководных озерах, благодаря постоянному перемешиванию воды, радиоактивный цезий распределяется по объему воды равномерно. В глубоких озерах, где вода слабо перемешивается, температура, химический состав примесей, концентрация радионуклидов, а также другие характеристики воды заметно меняются с глубиной. Такие озера называют *стратифицированными*.

В летний период концентрация радиоактивного цезия в них увеличивается от поверхности ко дну водоема. Например, в стратифицированном озере Святское, расположенном в Ветковском районе Гомельской области, на территории с плотностью загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$  770 кБк/м<sup>2</sup> (21 Ки/км<sup>2</sup>), объемная активность поверхностного слоя воды по этому радионуклиду составляет 6,2 кБк/м<sup>3</sup>, а придонного — 8,6 кБк/м<sup>3</sup> (ниже РДУ-99).

В настоящее время лишь в озерах, расположенных на территории с высокой плотностью загрязнения (например, в озере Риславское, расположенном на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  1 480 кБк/м<sup>2</sup> (40 Ки/км<sup>2</sup>), объемная активность воды превышает Республиканские допустимые уровни (РДУ-99) по  $^{137}\text{Cs}$ .

На всех пострадавших территориях уровень загрязнения поверхностных вод радионуклидами уже практически стабилен и мало меняется год от года. Однако в периоды, связанные с экстремальными ситуациями (засухи, паводки, обильные дожди), может происходить заметное изменение объемной активности поверхностных вод.

Содержание радионуклидов в *подземных водах*, которые являются источником питьевого и хозяйственного водоснабжения в нашей республике, как правило, не превышает Республиканских допустимых уровней.



### 8.5. Поведение чернобыльских радионуклидов в почве

Радиоактивные вещества при попадании на земную поверхность взаимодействуют с компонентами окружающей среды, и радионуклиды включаются в процессы природного круговорота химических элементов.

Радионуклиды, присутствующие в почве, могут усваиваться растениями и включаться в процессы перераспределения по пищевым цепям (например, почва-растение-животное-человек). Они могут поступать в почвенные воды, смываться дождевыми, тальными и паводковыми водами в реки, озера и другие водоемы. В составе почвенных частиц радионуклиды могут подниматься ветром и загрязнять приземные слои атмосферы. В процессе перераспределения может изменяться как химическое, так и физическое состояние соединений, содержащих радионуклиды. Например, из состава веществ, находящихся в твердом состоянии, радионуклиды могут переходить в водные растворы и вместе с ними перемещаться в почве или усваиваться растениями. И наоборот, из растворов радионуклиды могут переходить в состав нерастворимых соединений, то есть включаться в состав твердой фазы почвы.

Процессы перемещения содержащихся в почве радионуклидов в вертикальном или горизонтальном направлениях называют *миграцией*.

Перемещение радионуклида в вертикальном направлении называют *вертикальной миграцией*, а в горизонтальном направлении — *горизонтальной миграцией*.

К *вертикальному* перераспределению радионуклидов в почве могут приводить самые разнообразные процессы:

- перенос радионуклидов в глубь почвы вместе с атмосферными осадками под действием силы тяжести;
- перемещение растворов радионуклидов в мелких порах почвы под действием капиллярных сил;
- диффузионные процессы;
- миграция по корневым системам растений;
- деятельность почвенных животных;
- хозяйственная деятельность человека (перепашивание почвы и т. п.).

Вертикальная миграция

Горизонтальная миграция

*Ветровая эрозия* — это разрушение почвы под действием силы ветра. В результате происходит выдувание из почвы отдельных частиц, которые переносятся воздушным потоком и оседают в другом месте.

Подвижные и малоподвижные формы радионуклидов

*Горизонтальная миграция* может происходить при переносе радионуклидов с воздушными и водными потоками.

Перемещаясь с воздушным потоком, радиоактивные вещества в другом месте вновь оседают на земную поверхность. Мелкие частицы почвы начинают подниматься в воздух при достижении критического значения скорости ветра: 5–6 м/с — для минеральных почв, 8–9 м/с — для осушенных торфяников.

В среднем, на загрязненных радионуклидами территориях Беларуси до 21 % дней в году дуют ветры со скоростью, превышающей 5 м/с. Почвы, подверженные ветровой эрозии, занимают в республике свыше 20 % пахотных угодий. Наибольший перенос радионуклидов таким путем отмечается в весенне-летний период. Максимальное накопление радиоактивных продуктов при переносе воздушными потоками наблюдается в местах, где резко меняется скорость ветра — на дне долин, подветренных склонах, в ложбинах.

Подобное перераспределение радионуклидов осуществляется и с водными потоками. Однако в этом случае часть радионуклидов перемещается и в растворенном состоянии.

В результате горизонтальной миграции постепенно очищаются от радионуклидов одни участки почвы и загрязняются другие.

Скорость миграции радионуклидов в почве зависит от множества факторов:

- рельефа местности;
- структуры почвы (плотности, пористости, соотношения частиц разных размеров, соотношения минеральных и органических компонентов, их состава, способности почвы удерживать влагу и т. д.);
- климатических условий (количества атмосферных осадков, температуры и т. п.).

Радионуклиды в почве могут входить в состав соединений, которые хорошо растворимы в воде и относительно легко перераспределяются в почвенной среде. В этом случае говорят, что радионуклиды находятся в *подвижной* форме.

Радионуклиды могут входить и в состав труднорастворимых соединений, которые отличаются низкой подвижностью и значительно труднее перераспределяются в почве. В таком случае говорят, что радионукли-

ды находятся в *малоподвижной* (связанной, или фиксированной) форме. Радионуклиды в связанной форме также могут перемещаться в почве (например, в виде частиц, переносимых с почвенной влагой), однако, как правило, они перемещаются значительно медленнее, чем радионуклиды в подвижной (растворимой) форме.

Соотношение количеств каждого конкретного радионуклида в подвижной и малоподвижной формах зависит от химической природы радионуклида и свойств соединений, в состав которых он входит.

Несмотря на то, что цезий относится к щелочным металлам и большая часть его соединений хорошо растворима в воде, в почве радиоактивный цезий находится преимущественно в малоподвижном состоянии. Это связано с тем, что в почвах в том или ином количестве содержатся глинистые минералы, которые связывают основную часть цезия и переводят его в малоподвижное состояние.

Катионы цезия ( $^{137}\text{Cs}^+$ ), присутствующие в почвенных растворах, способны проникать в кристаллическую решетку подобных минералов и закрепляться в ней. В результате, за время, прошедшее после Чернобыльской катастрофы, подвижность радиоактивного цезия в почвах снизилась более чем в 10 раз.

В настоящее время в большинстве почв Беларуси основная часть  $^{137}\text{Cs}$  находится в связанной форме. Доля доступного растениям радионуклида составляет 5–20 % от его общего содержания в почве. При этом в почвах с высоким содержанием глинистых минералов количество доступного растениям  $^{137}\text{Cs}$  не превышает 5 %.

Лишь в торфяных почвах верховых болот с содержанием органического вещества 95 % и выше и в песчаных почвах, которые содержат чрезвычайно мало глинистых минералов, наблюдается повышенная подвижность и биологическая доступность радиоактивного цезия.

В отличие от радиоактивного цезия, в большинстве почв основная часть  $^{90}\text{Sr}$  находится в подвижном состоянии. В настоящее время в почвах Беларуси количество  $^{90}\text{Sr}$  в подвижной форме достигает 50–70 % от его общего содержания в почве. При этом в минеральных почвах содержание радиоактивного стронция в подвижной форме, как правило, больше, чем в органических.

По способности перераспределяться в почве и по биологической доступности растениям радиоактивный стронций обычно превосходит другие долгоживущие чернобыльские радионуклиды.

В природных почвенных водах могут присутствовать не только растворенные формы радионуклидов, но и радионуклиды в составе коллоидных частиц и взвесей мельчайших частиц твердых веществ.

$^{137}\text{Cs}$

$^{90}\text{Sr}$

Содержание в почвах плутония и америция в подвижной форме невелико — не превышает нескольких процентов. Эти радионуклиды находятся в почвах преимущественно в составе малорастворимых соединений. Они медленно мигрируют в почве и плохо усваиваются растениями.

Начиная с 1994 года, на расстоянии более 20 км от ЧАЭС значительных изменений в соотношении количеств радионуклидов в подвижной и малоподвижной формах не наблюдалось. До сих пор основная часть плутония и америция содержится в верхнем (0–5)-см слое почвы,  $^{137}\text{Cs}$  — в (0–10)-см,  $^{90}\text{Sr}$  — в (0–20)-см слое.

Содержание радионуклидов в (0–20)-сантиметровом слое почвы, где располагается корневая система сельскохозяйственных растений, постепенно сокращается. В основном, это происходит за счет

- вертикальной миграции радионуклидов в нижние слои почвы,
- естественного распада радионуклидов.

Чтобы оценить, как долго радионуклиды останутся в определенном слое почвы, используют такой показатель, как *эффективный период полуочищения*.

*Эффективный период полуочищения* — это промежуток времени, в течение которого содержание радионуклидов в определенном слое почвы сокращается вдвое.

*Эффективный период полуочищения* отличается для разных радионуклидов и разных типов почвы. В белорусских почвах его величина для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  находится в пределах от 5 до 28 лет. Это означает, что значительная доля радионуклидов еще длительное время будет оставаться в корнеобитаемом слое почв.

Таким образом, в зависимости от химической природы и форм нахождения в почве радионуклиды могут по-разному мигрировать в окружающей среде. Из чернобыльских радионуклидов, присутствующих в настоящее время на загрязненных территориях, наиболее подвижен *радиоактивный стронций*. Радионуклиды цезия, плутония и америция, как правило, значительно уступают по подвижности радиоактивному стронцию.

Одним из важнейших этапов *биологической миграции* радионуклидов в окружающей среде является их поступление из почвы в растения. О том, как различные виды растительной продукции накапливают радионуклиды, Вы узнаете в следующем разделе.

## 8.6. Загрязнение радионуклидами природной растительности

Хвойные, лиственные и смешанные леса, сенокосные луга и пастбища широко используются для заготовки древесины, сбора грибов и ягод, охоты, выпаса животных, заготовки сена и лекарственных растений.

Луга занимают около 10 % территории, загрязненной радионуклидами в результате катастрофы на ЧАЭС. Около 22 % всей площади лесов Беларуси, то есть около 2 миллионов гектаров лесных угодий, также оказались загрязненными радионуклидами.

В первые дни после катастрофы около 80 % выпавших на лесные территории радиоактивных веществ было задержано надземными частями растений и только 20 % осело на почву. Со временем загрязнение растений из воздуха снижалось. Атмосферные осадки, ветер, опадание листвы и ветвей деревьев способствовали переходу радионуклидов с древесных крон в лесную подстилку. Постепенно древесные кроны очищались.

К концу лета 1986 года в надземной части растений осталось лишь 13–15 % от общего количества выпавших радионуклидов.

В целом, в лесных экосистемах содержание радионуклидов уменьшается при переходе от нижних ярусов к верхним. Больше всего радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  накапливается в живом надпочвенном покрове, меньше — в подлеске и подросте и еще меньше — в верхнем ярусе леса.

Содержание радионуклидов в древесной растительности, в основном, зависит от:

- условий произрастания и свойств почвы,
- возраста и породы деревьев,
- плотности (густоты) насаждений.

Поступление радионуклидов из почвы в растение зависит от вида и возраста древесной породы. Ива, береза, сосна и ель больше других древесных пород накапливают радионуклиды. Чем старше дерево, тем медленнее в нем протекают процессы обмена веществ и в меньшей степени усваиваются радионуклиды. Различные органы и ткани деревьев также отличаются по способности накапливать радионуклиды.

*Верхний ярус* леса образуют зрелые деревья, кроны которых высоко поднимаются над земной поверхностью.

*Средний ярус* образуют молодые, подрастающие деревья (*подрост*) и высокие кустарники (*подлесок*).

*Нижний ярус* составляют мох, грибы, травяные, мелкие кустарничковые и другие виды растительности. Вместе с лесной подстилкой они образуют *живой надпочвенный покров*.

По снижению способности накапливать  $^{137}\text{Cs}$  надземные части древесных растений можно расположить в следующей последовательности: внешняя кора (пробка)–ветви, сучья–листья и хвоя–внутренняя кора (луб)–стволовая древесина.

По оценкам специалистов, в 2011 году в надземной части 30-летних сосен будет содержаться до 10–15 %  $^{137}\text{Cs}$  от общего его запаса в почвенно-растительном комплексе (для сравнения, в 1996 году было 5–7 %).








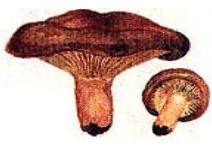




Из пищевой продукции леса наиболее загрязнены грибы и некоторые виды ягод (черника, клюква, голубика, брусника), корневая система которых располагается в самой верхней и наиболее загрязненной радионуклидами части почвенного профиля. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в этих растениях обычно превышает допустимые нормы даже на территориях с небольшой плотностью загрязнения 37–100 кБк/м<sup>2</sup> (1–3 Ки/км<sup>2</sup>). В ближайшие 20–30 лет многие виды лесной продукции останутся загрязненными выше допустимых уровней (РДУ-99) на территории с плотностью загрязнения 150 кБк/м<sup>2</sup> (4 Ки/км<sup>2</sup>) и более, что ограничит их использование.

Республиканские допустимые уровни (РДУ-99) содержания  $^{137}\text{Cs}$ :  
ягоды — 185 Бк/кг  
грибы свежие — 370 Бк/кг

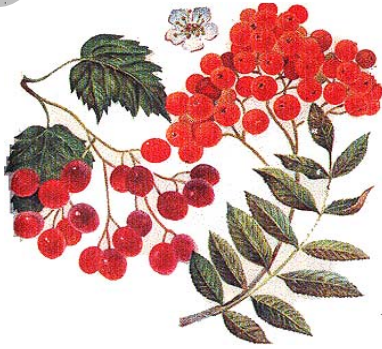

По способности накапливать радионуклиды грибы можно разделить на четыре группы: слабо-, средне-, сильнонакапливающие и грибы-аккумуляторы.

**Классификация грибов по степени накопления  $^{137}\text{Cs}$**

Слабонакапливающие		Средненакапливающие	
Опенок осенний		Лисичка настоящая	
Опенок зимний		Рядовка серая	
Опенок летний		Белый гриб	
Зонтик пестрый		Подосиновик и подосиновик красный	

Слабонакапливающие		Средненакапливающие	
Дождевик		Подберезовик обыкновенный	
Вешенка		Подберезовик болотный	
Сильнонакапливающие		Грибы-аккумуляторы	
Груздь белый и черный		Польский гриб	
Волнушка белая и розовая		Свинушка	
Зеленка		Моховик желто-бурый и зеленый	
Сыроежки		Масленок Горькушка	

**Классификация лесных ягод по степени накопления <sup>137</sup>Cs**

Слабонакапливающие		Средненакапливающие	
Калина		Земляника	
Рябина		Ежевика	
		Малина	

Сильнонакапливающие

Клюква		Голубика	
Черника		Брусника	

Из 200 видов съедобных грибов, встречающихся в белорусских лесах, в пищу традиционно используют не более 35 видов.

Сбор грибов *слабо и средненакапливающих* радионуклиды рекомендуется проводить в лесах с плотностью загрязнения до 74 кБк/м<sup>2</sup> (2 Ки/км<sup>2</sup>), а грибов-аккумуляторов и грибов, *сильно накапливающих* радионуклиды, — в лесах с плотностью загрязнения до 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>).



При плотности загрязнения лесов радиоактивным цезием выше 74 кБк/м<sup>2</sup> (2 Ки/км<sup>2</sup>) в собранных грибах, ягодах, заготавливаемом сырье **ОБЯЗАТЕЛЬНО** контролировать содержание радионуклидов.



**Практический совет:** дикорастущие ягоды, плоды и лекарственное сырье можно заготавливать на территории с плотностью загрязнения не более 74 кБк/м<sup>2</sup> (2 Ки/км<sup>2</sup>).

Накопление радионуклидов *травянистыми растениями* в основном зависит от:

- условий произрастания и свойств почвы,
- количества почвенной влаги,
- видовых особенностей растения.

Способность растений накапливать радионуклиды можно оценивать по величине коэффициента накопления (**Кн**). Он представляет собой отношение удельной активности растительной биомассы (**A<sub>p</sub>**, Бк/кг) к удельной активности почвы в области корневого питания растения (**A<sub>n</sub>**, Бк/кг).

$$Кн = \frac{A_p}{A_n}$$

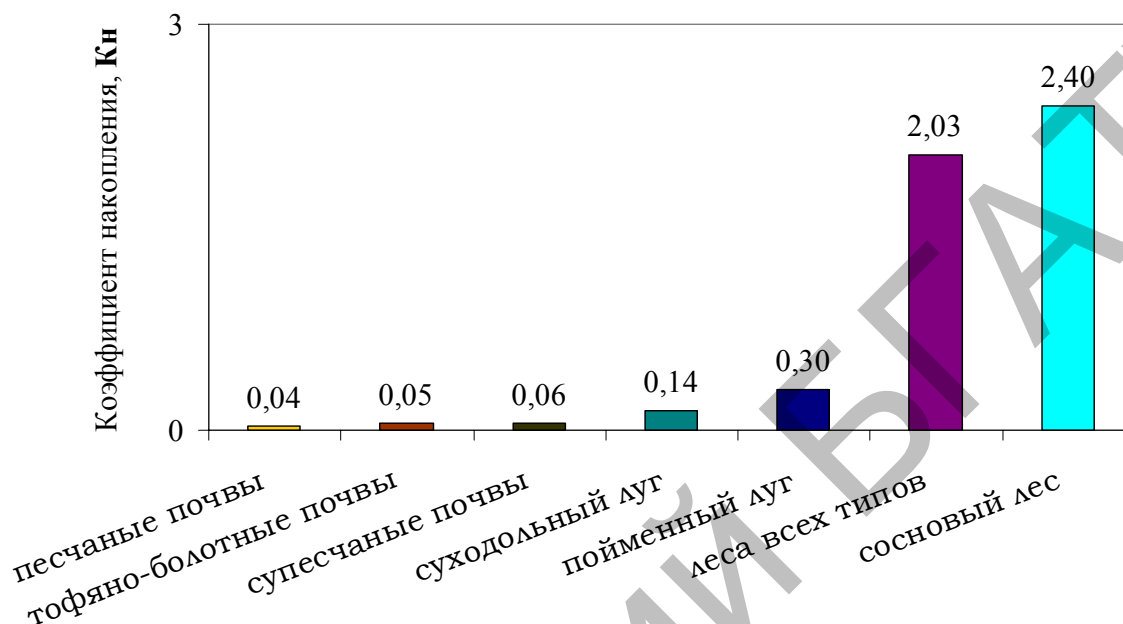
Коэффициент накопления <sup>137</sup>Cs травянистым растением существенно зависит от свойств почвы и условий произрастания. В значительной степени накапливают

Коэффициент накопления, **Кн**



радионуклиды травы, произрастающие во влажных лесах, особенно сосновых, меньше всего — на почвах, богатых глинистыми минералами и не обедненных калием.

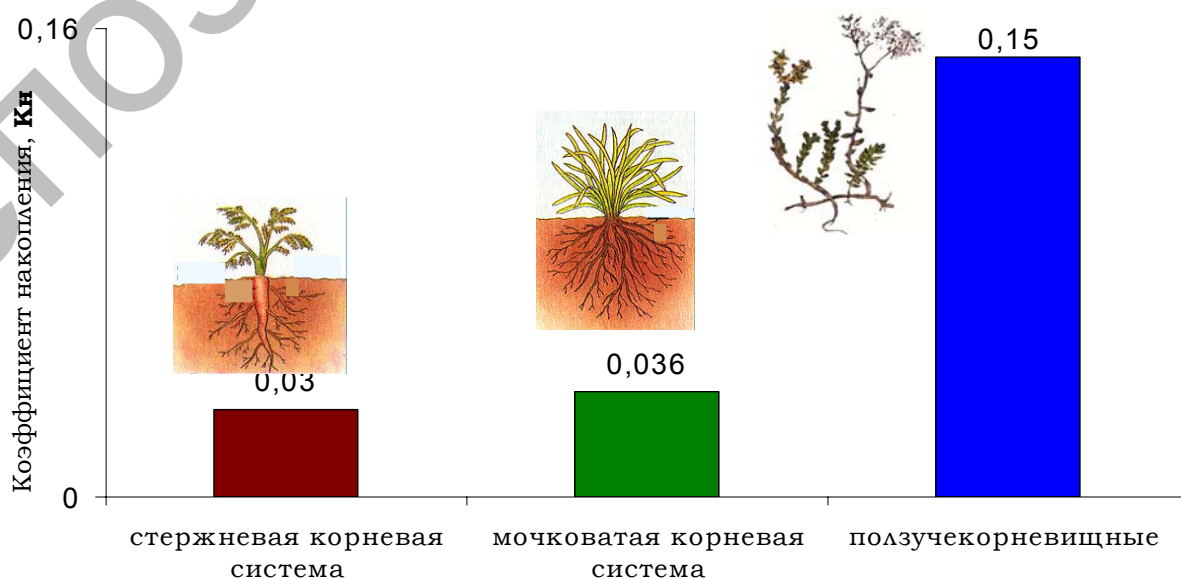
### Коэффициент накопления $^{137}\text{Cs}$ травяной растительностью в зависимости от типа почвы и условий произрастания



Способность растения накапливать радионуклиды зависит также от вида растения и строения его корневой системы.

В порядке увеличения способности накапливать  $^{137}\text{Cs}$  в надземной части травянистые растения можно расположить в следующей последовательности: крестоцветные, зверобойные, кипрейные, бобовые, гречишные, сложноцветные, злаковые, осоковые, вересковые.

### Влияние строения корневой системы растения на величину коэффициента накопления $^{137}\text{Cs}$



Морфология — наука о форме и строении организмов

Исследования природных популяций растений свидетельствуют, что в целом растительные комплексы являются относительно устойчивыми к радиационному воздействию. Большинство представителей растительного мира на загрязненных территориях не претерпели существенных морфологических изменений. Действие радиации на растительность отчетливо проявляется только на территориях с чрезвычайно высокими уровнями загрязнения — более 3 700 кБк/м<sup>2</sup> (100 Ки/км<sup>2</sup>) по <sup>137</sup>Cs.

В будущем, благодаря естественному отбору, в растительных сообществах может увеличиться число видов, устойчивых к воздействию радиации.

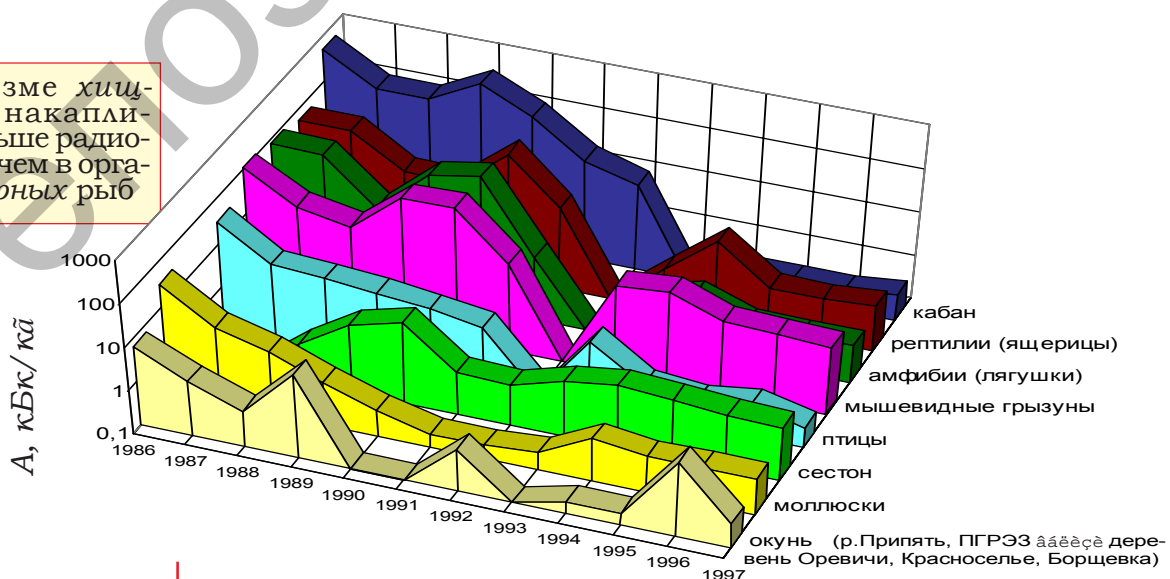
### 8.7. Последствия катастрофы для животного мира

Накопление радионуклидов в организмах животных зависит от уровня загрязнения среды их обитания и, в основном, происходит по пищевым цепям. Наиболее высокое содержание радионуклидов у представителей различных видов фауны наблюдали в первый год после катастрофы в радиусе 30 км от ЧАЭС.

Уже в 1987 году после распада наиболее короткоживущих радионуклидов загрязнение представителей различных групп животных снизилось в 5–10 раз. В последующий период (1988–1997 годы) темпы снижения существенно замедлились. При этом в некоторых группах животных (рыб, амфибий, мелких млекопитающих), обитающих на наиболее загрязненных территориях, содержание радионуклидов в организмах животных оказалось близким к уровню 1986 года.

Изменение содержания радионуклидов (A, кБк/кг) в организме различных представителей фауны

В организме хищных рыб накапливается больше радионуклидов, чем в организме мирных рыб



У рыб, обитающих в одних и тех же водоемах, самое высокое содержание радионуклидов в мышечной ткани характерно для *хищных* видов — окуня, щуки. Значительно меньше содержится радионуклидов в мышечной ткани представителей *мирных* видов рыб — красноперки, карася золотого и др. При этом в мышцах крупных рыб накапливается  $^{137}\text{Cs}$  больше, чем в мышцах мелких.

У всех видов рыб, которые обитают в проточных водоемах (реках, проточных озерах и т. п.), содержание радионуклидов в организме значительно ниже, чем у видов, обитающих в непроточных водоемах.

На территории Беларуси вне 30-км зоны ЧАЭС содержание радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в речной рыбе, как правило, не превышает РДУ (370 Бк/кг по  $^{137}\text{Cs}$  и 3,7 Бк/кг по  $^{90}\text{Sr}$ ). В непроточных водоемах, загрязненных радионуклидами, накопление  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб может достигать десятков и даже сотен тысяч Беккерель на килограмм.

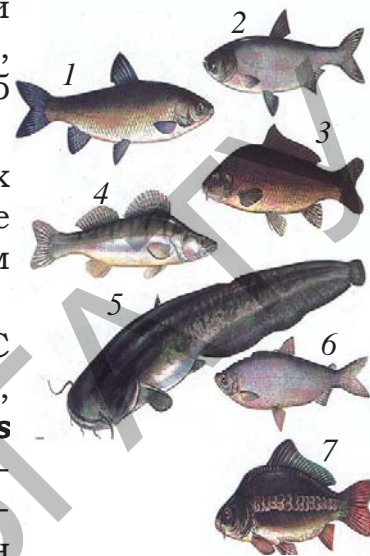
У представителей сухопутной фауны поступление радионуклидов в организм существенно зависит от условий обитания. Среди птиц, являющихся объектами охоты, максимальное содержание радиоактивного цезия отмечено в организме *серой куропатки*, обитающей на сухих открытых местах. Из птиц прибрежного водного комплекса больше всего накапливают радионуклиды *чирок-трескунок* и *кряква*, меньше всего — *широконоска*.

У копытных млекопитающих, обитающих в наиболее загрязненных районах, содержание радионуклидов остается на высоком уровне и зависит от сезона и климатических условий. Например, у охотничье-промысловых копытных в летне-осенний период загрязнение внутренних органов и тканей увеличивается в связи с накоплением радионуклидов в этот период в растениях, составляющих их кормовую базу.

Хищные млекопитающие (волк, лисица) накапливают больше радионуклидов, чем травоядные животные, которыми они питаются. Так, уровни загрязнения организма волка  $^{137}\text{Cs}$  достигают 50 кБк/кг, а организма лисицы — 47 кБк/кг, что в 10–12 раз превышает содержание радионуклида в организмах травоядных животных на той же территории.

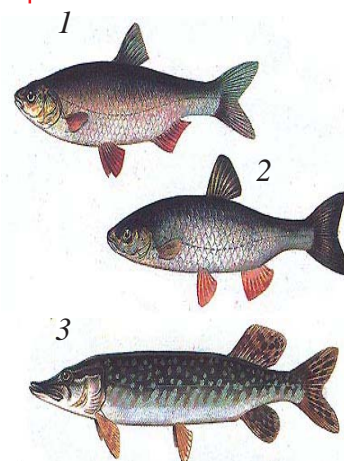
При постоянном поступлении радионуклидов с пищей в организм позвоночных животных происходит их накопление в отдельных органах и тканях.

### Мирные виды рыб



- 1 — уклейка,
- 2 — плотва, 3 — лещ,
- 4 — ерш, 5 — линь,
- 6 — красноперка,
- 7 — толстолобик

### Хищные виды рыб



- 1 — судак,
- 2 — окунь,
- 3 — щука

Хищные млекопитающие накапливают больше радионуклидов, чем травоядные.

По степени убывания содержания  $^{137}\text{Cs}$  органы и ткани животных можно расположить в следующей последовательности: мышечная ткань–почки–сердце–селезенка–печень–легкие–костная ткань.

В условиях Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ) дикие животные испытывают значительные дозовые нагрузки. Это может оказывать влияние на состояние здоровья животных. У отдельных видов животных выявлены низкий темп кроветворения, замедление созревания молодняка, снижение воспроизводства, нарушение соотношения полов и другие изменения. Отмечено, например, снижение плодовитости рыб.

Многие изменения в природной среде связаны с прекращением хозяйственной деятельности на загрязненных территориях. Отмечены, в частности, изменения в соотношении численности отдельных групп животных.

Например, в 30-км зоне ЧАЭС, благодаря обильной кормовой базе и отсутствию охоты, значительно увеличилась численность популяции охотничье-промысловых млекопитающих, в частности, в 4–5 раз увеличилась численность волков.

На территориях, где имеются мелиоративные системы со шлюзами, возросло видовое разнообразие и численность амфибий и рептилий, болотных и древесно-кустарниковых птиц. Увеличилась и численность ряда редких видов животных.

В зоне отселения, на территории бывших населенных пунктов, численность и видовое разнообразие насекомых в 3–3,5 раза выше по сравнению с тем, что наблюдается на приусадебных участках сельских населенных пунктов.

Такая ситуация может приводить к определенным проблемам. Например, в зоне отселения, по сравнению с сопредельными территориями, возросла численность паразитирующих животных, а также кровососущих насекомых. Подобные виды организмов являются потенциальными переносчиками опасных заболеваний, таких как туляремия, клещевой энцефалит, калифорнийская лихорадка и др. Это следует учитывать при оценке эпидемиологической обстановки в зоне отселения и на приграничной территории.

В ближайшие годы существенного снижения содержания радионуклидов в организмах диких животных не предвидится.

### 8.8. Содержание радионуклидов в продуктах питания

В настоящее время основной вклад в эффективную дозу облучения населения вносит *внутреннее облучение* за счет потребления загрязненных радионуклидами продуктов питания. Чтобы ограничить поступление радионуклидов в организм человека с пищей, в Беларуси введены «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде» (РДУ). После катастрофы на Чернобыльской АЭС эти нормы неоднократно уточнялись.

В настоящее время в Республике Беларусь действуют «Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде», принятые в 1999 году (РДУ-99).

#### Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)

Наименование продукта	Удельная (объемная) активность, Бк/кг (л)	Наименование продукта	Удельная (объемная) активность, Бк/кг (л)
$^{137}\text{Cs}$			
Вода питьевая	10	Молоко и цельномолочная продукция	100
Молоко сгущенное и концентрированное	200	Творог и творожные изделия	50
Сыры сычужные и плавленые	50	Масло коровье	100
Мясо и мясные продукты, в том числе: говядина, баранина и продукты из них, свинина, птица и продукты из них	500	Картофель	80
	180		
Хлеб и хлебобулочные изделия	40	Мука, крупы, сахар	60
Жиры растительные	40	Жиры животные и маргарин	100
Овощи и корнеплоды	100	Фрукты	40

## Глава 8

Наименование продукта	Удельная (объемная) активность, Бк/кг (Λ)	Наименование продукта	Удельная (объемная) активность, Бк/кг (Λ)
Садовые ягоды	70	Консервированные продукты из овощей, фруктов и ягод садовых	74
Дикорастущие ягоды и консервированные продукты из них	185	Грибы свежие	370
Грибы сушеные	2500	Специализированные продукты детского питания, готовые к употреблению	37
<b><sup>90</sup>Sr</b>			
Вода питьевая	0,37	Молоко и цельномолочная продукция	3,7
Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7	Хлеб и хлебобулочные изделия	3,7
Специализированные продукты детского питания, готовые к употреблению	1,85		

### Примечание.

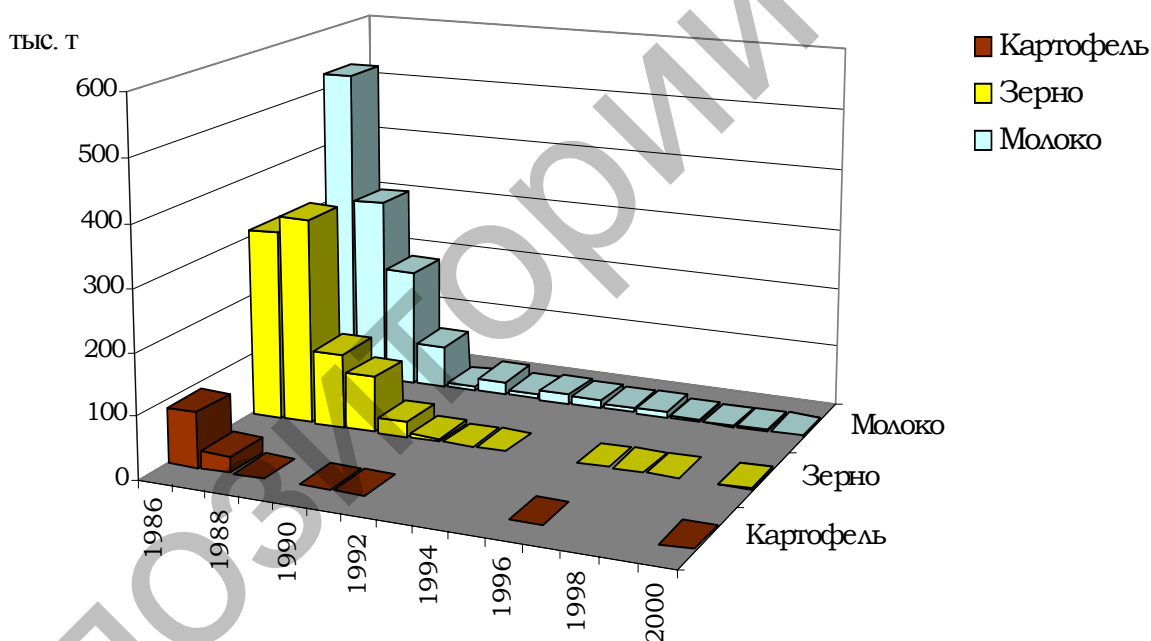
1. Для продуктов питания, потребление которых составляет менее 5 кг в год на человека (специи, чай, мед и др.), устанавливаются допустимые уровни в 10 раз более высокие, чем для прочих пищевых продуктов.
2. К специализированным продуктам детского питания относятся продукты промышленного производства, имеющие специальную маркировку, а также продукция детских молочных кухонь.
3. Для колбасных мясных изделий и мясных консервов, в рецептуры которых входит конина, мясо диких животных, устанавливаются такие же нормативы, как для говядины.
4. Для макаронных изделий устанавливаются такие же нормативы, как для хлеба и хлебобулочных изделий.

Чтобы контролировать качество продукции, в Республике Беларусь создана и функционирует система радиационного контроля. Благодаря этой системе в розничную торговую сеть попадают только продукты питания с содержанием радионуклидов в пределах установленных норм. Употребление продуктов с содержанием радионуклидов, не превышающим допустимые уровни, относительно безопасно для здоровья человека.

Результаты обследования показывают, что содержание радионуклидов в продуктах питания, произведенных в общественном и частном хозяйствах, различается. Ситуация

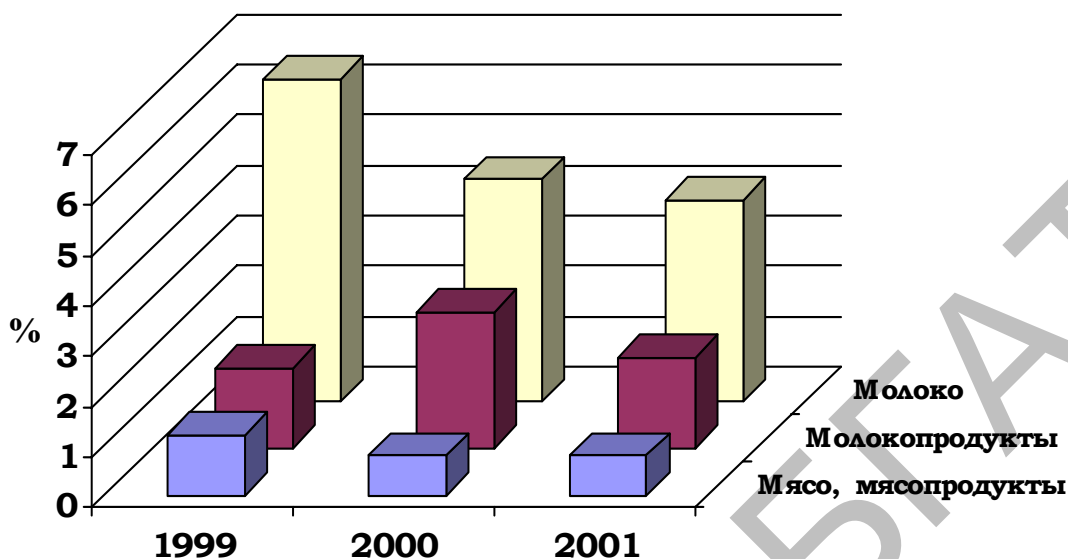
в общественном секторе достаточно благополучна. Осуществляемые государством меры по радиационной защите в сельском хозяйстве (известкование кислых почв, внесение дополнительных доз удобрений и другие), вместе с природными процессами (такими, как радиоактивный распад, снижение подвижности цезия в почвах) привели к сокращению поступления  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственную продукцию более чем в 10 раз. Уменьшилась и доля загрязненной продукции в общем объеме производства. В частности, производство молока с превышением допустимого содержания цезия-137 снизилось с 524,6 тыс. т в 1986 году до 1,4 тыс. т в 2000 году и до 0,2 тыс. т в 2004 году. Количество загрязненного мяса, соответственно, уменьшилось с 21,1 тыс. до нескольких тонн.

### Динамика производства сельскохозяйственной продукции с превышением допустимого уровня содержания $^{137}\text{Cs}$



В личных хозяйствах производство продуктов питания, загрязненных сверх допустимых норм, также сокращается, однако медленнее, чем в государственном секторе сельскохозяйственного производства. Так, за период с 1986 по 2001 год производство молока с содержанием  $^{137}\text{Cs}$  выше 100 Бк/л в личных подсобных хозяйствах снизилось лишь в 1,7 раза. За период 2002–2004 годы в 165–273 населенных пунктах периодически отмечаются случаи производства молока с превышением РДУ-99 по содержанию радионуклидов.

### Относительное количество пищевых продуктов из личных подсобных хозяйств, где превышены нормативы РДУ-99 по $^{137}\text{Cs}$ (%)



Молоко  
и молочные  
продукты

Производство загрязненного молока отмечено преимущественно в населенных пунктах Гомельской, Брестской и Могилевской областей. Хотя во многих населенных пунктах имеются центры, где можно измерять содержание радионуклидов в продуктах питания, жители зачастую не проверяют молоко, произведенное в частном секторе, и используют его для личного потребления. Безусловно, это увеличивает радиационный риск для сельского населения, особенно для детей.

Употребление молока и молочных продуктов с повышенным содержанием радионуклидов обуславливает основной вклад в дозу внутреннего облучения людей (более 50 %) в тех местах, где населенные пункты расположены вдали от лесной зоны и жители мало используют лесную продукцию.

Овощи, в том числе картофель, загрязнены радионуклидами в гораздо меньшей степени по сравнению с молоком. Их потребление, как правило, вносит незначительный вклад в дозу внутреннего облучения людей.

Овощи

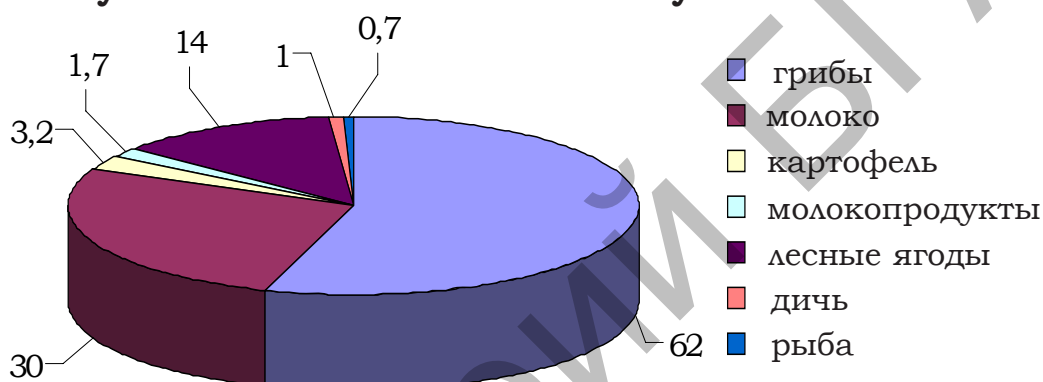
Иная ситуация складывается в населенных пунктах, расположенных в лесной зоне или вблизи нее. Как уже отмечалось, из пищевой продукции леса наиболее загрязнены грибы и ягоды (клюква, черника, брусника, голубика). Содержание радионуклидов в них может превышать допустимые уровни даже на территориях с незначительной плотностью загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$ .



Примерно 40 % проанализированных проб очень популярной в Беларуси клюквы не соответствует республиканским нормативам. Иногда своеобразным накопителем  $^{137}\text{Cs}$  является и земляника. Ее удельная активность может достигать 150–300 Бк/кг при плотности загрязнения почвы всего 5–25 кБк/м<sup>2</sup> (0,15–0,7 Ки/км<sup>2</sup>).

За счет потребления загрязненной радионуклидами пищевой продукции леса может формироваться до 70–80 % дозы внутреннего облучения населения. Относительный вклад продуктов питания, загрязненных  $^{137}\text{Cs}$ , в дозу внутреннего облучения жителей населенных пунктов, расположенных в лесной зоне, показан на следующем рисунке.

**Вклад загрязненных  $^{137}\text{Cs}$  продуктов питания в дозу внутреннего облучения жителей населенных пунктов лесной зоны (%)**



На рисунке приведены результаты исследований проб пищевой продукции леса в процентах от количества проанализированной продукции за период с 2000 по 2002 год. Практически такая же картина наблюдалась и в последующие годы.

О накоплении радионуклидов в организме диких животных уже упоминалось ранее. Различные виды животных по-разному накапливают радионуклиды. В 2002 году содержание  $^{137}\text{Cs}$  в мясе диких животных, отловленных или отстреленных на загрязненных радионуклидами территориях республики, изменялось в интервале от 2 000 до 250 000 Бк/кг. Исследования показывают, что ощутимого снижения содержания радионуклидов в организмах диких животных не происходит.

Что касается *рыбной продукции*, то в мышечной ткани рыб, обитающих в реках на пострадавшей территории вне 30-км зоны ЧАЭС, содержание  $^{137}\text{Cs}$ , в среднем, составляет 5–15 Бк/кг. Это значительно меньше допустимого уровня (370 Бк/кг). Однако в непроточных водоемах уровень загрязнения рыбной продукции  $^{137}\text{Cs}$  для хищных видов может достигать 300 000 Бк/кг. Поэтому следует избегать ее употребления в пищу без проверки на содержание радионуклидов.

Мясо диких животных

Рыбная продукция

Поскольку существенный вклад в дозу внутреннего облучения человека могут вносить (а значит, и представлять опасность для его здоровья) продукты, произведенные в частном секторе, а также «дары природы» (грибы, ягоды, дичь, рыба), содержание радионуклидов в них необходимо обязательно контролировать.

Итак,



Недостатки конструкции атомного реактора Чернобыльской атомной электростанции и ошибочные действия персонала, вплоть до нарушения правил эксплуатации реактора, привели к самой крупной ядерной катастрофе в истории развития ядерной энергетики. Примерно 3,5–5,0 % общего количества радионуклидов, находившихся в реакторе непосредственно перед катастрофой, было выброшено в окружающую среду.

Основная часть радионуклидов плутония и америция оказалась сосредоточенной в 30-км зоне ЧАЭС. Радионуклиды йода и цезия распространились на многие сотни и даже тысячи километров от места катастрофы, что обусловило ее глобальный характер. В результате, были загрязнены обширные пространства суши, приземные слои атмосферы и поверхностные водоемы.

Благодаря способности к самоочищению, атмосферный воздух и воды поверхностных водоемов постепенно очистились. Однако значительное количество радионуклидов скопилось в донных отложениях рек, озер и других водных резервуаров, расположенных в зоне загрязнения.

На значительной части территории страны почвы и произрастающая на них растительность оказались загрязненными долгоживущими радионуклидами. За счет миграции радионуклидов по пищевым цепям загрязненной оказалась и продукция животного происхождения.

Процессы самоочищения почв за счет естественного распада чернобыльских радионуклидов и их выноса из корнеобитаемого слоя в нижележащие слои протекают медленно. Поэтому еще на протяжении длительного периода времени долгоживущие радионуклиды будут оставаться в корнеобитаемом слое почв и могут поступать в продукцию растительного и животного происхождения.

В настоящее время основной вклад в эффективную дозу облучения населения пострадавших регионов вносит потребление загрязненных радионуклидами продуктов питания. Вот почему следует уделять должное внимание их радиационному контролю, особенно молочной продукции, произведенной в частном секторе, а также «даров природы» (грибов, ягод, лекарственных растений, рыбы).

Употребление в пищу продуктов питания, соответствующих установленным нормам, позволит населению существенно сократить дозовые нагрузки и уменьшить радиационный риск.

### Вопросы для самоконтроля и обсуждения:

1. Как Вы думаете, каковы причины аварии, произошедшей на Чернобыльской АЭС в апреле 1986 года?
2. Какие радионуклиды определяли облучение населения в зоне Чернобыльской катастрофы непосредственно после разрушения ядерного реактора?
3. Почему аварию, произошедшую на Чернобыльской АЭС, называют глобальной радиационной катастрофой?
4. Как и почему менялся со временем уровень загрязнения воздушной и водной сред после Чернобыльской катастрофы?
5. Какие чернобыльские радионуклиды определяют в настоящее время облучение населения?
6. Какие документы в настоящее время определяют допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде в Республике Беларусь?
7. Какие продукты могут быть в наибольшей степени загрязнены радионуклидами чернобыльского происхождения и требуют обязательного контроля перед потреблением?
8. Почему рыбу замкнутых (непроточных) водоемов, расположенных на загрязненной территории, следует подвергать радиационному контролю?



9. Как Вы думаете, у представителей каких видов рыб, хищных или мирных, содержится больше радиоактивного цезия в мышечной ткани?
10. Почему хищные животные в большей степени накапливают радионуклиды по сравнению с травоядными?

**Ключевые слова и словосочетания:** экономический ущерб, дозы облучения населения, медицинские, социально-психологические последствия

Катастрофа на Чернобыльской АЭС привела к загрязнению радионуклидами обширных территорий и серьезным экономическим, медицинским, социально-психологическим и другим последствиям, которые полностью не преодолены до настоящего времени. Поскольку радиационных катастроф подобного масштаба никогда раньше не было, а их возможность даже не рассматривалась, пострадавшие республики (БССР, УССР, РСФСР) оказались не готовы к оперативному принятию адекватных мер, соответствующих масштабам катастрофы.

Изучив главу... Вы узнаете, какой огромный ущерб нанесла экономике Беларуси Чернобыльская катастрофа. Поймете, что она явилась причиной нарушений социально-экономических связей, психологического стресса, медицинских, демографических и других последствий. Анализ последствий произошедшей катастрофы поможет оценить случившееся и понять, что следует предпринять, чтобы лучше справиться с возникшими проблемами и быть готовыми к их решению, если подобное событие где-нибудь произойдет в будущем.



### 9.1. Экономический ущерб

Радиационная катастрофа 1986 года оказала негативное воздействие на все сферы жизни людей и, прежде всего, на сельскохозяйственное и промышленное производство, лесное хозяйство, традиционное природопользование и сложившийся уклад жизни.

Больше всего пострадало сельское хозяйство. Высокие уровни загрязнения почвы радионуклидами привели к тому, что из оборота было выведено 2,65 тыс. км<sup>2</sup> сельхозугодий. Сократились посевные площади и производство сельскохозяйственных культур, уменьшилось поголовье скота.

В зоне загрязнения оказались 132 месторождения полезных ископаемых, из которых 57 выведены из эксплуатации. Это почти 5 млн. м<sup>3</sup> строительного песка, песчано-гравийных материалов и глин, 7,7 млн. т мела и 13,5 млн. т торфа. Ограничены поисково-разведочные работы в южной части Припятской нефтегазоносной области с оцененными ресурсами 25,3 млн. т нефти.

Огромный урон нанесен лесному хозяйству. Около четверти лесного фонда Беларуси (примерно 2 млн. га) подверглось загрязнению чернобыльскими радионуклидами. В Гомельской и Могилевской областях радионуклидами загрязнено соответственно 51,6 и 36,4 % общей площади лесных массивов. Заготовка древесины на территории с плотностью загрязнения <sup>137</sup>Cs 555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>) и выше полностью прекращена. В настоящее время ежегодный недобор товарной

#### Полезные ископаемые в зоне загрязнения (% от промышленных запасов республики)

Пески:	
формовочные	— 47 %;
строительные и силикатные	— 19 %;
пригодные для стекольного производства	— 91%;
цементное сырье	— 16 %;
мел	— 20 %;
глины для производства кирпича	— 13 %;
тугоплавкие глины	— 40 %;
строительный камень	— 65%.

древесины составляет около 2 млн. м<sup>3</sup>, а к 2010 году, по оценкам специалистов, он достигнет 3,5 млн. м<sup>3</sup>.

В результате отселения жителей с наиболее загрязненных радионуклидами территорий деятельность многих промышленных предприятий приостановлена.

В наши дни в зоне загрязнения находится около 340 промышленных предприятий. Условия их функционирования заметно ухудшились. Предприятия несут большие потери и терпят убытки от снижения объемов производства и дополнительных расходов, связанных с необходимостью обеспечивать радиационную безопасность и получать продукцию, соответствующую действующим нормативам.

*Суммарный ущерб, нанесенный республике Чернобыльской катастрофой, белорусские экономисты оценивают в 235 млрд. долларов США, что составляет 32 годовых бюджета БССР 1985 года.*

В суммарный ущерб входят:

- ущерб, нанесенный промышленности и социальной сфере, сельскому хозяйству, строительству, транспорту и связи, жилищно-коммунальному хозяйству в результате загрязнения минерально-сырьевых, земельных, водных, лесных и других ресурсов;
- потери, связанные с ухудшением здоровья населения;
- дополнительные затраты на преодоление последствий катастрофы и обеспечение безопасных условий жизнедеятельности населения.

В течение многих лет выводы белорусских ученых и специалистов о масштабах социально-экономических последствий Чернобыльской катастрофы для республики не признавались за рубежом, в том числе в России и Украине. Только на международной конференции «15 лет Чернобыльской катастрофы. Опыт преодоления» (Киев, 18–20 апреля 2001 года) расчеты белорусских специалистов были подтверждены и признаны.

Суммарный экономический ущерб Украины оценен в 201 млрд. долларов США. Россией не проводилась оценка полного ущерба.

Загрязненные в результате радиационной катастрофы регионы оказались в сложных социально-экономических условиях. Спад производства, отток населения, особенно квалифицированных кадров, низкий уровень

социально-бытового и медицинского обслуживания делали невозможным быстрое преодоление последствий катастрофы.

Еще много лет понадобится для реабилитации пострадавших территорий, то есть восстановления их утраченного социального и экономического потенциала и создания безопасных условий для проживания и работы людей.

Размеры социально-экономического ущерба от Чернобыльской катастрофы для Беларуси и Украины несоизмеримы с экономическими возможностями этих стран, и его устранение нуждается в ближайшие десятилетия в помощи международного сообщества.

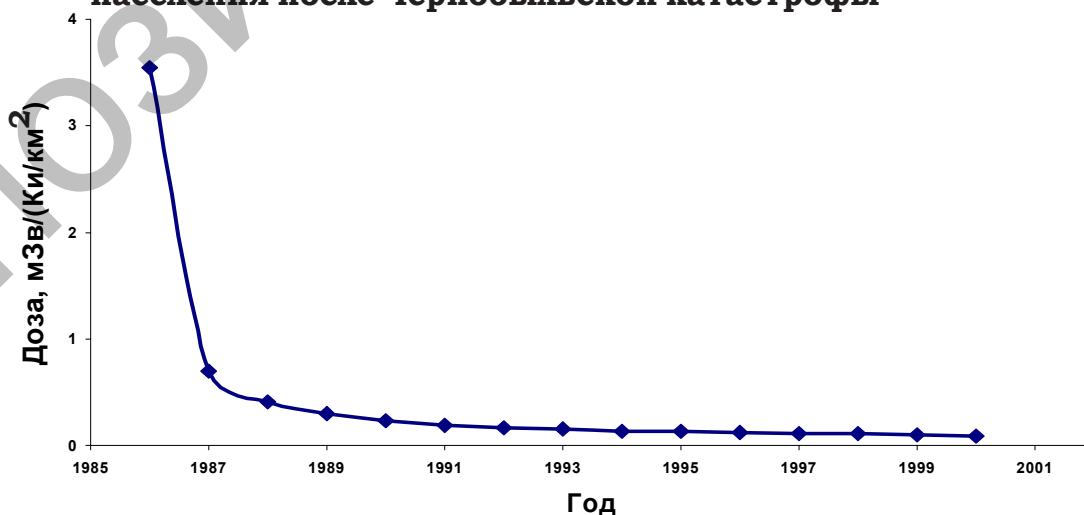
## 9.2. Дозы облучения населения

Основной вклад в дозу облучения населения за послеаварийный период внесли:

- внутреннее облучение от короткоживущих радионуклидов (прежде всего,  $^{131}\text{I}$ ), поступивших в организм человека с вдыхаемым воздухом и с загрязненными продуктами питания;
- внешнее облучение от радионуклидов, выпавших на поверхность почвы;
- внутреннее облучение от долгоживущих радионуклидов, поступавших с загрязненными продуктами питания.

$^{131}\text{I}$

**Изменение нормированной\* дозы внешнего облучения населения после Чернобыльской катастрофы**



\* Нормированная доза — это отношение средней эффективной дозы внешнего облучения населения к плотности загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$ , мЗв/(Ки/км<sup>2</sup>)

Примерно до середины июня 1986 года одним из основных источников облучения населения был  $^{131}\text{I}$ , который воздействовал, главным образом, на щитовидную железу (ЩЖ). В результате его поступления (преимущественно с молоком и листовыми овощами) были сформированы дозы внутреннего облучения щитовидной железы у большинства жителей Беларуси.

На основе имеющихся прямых измерений, выполненных в течение нескольких недель после аварии для населения наиболее загрязненных районов Гомельской и Могилевской областей, а также города Минска, были определены и внесены в специальный дозиметрический регистр индивидуальные дозы облучения щитовидной железы только для 130 тыс. человек. Из них около 39 тыс. составляли дети и подростки.

Дозы облучения практически для всего населения Беларуси удалось реконструировать методом радиоэкологического моделирования. Результаты показывают, что наибольшая численность лиц с высокими (свыше 1 Гр) дозами облучения ЩЖ приходится на младшую возрастную группу. Категория детей и подростков, составляя неполных 30 % от общей численности населения, для которого было возможным провести реконструкцию доз облучения, содержит более 97 % от всех случаев с высокими дозами облучения.

Наиболее высокие дозы были получены жителями Гомельской и Могилевской областей; при этом величины облучения детей и подростков Брестской области в целом сопоставимы по уровням с облучением, характерным для Могилевской области. Максимальные дозовые нагрузки получили дети и подростки, проживавшие в Брагинском, Хойникском, Наровлянском и Ветковском районах Гомельской области.

Уровни доз облучения ЩЖ для взрослого населения существенно ниже. При этом максимальные дозы, характерные для данной возрастной категории, были получены жителями как четырех наиболее загрязненных районов, так и более удаленных: Калинковичского, Лельчицкого, Добрушского, Речицкого, Житковичского районов Гомельской области.

Самые большие коллективные дозы облучения ЩЖ зарегистрированы у жителей Гомельской области и г. Гомеля, наименьшие — для жителей Витебской области. Суммарная коллективная доза жителей Гомельской области вместе с г. Гомелем составляет 70 % от коллективной дозы для всей Беларуси.



### Коллективные дозы облучения щитовидной железы

Регион	Коллективные дозы для детей и подростков (0–18 лет на момент аварии), чел.-Гр	Коллективные дозы для взрослых (19 лет и старше на момент аварии), чел.-Гр	Суммарные коллективные дозы жителей Беларуси, чел.-Гр
Брестская обл.	21 129	24 042	45 171
Витебская обл.	1 164	1 560	2 724
г. Гомель	36 998	38 236	75 234
Гомельская обл.	112 812	171 939	284 751
Гродненская обл.	3 329	4 453	7 782
г. Минск	15 063	19 244	34 307
Минская обл.	6 404	8 121	14 525
Могилевская обл.	22 328	27 694	50 022

Наиболее облученной когортой среди всех жителей Беларуси, подвергшихся аварийному облучению, являются участники ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС (ликвидаторы, аварийные рабочие).

В соответствии с законодательством к ликвидаторам относятся граждане, принимавшие участие в работах в 1986–1989 годах в пределах зоны эвакуации (отчуждения), а также работавшие в 1986–1987 годах в зонах первоочередного и последующего отселения. Министерством здравоохранения СССР были установлены следующие предельно-допустимые дозы аварийного облучения для ликвидаторов: 1986 год — 250 мЗв (до 21 мая для военнослужащих — 500 мЗв), 1987 год — 100 мЗв, 1988 и 1989 годы — по 50 мЗв.

К сожалению, индивидуальный дозиметрический контроль был налажен неудовлетворительно. Только начиная с июля 1986 года такой контроль, с использованием термолюминесцентных либо пленочных дозиметров, стали проводить для всех гражданских работников. В этой связи надежные результаты измерения доз внешнего облучения имеются для ограниченной части ликвидаторов.

По состоянию на начало 1996 года в Беларуси статус ликвидаторов имели 113 тыс. человек, из них 91 тыс. человек была внесена в Чернобыльский регистр. Анализ данных регистра показал, что официальные записи о дозах облучения колеблются в широком

Дозы облучения ликвидаторов и эвакуированного населения

диапазоне. Максимальные дозы внешнего облучения получили ликвидаторы 1986 года — средняя доза составила 60 мГр.

### Распределение доз, полученных белорусскими ликвидаторами

Годы работ	Количество ликвидаторов	Процент лиц с известной дозой	Средняя доза внешнего облучения*, мГр
1986	68 000	8	60
1987	17 000	12	28
1988	4 000	20	20
1989	2 000	16	20
1986–1989	91 000	9	46

\* Для удобства внешняя доза выражается в мГр.

Большинство ликвидаторов 1986–1987 годов получило дозы не более 100 мГр (80 % в 1986 году и 96 % в 1987 году). Подавляющее число белорусских ликвидаторов не принимало участия в работах на самой Чернобыльской АЭС и в пределах промплощадки, поэтому средние дозы облучения оказались ниже, чем у ликвидаторов России и Украины.

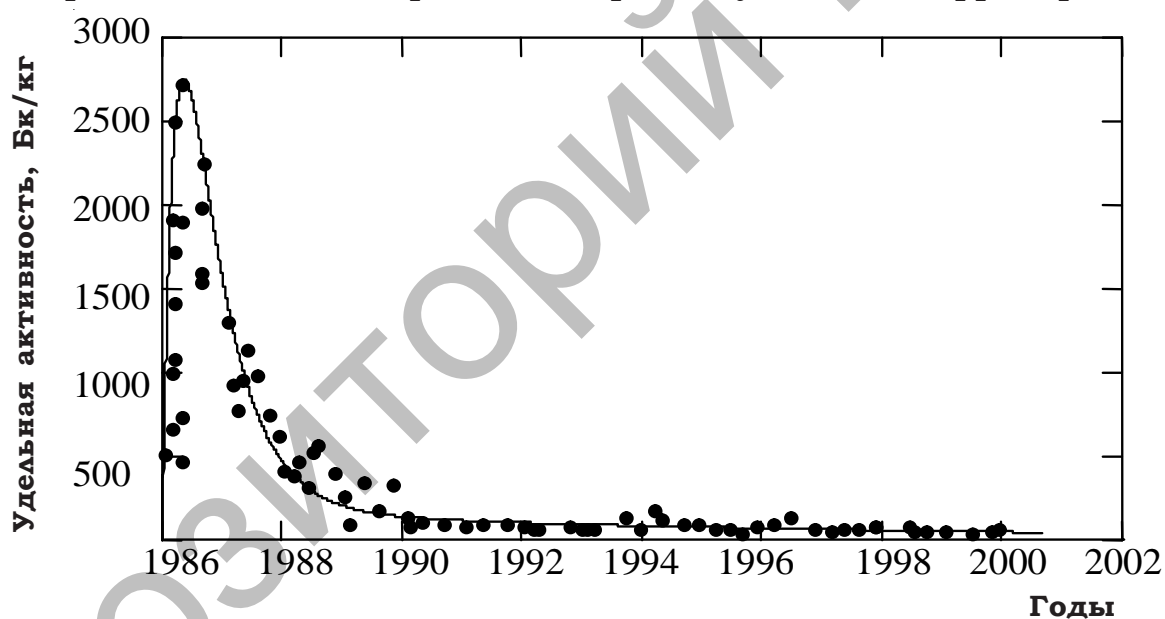
Для когорты эвакуированного населения численностью 23 892 человека выполнены оценки доз облучения щитовидной железы. Коллективная доза для них составила 15 686 чел.-Гр. Максимальные индивидуальные дозы внешнего облучения, превышающие 0,4 Зв, были получены менее чем одним процентом эвакуированных жителей Беларуси. Дозы облучения, полученные эвакуированным населением, зависели от даты эвакуации.

### Средние дозы облучения эвакуированного населения в зависимости от времени эвакуации в 1986 году

Этап эвакуации	Поглощенная доза облучения щитовидной железы от <sup>131</sup> I, Гр	Эффективная доза	
		внутреннего облучения от <sup>137</sup> Cs, мЗв	внешнего облучения, мЗв
2–7 мая	1,33	2,1	31,2
3–10 июня	1,04	1,6	15,9
Август–сентябрь	0,66	0,9	20,3

Отдаленный после аварии период времени, начиная с 1992 года и далее, характеризуется постепенным сокращением объема контрмер и замедлением процессов естественного очищения пищевых продуктов от радионуклидов. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в сельскохозяйственной продукции после 1991–1992 годов снижалась с периодом полууменьшения 10–20 лет. В то же время, содержание  $^{137}\text{Cs}$  в организме жителей в этот период времени статистически достоверно не изменялось, а в ряде населенных пунктов даже был отмечен его рост. Это объясняется постепенным снижением, а в ряде случаев — и практически полным сворачиванием контрмер, а также возвратом населения к употреблению пищевых продуктов лесного происхождения и из личных подсобных хозяйств.

**Изменение содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме жителей Беларуси, проживающих на загрязненных радионуклидами территориях**



В этот период времени в формировании дозы внутреннего облучения населения существенно возросла роль природных пищевых продуктов. В настоящее время их вклад в дозу внутреннего облучения в некоторых населенных пунктах может достигать 70–80%. В первую очередь, это обусловлено практически не изменяющимися с момента радиоактивных выпадений или слабо меняющимися со временем уровнями содержания  $^{137}\text{Cs}$  в лесных грибах. Именно грибы, как правило, составляют наиболее значимую в радиологическом отношении часть природного компонента пищевого рациона населения большинства пострадавших регионов.

Начиная с лета 1986 года и по настоящее время, доза внутреннего облучения формируется, главным образом, за счет поступления  $^{137}\text{Cs}$  в организм жителей с пищевыми продуктами. Вклад  $^{90}\text{Sr}$  в дозу внутреннего облучения населения невелик — единицы процентов, однако его относительный вклад в прогнозируемую дозу будет возрастать. Вклад в дозу внутреннего облучения, обусловленный ингаляционным поступлением радионуклидов плутония и америция, составляет доли процента.

По состоянию на начало 2004 года в Беларуси на территории, загрязненной радионуклидами, было расположено 2646 населенных пунктов с населением около 1,34 млн. человек, причем на долю Гомельской и Могилевской областей приходится 86 % этого населения. Число населенных пунктов, где среднегодовая эффективная доза превышает 1 мЗв, составляло 12, в них проживало около 1000 жителей. Средняя доза в девяти из них составляла около 1,2 мЗв, а в трех остальных — около 2,5 мЗв. Данные населенные пункты расположены на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  выше 555 кБк/м<sup>2</sup>. К дополнительным факторам формирования доз облучения в этих населенных пунктах можно отнести близость «зон отчуждения», служащей поставщиком загрязненных натуральных продуктов и фуража для скота. Особенностью этих населенных пунктов является малочисленность жителей: в 10 из них проживает от 4 до 50 человек, причем преобладают люди пожилого возраста.

Вместе с тем, число деревень, где среднегодовая эффективная доза близка к годовому пределу дозы или превышает его, составляет 158 (в основном, в Гомельской и Могилевской областях), а число жителей с превышением дозы 1 мЗв составляет около 2000 человек. Максимальные зарегистрированные величины содержания  $^{137}\text{Cs}$  в организме соответствуют дозам внутреннего облучения 10–20 мЗв/год. Такие населенные пункты располагаются на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ , начиная с 300 Бк/м<sup>2</sup>, и их можно рассматривать как «критические».

Годовая коллективная доза для жителей территории радиоактивного загрязнения составляет около 210 чел.-Зв, средняя индивидуальная — 0,15 мЗв. Для населения Беларуси в целом основные дозы облучения были сформированы в течение первых 10 лет после

аварии. Сравнивая два временных послеварийных периода (1986–1995 годы и 1986–2005 годы), можно отметить, что с течением времени ежегодный вклад в накопленную дозу постоянно сокращался.

**Коллективные накопленные эффективные дозы облучения за два временных этапа: 1986–1995 годы и 1986–2005 годы (для территорий с плотностью выпадения  $^{137}\text{Cs}$  в 1986 году свыше 37 кБк/м<sup>2</sup>; за исключением доз облучения щитовидной железы)**

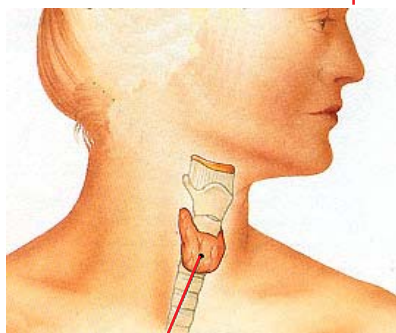
Период	Коллективная эффективная доза, чел.-Зв		
	внешняя	внутренняя	суммарная
1986–1995	9 636	5 504	15 140
1986–2005	11 900	6 800	18 700

Так, за последний десятилетний период коллективная накопленная эффективная доза выросла всего на 23 % по отношению к накопленной за первые десять лет после аварии, при этом ежегодный усредненный прирост составил менее 2,5 %.

### 9.3. Здоровье населения

Последствия катастрофы на ЧАЭС являются предметом пристального внимания медицинской общественности всего мира. Связанное с чернобыльской катастрофой радиационное воздействие на население республики не имеет аналогов ни по своему характеру, ни по масштабам. В соответствии с законодательством Беларуси пострадавшими были признаны около двух миллионов человек, проживающих на территориях с плотностью загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  более 37 кБк/м<sup>2</sup>.

В мировой практике к *радиационно-индуцированным*, то есть вызванным радиацией, заболеваниям принято относить *онкологические заболевания*, лучевую болезнь и лучевую катаракту. В последнее время в отечественных и зарубежных научных публикациях стали появляться результаты, ставящие вопрос о возможности влияния радиационного воздействия на частоту неонкологических заболеваний.

Щитовидная железа  
человека

К моменту катастрофы на Чернобыльской АЭС известные медицинские данные о воздействии радиации на живые организмы касались в основном действия излучения в течение короткого промежутка времени при больших и средних дозах облучения. Такая ситуация имела место в начальный период аварии, прежде всего для участников ликвидации последствий аварии («ликвидаторов») и эвакуируемого населения. В этот период достаточно высокие дозы в результате воздействия радиоактивного  $^{131}\text{I}$  (см. раздел 8.3), которое специалистами расценивается как «йодный удар», получило практически все население республики. В результате медицинская наука ожидала рост заболеваний раком щитовидной железы. Риск заболевания детей раком щитовидной железы для России, Украины и Белоруссии был оценен в 716 случаев, в том числе для Беларуси — 92. Реальность значительно превзошла ожидания.

За период с 1986 по 2004 год среди *детей и подростков*, облученных в возрасте до 18 лет, выявлено 2430 случаев рака щитовидной железы, 2399 из них диагностировано с 1990 года.

До катастрофы на ЧАЭС у *взрослого населения* Беларуси заболевание раком щитовидной железы встречалось относительно редко. За 10-летний период до чернобыльской аварии было зарегистрировано 557 случаев у лиц в возрасте от 19 до 50 лет. С 1992 года началось стремительное увеличение заболеваемости. За период с 1986 по 2004 год заболеваемость взрослого населения увеличилась более чем в 6 раз — с 1,9 случаев на 100 тыс. населения в 1986 году до 12,7 случаев на 100 тыс. населения в 2004 году. Только за 2002 год для облученных в различном возрасте было зарегистрировано 1 055 новых случаев. Прогнозируется, что в период до 2036 года возможно развитие около 15 тысяч случаев радиационно-индуцированного заболевания раком щитовидной железы.

Важно отметить, что в результате раннего обнаружения и своевременного медицинского вмешательства возможные летальные исходы при возникновении рака щитовидной железы удалось свести к минимуму. Разработанные и внедренные нашими медиками методы ранней диагностики, комплексного лечения и реабилитации больных раком щитовидной железы позволили довести уровень смертности этих больных до 1 % при среднем уровне в развитых странах 10 %.

Другим последствием аварийного облучения предполагался рост заболеваемости лейкозами. Исследования показывают, что в период с 1993 по 2003 год у детей, проживающих в загрязненных радионуклидами районах Гомельской и Могилевской областей, не отмечено роста заболеваемости лейкозами, а также болезнью Ходжкина и неходжкинскими лимфомами по сравнению с доаварийным периодом. В этот же период не отмечено и роста заболеваемости острыми формами лейкоза как у взрослых жителей Гомельской и Могилевской областей в целом, так и среди населения, проживающего в наиболее загрязненных радионуклидами районах. Однако в этих районах отмечается рост заболеваемости всеми формами хронических лейкозов для населения в целом и выявлен достоверный рост заболеваемости неходжкинскими лимфомами.

К настоящему моменту мировая медицинская общественность признала единственно доказанным радиационно-индуцированный характер избыточной заболеваемости раком щитовидной железы у людей, облученных от радионуклидов йода в детском и подростковом возрасте. Проведенными до настоящего времени исследованиями не удалось напрямую связать увеличение частоты других, помимо щитовидной железы, локализаций злокачественных новообразований с действием аварийного облучения. При этом нужно учитывать небольшое время, прошедшее с момента окончания минимального латентного периода, продолжительность которого теоретически оценивается примерно в 15 лет.

В некоторых работах отмечалось статистически значимое превышение заболеваемости раком молочной железы среди женщин, проживающих на загрязненных радионуклидами территориях. Однако результаты этих работ нуждаются в уточнении.

Во всей республике количество зарегистрированных врожденных пороков развития строгого учета увеличилось примерно в 2 раза по сравнению с доаварийным периодом. Однако статистически достоверного превышения частот врожденных пороков развития в пострадавших в результате аварии на ЧАЭС регионах не наблюдается.

Один из нерешенных мировой медицинской наукой вопросов состоит в том, что для всех категорий пострадавшего от катастрофы на ЧАЭС населения наблюдается рост заболеваемости неонкологической природы,

прежде всего аутоиммунным тиреоидитом, катарактой, болезнями системы кровообращения, психоневрологическими расстройствами, которые (за исключением катаракты) по существующим представлениям не относятся к радиационно-обусловленным.

Большинство ученых считает причиной роста общей заболеваемости сочетанное воздействие радиации с целым комплексом факторов. В их числе: действовавшие и до аварии неблагоприятные факторы природного и антропогенного характера, психологические потрясения как в связи с аварией, так и вследствие социально-экономических катаклизмов (распад СССР, ухудшение уровня жизни). При этом радиация могла явиться и доминирующим действующим началом, а могла и сыграть роль своеобразного спускового механизма для негативного действия остальных факторов.

В этой связи повышенный интерес представляет состояние здоровья ликвидаторов. Действительно, с одной стороны, большинство ликвидаторов были молодыми, здоровыми людьми: их средний возраст на момент аварии составлял немногим более тридцати лет. С другой стороны, именно ликвидаторы подверглись наибольшему радиационному воздействию в результате аварии на ЧАЭС.

Особенно необходимо подчеркнуть достоверное превышение уровня заболеваемости катарактой, болезнями, характеризующимися повышенным кровяным давлением, ишемической болезнью сердца, в том числе острым инфарктом миокарда и цереброваскулярными болезнями мужчин.

Все эти вопросы активно обсуждаются мировым научным сообществом в многочисленных публикациях и на конференциях, крупнейшая из которых прошла в 2006 году в Беларуси и была приурочена к 20-летию чернобыльской аварии. В соответствии с выводами конференции на первоочередное решение этих вопросов должна быть направлена работа белорусских ученых-медиков.

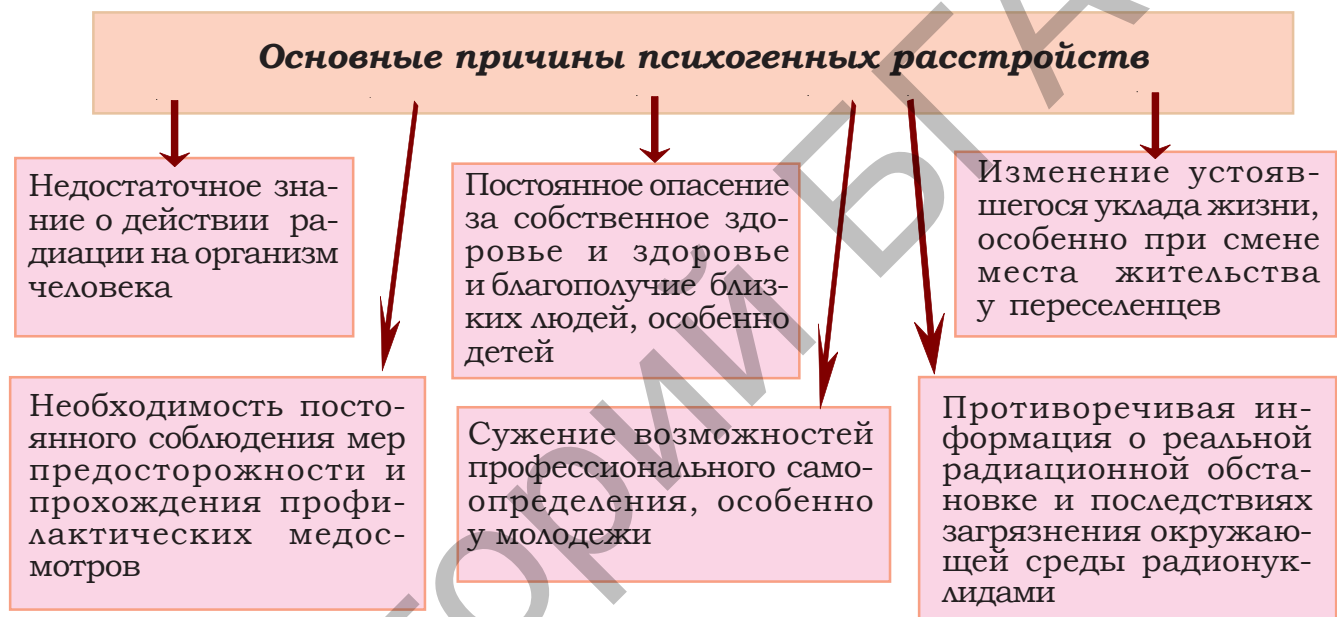
Подводя итоги, можно сказать, что катастрофического ухудшения здоровья граждан в результате чернобыльской аварии, к счастью, не произошло. Во многом — это результат проводимой в стране диспансеризации, которая способствовала стабилизации заболеваемости, а по некоторым классам и формам болезней — к ее достоверному снижению. При этом показатели смертности в когортах пострадавшего населения достоверно ниже, чем среди контрольной группы, не подвергшейся аварийному облучению.

Сердечно-сосудистые заболевания



### 9.4. Социально-психологические последствия

Результаты медицинского обследования показали, что под влиянием Чернобыльской катастрофы у значительной части пострадавшего населения изменилось эмоциональное состояние. Известно, что накопление отрицательных эмоций ведет к истощению нервно-психических механизмов защиты и нарушениям адаптационных систем организма, отвечающих за способность приспосабливаться к новым условиям.



Как результат, у некоторых представителей пострадавшего населения отмечается:

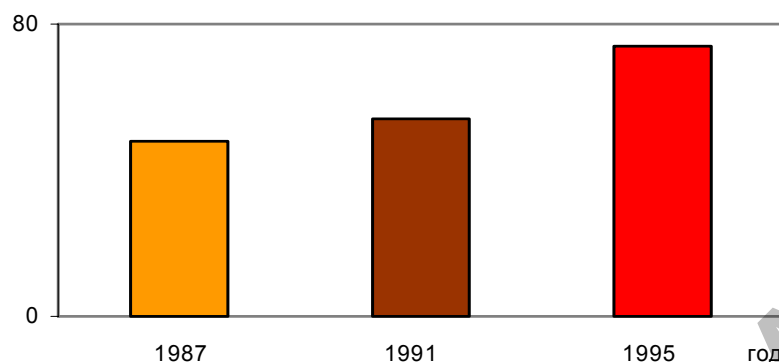
- снижение уровня психической адаптации,
- чувство неуверенности в себе,
- неустойчивая самооценка,
- пессимистическая оценка будущего.

Почти у двух третей обследованного населения наблюдалось чувство утраты личной безопасности, что само по себе является свидетельством глубочайшей социально-психологической травмы.

Подобное состояние можно охарактеризовать как *социально-радиоэкологический стресс*. Ситуация еще больше обостряется по мере накопления у человека отрицательных эмоций. Как показали наблюдения, в первые годы число людей, подверженных такой разновидности стресса, со временем увеличивалось.

Социально-радио-  
экологический  
стресс

**Количество людей, подверженных стрессу  
(% от обследованного населения в пострадавших  
районах Беларуси)**



Адаптационные нарушения

Массовый социально-радиоэкологический стресс порождает несколько видов *адаптационных нарушений (синдромов)*:

- *повышенные тревожные ожидания*, ведущие к болезни («бегство в болезнь»);
- *социально-психологическая апатия* (безразличие, нежелание что-либо изменять в своей жизни);
- *сосредоточенность на неприятных переживаниях* (крайнее проявление — постоянное ощущение безысходности).

Демографическая ситуация

Чернобыльская катастрофа и ее последствия совпали по времени с кризисными явлениями в жизни общества. Сочетание этих факторов стало причиной негативной *демографической ситуации* в Беларуси. Низкая рождаемость и рост смертности привели к снижению численности населения республики. Начиная с 1994 года, абсолютная численность населения Беларуси снижалась и к 2004 году она сократилась почти на 300 тысяч человек (примерно на 3 %).

На пострадавших территориях картина еще более драматична. Число умерших в загрязненных районах в два раза и более превышает число родившихся. Например, в Гомельской области снижение численности населения отмечается с 1987 года. В 2004 году число жителей сократилось на 150,6 тыс. человек, то есть на 9 % по сравнению с 1987 годом. В Могилевской области абсолютная численность населения стала убывать с 1990 года и к 2004 году снизилась на 88,1 тыс. человек, то есть на 7 % по сравнению с 1987 годом.

Около 138 тыс. человек было переселено в ходе организованной эвакуации и не менее 200 тыс. человек самостоятельно покинули загрязненные районы.

При этом активнее всего уезжала из загрязненных районов молодежь, интеллигенция и квалифицированные специалисты. В настоящее время в некоторых наиболее пострадавших районах республики около 70 % населения составляют пенсионеры, что почти в три раза больше, чем в целом по республике.



Итак,

Значительный экономический ущерб, радиационные, медицинские, социально-демографические и другие изменения составляют негативные последствия Чернобыльской катастрофы.

Загрязненные чернобыльскими радионуклидами регионы Беларуси оказались в сложных социально-экономических условиях. Больше всего пострадало *сельское хозяйство*. Сократились посевные площади и производство сельскохозяйственных культур, уменьшилось поголовье скота.

Стали меньше использоваться местные *минерально-сырьевые ресурсы*. Значительны потери в промышленном производстве.

В результате катастрофы часть населения Беларуси получила значительные дозы облучения. В первые недели после катастрофы наиболее ощутимый вклад в облучение людей внесли изотопы йода (в основном,  $^{131}\text{I}$ ), впоследствии — радиоактивные изотопы цезия ( $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ).

В настоящее время радиационное воздействие на жителей республики более чем на 90 % обусловлено  $^{137}\text{Cs}$ . Вклад *радиоактивного стронция* в суммарную дозу облучения людей составляет 1–4 %, а *трансурановых элементов* — 0,1–1 %.

После Чернобыльской катастрофы возникло множество серьезных медицинских и психологических проблем. Действие неблагоприятных факторов катастрофы может вызывать изменения в функционировании органов и систем организма человека. Особое беспокойство вызывает рост заболеваемости раком щитовидной железы у облученных в детском и подростковом возрасте.

Необходимо длительное время для восстановления утраченного социального и экономического потенциала пострадавших территорий и создания безопасных условий для проживания и работы людей.

Рассмотрение последствий Чернобыльской катастрофы позволяет лучше понять и оценить масштабы произошедшего события. Анализ последствий помогает также разобраться в том, что нужно сделать, чтобы решить те сложнейшие проблемы, которые возникли в результате крупномасштабного загрязнения окружающей среды техногенными радионуклидами.

Накопленный опыт по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы имеет огромную ценность для всего мирового сообщества. Он помогает человечеству уменьшить вероятность подобных событий и быть готовым к решению проблем, которые могут возникнуть, если крупная радиационная авария где-нибудь произойдет в будущем.

Несмотря на ограниченные возможности, государство прилагает огромные усилия, чтобы преодолеть негативные последствия Чернобыльской катастрофы. С мерами, которые предпринимаются в этом направлении, Вы познакомитесь в следующей главе.

### Вопросы для самоконтроля и обсуждения:

1. Какие радионуклиды в настоящее время определяют облучение населения в загрязненных радионуклидами районах?
2. Какой ущерб нанесла Чернобыльская катастрофа нашей республике?
3. Какая опасность для здоровья населения связана с поступлением радиоактивного йода в организм человека в первые месяцы после Чернобыльской катастрофы?
4. Как влияет психоэмоциональное состояние человека на состояние его здоровья после Чернобыльской катастрофы?
5. При какой среднегодовой эффективной дозе облучения проживание и трудовая деятельность на территории Республики Беларусь не требуют каких-либо ограничений?
6. Как менялись во времени после Чернобыльской катастрофы дозы облучения населения, обусловленные радиоактивным цезием?



**Ключевые слова и словосочетания:** Чернобыльская катастрофа, преодоление последствий, государственная политика, защита населения, снижение доз облучения

*Преодоление последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС до сих пор является одной из важнейших задач государственной политики Республики Беларусь. Кроме организации эвакуации населения из зоны с высоким уровнем загрязнения радионуклидами чернобыльского выброса и работ по ликвидации последствий катастрофы непосредственно в районе ЧАЭС, была проведена огромная работа по радиационной и социальной защите населения, пострадавшего от катастрофы на Чернобыльской АЭС. Проведены мероприятия по дезактивации населенных пунктов, приняты законы и документы, позволяющие компенсировать материальный ущерб пострадавшим и регулировать любой вид деятельности на загрязненной радионуклидами территории. Осуществляются меры по снижению доз облучения, по повышению уровня медицинского обслуживания и оздоровлению жителей загрязненных районов, по улучшению условий их жизни.*

Изучив главу...



Вы познакомитесь с законами и документами, которые составили основу для проведения мероприятий по радиационной защите населения и природной среды после Чернобыльской катастрофы. Вы узнаете, что было практически сделано, чтобы уменьшить дозы облучения жителей пострадавших регионов и предотвратить распространение выпавших радионуклидов за пределы загрязненных территорий. Вы также познакомитесь с приемами, позволяющими снизить содержание радионуклидов в сельскохозяйственной продукции, узнаете, как нужно организовать питание, чтобы уменьшить радиационный риск и укрепить собственное здоровье.

### 10.1. Что делает государство, чтобы преодолеть последствия катастрофы и защитить пострадавшее население

Чтобы организовать и координировать мероприятия по ликвидации последствий радиационной катастрофы, в 1986 году была создана специальная Правительственная комиссия при Совете Министров СССР. В первые годы после катастрофы решение всех проблем, связанных с устранением последствий крупного выброса радионуклидов в окружающую среду, осуществлялось под руководством этой Правительственной комиссии и Министерства здравоохранения СССР.

В первую очередь, была проведена оценка радиационной обстановки и эвакуация населения из зоны с наиболее высоким уровнем загрязнения, организованы работы по ликвидации последствий катастрофы непосредственно в районе Чернобыльской АЭС. В этих работах участвовали десятки тысяч человек из всех союзных республик, в том числе из Белорусской ССР.

Мероприятия

Были проведены и другие мероприятия и, в частности, широкомасштабная дезактивация загрязненных радионуклидами населенных пунктов силами инженерных войск и гражданской обороны. Только за пределами 30-км зоны ЧАЭС было дезактивировано около 500 населенных пунктов, из них более половины подвергались дезактивации дважды и трижды.

Чтобы уменьшить облучение людей, уже в 1986 году Национальной Комиссией по Радиационной защите (НКРЗ) СССР были введены:

- временные допустимые уровни содержания йода в питьевой воде и других продуктах питания;
- предельные дозы облучения населения;
- допустимые уровни загрязнения радионуклидами помещений, транспортных средств, одежды, кожных покровов.

По мере изменения и уточнения радиационной обстановки эти нормативные величины неоднократно пересматривались и корректировались. Разрабатывались и другие документы, которые определяли порядок проведения защитных мероприятий. С 5 мая по 9 декабря 1986 года Правительством республики было разработано и утверждено 32 нормативных документа, необходимых для осуществления мер по ликвидации последствий

Чернобыльской катастрофы и социальной защите населения.

Многие решения Правительства касались обустройства переселенцев на новых местах, компенсационных выплат пострадавшим гражданам и улучшения их материального положения, организации отдыха и оздоровления детей, подростков и беременных женщин.

Уже в первые годы после катастрофы, несмотря на десятки постановлений и распоряжений, которые были приняты Советом Министров БССР по вопросам, связанным с ликвидацией ее последствий, стало ясно, что без четкой государственной политики и специального законодательства невозможно решить весь комплекс возникших проблем.

### Обследование территории



## Государственные Программы

22 марта 1989 года ЦК КПБ и Совет Министров БССР приняли постановление о разработке *Государственной программы* преодоления в Белорусской ССР последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 1990–1995 годы и до 2000 года. Программа была разработана и в июле 1989 года одобрена XI сессией Верховного Совета БССР, а в октябре 1989 года окончательно принята на XII сессии Верховного Совета БССР.

В Программе намечалось:

- *осуществить* комплекс мер, чтобы максимально снизить дозы облучения населения от чернобыльских радионуклидов;
- *обеспечить* сохранность здоровья людей за счет медицинской профилактики, оздоровления, социального обеспечения и отселения из населенных пунктов, в которых не гарантировано безопасное проживание;
- *создать* безопасные для здоровья людей условия жизни в районах, которые подверглись загрязнению чернобыльскими радионуклидами;
- *повысить* качество жизни населения в загрязненных радионуклидами районах;
- *провести* научные исследования по проблемам, связанным с радиационным воздействием на человека и окружающую среду и т. д.

В апреле 1990 года Верховным Советом СССР была утверждена *Государственная союзно-республиканская программа* неотложных мер по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС. Однако после распада Советского Союза Республике Беларусь самой пришлось решать все чернобыльские проблемы на своей территории.

28 июля 1992 года Президиум Совета Министров нового государства — Республики Беларусь одобрил *Государственную программу* по преодолению в стране последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 1993–1995 годы и на период до 2000 года.

*В настоящее время выполняется Государственная программа по преодолению последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС на 2006–2010 годы.*

Чернобыльские проблемы по-прежнему остаются общегосударственными, и их решению Правительство и Президент Республики Беларусь уделяют значительное внимание.

В 1991 году в республике был образован *Государственный комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС*, который в 1994 году был преобразован в Министерство по чрезвычайным ситуациям и защите населения от последствий катастрофы на ЧАЭС.

В настоящее время координацию и контроль деятельности министерств и организаций, которые реализуют государственную политику в области преодоления последствий катастрофы и защиты населения, осуществляет *Департамент по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС* Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Чтобы решать проблемы, возникшие после радиационной катастрофы, понадобилось разработать и принять законы, которые на государственном уровне обеспечивали социальную защиту пострадавших и регулировали различные виды деятельности на загрязненных территориях.

В 1991 году Верховный Совет Республики Беларусь принял законы «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС» и «О правовом режиме территорий, подвергшихся загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС».

*Закон «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС»*

Этот закон защищает права и интересы граждан, которые:

- принимали участие в ликвидации последствий катастрофы;
- отселены и выехали на новое место жительства с территорий, загрязненных радионуклидами;
- проживают в настоящее время на территориях, загрязненных радионуклидами;
- участвовали в ликвидации или пострадали от аварий и их последствий на других гражданских или военных ядерных объектах;
- пострадали в результате испытаний, учений и других работ, связанных с ядерными установками, включая ядерное оружие.

*Закон «О правовом режиме территорий, подвергшихся загрязнению в результате катастрофы на Чернобыльской АЭС»*

*Территория Республики Беларусь, загрязненная радионуклидами, — это часть территории республики, на которой в результате катастрофы на ЧАЭС возникло долговременное загрязнение окружающей среды любым из следующих радионуклидов с плотностью загрязнения почв, превышающей*

по  $^{137}\text{Cs}$  — 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>);  
 по  $^{90}\text{Sr}$  — 5,55 кБк/м<sup>2</sup> (0,15 Ки/км<sup>2</sup>);  
 по изотопам  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  — 0,37 кБк/м<sup>2</sup> (0,01 Ки/км<sup>2</sup>) в сумме

Последняя редакция этого закона принята 24 июля 2002 года.

Закон регулирует

- режим территорий, загрязненных радионуклидами;
- условия
  - проживания,
  - осуществления любого вида деятельности на этих территориях (хозяйственной, научно-исследовательской и др.).



Этот закон направлен на:

- снижение радиационного воздействия на население и окружающую среду;
- проведение мероприятий, защищающих природу и способствующих восстановлению природных экосистем;
- рациональное использование природного, хозяйственного и научного потенциала территорий, загрязненных радионуклидами.

В 1998 году Национальным собранием Республики Беларусь был принят закон «О радиационной безопасности населения».

### Закон «О радиационной безопасности населения»

В этом законе

- дается современное определение понятия «радиационная авария» и других понятий, используемых в радиационной безопасности;
- излагаются принципы, лежащие в основе практического обеспечения радиационной безопасности;
- указывается, какие конкретные мероприятия обеспечивают радиационную безопасность на территории Республики Беларусь.

*Радиационная авария — это потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью, повреждением оборудования, неправильными действиями персонала, стихийными бедствиями, иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей или загрязнению окружающей среды радионуклидами сверх установленных норм.*

Закон предусматривает переход в Республике Беларусь от устаревших радиационных норм к нормам, которые учитывают накопленные знания и опыт мирового сообщества и соответствуют международным стандартам.

В разные годы затраты на Программы по преодолению последствий Чернобыльской катастрофы составляли значительную часть республиканского бюджета — от 17 до 5 %. К сожалению, возможности страны не позволяют в полной мере финансировать необходимые меры, чтобы преодолеть нанесенный катастрофой ущерб. Тем не менее, благодаря усилиям органов государственного управления, законодательных органов, научных организаций и других учреждений, где работают специалисты самого разного профиля, удалось решить ряд важнейших проблем.

Бюджетные  
затраты

**1. Создана нормативно-правовая база практически по всем направлениям преодоления последствий катастрофы**

Основные нормативные документы в области радиационной безопасности и защиты населения

Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99)

Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000)

Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСП-2002)

Каталог средних годовых эффективных доз облучения жителей населенных пунктов РБ (2004 год)

Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в сельскохозяйственном сырье

Регламент лесохозяйственной деятельности на загрязненных территориях

Республиканские допустимые уровни содержания <sup>137</sup>Cs в древесине, продукции из древесины и прочей непищевой продукции лесного хозяйства

Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия и стронция в основных видах кормов

**2. Благодаря защитным мерам в сельском хозяйстве значительно снижен уровень загрязнения радионуклидами сельскохозяйственной продукции**

**3. Создана надежная система радиационного контроля**

- Разработаны высокочувствительные приборы для контроля содержания радионуклидов в производимой продукции, питьевой воде и т. д.;
- созданы предприятия по их производству.

Произведены:

- гамма- и бета-радиометры (более 4 000);
- дозиметры гамма-излучения;
- гамма- и бета-спектрометры.

Выпуск приборов помог решить проблемы радиационного контроля

В системе Министерства сельского хозяйства и продовольствия

Ежегодно анализируют свыше 11 млн. проб сельскохозяйственной продукции

В учреждениях здравоохранения

- определяют содержание радиоактивного цезия в организме человека с помощью более 100 счетчиков излучения человека (СИЧ);
- ежегодно контролируют около 200 тыс. проб продуктов питания с помощью более 2 тыс. радиометрических и спектрометрических установок.

#### 4. Действует система социальной защиты населения, пострадавшего от катастрофы на ЧАЭС

Согласно Закону «О социальной защите граждан, пострадавших от катастрофы на ЧАЭС», *пострадавшими от катастрофы на Чернобыльской АЭС* официально признаны:

- участники ликвидации последствий катастрофы,
- потерпевшие от нее.

Участниками ликвидации последствий катастрофы на ЧАЭС являются граждане:

- принимавшие в 1986–1989 годах участие в работах по ликвидации последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС в пределах зоны эвакуации (отчуждения);
- занятые в 1986–1989 годах на эксплуатации или других работах на Чернобыльской АЭС (в том числе, временно направленные или командированные);
- принимавшие в 1986–1987 годах участие в работах по дезактивации, строительству, жизнеобеспечению населения в зонах первоочередного и последующего отселения.

К населению, *потерпевшему* от катастрофы на ЧАЭС, относятся граждане (включая детей во внутриутробном состоянии), которые

- проживают (проживали) на территориях, загрязненных радионуклидами;
- работают (работали) на территориях, загрязненных радионуклидами, в том числе и те, которые были заняты на эксплуатации или других работах на ЧАЭС в 1986–1989 годах;
- дети и подростки, у которых обнаружены заболевания кроветворных органов (острые лейкозы), щитовидной железы (аденома, рак) и злокачественные опухоли.

Ежегодно на социальную защиту пострадавшего населения используется более 50 % средств, выделяемых из бюджета страны на преодоление последствий катастрофы. В наибольшей мере социальными льготами пользуются те, кто стали инвалидами в результате катастрофы (около 11 тыс. человек).

Ежегодно 200–250 тыс. человек (в основном дети) получают бесплатное санаторно-курортное лечение.

Пострадавшие от катастрофы на ЧАЭС

Потерпевшее население

Социальная защита населения

Ощутимой социальной поддержкой является бесплатное питание детей, проживающих на пострадавших территориях. Его получают свыше 200 тыс. учащихся.

За 20 лет, прошедших после Чернобыльской катастрофы, из 470 населенных пунктов, расположенных в загрязненных районах, отселено 138 тыс. человек. За эти годы для переселенных граждан построено свыше 66 тыс. квартир и домов приусадебного типа. Фактически, в сельской местности было построено 239 поселков с необходимой инфраструктурой и предприятиями сервиса.

Построены новые школы (на 45,7 тыс. мест), дошкольные учреждения (на 18,5 тыс. мест), больницы (на 4,6 тыс. коек) и т. д.

Чтобы обеспечить население, проживающее в загрязненных радионуклидами районах, чистым топливом и водой, в республике проложено более 2 000 км газопроводов и около 1 900 км водопроводов. Построено 22 тыс. км автомобильных дорог с твердым покрытием, проведено благоустройство населенных пунктов, животноводческих ферм, механизированных дворов и других объектов. В ближайшей перспективе в пострадавших районах запланировано газифицировать около 80 тыс. домов.

### **5. Осуществляется комплекс мер по повышению уровня медицинского обслуживания населения в загрязненных радионуклидами районах**

Проводится постоянное наблюдение за состоянием здоровья населения. Ежегодно около 1,5 млн. человек проходят специальное медицинское обследование.

В 2003 году в Гомеле начал работать построенный под патронажем Президента Республики Беларусь Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека.

## **10.2. Защитные мероприятия**

Никогда ранее ни в одной стране мира не проводили мероприятия по защите окружающей среды и сельскохозяйственных комплексов от последствий загрязнения техногенными радионуклидами в таких масштабах, как после Чернобыльской катастрофы. Поэтому никто из специалистов не обладал опытом проведения подобных работ.

На первый взгляд, одним из самых надежных способов очистки территории является полное удаление загрязненного радионуклидами грунта, растительности, строений и других объектов. Однако вряд ли целесообразно проводить такое мероприятие из-за:

- многообразия объектов, подлежащих дезактивации,
- огромных трудозатрат,
- возникающих трудностей при ведении сельскохозяйственного производства после удаления плодородного слоя почвы.

На практике применяли несколько иную стратегию. В период с 1986 по 1989 год осуществляли *широкомасштабную дезактивацию* (очистку территории от выпавших радионуклидов) только в пределах наиболее пострадавших населенных пунктов. Загрязненный радионуклидами верхний слой почвы срезали и удаляли, затем очищенные участки засыпали чистым грунтом.

Радиоактивные вещества с поверхности загрязненных зданий, оборудования, транспорта и т. д. смывали специальными дезактивирующими растворами. Нередко для предотвращения переноса радиоактивных веществ загрязненные поверхности обрабатывали специальными составами, образующими защитные пленочные покрытия полимерного типа.

Меняли также кровли, заборы, сносили не подлежащие дезактивации загрязненные строения. Чтобы уменьшить перенос радиоактивных веществ с пылью, асфальтировали дороги и тротуары.

Образующиеся в результате работ жидкие отходы дезактивации переводили в твердое состояние и вместе с другими радиоактивными отходами свозили в специальные пункты, расположенные в зоне отселения, для захоронения.

В Беларуси до катастрофы на ЧАЭС имелся только один пункт захоронения радиоактивных отходов, который из-за малого объема и расположения вне зоны отселения не мог быть использован для размещения чернобыльских радиоактивных отходов. Поэтому собран-

Дезактивационные работы



В настоящее время на загрязненных территориях Беларуси создана система пунктов захоронения отходов дезактивации (ПЗОД), построенных по типовым проектам.

ные отходы дезактивации помещали в зоне отселения просто в вырытые траншеи, дно и стены которых были покрыты водонепроницаемым материалом, чтобы предотвратить вынос радиоактивных веществ за пределы мест захоронения, и засыпали грунтом. В результате, на территории Беларуси было создано более 80 подобных пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Начиная с 1991 года дезактивационные работы проводили лишь на территории наиболее важных социально значимых объектов (детские сады, школы, лечебные и оздоровительные учреждения, производственные объекты, места массового посещения людьми). Позднее проводились работы по дезактивации приусадебных участков.

В результате проведения дезактивационных работ удалось улучшить радиационную обстановку, однако для ликвидации последствий Чернобыльской катастрофы этого было далеко не достаточно.

Чтобы защитить население и окружающую среду, проводятся мероприятия по уменьшению *экологических последствий* катастрофы. Поскольку загрязнение территории Беларуси чернобыльскими радионуклидами в наибольшей степени затронуло лесное и сельское хозяйства, защитные меры, в основном, проводятся в этих отраслях хозяйственной деятельности.

Защитные меры направлены на

- получение нормативно чистой продукции,
- обеспечение радиационной безопасности работников лесхозов и сельскохозяйственного производства,
- ограничение выноса радионуклидов за пределы загрязненных территорий.

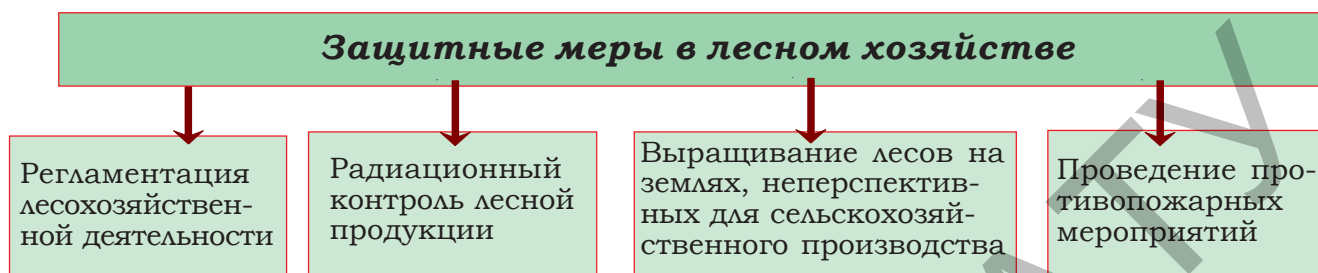
По оценкам ученых, в результате Чернобыльской катастрофы наиболее загрязненными оказались леса. Лесные территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  более  $37 \text{ кБк/м}^2$  ( $1 \text{ Ки/км}^2$ ) занимают в Беларуси площади около  $20 \text{ тыс. км}^2$ . Территория 51 лесхоза оказалась в различной степени загрязненной радионуклидами.

После Чернобыльской катастрофы обеспечение радиационной безопасности работников лесного хозяйства является приоритетной задачей при

Уменьшение  
экологических  
последствий

Лесное хозяйство

осуществлении любого вида деятельности на лесных территориях. Ниже приведены защитные меры, осуществляемые в настоящее время в лесном хозяйстве.



Одной из защитных мер является строгая *регламентация лесохозяйственной деятельности*. Это означает, что на территории лесов с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  более  $37 \text{ кБк/м}^2$  ( $1 \text{ Ки/км}^2$ ) проводятся лишь ограниченные виды лесозаготовительных и лесохозяйственных работ. В следующей таблице перечислены виды лесопользования, разрешенные и запрещенные на территориях с различными уровнями загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ . В основном они касаются заготовки пищевой, лекарственной и некоторых видов технической продукции.

**Регламентирование лесопользования на загрязненных радионуклидами территориях**

Виды лесопользования	Плотность загрязнения $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )			
	37–74 (1–2)	74–185 (2–5)	185–555 (5–15)	555 и выше (15 и выше)
	■ — Разрешено		■ — Запрещено	
Сбор грибов-аккумуляторов и грибов, сильнонакапливающих радиоактивный цезий	■	■	■	■
Сбор грибов, средне- и слабонакапливающих радиоактивный цезий	■	■	■	■
Заготовка лесных ягод и плодов	■	■	■	■
Ведение пчеловодства	■	■	■	■
Заготовка лекарственного сырья	■	■	■	■

Виды лесопользования	Плотность загрязнения $^{137}\text{Cs}$ , кБк/м <sup>2</sup> (Ки/км <sup>2</sup> )			
	37–74 (1–2)	74–185 (2–5)	185–555 (5–15)	555 и выше (15 и выше)
	<span style="color: green;">■</span> — Разрешено		<span style="color: red;">■</span> — Запрещено	
Заготовка технического сырья				
Выпас откормочного* и рабочего скота и заготовка сена для него				
Выпас молочного скота и заготовка сена для него				
Заготовка хвойной лапки и веточного корма				
Охота и рыбная ловля				
Заготовка мха				
Заготовка новогодних елок				
Заготовка березового сока				

\* За 1,5–2 месяца до убоя животных следует переводить на безвыгульное содержание с использованием кормов, соответствующих действующим нормативам.

### Сбор грибов и заготовка лесных ягод и плодов

Как видно из таблицы, на территории с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  более 74 кБк/м<sup>2</sup> (2 Ки/км<sup>2</sup>) запрещено собирать любые виды грибов и ягод.

На территории с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  от 37 до 74 кБк/м<sup>2</sup> (1–2 Ки/км<sup>2</sup>) разрешена заготовка любых лесных ягод и плодов, а сбор грибов — только слабо- и средненакапливающих радиоактивный цезий.

Примеры грибов и ягод, отличающихся по степени накопления радиоактивного цезия, приведены в разделе 8.6.

### Ведение пчеловодства

Пчеловодством можно заниматься на территориях с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до 555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>). При этом собранный мед обязательно подлежит радиометрическому контролю. Не рекомендуется размещать ульи и пасеки на расстоянии менее 10 км от мест с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  555 кБк/м<sup>2</sup> и выше.



### Заготовка лекарственного и технического сырья

Лекарственное и техническое сырье (лесные травы и их отдельные части, листья древесных и кустарниковых растений, кора, споры, почки и т. п.) накапливают значительное количество радионуклидов.

#### **Больше всего накапливают радиоактивный цезий:**

споры плауна булавовидного, побеги багульника болотного, листья брусники, листья черники, трава золототысячника, зверобоя, пижмы обыкновенной, толокнянки, кора дуба и крушины.

#### **Меньше всего накапливают радиоактивный цезий:**

фиалка трехцветная, ландыш майский, душица обыкновенная, тмин песчаный, тимьян обыкновенный, наперстянка крупноцветная.

Сбор лекарственного сырья допускается лишь при плотности загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до  $74 \text{ кБк/м}^2$  ( $2 \text{ Ки/км}^2$ ) с обязательным радиометрическим контролем собранного сырья.

Заготовка технического сырья (луба, лыка, дубильной коры) разрешается на срубленных деревьях при уровне загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до  $185 \text{ кБк/м}^2$  ( $5 \text{ Ки/км}^2$ ) и также с обязательным радиометрическим контролем сырья.

Предельно допустимые уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в некоторых видах лесной продукции приведены в следующей таблице.

#### **Допустимые уровни содержания $^{137}\text{Cs}$ в меде, ягодах, лекарственном и некоторых видах технического сырья**

Наименование продукции	Содержание $^{137}\text{Cs}$ , Бк/кг
Мед	3 700
Лекарственно-техническое сырье (цветы, листья, травы, клубни, корневища, грибы и др.)	1 850
Высушенные плоды и ягоды	2 590

### Выпас скота и заготовка сена

Выпас скота и заготовка сена в лесах без согласования с органами лесного хозяйства **запрещены**.

Выпас *рабочего скота*, а также заготовка для него сена допускаются на естественных лесных пастбищах и сенокосах с плотностью загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до  $185 \text{ кБк/м}^2$  ( $5 \text{ Ки/км}^2$ ).

## Знаки, предупреждающие о радиационной обстановке



**РАДИОАКТИВНОЕ  
ЗАГРЯЗНЕНИЕ!**

Сбор грибов и ягод разрешается с обязательным радиометрическим КОНТРОЛЕМ!

Знак устанавливается на дорогах республиканского и областного значения перед въездом в зону с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$

**37–85 кБк/м<sup>2</sup> (1–5 Ки/км<sup>2</sup>)**



**РАДИОАКТИВНОЕ  
ЗАГРЯЗНЕНИЕ!**

Выпас скота, сенокошение, сбор грибов и ягод, заготовка дров ЗАПРЕЩЕНЫ!

Знак устанавливается в местах, наиболее посещаемых людьми, и на дорогах перед въездом в зону с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$

**185–555 кБк/м<sup>2</sup> (5–15 Ки/км<sup>2</sup>)**



**РАДИОАКТИВНОЕ  
ЗАГРЯЗНЕНИЕ!  
ВХОД И ВЪЕЗД  
ЗАПРЕЩЕН!**

Знак устанавливается на дорогах и по границам лесных массивов, расположенных вблизи населенных пунктов в зоне с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$

**555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>)  
и более**

Выпас *откормочного скота* и заготовка для него сена допускаются на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до 185 кБк/м<sup>2</sup> (5 Ки/км<sup>2</sup>), однако за 1,5–2 месяца до предполагаемого убоя скот следует переводить на безвыгульное содержание и корма, соответствующие действующим нормативам.

Выпас *молочного скота* на лесных пастбищах и заготовка для него сена на лесных сенокосах допускается при плотности загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до 74 кБк/м<sup>2</sup> (2 Ки/км<sup>2</sup>).

## Заготовка хвойной лапки, веточного корма, мха, новогодних елок, березового сока

Заготовка хвойной лапки, веточного корма и мха на лесных территориях запрещена во всех зонах загрязнения. Особенно загрязненным является мох, поскольку он активно накапливает радионуклиды из почвы.

Заготовка новогодних елок разрешена только в зоне с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до 185 кБк/м<sup>2</sup> (5 Ки/км<sup>2</sup>).

Березовый сок является одним из самых чистых пищевых продуктов леса. Его заготовка разрешена на территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до 555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>) с обязательным радиометрическим контролем заготовленного сока.

## Охота и рыбная ловля

В охотничьих угодьях с плотностью загрязнения территории  $^{137}\text{Cs}$  до 185 кБк/м<sup>2</sup> (5 Ки/км<sup>2</sup>) разрешается вести охоту с *выборочным контролем* охотничьих трофеев на содержание радионуклидов.

В охотничьих угодьях с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  от 185 до 555 кБк/м<sup>2</sup> (5–15 Ки/км<sup>2</sup>) установлен обычный режим охоты на зверей и птиц, однако *обязательна проверка* мяса убитых животных на содержание радионуклидов.

Из-за миграции диких птиц на большие расстояния при охоте на них даже на территории с плотностью загрязнения радиоактивным цезием до 37 кБк/м<sup>2</sup> (1 Ки/км<sup>2</sup>) добытое мясо необходимо проверять на содержание радионуклидов.

В угодьях с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>) и более охота **запрещена**.

Рыболовством разрешено заниматься на территории с плотностью загрязнения радиоактивным цезием до 555 кБк/м<sup>2</sup> (15 Ки/км<sup>2</sup>). При этом рыбу рекомендуется ловить в реках и проточных

водоемах, которые из-за постоянной смены воды менее загрязнены радионуклидами по сравнению с замкнутыми непроточными и слабопроточными водоемами, расположенными на территории с одинаковым уровнем загрязнения.

Уровень загрязнения рыб зависит от места их обитания.

**Больше всех накапливают радионуклиды придонные и хищные виды рыбы:**  
карась, карп, линь, окунь, щука, сом

**Меньше всех накапливают радионуклиды обитатели верхней части водоемов:**  
плотва, лещ, судак, голавль

Перед приготовлением отловленную рыбу рекомендуется тщательно очистить, вымыть и обязательно удалить голову, плавники и внутренности.

Помимо рассмотренных видов лесохозяйственной деятельности, важную роль в экономике республики играет заготовка древесной продукции. В основном она осуществляется в зонах с уровнем загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  до  $555 \text{ кБк/м}^2$  ( $15 \text{ Ки/км}^2$ ). Древесина, продукция из древесины и древесных материалов и другие виды продукции лесного хозяйства непищевого назначения подлежат обязательному радиационному контролю.

В настоящее время в нашей стране действуют Республиканские допустимые уровни, регламентирующие содержание  $^{137}\text{Cs}$  в древесной продукции (РДУ/ЛХ-2001).

**Республиканские допустимые уровни содержания  $^{137}\text{Cs}$  в древесине, древесных материалах, продукции из них и прочей непищевой продукции лесного хозяйства**

№ п/п	Наименования групп продукции	Удельная активность, Бк/кг
1	Лесоматериалы круглые:	
1.1	Лесоматериалы круглые для строительства стен жилых зданий	740
1.2	Лесоматериалы круглые прочие	1 480
2	Древесное технологическое сырье	1 480
3	Топливо древесное	740
4	Пилопродукция, изделия и детали из древесины и древесных материалов:	
4.1	Пилопродукция, изделия и детали из древесины и древесных материалов для строительства (внутренней обшивки) стен жилых зданий	740
4.2	Пилопродукция, изделия и детали из древесины и древесных материалов (прочие)	1 850
5	Прочая непищевая продукция лесного хозяйства	1 850

### Радиационный контроль

С целью предотвращения поставок потребителям лесной продукции, загрязненной выше допустимых уровней, в наиболее загрязненных лесхозах страны были созданы специальные подразделения *радиационного контроля*, в том числе и передвижные.

В конторах лесхозов, лесничеств, деревообрабатывающих цехов установлены информационные стенды, на которых приведены

- карты-схемы загрязнения лесов радионуклидами;
- действующие нормы на содержание радионуклидов в лесной продукции;
- уровни загрязнения местной лесной продукции черновобильскими радионуклидами;
- адреса лабораторий и постов, где можно проверить продукцию на содержание радионуклидов.

Получить информацию о радиационной обстановке в окрестностях конкретного населенного пункта можно в ближайшем лесхозе.

На территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  свыше  $185 \text{ кБк/м}^2$  ( $5 \text{ Ки/км}^2$ ), а также на землях, подверженных водной и ветровой эрозии, которые неперспективны для сельскохозяйственного производства, проводятся мероприятия *по выращиванию лесов (облесение)*. Эта мера способствует предотвращению распространения радионуклидов на более чистые территории в результате водной и ветровой эрозии почв.

Чтобы не допустить распространения радионуклидов вследствие пожаров, проводятся также профилактические *противопожарные мероприятия*. На дорогах при въездах в лес устанавливаются шлагбаумы, а непосредственно на лесной территории — пожарно-наблюдательные вышки и мачты. В лесах создают противопожарные разрывы и просеки.

В засушливые периоды, когда повышается пожарная опасность, усиливается авиапатрулирование лесов.

Важнейшей задачей сельскохозяйственного производства в условиях загрязнения территории радионуклидами является получение продукции с содержанием радионуклидов в пределах установленных норм. Для ее решения разработан и выполняется комплекс специальных защитных мероприятий.

Лесные территории с плотностью загрязнения  $^{137}\text{Cs}$   $37 \text{ кБк/м}^2$  ( $1 \text{ Ки/км}^2$ ) и выше занимают в Республике Беларусь площадь около  $20 \text{ тыс. км}^2$

### Выращивание лесов

### Противопожарные мероприятия

### Сельское хозяйство

### Растениеводство

## Защитные меры в сельском хозяйстве

Подбор культур и сортов с минимальным уровнем накопления радионуклидов

Обработка почвы

Защита сельскохозяйственных растений

Регулирование водного режима почвы

### Подбор культур и сортов с минимальным уровнем накопления радионуклидов

Подбор культур и сортов с минимальным уровнем накопления радионуклидов является наиболее доступным средством снижения поступления радионуклидов из почвы в растения. Специалисты в области сельскохозяйственной радиологии установили, что растения по-разному накапливают радионуклиды.

По снижению способности накапливать  $^{137}\text{Cs}$  растительную продукцию можно расположить в следующем порядке:

Максимум

- зеленая масса рапса, клевера, гороха, вики,
- зеленая масса люпина,
- многолетние злаковые травы,
- солома овса,
- зеленая масса кукурузы,
- зерно овса, ячменя,
- картофель,
- кормовая свекла,
- зерно озимой ржи и пшеницы.

Минимум

По снижению способности накапливать  $^{90}\text{Sr}$  растительную продукцию можно расположить следующим образом:

Максимум

- зеленая масса клевера, люпина, гороха, рапса, вики,
- зеленая масса многолетних злаковых трав,
- зеленая масса озимой ржи,
- кормовая свекла,
- зеленая масса кукурузы,
- солома овса, озимой ржи,
- зерно ячменя, овса, озимой ржи
- картофель

Минимум

Выявленные специалистами закономерности накопления радионуклидов различными сельскохозяйственными культурами являются основой формирования структуры посевов и специализации растениеводства в загрязненных районах.

Эффективной мерой, снижающей поступление радионуклидов в растения, является обработка почвы.

### Обработка почвы

#### Глубокая вспашка

Может снижать поступление радионуклидов в растения в 5–10 раз, однако заглубляет плодородный слой почвы и делает невозможным получение хорошего урожая сельскохозяйственных культур.

#### Известкование кислых почв

Внесение доломитовой муки или др. веществ, уменьшающих кислотность почвы, снижает поступление радионуклидов в урожай сельскохозяйственных растений в 1,5–3 раза.

#### Внесение удобрений

- калийных (в почвы с низким содержанием обменного калия),
- органических,
- фосфорных (на почвах с низким содержанием доступного растениям фосфора),
- азотных,
- медленно действующих — типа карбамида и сульфата аммония, которые выпускает Гродненский ПО «Азот»,
- микроудобрений (например сульфата марганца).

Уменьшает поступление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растения в 1,3–3 раза.

! Чрезмерно высокие дозы азотных удобрений могут усиливать поступление радионуклидов из почвы в растения.

#### Глубокое рыхление

Периодически применяют на переуплотненных, подвергнутых эрозии (разрушению) и избыточно увлажняемых почвах.

Снижению содержания радионуклидов в растительной продукции способствует также проведение комплексных мероприятий по защите растений.

### Защита сельскохозяйственных растений

от вредителей

от болезней

от сорняков

Эти меры позволяют увеличивать урожайность и снижать (до 40 %) концентрацию радионуклидов в растениеводческой продукции

**Практически все агротехнические приемы, увеличивающие плодородие почв и урожайность сельскохозяйственных культур, способствуют снижению удельной активности сельскохозяйственной продукции.**

Одним из способов снижения накопления радионуклидов сельскохозяйственными культурами является *регулирование водного режима* переувлажненных почв.

Меньше всего растения накапливают радионуклиды, когда уровень воды располагается на глубине 90–120 см от поверхности почвы. Подъем воды до уровня 35–50 см от поверхности почвы приводит к увеличению накопления радионуклидов в растениеводческой продукции до 20 раз.

Снижение поступления радионуклидов из почвы в растения позволяет обеспечивать животноводство кормами с содержанием радионуклидов, допустимым для получения мясной и молочной продукции, соответствующей действующим нормативам.

В системе мероприятий по снижению содержания радионуклидов в продукции животноводства можно выделить следующие приемы:

- производство кормов с допустимым содержанием радионуклидов;
- изменение условий содержания и рационов кормления крупного рогатого скота, использование наименее загрязненных кормов на заключительной стадии откорма;
- введение в рацион специальных добавок, снижающих переход радионуклидов в продукцию животноводства;
- технологическая переработка продуктов животноводства;
- перепрофилирование отраслей животноводства (замена молочного скотоводства на мясное или производство крупного рогатого скота на свиноводство, птицеводство и т. д.).

В настоящее время в Республике Беларусь действуют следующие нормативы по содержанию радионуклидов цезия и стронция в кормах.

#### Допустимые уровни содержания $^{137}\text{Cs}$ и $^{90}\text{Sr}$ в кормах

Виды кормов	Содержание радионуклидов, Бк/кг				
	$^{137}\text{Cs}$			$^{90}\text{Sr}$	
	Для производства молока цельного*	Для производства молока-сырья с целью переработки на масло	Для производства мяса (заключительный откорм)	Для производства молока цельного	Для производства молока-сырья с целью переработки на масло
Сено	1 300	1 850	1 300	260	1 300
Солома	330	900	700	185	900

Регулирование водного режима

Животноводство

Производство кормов с допустимым содержанием радионуклидов

Продолжение таблицы

Виды кормов	Содержание радионуклидов, Бк/кг				
	<sup>137</sup> Cs			<sup>90</sup> Sr	
	Для производства молока цельного*	Для производства молока-сырья для переработки на масло	Для производства мяса (заключительный откорм)	Для производства молока цельного	Для производства молока-сырья для переработки на масло
Сенаж	500	900	500	100	500
Силос	240	600	240	50	250
Корнеплоды	160	600	300	37	185
Зерно на фураж, комбикорм	180	600	480	100	500
Зеленая масса	165	600	240	37	185

\*Корма для производства молока-сырья для переработки на сыр и творог, а также для откорма свиней и птицы должны соответствовать тем же требованиям.

Изменение условий содержания

Кроме производства кормов с допустимым уровнем содержания радионуклидов, были также разработаны и внедрены другие методы получения продукции животноводства, соответствующей действующим в республике нормативам. Например, для получения мяса была разработана схема откорма животных, по которой на заключительной стадии перед убоем их на протяжении 2–3 месяцев содержали на кормах с наиболее низким допустимым содержанием радио-активного цезия.

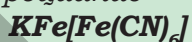
Кормовые добавки

Эффективным способом снижения загрязнения продуктов животноводства (молока, мяса) <sup>137</sup>Cs является использование кормовых добавок, избирательно связывающих радионуклиды в желудочно-кишечном тракте животных. К таким добавкам относятся ферроцианидные препараты — *ферроцин* и *ферроцианид*.

Ферроцин — соединение, состав которого отражает химическая формула



Ферроцианид —



Механизм действия препаратов основан на способности *ферроцина* и *ферроцианида* образовывать с цезием нерастворимые соединения, которые в процессе пищеварения не усваиваются животным и естественным путем выводятся из его организма.

Обычно такие препараты применяют в виде добавки к комбикормам и отдельно в виде болюсов — пресованных брикетов на основе воска с добавлением ферроцина.



Болюсы с ферроцином предназначены для введения в организм крупного рогатого скота через пищеварительный тракт. В пищеварительном тракте болюс постепенно (в течение двух месяцев) растворяется и содержащийся в нем препарат взаимодействует с радиоактивным цезием.

В настоящее время выпускаются комбикорм-концентраты с добавлением ферроцианидных препаратов, предназначенные для крупного и мелкого рогатого скота.

Комбикорм, содержащий 0,6 % ферроцианида, в количестве 0,5 кг можно ежедневно давать утром дойным коровам в течение лактационного периода, а также в течение 2–3 месяцев на заключительном этапе откорма крупного рогатого скота. Такой же комбикорм в количестве 0,15 кг можно ежедневно давать по утрам и молочным козам в течение лактационного периода, а также мелкому рогатому скоту на протяжении 1,5–2 месяцев перед убоем.

Применение комбикорма с добавкой ферроцианидного препарата в рекомендуемых дозах не вызывает у животных побочных эффектов. При этом его не рекомендуется назначать животным одновременно со средствами, усиливающими перистальтику желудочно-кишечного тракта, а также со слабительными, поскольку подобные средства снижают эффективность действия ферроцианидного препарата.

Применяют также брикеты соли-лизунца, содержащей ферроцин. Брикеты помещают в кормушки или раскладывают на пастбищах в местах отдыха животных.

Применение ферроцианидных препаратов позволяет в 2–5 раз (в зависимости от уровня загрязнения кормов) снизить содержание  $^{137}\text{Cs}$  в молоке и мясе.

Продукцию, полученную от животных, которым скармливали такие препараты, можно использовать без ограничения при условии содержания в ней  $^{137}\text{Cs}$  ниже допустимых уровней.

Важнейшим мероприятием радиэкологической защиты территории, пострадавшей от катастрофы на Чернобыльской АЭС, явилось создание Полесского государственного радиационно-экологического заповедника (ПГРЭЗ).

Заповедник был создан в 1988 году на белорусской территории зоны отчуждения.

Проживавшее на этой территории население (24,7 тыс. человек) в 1986 году было эвакуировано. Тогда же на этой территории была прекращена хозяйственная деятельность. В 1993 году к ПГРЭЗ присоединили прилегающую отселенную территорию, и площадь заповедника достигла 2,154 тыс. км<sup>2</sup>.

Полесский  
государственный  
радиационно-  
экологический  
заповедник

### Максимальная плотность загрязнения территории ПГРЭЗ:

- по  $^{137}\text{Cs}$  — 49 950 кБк/м<sup>2</sup> (1 350 Ки/км<sup>2</sup>),
- по  $^{90}\text{Sr}$  — 2 590 кБк/м<sup>2</sup> (70 Ки/км<sup>2</sup>),
- по изотопам плутония  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  — 185 кБк/м<sup>2</sup> (5 Ки/км<sup>2</sup>).

Высокий уровень загрязнения территории заповедника плутонием не позволит даже в отдаленном будущем вернуть основную часть его земель в хозяйственное пользование.

Основными задачами ПГРЭЗ являются:

- охрана территории заповедника и предотвращение выноса радионуклидов с его территории;
- защита лесов и бывших сельхозугодий от пожаров;
- обеспечение естественного развития природы;
- проведение научных наблюдений за радиационно-экологическим состоянием и изменением природной среды в условиях загрязнения техногенными радионуклидами и прекращения хозяйственной деятельности;
- выращивание лесов на территориях с почвенным покровом, подверженным ветровой и водной эрозии.

На территории заповедника действует особый правовой режим. Вокруг заповедника построены заградительные сооружения и установлены предупреждающие знаки. Территория заповедника охраняется. Въезд на территорию заповедника осуществляется только по пропускам через систему контрольно-пропускных пунктов. Это делается для того, чтобы предотвращать:

- самовольное проникновение граждан и транспортных средств на территорию заповедника,
- неконтролируемый вывоз грузов,
- браконьерство, сбор «даров природы».

Вместе с другими мерами, предпринимаемыми Правительством Республики Беларусь, создание заповедника направлено на защиту человека и среды его обитания от воздействия излучения чернобыльских радионуклидов.

Для снижения радиационного риска и сохранения здоровья населения среди других предпринимаемых мер особое значение на современном этапе имеет организация правильного питания. Об этом и пойдет речь в следующем разделе.

### 10.3. Правильное питание

Рацион питания должен не только удовлетворять потребности организма в питательных веществах, но и иметь профилактическую направленность, то есть способствовать увеличению сопротивляемости организма действию неблагоприятных факторов окружающей среды, в том числе и радиации.

Это особенно важно для подрастающего поколения. Недостаточное потребление питательных веществ в детском и юношеском возрасте

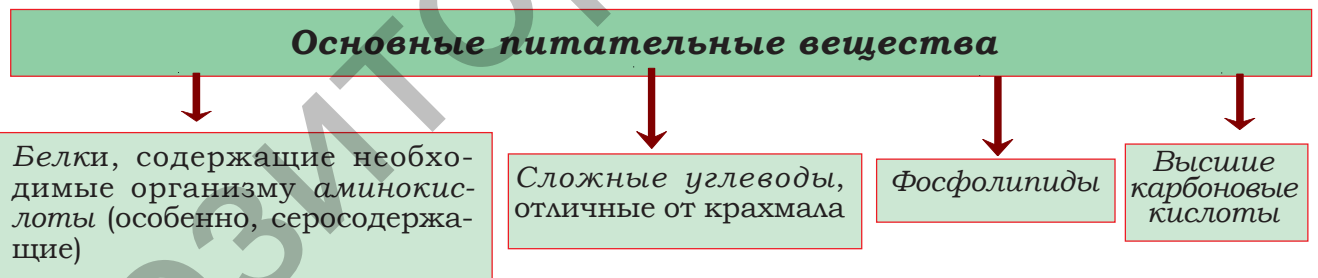
- способствует появлению нарушений обмена веществ;
- может вызвать задержку физического и психического развития;
- приводит к снижению иммунитета.

Изменения, возникающие в детском организме из-за нехватки питательных веществ, могут приобрести необратимый характер и впоследствии не поддаваться исправлению.

В рационе питания должно содержаться необходимое количество *основных питательных веществ*.

*Рацион питания — это состав и количество продуктов питания, потребляемых организмом за определенный промежуток времени (за сутки — суточный рацион, за месяц — месячный рацион и т. д.)*

*Иммунитет — это способность живых организмов противостоять действию негативных факторов, в том числе и ионизирующего излучения.*



*Белки* являются незаменимыми веществами, без которых невозможна жизнь человека. Они обеспечивают рост и регенерацию клеток и тканей, участвуют в процессах кроветворения, способствуют усвоению питательных и других биологически важных веществ, а также развитию иммунитета.

Аминокислоты, являющиеся основной составной частью белков, необходимы для образования гормонов и ферментов, формирования костной ткани, обновления клеток. Недостаточное поступление белков может приводить к негативным изменениям во всех системах организма. Одним из наиболее ранних проявлений белковой недостаточности является снижение иммунитета.

Белки

Полноценные белки — это белки, содержащие все аминокислоты, необходимые организму человека для нормальной жизнедеятельности

Содержащиеся в пище белки должны включать все аминокислоты, необходимые организму человека для нормальной жизнедеятельности. Белки входят в состав продуктов как животного, так и растительного происхождения. Основные источники полноценного белка перечислены в следующей таблице.

Основные источники полноценного белка	
Продукты животного происхождения	Продукты растительного происхождения
Говядина, свинина, птица, мясо кролика	Фасоль, горох, соя, капуста белокачанная
Яйца куриные, утиные, индюшачьи, перепелиные и другие	Чечевица, гречка
Рыба и морепродукты	Орехи (фундук, грецкие и др.), семя подсолнуха
Творог нежирный, твердые сыры	Хлебопродукты из муки грубого помола и отрубей, макаронные изделия из муки твердых сортов

Фосфолипиды и жирные кислоты

Важную роль в питании человека играют *фосфолипиды* и *высшие карбоновые кислоты*. Поскольку эти вещества входят в состав клеточных мембран, без них невозможно развитие клеток. *Фосфолипиды* и *высшие карбоновые кислоты* оказывают влияние на проницаемость клеточных мембран, поэтому от них зависит устойчивость организма к воздействию ионизирующих излучений, инфекционным болезням, канцерогенным факторам.

Недостаток *фосфолипидов* и *высших карбоновых кислот* приводит к нарушению нормального развития растущего организма, снижая его сопротивляемость неблагоприятным внешним воздействиям.

### Основные источники фосфолипидов и высших карбоновых кислот:

- растительные масла (подсолнечное, кукурузное, оливковое и др.),
- животные жиры.

Пектин и клетчатка

Сложные углеводы, такие как *пектин* и *клетчатка*, также чрезвычайно важны для организма человека, особенно в неблагоприятных экологических условиях.

Эти вещества обладают способностью связывать и выводить тяжелые металлы и радионуклиды из организма человека, снижая тем самым их токсическое действие.

*Пектин* и *клетчатка* способствуют также нормализации микрофлоры кишечника. Кроме того, они улучшают перистальтику кишечника, ускоряя выведение из организма токсичных продуктов, в том числе и радиоактивных.

#### Основные источники пектина и клетчатки:

- *зерновые культуры,*
- *фрукты, овощи и продукты их переработки — соки с мякотью, варенье, джемы,*
- *пектинсодержащие кондитерские изделия (зефир, пастила, мармелад).*

Подобно пектинам и клетчатке действуют в организме и *альгинаты* и *каррагенаты* — вещества, которые в больших количествах содержатся в морских водорослях ламинариях (морской капусте).

Незаменимы в питании и *витамины* — специфические органические вещества сравнительно небольшой, по сравнению с биополимерами, молекулярной массы.

От *витаминов* не зависит калорийность пищи, но они крайне необходимы для нормального функционирования организма человека. *Витамины* входят в состав ферментов и регулируют обмен веществ. Без них невозможно усвоение пищи, нормальная работа печени, почек, функционирование всех систем организма. Кроме того, *витамины* поддерживают устойчивость организма к воздействию неблагоприятных факторов внешней среды.

При отсутствии *витаминов* нарушаются процессы обмена веществ и кроветворения. *Витамины* необходимы организму в небольших количествах — от микрограммов до нескольких миллиграммов в день в зависимости от их состава.

В организме человека могут синтезироваться лишь отдельные *витамины*, при этом, зачастую, в недостаточном количестве. Поэтому *витамины* обязательно должны поступать в организм с пищей, а если в рационе недостаточно *витаминов* — в виде поливитаминных препаратов.

В следующей таблице приведены важнейшие *витамины*, их функции в организме человека и продукты, содержащие эти *витамины*.

Витамины

#### Важнейшие витамины

**A, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>,  
B<sub>6</sub>, B<sub>9</sub>, B<sub>12</sub>,  
C, D, E, K, PP (B<sub>3</sub>)**

## Характеристики важнейших витаминов

Витамин	Роль в организме человека	Продукты, содержащие витамин
<b>A</b> (ретинол)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Участвует в процессах роста и обновления тканей организма.</li> <li>• Способствует защите организма от инфекций и препятствует образованию опухолей.</li> <li>• Обладает радиопротекторными свойствами.</li> <li>• Необходим для поддержания нормальной работы органов зрения.</li> <li>• Помогает при аллергии.</li> <li>• Регулирует деятельность нервной системы.</li> </ul> <p>Витамин А лучше действует в комплексе с витаминами С и Е.</p>	<p>Печень и почки животных, рыбий жир, яичные желтки, сливочное масло, сливки, молоко.</p> <p>Многие растительные продукты, имеющие красную, оранжевую, желтую и зеленую окраску (морковь, томаты, красный перец, капуста, шпинат, листья салата, зеленый лук и др.) содержат <i>бета-каротин</i> — провитамин витамина А, из которого в организме человека в присутствии жиров синтезируется витамин А.</p>
<b>B<sub>1</sub></b> (тиамин)	<p>Участвует в углеводном, белковом, азотистом и жировом обмене.</p>	<p>Бобовые, отруби, ячменная и овсяная крупы, хлеб из муки грубого помола (особенно ржаной), орехи (лесные, грецкие, арахисовые), куриные яйца, печень, почки и мясо животных, картофель, пекарские дрожжи.</p>
<b>B<sub>2</sub></b> (рибофлавин)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Участвует в обмене белков, углеводов и жиров.</li> <li>• Необходим для нормальной работы <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ органов пищеварения (особенно печени),</li> <li>➢ органов зрения.</li> </ul> </li> <li>• Необходим для поддержания здоровья кожи.</li> </ul> <p>При высоком содержании в пище углеводов или жиров потребность организма в витамине B<sub>2</sub> повышается в несколько раз.</p>	<p>Капуста, свежий зеленый горох, яблоки, зеленая фасоль, помидоры, репа, пивные дрожжи, печень животных, говядина, яйца, молоко и молочные продукты, свежепроращенные зерна пшеницы.</p> <p><i>Витамин B<sub>2</sub> разрушается на свету, поэтому молоко и молочные продукты, постоявшие на свету несколько часов, не только прокисают, но и теряют витамин B<sub>2</sub>.</i></p>

Витамин	Роль в организме человека	Продукты, содержащие витамин
<b><math>V_6</math></b> <b>(пиридоксин),</b> <b>PP (<math>V_3</math>)</b> <b>(ниацин)</b>	Влияют на <ul style="list-style-type: none"> <li>• функционирование нервной системы,</li> <li>• процессы кроветворения.</li> </ul>	Крупы, хлеб, бобовые, мясо и печень животных.
<b><math>V_9</math></b> <b>(фолиевая кислота),</b> <b><math>V_{12}</math></b> <b>(цианокобаламин)</b>	Необходимы для <ul style="list-style-type: none"> <li>• нормального функционирования всех клеток организма,</li> <li>• образования клеток крови, в том числе эритроцитов и лимфоцитов.</li> </ul>	Печень и почки животных, говядина, рыба, дрожжи, зеленые листовые овощи, спаржа, брокколи, чечевица, соя, цельнозерновые крупы.
<b>C</b> <b>(аскорбиновая кислота)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Принимает участие в окислительно-восстановительных реакциях, протекающих в организме.</li> <li>• Влияет на               <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ белковый обмен,</li> <li>➤ сопротивляемость организма инфекциям,</li> <li>➤ эластичность кровеносных сосудов,</li> <li>➤ состояние зубов и десен.</li> </ul> </li> <li>• Замедляет процессы старения организма.</li> </ul>	Черная смородина, лимоны, апельсины, плоды шиповника, кресс-салат, красный перец, помидоры, репа и разнообразная зелень.

Витамин	Роль в организме человека	Продукты, содержащие витамин
<p><b>Д</b> (кальциферол)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Регулирует обмен фосфора и кальция в организме.</li> <li>• Влияет на формирование костной ткани, способствуя превращению органических соединений фосфора в неорганические.</li> <li>• Регулирует работу нервной и иммунной систем.</li> <li>• Необходим для нормальной работы сердца, свертывания крови.</li> </ul>	<p>Печень морских рыб, особенно трески и палтуса, рыбий жир, куриные и др. яйца, молоко, сливочное масло.</p> <p>В растительных продуктах содержатся провитамины витамина Д (стерины), которые под действием ультрафиолетовых лучей могут преобразовываться в организме человека в витамин Д.</p> <p><i>В организме светлокотких людей под действием ультрафиолетовых лучей витамин Д синтезируется вдвое быстрее, чем у людей со смуглой кожей.</i></p>
<p><b>Е</b> (токоферол)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Влияет на формирование клеток крови.</li> <li>• Стабилизирует клеточные мембраны.</li> <li>• Участвует в белковом обмене.</li> <li>• Нормализует             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ мышечную деятельность,</li> <li>➢ состояние половых желез, гипофиза, надпочечников, щитовидной железы.</li> </ul> </li> <li>• Способствует нормальному функционированию иммунной системы, разрушая вещества, отравляющие клетки этой системы.</li> <li>• Обладает мощными антиоксидантными свойствами.</li> <li>• Необходим для противораковой, противовирусной и противомикробной защиты организма.</li> </ul> <p><i>Действие витамина Е усиливается в комбинации с витаминами А, С и группы В.</i></p>	<p>Растительные масла, зародыши злаков, ячменная и овсяная крупы, фасоль, бобы, дрожжи, орехи (лесные, грецкие, арахисовые), зеленые овощи (салат-латук, листовой салат), яйца, печень, почки, картофель.</p>



Витамин	Роль в организме человека	Продукты, содержащие витамин
<b>К</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Поддерживает необходимую концентрацию в крови протромбина — вещества, обеспечивающего свертываемость крови.</li> <li>• Играет важную роль в обмене веществ в костной и соединительных тканях.</li> <li>• Участвует в работе почек.</li> <li>• Помогает включить накопленные организмом углеводы в процесс внутриклеточного обмена веществ.</li> <li>• Помогает работе печени.</li> <li>• Придает нам бодрость и способствует долголетию.</li> </ul>	<p>Зеленые листовые овощи и салаты (розовая и зеленая листовая капуста, шпинат, брокколи, кресс-салат, цветная капуста), фасоль, огурцы, цуккини, помидоры.</p> <p><i>Обезболивающие средства, прогорклый жир и консерванты в пище разрушают витамин К и препятствуют его усвоению.</i></p>

#### Возможные причины дефицита витаминов в организме человека:

- недостаточное или несбалансированное содержание витаминов в пище;
- неполное их всасывание при нарушении работы кишечника;
- нарушение усвоения витаминов в результате заболевания различных органов;
- повышенная потребность в витаминах в определенные периоды жизни человека (при заболевании, беременности у женщин, интенсивном росте, во время стрессов, повышенной физической активности, после хирургического вмешательства и т. д.).

Организм человека нуждается в *определенном количестве витаминов*. Нежелателен как недостаток, так и избыток витаминов. Признаки *дефицита витаминов* часто трудно распознать, поэтому человек не должен принимать *витамины* без разбора и в большом количестве. О том, какие витамины и в каком количестве следует принимать каждому человеку, обязательно нужно проконсультироваться у медицинских работников.



Чтобы организм человека нормально развивался и функционировал, он также нуждается в достаточном количестве *кальция, фосфора, магния, железа, натрия, калия, цинка, йода, селена и других биологически важных элементов*. Эти элементы необходимы для роста и развития костной, мышечной и нервной тканей, а также для образования компонентов крови. Они являются обязательной частью продуктов питания, и обычно их называют «*минералами*».

В следующей таблице приведены примеры биологически важных «минералов», указаны их функции в организме человека, а также продукты, содержащие эти «минералы».

### Характеристики важнейших «минералов»

«Минерал»	Роль «минерала» в организме человека	Продукты, содержащие «минерал»
<b>Кальций</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Входит в состав костной ткани и практически всех клеток организма.</li> <li>Участвует в работе всех органов и систем органов человека.</li> </ul> <p><i>При достаточном количестве кальция в пище он вытесняет из костной ткани уже попавший туда радиоактивный стронций.</i></p>	Яйца, сыр, молоко и кисломолочные продукты, морепродукты, бобовые, хлеб, крупы, яблоки, абрикосы, свекла, ежевика, капуста, морковь, крыжовник, виноград, фасоль, лук, апельсины, персики, ананасы, редис, клубника, проращенные зерна пшеницы.
<b>Калий</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Регулирует работу сердца, почек, печени, скелетных мышц.</li> </ul>	Фрукты, ягоды, листовые овощи, бобовые, картофель, курага, изюм, чернослив, овсяная крупа, грейпфруты, петрушка, редис, помидоры, капуста, ржаной хлеб, листья одуванчика.

«Минерал»	Роль «минерала» в организме человека	Продукты, содержащие «минерал»
<b>Железо</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Является составной частью гемоглобина крови. Именно железо связывает кислород, который по кровеносной системе доставляется всем органам и тканям.</li> <li>• Входит в состав многих ферментов и участвует в химических превращениях, происходящих в клетках организма.</li> </ul>	<p>Мясо, печень, почки, рыба, икра, овсяная крупа, яичные желтки, сухофрукты, крыжовник, горчица, кресс-салат, крапива, гранаты, апельсины, абрикосы, айва, хурма, рябина садовая, горох, мята, ананасы, редис, малина, клубника, помидоры, цветная капуста, свекла, яблоки, проращенные зерна пшеницы.</p>
<b>Фосфор</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Необходим для               <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ функционирования нервной системы,</li> <li>➢ роста и развития костной ткани,</li> <li>➢ процессов кроветворения;</li> </ul> </li> <li>• Является элементом, от которого зависит деятельность практически всех систем организма.</li> </ul>	<p>Бобы, цветная капуста, сельдерей, салат-латук, сыр, печень трески, яичный желток, рыба (особенно лосось, сардины), креветки, мясо животных, овсяная крупа, грибы, соя, грецкие орехи, проращенные зерна пшеницы.</p>
<b>Магний</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Является жизненно важным элементом и находится во всех тканях организма:               <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ необходим для нормального функционирования клеток;</li> <li>➢ участвует в большинстве реакций обмена веществ;</li> <li>➢ играет важную роль в поддержании ионного баланса в мышечной ткани.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Овсяная и пшенная крупы, сырые яичные желтки, цветная капуста, салат-латук, печень животных, рыба, тыква, мята, цикорий, петрушка, арахис, грецкие орехи, курага, сливки, проращенные зерна пшеницы.</p>

«Минерал»	Роль «минерала» в организме человека	Продукты, содержащие «минерал»
<p><b>Селен</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Входит в состав одного из основных ферментов антиоксидантной системы организма:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ обладает антиканцерогенным и антимуtagenным действием;</li> <li>➢ стимулирует деятельность иммунной системы;</li> <li>➢ усиливает защитные функции организма, в том числе и к действию ионизирующего излучения.</li> </ul> </li> </ul>	<p>Рисовая, ячменная и овсяная крупы, чеснок, рыба.  <i>В республике начато производство некоторых продуктов питания с добавлением соединений селена (например, куриные яйца).</i></p>

Макроэлементы

Элементы, которые необходимы организму в относительно большом количестве (их суточная потребность измеряется граммами и миллиграммами), называют *макроэлементами*. Перечисленные в таблице элементы, за исключением селена, относятся к макроэлементам.

Микроэлементы

Однако некоторые элементы, играющие важную роль в жизнедеятельности организма человека, особенно в детском возрасте, необходимы ему в чрезвычайно малых количествах (их суточная потребность измеряется микрограммами). Такие элементы называют *микроэлементами*. К ним относятся *медь, цинк, кобальт, йод, фтор* и др.

Содержание достаточных количеств микроэлементов в рационе питания особенно важно для населения, проживающего на загрязненных радионуклидами территориях, так как недостаток подобных элементов ослабляет защитные функции организма.

#### Основные источники микроэлементов:

- куриные и другие яйца,
- морепродукты (рыба, кальмары, креветки, морская капуста и др.),
- печень,
- бобовые.

**!** *Безусловно, следует употреблять в пищу продукты, прошедшие **радиационный контроль**, особенно это касается продукции, произведенной в личном хозяйстве. Кроме этого, необходимо выполнять определенные гигиенические требования, чтобы ограничить поступление радионуклидов в организм человека.*

### 10.4. Здоровый образ жизни

Здоровье человека формируется под воздействием многих факторов. Специалисты полагают, что здоровье человека зависит от:

- наследственности и биологических особенностей организма — на 18–20 %;
- влияния окружающей среды — на 17–20 %;
- уровня развития системы здравоохранения — на 8–10 %.

Однако в основном (на 49–55 %) здоровье человека зависит от образа жизни, который он ведет.

Под *образом жизни человека* подразумевают:

- условия его труда и быта;
- то, как он использует свободное время;
- как удовлетворяет свои материальные и духовные потребности;
- как участвует в общественной и политической жизни;
- нормы и правила поведения, которых он придерживается в своей жизни;
- умения и навыки, которыми он пользуется, чтобы укрепить собственное здоровье.

С современной точки зрения, понятие «*здоровый образ жизни*» — это *осознанное постоянное выполнение гигиенических правил по укреплению и сохранению индивидуального здоровья и здоровья общества в целом.*

Чтобы сохранить здоровье, особенно в сложных радиоэкологических условиях, человек должен вести *здоровый образ жизни*. Прежде всего, для этого необходимы:

- здоровое питание;
- двигательная активность;
- гигиенически рациональная организация труда в сочетании с полноценным активным отдыхом.

Важным элементом здорового образа жизни является регулярное занятие детей и взрослых физической культурой и спортом. Простейший и доступный для всех вид физической культуры — это *гигиеническая гимнастика*.

Гигиеническая гимнастика



В отличие от специальных видов гимнастики, гигиеническая гимнастика представляет собой комплекс сравнительно простых, общеразвивающих и силовых упражнений, воздействующих на основные группы мышц тела. Такие упражнения не требуют большого физического напряжения.

Гимнастику рекомендуется делать в хорошо проветренном помещении, по возможности, с музыкальным сопровождением.

Гимнастика полезна как в физиологическом, так и в гигиеническом отношении. Обычно она включает 12–15 упражнений на сгибание, разгибание, приседания, махи, повороты головы, туловища, круговые движения рук и ног, а также ходьбу, бег, прыжки и другие движения. Все эти упражнения развивают и укрепляют опорно-двигательный аппарат, органы дыхания и кровообращения, улучшают деятельность желудка и кишечника. Они увеличивают циркуляцию крови, повышают тонус мышц, стимулируют обменные процессы, тем самым, способствуя выведению радионуклидов из организма человека.

Кроме того, занятия гимнастикой улучшают психоэмоциональное состояние человека и способствуют наиболее эффективной его физической и умственной деятельности в течение рабочего дня.

Гимнастику целесообразно сочетать с закаливанием организма.

### Закаливание

*Закаливание — это адаптация (приспособление) организма к изменению температуры окружающей среды и смене погодных условий.*

Закаливание организма обычно достигается многократным воздействием воздуха и воды на тело человека. Закаливание повышает способность организма приспосабливаться не только к изменениям температуры окружающей среды, но и к другим неблагоприятным воздействиям (биологическим, радиационным, психологическим и др.). Оно снижает восприимчивость к инфекциям, способствует формированию положительных психофизиологических реакций.

Закаливание имеет особое значение для здоровья детей, причем уже с грудного возраста.

### Основные правила, которых следует придерживаться при проведении закаливающих процедур

**Постепенность** — постепенное увеличение интенсивности и продолжительности воздействия закаливающего фактора

**Систематичность** — регулярное, а не эпизодическое выполнение закаливающих процедур

**Учет индивидуальных особенностей человека** — характер, интенсивность и режим закаливания определяется возрастом, полом, состоянием здоровья и другими особенностями организма человека

Непременное условие здорового образа жизни — отказ от вредных привычек (курения, потребления алкоголя, различных видов наркотиков).

Неблагоприятные последствия курения для здоровья человека, прежде всего, связаны с химическим составом вдыхаемого табачного дыма и его повышенной температурой. Вместе с дымом в организм человека попадает более 100 вредных веществ, в том числе: никотин, синильная кислота, оксид углерода, аммиак, мышьяк, радиоактивные полоний ( $^{219}\text{Po}$ ) и свинец ( $^{210}\text{Pb}$ ).

Курение отрицательно влияет на состояние зубов, полости рта, органов дыхания, слизистой оболочки желудка и кишечника, на деятельность эндокринных желез. Оно снижает внимание, ухудшает память и постепенно ослабляет способность к умственной деятельности. Особенно вредит курение беременным женщинам, отрицательно влияя на растущий плод.

Большую опасность (особенно для детей и беременных женщин) представляет вынужденное пассивное курение — вдыхание дыма во время пребывания в помещении, загрязненном табачным дымом.

Алкоголь также оказывает на организм человека отрицательное воздействие. Бытующее до настоящего времени представление о способности алкоголя защитить от вредного действия ионизирующего излучения ошибочно.

Как показали многочисленные наблюдения, под влиянием алкоголя могут происходить преждевременные роды, увеличивается смертность новорожденных. С алкогольной интоксикацией беременных женщин многие ученые связывают возрастание с 60–70-х годов XX столетия частоты возникновения нарушений в развитии детей. К числу типичных нарушений, возникающих при этом, относят косоглазие, врожденные пороки сердца, anomalies развития конечностей. Описаны также случаи anomalies черепа и головного мозга, дефектов развития

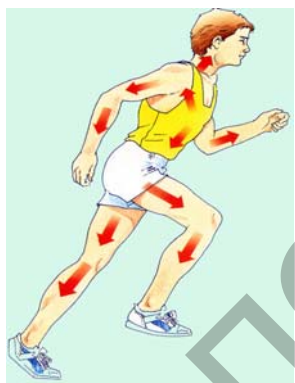
Отказ от вредных привычек





Распорядок дня

Отдых



Кровь доставляет кислород во все части тела этого спортсмена.

внутренних органов, которые обусловлены потреблением алкоголя беременными женщинами.

С алкогольной интоксикацией женщин в период беременности связывают и повышенную раздражительность родившихся детей. Нередко такие дети отстают и в психическом развитии.

Алкоголь и наркотики отрицательно влияют на все органы, снижают интеллект человека, вплоть до полной деградации личности. Будучи сильными ядами, эти вещества особенно пагубно действуют на центральную нервную систему детей.

Важнейшей составляющей здорового образа жизни является *гигиенически рациональный распорядок дня*, т. е. разумное чередование активной деятельности и отдыха, бодрствования и сна. Распорядок дня каждого человека имеет свои особенности, но, в среднем, для работающих и учащихся сутки должны делиться на три примерно равные части (каждая по 8 часов):

- *трудовая деятельность (учеба),*
- *личное время,*
- *сон.*

Основными видами *отдыха* являются:

- *ежегодный,*
- *еженедельный,*
- *ежедневный,*
- *кратковременный отдых в течение рабочего дня.*

Поскольку отдых является физиологической потребностью организма, пренебрежение *ежедневным и еженедельным* отдыхом опасно для здоровья и работоспособности человека.

Особое внимание следует обращать на *еженедельный отдых* школьникам и работникам умственного труда. Многие из них пренебрегают еженедельным отдыхом, посвящают выходные дни все той же напряженной умственной работе, которой занимались на протяжении рабочей недели.

Лучшими формами отдыха являются занятия физкультурой и спортом.

Обязательный элемент *ежедневного отдыха* — 7–8-часовой сон для взрослых и старших школьников. Чтобы обеспечить полноценный сон, рекомендуется:



- отходить ко сну в одно и то же время;
- спать в хорошо проветренном помещении (желательно при открытой форточке в теплое время года);
- устранять беспокоящий шум;
- прекращать занятия, требующие умственного и эмоционального напряжения, в том числе и просмотр телепередач, не менее чем за 2 часа перед тем, как укладываться спать;
- перед отходом ко сну в течение 20–30 минут прогуляться на свежем воздухе.

В условиях повышенного радиационного риска двигательная активность, закаливающие процедуры, а также гигиенически рациональная организация труда и отдыха в сочетании со здоровым питанием, организованным с учетом рекомендаций специалистов, помогут человеку укрепить организм и повысить его сопротивляемость действию негативных факторов окружающей среды, в том числе и ионизирующего излучения в повышенных дозах.

За годы, прошедшие после Чернобыльской катастрофы, благодаря усилиям органов государственного управления, законодателей, ученых и специалистов сделано очень многое, чтобы сократить негативные последствия загрязнения окружающей среды черными радионуклидами для населения и природы.

Однако все усилия и государства, и общества не принесут желаемых результатов, если сами люди не осознают, что в значительной мере от них зависит величина дозы облучения и способность организма противостоять воздействию радиации.

Проживая на территории с повышенным уровнем загрязнения радионуклидами, тем не менее, можно значительно уменьшить дозу облучения организма и степень радиационного риска, сохранить собственное здоровье и здоровье своих близких. Для этого необходимо:

- интересоваться радиоэкологической ситуацией в своем населенном пункте и его окрестностях;
- по возможности избегать посещения или сокращать время пребывания в местах наибольшего загрязнения;

Итак,



Итак,



- использовать рекомендации специалистов по снижению поступления радионуклидов в продукцию растительного и животного происхождения, получаемую в подсобном хозяйстве;
- контролировать уровень загрязнения потребляемой природной продукции (грибов, ягод, лекарственных растений и т. п.) и использовать лишь продукты с допустимым содержанием радионуклидов;
- правильно организовать распорядок дня и собственное питание, пользуясь рекомендациями специалистов;
- отказаться от вредных привычек — курения, потребления алкоголя и других наркотических веществ;
- постепенно и последовательно закаливать организм;
- по возможности повышать двигательную активность, занимаясь физкультурой и спортом;
- ни в коем случае не отказываться от отдыха и разумно организовывать его;
- не концентрироваться на негативных сторонах жизни и не «погружаться» в болезнь.

В заключение напомним кратко наиболее важные витамины и элементы, необходимые для нормального функционирования организма человека, и продукты, богатые ими.

### **Витамин А**

Продукты: шиповник, морковь, петрушка, сельдерей, черемша, лук-порей, томаты, сладкий перец, чеснок, салат, черноплодная рябина, облепиха.

### **Витамины группы В**

Продукты: мясо, молочные продукты, дрожжи, хлеб, гречка, чай, овощи, фрукты.

### **Витамин С**

Продукты: шиповник, облепиха, черная смородина, цитрусовые, петрушка, черемша, сладкий перец.

**Витамин Е**

Продукты: подсолнечное и другие виды растительного масла, облепиха, бобовые, гречка, кукуруза, зеленый горошек, чеснок, лук, черная смородина, брюссельская капуста, салат, морковь.

**Йод**

Продукты: морская капуста, креветки, кальмары, птичьи яйца, овес, гречка, пшенная крупа, бобовые, кедровые орехи, редис, морковь, черноплодная рябина.

**Кальций**

Продукты: творог, сыр, икра, птичьи яйца, бобовые.

**Калий**

Продукты: изюм, курага, чернослив, орехи, морковь.

**Железо**

Продукты: мясо и рыба, яблоки, салат, изюм.

**Кобальт**

Продукты: щавель, укроп, зеленый лук, рыба, морковь, свекла, крапива, клюква, рябина, черная смородина, орехи, горох, фасоль, бобы.

**Магний**

Продукты: зерновые.

**Вопросы для самоконтроля и обсуждения:**

1. Какие законы защищают интересы граждан Республики Беларусь, пострадавших от последствий Чернобыльской катастрофы?
2. Какие меры по защите населения от излучения чернобыльских радионуклидов осуществляют в лесном хозяйстве?
3. При каком уровне загрязнения территории радионуклидами можно собирать дикорастущие ягоды?
4. При каком уровне загрязнения территории чернобыльскими радионуклидами можно собирать грибы и какие?



5. Какие меры способствуют снижению поступления радионуклидов из почвы в растительную продукцию?
6. Какие меры рекомендуется предпринимать, чтобы уменьшить содержание радионуклидов в продукции животноводства?
7. С какой целью создан Полесский государственный радиационно-экологический заповедник?
8. Что означает сбалансированный рацион питания человека?
9. Перечислите наиболее биологически важные витамины и «минералы», необходимые для нормального функционирования организма человека?

---

## Приложения

Репозиторий БГАТУ

Словарь терминов



**Аварийный выброс радиоактивных веществ**

**Авария радиационная**

**Активационный метод**

**Активная зона ядерного реактора**

**Активность**

**Альфа-распад**

**Альфа-частица**

**Антиоксиданты**

**Атом**

**Атомная бомба**

**Атомная единица массы (а. е. м.)**

Поступление радиоактивных веществ в окружающую среду в результате нарушения технологического процесса или аварии на предприятии ядерного топливного цикла.

Потеря управления источником ионизирующего излучения, вызванная неисправностью или повреждением оборудования, неправильными действиями персонала, стихийными бедствиями, а также иными причинами, которые могли привести или привели к облучению людей или загрязнению радионуклидами окружающей среды.

*См. Метод активационный*

Часть ядерного реактора, в которой располагается ядерное топливо и осуществляется цепная реакция ядерного деления.

Количественная характеристика радиоактивного вещества, соответствующая числу самопроизвольных (спонтанных) ядерных превращений содержащихся в нем радионуклидов в единицу времени. В системе СИ единицей измерения активности является Беккерель (Бк). 1 Бк соответствует одному ядерному превращению в секунду. Внесистемная единица измерения активности — Кюри (Ки). 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк, то есть 1 Ки соответствует  $3,7 \cdot 10^{10}$  ядерным превращениям в секунду.

Ядерное превращение, при котором ядро атома испускает альфа-частицу. Образуется новое дочернее ядро, заряд которого на две относительные единицы, а массовое число на 4 а. е. м. меньше, чем у исходного материнского ядра.

Ядро атома гелия ( ${}^4\text{He}$ ), состоящее из двух протонов и двух нейтронов. Все нуклоны в ядре прочно связаны между собой, поэтому ядро отличается высокой устойчивостью. Масса альфа-частицы равна 4 а. е. м., а заряд — «плюс» 2.

Вещества, препятствующие накоплению избыточного количества химически активных радикалов, которые образуются в организме под влиянием различных факторов, в том числе и под действием ионизирующего излучения.

Наименьшая электронейтральная химически неделимая частица вещества, состоящая из положительно заряженного ядра и отрицательно заряженных электронов. Поперечное сечение атома — порядка  $10^{-10}$  м, атомного ядра —  $10^{-14}$ – $10^{-15}$  м.

*См. Бомба атомная*

Единица измерения атомных масс, равная  $1/12$  части массы атома углерода  ${}^{12}\text{C}$ . 1 а. е. м. =  $1,661 \cdot 10^{-27}$  кг. Масса атома, выраженная в атомных единицах массы (относительная атомная масса), является безразмерной величиной, которая показывает, во сколько раз масса атома больше  $1/12$  массы атома углерода  ${}^{12}\text{C}$ .

**Атомная электростанция**

Предприятие, на котором энергия, выделяющаяся в процессе осуществления некоторых видов ядерных реакций (цепной реакции деления тяжелых атомных ядер или реакций термоядерного синтеза легких ядер), преобразуется в тепловую, а затем в электрическую энергию.



**Базовые дозиметрические величины**

*См. Дозиметрические величины базовые*

**Безопасность радиационная**

Степень защищенности настоящего и будущего поколения людей от вредного воздействия ионизирующего излучения.

**Беккерель (Бк)**

Единица измерения активности радионуклидов. При активности радионуклида, равной 1 Бк, за 1 секунду происходит, в среднем, одно спонтанное ядерное превращение.

**Белки (протеины)**

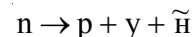
Важнейшие биополимеры, мономерами которых являются аминокислоты. Белки играют исключительно важную роль в жизнедеятельности организмов. Выполняют в организме функции: структурную (входят в состав клеток и тканей), каталитическую (ферментативную), транспортную, защитную, сократительную, регуляторную, рецепторную, энергетическую.

**Белковый обмен**

Совокупность процессов превращения белков и их производных в организме.

**Бета-распад**

Ядерное превращение, в результате которого образуется новое дочернее ядро, заряд которого увеличивается (или уменьшается) на единицу, а массовое число остается без изменения. Один из видов бета-распада — электронный бета-распад осуществляется посредством испускания ядром атома бета-частицы (электрона), который образуется в ядре атома при распаде нейтрона:



**Бета-частица**

Свободный электрон — элементарная частица с массой покоя  $9,11 \cdot 10^{-31}$  кг и зарядом «минус»  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл (Кулон).

**Биогеоценоз**

Природный комплекс, включающий сообщество совместно обитающих живых организмов и среду их обитания, которые объединены обменом веществ и энергии на относительно однородном участке территории.

**Биологические молекулы**

Органические молекулы, входящие в состав живого организма и выполняющие важную роль в его жизнедеятельности. Различают малые биологические молекулы (молекулы аминокислот, глицерола, холина, высших карбоновых кислот, моносахаридов и т. д.) и молекулы биополимеров (полисахариды, белки, нуклеиновые кислоты и др.).

**Биологические нарушения**

Изменения структуры и функций биологических молекул в живых клетках, которые приводят к биохимическим, физиологическим и другим изменениям в организме.

**Биом**

Крупная экосистема, расположенная в определенной климатической и ландшафтно-географической зоне (например, тундра, степь, тайга, пустыня).

<b>Биополимеры</b>	Органические макромолекулы, состоящие из большого числа повторяющихся звеньев (мономеров) — полисахариды, белки, нуклеиновые кислоты. Соответствующие мономеры — моносахариды, аминокислоты, нуклеотиды.
<b>Биосфера</b>	Совокупность всех экосистем планеты в пределах атмосферы, гидросферы и литосферы, охватывающая все биомы планеты.
<b>Биоценоз</b>	Единое сообщество совместно обитающих групп различных организмов (растений, животных, микроорганизмов), населяющих относительно однородное жизненное пространство.
<b>Болезнь лучевая</b>	Один из видов детерминированных эффектов. Комплексная реакция организма на действие ионизирующего излучения в больших дозах. Различают <i>острую</i> и <i>хроническую</i> лучевую болезнь. <i>Острая</i> лучевая болезнь возникает при <i>однократном кратковременном</i> воздействии на организм ионизирующего излучения в дозах 1 Гр и выше, а <i>хроническая</i> — при длительном облучении и постепенном накоплении поглощенной дозы до уровня 0,7–1,0 Гр и выше.
<b>Бомба атомная</b>	Вид боеприпаса, взрыв которого происходит в результате развития неуправляемого цепного процесса деления атомных ядер тяжелых элементов. В зависимости от способа достижения условий, при которых начинается цепная реакция ядерного деления, атомные бомбы могут быть двух типов: <i>пушечного</i> и <i>имплозивного</i> .
<b>Бомба водородная</b>	Вид боеприпаса, взрыв которого происходит в результате развития неуправляемой реакции термоядерного синтеза атомных ядер из более легких ядер химических элементов, расположенных в начале Периодической системы Д.И. Менделеева. (Относится к термоядерному оружию.)
<b>Бомба нейтронная</b>	Вид боеприпаса, взрыв которого обусловлен теми же процессами, что и в водородной бомбе, однако конструкционные особенности нейтронной бомбы обеспечивают выход в окружающую среду мощного потока нейтронов. Нейтронная бомба предназначена для максимального поражения всего живого при минимальном, по сравнению с другими видами ядерного оружия, разрушении зданий, сооружений и других подобных объектов.

## **В**

**Вещество радиоактивное**

**Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов человека**

**Взвешивающие коэффициенты излучения**

Вещество, в состав которого входят радионуклиды, как природные, так и искусственно полученные.

Множители для величины эквивалентной дозы, приписываемые биологическим тканям и органам человека. Используются в радиационной защите при оценке эффективной дозы, чтобы учесть неодинаковую чувствительность тканей или органов человека к возникновению стохастических радиационных эффектов.

Множители для величины поглощенной дозы в органе или биологической ткани, приписываемые каждому виду ионизирующего излучения. Используются в радиационной защите при оценке эквивалентной дозы, чтобы учесть неодинаковую относительную способность разных видов излучения индуцировать биологические эффекты. Чем более серьезные нарушения вызывает излучение в органе или биологической ткани при одинаковой поглощенной дозе, тем больше его взвешивающий коэффициент. Напри-



**Витамины**

**Вмешательство при радиационной аварии**

**Внешнее облучение**

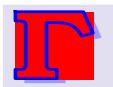
**Внутреннее облучение**

**Водоем замкнутый (непроточный)**

**Водоем открытый (проточный)**

**Водоем открытый (слабопроточный)**

**Водородная бомба**



**Гаметы**

**Гамма-излучение**

**Гены**

**Гигиена питания**

**Глобальный**

**«Горячие» частицы**

**Грей (Гр)**

мер, взвешивающие коэффициенты *гамма*- и *бета*-излучений равны 1, а *альфа*-излучения — 20.

Низкомолекулярные органические вещества различной химической природы, необходимые для нормального протекания процессов обмена веществ, поддерживающих жизнедеятельность организма.

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

*См. Облучение внешнее*

*См. Облучение внутреннее*

Водоем (озеро, пруд и т. п.), который не имеет впадающих и вытекающих ручейков или рек, обеспечивающих смену воды в нем.

Водоем (река, озеро и т. д.), в котором обеспечивается смена воды за счет собственного течения или с помощью впадающих и вытекающих ручьев или рек.

Водоем, имеющий впадающие и вытекающие ручьи или реки, которые обеспечивают в нем смену воды лишь в незначительной степени.

*См. Бомба водородная*

Половые клетки.

Коротковолновое электромагнитное (фотонное) излучение с длиной волны менее 0,2 нм. Часто сопровождает ядерные превращения. Испускается при переходе атомных ядер из возбужденного (метастабильного) состояния на более низкие энергетические уровни. Является ионизирующим излучением.

Отдельные участки молекул *ДНК*, ответственные за хранение информации по определенному наследуемому признаку организма.

Раздел гигиены, посвященный изучению качества пищевых продуктов, а также разработке системы рационального питания, способствующей сохранению и улучшению здоровья людей.

1. Охватывающий весь земной шар, всемирный.
2. Всесторонний, полный, всеобщий, универсальный.

Радиоактивные частицы, удельная активность которых не менее чем на 2 порядка превышает удельную активность окружающей среды.

Единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения. 1 Грей соответствует поглощению 1 Джоуля энергии излучения в расчете на 1 килограмм вещества, подвергающегося облучению. 1 Гр = 1 Дж/кг.



**Дезактивация**

Комплекс мероприятий по снижению уровня загрязнения радионуклидами какой-либо среды или поверхности каких-либо объектов.

**Деление атомного ядра**

Ядерная реакция, в результате которой атомное ядро делится на более легкие ядра, называемые осколками деления.

**Детектор ионизирующего излучения**

Устройство, в котором энергия ионизирующего излучения преобразуется в электрическую или другие виды энергии, что позволяет регистрировать излучение.

**Детерминированные эффекты**

См. **Радиационные эффекты детерминированные**

**Доза поглощенная**

Количество энергии ионизирующего излучения, поглощенной облучаемым веществом в расчете на единицу его массы. В системе СИ единицей измерения является *Грей (Гр)*.  
 $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ .

**Доза предотвращаемая**

Прогнозируемая доза в случае возможной радиационной аварии, которая может быть предотвращена защитными мероприятиями.

**Доза эквивалентная ( $H_{T,R}$ )**

Величина, характеризующая способность ионизирующего излучения вызывать радиационные эффекты в биологической ткани или органе человека. Эквивалентная доза равна произведению величины поглощенной дозы в ткани или органе человека на соответствующий взвешивающий коэффициент излучения, учитывающий относительную способность разных видов излучения индуцировать радиационные эффекты:

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot W_R$$

где  $D_{T,R}$  — средняя поглощенная доза в органе или ткани;  
 $W_R$  — взвешивающий коэффициент излучения  $R$ .

При воздействии ионизирующего излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для всех этих видов излучения.

$$H_T = \sum R_i D_{T,R_i}$$

Единицей измерения эквивалентной дозы в системе СИ является *Зиверт (Зв)*.

**Доза эффективная**

Величина, характеризующая степень воздействия ионизирующего излучения на организм человека. Используется как мера риска возникновения отдаленных последствий при облучении организма человека в целом или отдельных его тканей и органов с учетом их радиочувствительности. Эффективная доза равна сумме произведений величин эквивалентных доз в отдельных тканях и органах человека, умноженных на соответствующие взвешивающие коэффициенты:

$$E = \sum W_T H_T$$

Единицей измерения эффективной дозы в системе СИ является *Зиверт (Зв)*.

**Доза эффективная годовая**

Доза, полученная человеком от источников ионизирующего излучения в течение года, которая равна сумме эффективных доз внешнего и внутреннего облучения за один и тот же год.

**Доза эффективная коллективная**

Доза, полученная коллективом людей от какого-либо источника (источников) ионизирующего излучения за определенный промежуток времени. Она равна сумме индивидуальных эффективных доз членов рассматриваемого коллектива за этот период времени. Является мерой коллективного риска возникновения стохастических радиационных эффектов. Единица измерения — *человеко-зиверт (чел.-Зв)*.

**Доза эффективная коллективная полная (ожидаемая)**

Коллективная доза, которую получили или получают все поколения людей от какого-либо источника излучения за время его существования.

**Дозиметр**

Прибор, предназначенный для определения доз облучения и их мощностей. Обычно используется для определения доз и их мощностей при внешнем облучении объектов.

**Дозиметрические величины**

Величины, характеризующие взаимодействие излучения с веществом. Дозиметрические величины могут быть сопоставлены с радиационными эффектами в облучаемых объектах живой и неживой природы.

**Дозиметрические величины базовые**

Дозиметрические величины, которые могут быть непосредственно измерены (например, поглощенная доза).

**Дозиметрические величины нормируемые**

Величины, с помощью которых устанавливают пределы облучения людей (эквивалентная и эффективная дозы). Эти величины не могут быть непосредственно измерены. Их рассчитывают по базовым дозиметрическим величинам с учетом особенностей ионизирующего излучения и радиочувствительности облучаемых органов или биологических тканей. В современных дозиметрах такой расчет осуществляется по специальной программе, введенной в прибор.

**Дозиметрия**

Раздел прикладной ядерной физики, в котором изучают величины, от которых зависят радиационные эффекты в облучаемых объектах живой и неживой природы. В этом разделе рассматриваются физические величины, характеризующие излучение, и *дозиметрические величины*.

**Дозовый коэффициент**

См. **Коэффициент дозовый**



**Естественный радиационный фон**

См. **Радиационный фон естественный**



**Жизнь**

1. Особая форма организации материи со специфическим обменом веществ и энергией с окружающей средой.
2. Активное, идущее с затратой полученной извне энергии, поддержание и самовоспроизведение специфических структур на основе биополимеров — белков и нуклеиновых кислот.
3. Способ существования открытых коллоидных систем, обладающих свойствами саморегуляции, воспроизведения и развития на основе биохимического взаимодействия

## Жиры



## Заболеваемость или частота заболеваний

## Загрязнение радионуклидами

## Закаливание

## Замедлители

## Захоронение радиоактивных отходов

## Здоровый образ жизни

## Здоровье

## Зиверт (Зв)

## Зона отчуждения (отселения)

белков, нуклеиновых кислот и других соединений вследствие преобразования веществ и притока энергии из внешней среды

Органические соединения, представляющие собой сложные эфиры трехатомного спирта глицерина и одноосновных жирных кислот. Один из основных компонентов клеток и тканей живых организмов.

Число заболевших людей в группе определенной численности.

Присутствие радионуклидов в объектах окружающей среды и в теле человека в количествах, превышающих установленные уровни.

Адаптация (приспособление) организма к изменению температуры окружающей среды и смене погодных условий.

Вещества, используемые в атомных реакторах, работающих на тепловых нейтронах, для замедления нейтронов высоких и средних энергий и превращения их в медленные тепловые нейтроны. Тем самым регулируется количество тепловых нейтронов, инициирующих реакцию ядерного деления. Замедлители позволяют поддерживать цепную реакцию ядерного деления и регулировать ее скорость.

Безопасное размещение радиоактивных отходов, которые в дальнейшем не предполагается извлекать.

Осознанное постоянное выполнение гигиенических правил по укреплению и сохранению индивидуального здоровья и здоровья общества в целом.

Состояние физического, психического и социального благополучия.

Единица измерения эквивалентной и эффективной доз. В случае эквивалентной дозы  $1$  Зиверт соответствует поглощенной дозе величиной в  $1$  Грей для ионизирующего излучения, взвешивающий коэффициент которого равен единице (например, гамма- или бета-излучение). Это означает, что если поглощенная доза гамма- или бета-излучения в каком-то органе или ткани составляет  $0,1$  Грей, то эквивалентная доза, полученная этим органом, равна  $0,1$  Зиверту. В случае альфа-излучения, для которого взвешивающий коэффициент равен  $20$ , при поглощенной дозе в  $0,1$  Грей эквивалентная доза составляет  $2$  Зиверта. Поскольку величина эффективной дозы равна сумме произведений эквивалентной дозы в тканях и органах на соответствующие безразмерные взвешивающие коэффициенты, она также измеряется в Зивертах.

Территория с высоким уровнем загрязнения радионуклидами. В Беларуси в результате катастрофы на ЧАЭС — территория с уровнем загрязнения радионуклидами чернобыльского выброса:

более  $111$  кБк/м<sup>2</sup> ( $3$  Ки/км<sup>2</sup>) по  $^{90}\text{Sr}$ , или

более  $3,7$  кБк/м<sup>2</sup> ( $0,1$  Ки/км<sup>2</sup>) по  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{240}\text{Pu}$ .

**И**

**Излучение**

С этой территории в 1986 году и в последующие годы было проведено отселение людей. В этой зоне разрешены лишь ограниченные виды деятельности в соответствии с действующими нормами радиационной безопасности.

**Излучение ионизирующее**

Перенос энергии в пространстве потоком частиц (корпускулярное излучение) или электромагнитной волной (электромагнитное или фотонное излучение).

**Излучение корпускулярное**

Излучение, прохождение которого через вещество вызывает ионизацию атомов или молекул вещества.

**Излучение электромагнитное (фотонное)**

Поток быстро движущихся частиц с массой покоя, отличной от нуля (например, электронов, протонов, нейтронов, *альфа*-частиц).

**Изотопы**

Перенос энергии в пространстве электромагнитной волной. *Гамма*-, рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное излучение, видимый свет, радиоволны — все это различные виды электромагнитного (фотонного) излучения.

**Иммунитет**

Атомы одного и того же химического элемента, имеющие в ядрах одинаковое количество протонов, но отличающиеся массовыми числами из-за разного количества в ядрах нейтронов.

**Иммунная система**

Способность живого организма противостоять действию негативных факторов среды, сохраняя при этом свою целостность и биологическую индивидуальность.

**Иммунодефицитное состояние**

Совокупность органов, тканей, клеток организма, обеспечивающих формирование иммунитета.

**Ингаляционное поступление радионуклидов**

Врожденное или приобретенное заболевание иммунной системы.

**Инкорпорирование радионуклидов**

Поступление радионуклидов в организм человека через органы дыхания.

**Интерфаза**

Попадание радионуклидов в организм при дыхании, потреблении пищи и воды, а также через кожу.

**Ионизация вещества**

В делящихся клетках — это часть клеточного цикла между двумя последовательными митозами, в неделящихся клетках — промежуток времени от последнего митоза до смерти клетки.

**Ионизация прямая**

Образование заряженных частиц (свободных электронов и ионов) в результате потери и присоединения электронов к атомам или молекулам.

**Ионизация косвенная**

Ионизация вещества под действием корпускулярного излучения.

Ионизация вещества под действием электромагнитного (фотонного) излучения. В этом случае ионизацию вещества вызывают свободные электроны, образующиеся в результате взаимодействия электромагнитного (фотонного) излучения с орбитальными электронами атомов (например, фотоэлектроны при прохождении *рентгеновского* или *гамма*-излучения через вещество).

**Ионизирующее излучение**

**Источник ионизирующего излучения**



**Йодная профилактика**



**Клетка**

**Клеточный цикл**

**Корпускулярное излучение**

**Космическое излучение**

**Коэффициент всасывания (резорбции) радионуклида**

**Коэффициент дозовый**

**Коэффициент накопления радионуклида растением**

**Коэффициент размножения нейтронов**

**Кратность накопления радионуклида**

**Критическая масса**

**См. Излучение ионизирующее**

Устройство или радиоактивное вещество, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение.

Профилактическая процедура, заключающаяся в пероральном введении в организм соединений стабильного йода с целью снижения накопления радиоактивного йода и уменьшения степени облучения щитовидной железы.

Мельчайшая структурно-функциональная единица живых организмов, наделенная всеми основными признаками живой материи. Для нее характерны обмен веществ и энергии, наследственность и изменчивость. Клетка способна к саморегуляции, она может расти, развиваться, реагировать на раздражение и размножаться.

Период существования клетки от момента ее образования путем деления материнской клетки до собственного деления или смерти.

**См. Излучение корпускулярное**

Излучение, поступающее на Землю из космического пространства, в том числе и от ближайшей к нам звезды — Солнца. Включает корпускулярную и электромагнитную (фотонную) компоненты.

Доля радионуклида, поступившего в кровь в легких, желудочно-кишечном тракте или коже, от общего количества радионуклида, поступившего в организм, соответственно, с воздухом в процессе дыхания, с пищей и водой или через кожу.

Эффективная доза облучения человека при поступлении в его организм радионуклида активностью 1 Бк с воздухом при дыхании или с пищевыми продуктами и водой.

Отношение удельной активности растительной биомассы к удельной активности почвы в области корневого питания растения.

Отношение количества нейтронов, освобождающихся при делении атомных ядер на определенном этапе развития цепной реакции ядерного деления, к количеству нейтронов, освобождающихся при делении ядер на предшествующем этапе ядерной реакции.

Отношение максимально накопленного количества радионуклида в органе (ткани) или в организме в целом к количеству радионуклида, ежесуточно поступающего в организм.

Минимальная масса делящегося вещества, обеспечивающая протекание самоподдерживающейся цепной реакции ядерного деления.

**Критический размер ядра**

Размер ядра, при котором резко возрастает вероятность самопроизвольного (спонтанного) ядерного деления.

**Кюри (Ки)**

Внесистемная единица измерения активности. При активности радионуклида, равной 1 Кюри (Ки), происходит, в среднем,  $3,7 \cdot 10^{10}$  самопроизвольных ядерных превращений в секунду. 1 Ки примерно равен активности 1 г радия.



**Латентный (скрытый) период**

Промежуток времени после какого-либо воздействия на организм (например, воздействия ионизирующего излучения), в течение которого нет никаких видимых признаков заболевания.

**Липиды**

Жироподобные вещества, практически нерастворимые в воде, но растворимые в неполярных растворителях (бензоле, эфире, хлороформе и др.). Входят в состав всех живых клеток. Играют важную роль в процессах жизнедеятельности организма. Являются основными компонентами клеточных мембран и влияют на их проницаемость. Служат запасным источником энергии. Выполняют другие жизненно важные функции.

**Личная гигиена**

Совокупность гигиенических знаний и навыков, выполнение которых способствует сохранению и укреплению здоровья человека.

**Лучевая болезнь**

См. **Болезнь лучевая**



**МАГАТЭ**

Международное Агентство по Атомной Энергии — межправительственная организация, созданная в 1957 году для развития международного сотрудничества в области использования ядерной энергии в мирных целях. Контролирует деятельность предприятий ядерной энергетики и обращение с радиоактивными отходами. Оказывает содействие всем странам в развитии ядерной энергетики и помогает обеспечивать ее безопасность.

**Магнитосфера Земли**

Область околоземного пространства, заполненная потоками электрически заряженных частиц космического происхождения. В основном, магнитосферу заполняют частицы, захваченные из потока излучаемых Солнцем частиц. Магнитосфера простирается на расстояние до 8–14 земных радиусов по направлению к Солнцу и на расстояние до нескольких сотен земных радиусов в противоположном направлении. Магнитосфера неоднородна по своим свойствам. Отдельные области магнитосферы образуют радиационные пояса Земли.

**Макроэлементы**

Химические элементы, содержащиеся в организме в относительно большом количестве и необходимые для его нормальной жизнедеятельности. Суточная потребность организма в макроэлементах измеряется граммами и миллиграммами.

**Мейоз**

Способ деления клеток, в результате которого уменьшается число хромосом в дочерних клетках. Посредством мейоза образуются половые клетки — гаметы. После оплодотворения набор хромосом восстанавливается (удваивается).

**Мембрана плазматическая (клеточная)**

Наружная оболочка клетки, образованная двойным слоем фосфолипидов, в который включены белковые молекулы. Через мембрану постоянно транспортируются вещества. Внутрь клетки поступают питательные вещества и кислород, наружу выводятся продукты жизнедеятельности клетки и вещества, необходимые для взаимодействия клеток друг с другом.

**Метод активационный**

Метод определения качественного и количественного состава вещества, заключающийся в облучении вещества потоками нейтронов, *гамма*-квантов или заряженных частиц (протонов, *альфа*-частиц и др.) и измерении интенсивности и энергетического спектра излучения образовавшихся под действием облучения радионуклидов, а также периодов полураспада этих радионуклидов.

**Метод «меченых» атомов**

Метод, основанный на применении радионуклидов для изучения поведения атомов тех или иных химических элементов в природных и техногенных системах.

**Метод радиоуглеродный**

Метод определения возраста образцов растительного или животного происхождения по содержанию радиоактивного углерода  $^{14}\text{C}$ .

**Миграция радионуклидов**

Процессы перераспределения радионуклидов в экосистемах под влиянием природных или техногенных факторов. Нередко сопровождаются процессами химических, физических и физико-химических преобразований (перехода радионуклидов из состава одних химических соединений в состав других, изменения агрегатного состояния радиоактивного вещества, коллоидообразования и т. д.).

**Микроэлементы**

Химические элементы, содержащиеся в организме в чрезвычайно малых количествах и необходимые для его нормальной жизнедеятельности. Суточная потребность в них измеряется микрограммами.

**Митоз**

Основной способ деления соматических клеток, при котором образуются две дочерние клетки с набором хромосом, аналогичным набору родительской клетки.

**МКРЗ**

Международная Комиссия по Радиологической защите, целью которой является обобщение данных по воздействию ионизирующих излучений на организм человека и разработка рекомендаций по его защите от облучения.

**Могильник радиоактивных отходов**

Сооружение, предназначенное для захоронения твердых радиоактивных отходов.

**Морфология**

Наука о форме и строении организмов.

**Мощность дозы**

Скорость изменения дозы (поглощенной, эквивалентной, эффективной), то есть изменение дозы в единицу времени. В системе СИ единицей измерения *мощности поглощенной дозы* ионизирующего излучения является *Грей в секунду* ( $\text{Гр}/\text{с}$ ) и его производные ( $\text{мкГр}/\text{ч}$  и др.), а *мощности эквивалентной и эффективной доз* — *Зиверт в секунду* ( $\text{Зв}/\text{с}$ ) и его производные (обычно  $\text{мкЗв}/\text{ч}$ ).

**Мутации**

Наследуемые изменения генетического материала организма.





**Нейтрон**

Элементарная электронейтральная частица с массой покоя 1,0087 а. е. м. Входит в состав ядер атомов химических элементов (за исключением нуклида  $^1\text{H}$ ).

**Нейтронная бомба**

См. **Бомба нейтронная**

**НКДАР ООН**

Научный Комитет по Действию Атомной Радиации, образованный Генеральной Ассамблеей ООН в 1955 году. Анализирует имеющиеся данные по биологическим эффектам ионизирующего излучения.

**НКРЗ РБ**

Национальная Комиссия по Радиационной защите Республики Беларусь. Разрабатывает и утверждает нормы радиационной безопасности для жителей республики. При разработке и утверждении норм радиационной безопасности НКРЗ РБ исходит из принятых международных норм по радиационной безопасности. При этом учитывается отечественный опыт и опыт стран, достигших высокого уровня радиационной защиты людей.

**Нормирование**

Установление допустимых уровней облучения людей, выше которых ущерб, наносимый облучением, становится для них неприемлемым.

**Нормируемые дозиметрические величины**

См. **Дозиметрические величины нормируемые**

**Нуклеиновые кислоты**

Фосфорсодержащие биополимеры, обеспечивающие хранение и передачу наследственной информации. Состоят из нуклеотидов. В природе существует два вида нуклеиновых кислот — дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) и рибонуклеиновая кислота (РНК). ДНК состоит из 2 полинуклеотидных цепочек, закрученных одна относительно другой. РНК представляет собой одну полинуклеотидную цепочку.

**Нуклеотид**

Сложное химическое соединение, состоящее из азотистого основания, углевода (рибозы или дезоксирибозы) и одного или нескольких остатков фосфорной кислоты.

**Нуклид**

Совокупность атомов с определенным количеством протонов и нейтронов в ядре. В таком смысле понятие «нуклид» чаще всего используют в химии. В ядерной физике этот термин применяют для обозначения не определенного вида атомов, а только их ядер.

**Нуклоны**

Общее название протонов и нейтронов, входящих в состав атомного ядра.



**Облако радиоактивное**

Скопление взвешенных в атмосфере радиоактивных веществ. Образуется при наземном или воздушном ядерном взрыве, а также при крупной аварии ядерной установки с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

**Область малых доз**

Поглощенные дозы ионизирующего излучения, не превышающие 0,2 Гр.

**Облучение**

Воздействие излучения на любой объект.

<b>Облучение внешнее</b>	Облучение от источников излучения, находящихся вне организма.
<b>Облучение внутреннее</b>	Облучение от источников излучения, находящихся в организме. Источниками внутреннего облучения человека, как правило, являются радионуклиды, попадающие в его организм с пищей, водой, воздухом и через кожу.
<b>Облучение острое</b>	Кратковременное воздействие ионизирующего излучения на биологический объект с поглощением большой дозы излучения.
<b>Облучение равномерное</b>	Облучение с одинаковой эквивалентной дозой для всех органов и тканей организма.
<b>Облучение хроническое</b>	Продолжительное воздействие ионизирующего излучения на биологический объект, как правило, в малых дозах, не превышающих 250 мЗв в год при общем облучении организма.
<b>Обмен веществ</b>	Совокупность всех процессов превращения веществ и энергии, происходящих в живом организме, а также между организмом и окружающей средой.
<b>Обстановка радиационная</b>	Состояние загрязненной радионуклидами территории, которое оценивают по плотности загрязнения местности радионуклидами и дозе облучения людей.
<b>Окружающая среда</b>	Совокупность окружающих человека природных объектов — почва, атмосфера, вода, флора и фауна, в их связи и взаимодействии. Иногда в понятие «окружающая среда» включают и искусственно созданные элементы среды (жилые строения, промышленные предприятия, водохранилища, каналы, сельскохозяйственные комплексы и др.).
<b>Орган</b>	Часть животного или растительного организма, имеющая определенную форму и строение, местоположение в организме и выполняющая определенную функцию. Обычно в состав органа входит несколько тканей, одна из которых является основной. В каждом органе животного организма имеется нервная ткань (нервные окончания) и кровеносные сосуды.
<b>Организм</b>	Совокупность упорядоченно взаимодействующих структур, образующих единое целое. Организм состоит из органов, органы — из тканей, ткани — из клеток. (Исключение составляют вирусы — неклеточные организмы, которые проникают в определенные клетки и размножаются внутри этих клеток). Важнейшим строительным материалом клеток являются биологические молекулы. Организм — это открытая система, которой присущи особенности, отличающие живую материю от неживой: обмен веществом и энергией, рост, развитие, саморегуляция, самовоспроизведение, устойчивость. Организму свойственны раздражимость (способность отвечать на внешние раздражения специфическими реакциями) и адаптация (приспособление) к среде обитания.
<b>Организмы-автогетеротрофы</b>	Организмы, которые в зависимости от условий могут осуществлять синтез органических веществ или употреблять их в готовом виде из окружающей среды.
<b>Организмы-автотрофы</b>	Организмы, способные к самостоятельному синтезу необходимых им органических веществ с использованием углекислого газа в качестве главного источника углерода для построения своего тела и энергии света (фотосинтез)

**Организмы-гетеротрофы**

или энергии, которая выделяется при окислении неорганических веществ (хемосинтез).

**Органоиды (органеллы)**

Организмы, которые используют для питания готовые органические вещества (например, произведенные организмами-автотрофами).

Внутриклеточные структуры (клеточные органы), находящиеся в цитоплазме. Имеют разное строение и выполняют специфические функции в процессе жизнедеятельности клетки. Они ответственны за хранение и передачу генетической (наследственной) информации, транспорт веществ, синтез и превращения веществ и энергии, деление, движение и другие функции.

Термин «органоиды» обычно применяют к внутриклеточным структурам животной клетки, а термин «органеллы» — к внутриклеточным структурам растительной клетки.

В животной клетке к органоидам относятся рибосомы, митохондрии, клеточная мембрана, комплекс Гольджи, лизосомы и др.

**Осадки радиоактивные**

Оседающие из атмосферы на земную поверхность радиоактивные вещества, попавшие в атмосферу в результате наземных и воздушных ядерных взрывов или аварий на ядерных установках.

**Острое облучение**

*См. Облучение острое*

**Острые последствия облучения**

*См. Последствия облучения острые*

**Отдаленные последствия облучения**

*См. Последствия облучения отдаленные*

**Отработанное ядерное топливо**

Ядерное топливо, в котором продукты ядерных превращений, поглощающие нейтроны, накопились в таком количестве, что это препятствует протеканию цепной реакции ядерного деления.

**Отражатели**

Конструкционные элементы в ядерном реакторе, применяемые для уменьшения потерь нейтронов, участвующих в реакции ядерного деления.

**Отходы радиоактивные**

Побочные продукты, образующиеся на всех стадиях получения, использования и регенерации радиоактивных веществ, с содержанием радионуклидов выше установленных норм.

**Охрана среды обитания человека**

Совокупность мер политического, экономического, правового, социального, культурного, медицинского, санитарно-гигиенического и противозидемического характера, направленных на уменьшение вредного воздействия факторов среды обитания на здоровье человека.

**Период биологического полувыведения радионуклида ( $T_B$ )**

Промежуток времени, в течение которого активность накопленного в организме (или в отдельном органе) радионуклида сокращается наполовину в результате естественных биологических процессов.

**Период полувыведения радионуклида эффективный ( $T_{\text{эф}}$ )**

Промежуток времени, в течение которого активность радионуклида в организме уменьшается вдвое за счет процессов биологического выведения и радиоактивного распада радионуклида.

$$T_{\text{эф}} = T_{\text{б}} \cdot T_{1/2} / (T_{\text{б}} + T_{1/2}),$$

где  $T_{\text{б}}$  — период биологического полувыведения,  
 $T_{1/2}$  — период полураспада радионуклида.

**Период полуочищения почвы эффективный**

Промежуток времени, в течение которого содержание радионуклида в определенном слое почвы сокращается вдвое за счет естественного распада и выноса радионуклида за пределы этого слоя.

**Период полураспада радионуклида ( $T_{1/2}$ )**

Промежуток времени, за который распадается половина любого количества радионуклида.

**Пероральное поступление радионуклидов**

Поступление радионуклидов в организм с пищей и водой.

**Плазма**

Особое физическое состояние вещества, существующее при температуре  $10^6$ – $10^9$  К. В этом состоянии атомы вещества полностью или частично утрачивают электроны. Ядра, ионы и электроны движутся с огромной скоростью. В состоянии плазмы находится большая часть вещества во Вселенной (звезды, галактические туманности, межзвездная среда), а плазмой можно управлять с помощью электрических и магнитных полей.

**Плазматическая (клеточная) мембрана**

См. **Мембрана плазматическая (клеточная)**

**Плотность загрязнения территории радионуклидом**

Активность радионуклида в расчете на единицу площади территории. Обычно применяется для характеристики уровня загрязнения территории. Единица измерения в системе СИ — Бк/ $\text{м}^2$ . Внесистемная единица — Ки/ $\text{км}^2$ .  
 $1 \text{ Ки}/\text{км}^2 = 37 \text{ кБк}/\text{м}^2$ .

**Поглощенная доза**

См. **Доза поглощенная**

**Популяция**

Совокупность относительно обособленных особей одного вида, объединенных общим местом длительного обитания, свободно скрещивающихся между собой и дающих плодотворное потомство, способных к саморегулированию для поддержания их определенной численности.

**Последствия облучения острые**

Патологические изменения в организме, возникающие в результате кратковременного воздействия ионизирующего излучения в больших дозах на значительную часть тела или при локальном облучении критических органов, тканей или систем органов, повреждение которых в наибольшей степени влияет на жизнедеятельность организма. Проявляются сразу или в течение нескольких часов, дней, недель после облучения.

**Последствия облучения отдаленные**

Заболевания, вызванные действием ионизирующего излучения на организм и возникающие спустя длительное время после облучения.

**Предел годового поступления радионуклида**

Суммарная активность радионуклида (в Бк), поступление которого в организм условного человека в течение года может привести к получению эффективной дозы, равной пределу годовой дозы.

**Предел дозы (годовой)**

Величина годовой эффективной или эквивалентной дозы облучения от техногенного источника, которая не должна превышать в условиях нормальной работы. Соблюдение предела годовой дозы предотвращает возникновение детерминированных эффектов, а вероятность стохастических эффектов при этом сохраняется на приемлемом уровне.

**Предотвращаемая доза**

*См. Доза предотвращаемая*

**Проникающая способность ионизирующего излучения**

Параметр, характеризующий глубину проникновения ионизирующего излучения в вещество. Зависит от вида и энергии излучения, а также от свойств облучаемого вещества (его химического состава и плотности).

**Протон**

Элементарная частица с массой покоя 1,0073 а. е. м. и зарядом «плюс» 1. Входит в состав ядра атома. Число протонов в ядре определяет заряд ядра и соответствует порядковому номеру химического элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева.



**Равномерное облучение**

*См. Облучение равномерное*

**Рад**

Внесистемная единица измерения поглощенной дозы ионизирующего излучения.  
 $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$ .

**Радиационная авария**

*См. Авария радиационная*

**Радиационная безопасность**

*См. Безопасность радиационная*

**Радиационная дефектоскопия**

Метод обнаружения дефектов структуры в промышленных изделиях с помощью ионизирующего излучения. Метод основан на способности ионизирующего излучения неодинаково поглощаться в местах расположения дефектов и на участках с ненарушенной структурой.

**Радиационная защита**

Комплекс методов и средств, направленных на обеспечение безопасных условий труда персонала и жизни населения в условиях возможного воздействия ионизирующего излучения.

**Радиационное поле**

Область распространения и влияния ионизирующего излучения на физические свойства окружающей среды.

**Радиационное торможение**

Потеря энергии быстрых заряженных частиц в электрическом поле атома, сопровождаемая выделением электромагнитного (тормозного) излучения.

**Радиационные эффекты**

Все изменения, возникающие в объекте под действием ионизирующего излучения. Различают два вида радиационных эффектов, которые возникают в организме человека: *детерминированные* и *стохастические*.

**Радиационные эффекты детерминированные**

Эффекты, которые неизбежно возникают в результате облучения организма человека при превышении определенных дозовых уровней. Характерны для больших поглощенных доз (обычно 1 Гр и выше). Чем больше поглощенная доза, тем больше нарушений возникает в организме и тяжелее протекает заболевание, вызванное облучением.

**Радиационные эффекты стохастические**

Эффекты облучения, о которых невозможно определенно сказать, реализуются они или нет у определенного лица на протяжении его жизни. Можно лишь оценить вероятность их

<b>Радиационный контроль</b>	<p>возникновения. Характерны для средних (<math>0,2-1 \text{ Гр}</math>) и малых (<math>\text{менее } 0,2 \text{ Гр}</math>) поглощенных доз. Проявляются в виде раковых и генетических (наследственных) заболеваний. Вероятность возникновения стохастических эффектов возрастает с увеличением дозы облучения.</p> <p>Определение и регистрация параметров, характеризующих степень воздействия ионизирующего излучения на человека.</p>
<b>Радиационный риск</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность возникновения у человека или его потомства какого-либо вредного для здоровья эффекта в результате облучения.</li> <li>2. Вероятность возникновения у человека или его потомства стохастических эффектов облучения при малых (<math>\text{менее } 0,2 \text{ Гр}</math>) и средних (<math>0,2-1,0 \text{ Гр}</math>) дозах облучения.</li> </ol>
<b>Радиационный синдром</b>	<p>Необратимое повреждение жизненно важной системы органов под действием ионизирующего излучения.</p>
<b>Радиационный фон естественный</b>	<p>Радиационное поле, создаваемое источниками ионизирующего излучения естественного происхождения. Естественный радиационный фон у поверхности Земли формируют космическое излучение и излучение радионуклидов земной коры.</p>
<b>Радикалы</b>	<p>Атомы или атомные группировки с неспаренными электронами. Отличаются высокой химической активностью и легко вступают в реакции с атомами и молекулами окружающей среды.</p>
<b>Радиоадаптация</b>	<p>Совокупность морфофизиологических, поведенческих, популяционных и других свойств организмов, обеспечивающих возможность их существования в условиях действия ионизирующего излучения, свойственного специфическим условиям среды обитания организмов.</p>
<b>Радиоактивное вещество</b>	<p>См. <b>Вещество радиоактивное</b></p>
<b>Радиоактивное облако</b>	<p>См. <b>Облако радиоактивное</b></p>
<b>Радиоактивное семейство</b>	<p>Группа радионуклидов, объединенных цепочкой последовательных самопроизвольных ядерных превращений (<i>альфа</i>- и <i>бета</i>-распадов). Известно четыре радиоактивных семейства, родоначальниками которых являются <math>^{238}\text{U}</math>, <math>^{235}\text{U}</math>, <math>^{232}\text{Th}</math>, <math>^{237}\text{Np}</math>. За исключением семейства нептуния, остальные до сих пор существуют на Земле.</p>
<b>Радиоактивность</b>	<p>Самопроизвольное превращение нестабильных атомных ядер в другие более устойчивые ядра с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения.</p>
<b>Радиоактивные индикаторы</b>	<p>Радионуклиды, используемые для изучения поведения атомов химических элементов в различных процессах благодаря сходству поведения атомов химического элемента со стабильными и радиоактивными ядрами, а также возможности детектирования радионуклидов по их излучению.</p>
<b>Радиоактивные осадки</b>	<p>См. <b>Осадки радиоактивные</b></p>
<b>Радиоактивные отходы</b>	<p>См. <b>Отходы радиоактивные</b></p>
<b>Радиоактивные элементы</b>	<p>Химические элементы, все изотопы которых радиоактивны.</p>

**Радиоактивный распад**

Один из видов ядерных превращений, заключающийся в самопроизвольном распаде нестабильных атомных ядер с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующих излучений.

**Радиоактивный «след»**

См. **«След» радиоактивный**

**Радиоиммунный анализ**

Высокочувствительный метод определения содержания в организме человека разнообразных гормонов (гормонов поджелудочной и щитовидной желез, гипофиза и др.), белков сыворотки крови, ферментов и других биологически важных веществ с использованием радиоактивных индикаторов.

**Радиолиз воды**

Химические реакции, протекающие в воде под действием ионизирующего излучения.

**Радиологическая культура**

Система взглядов, убеждений, практических навыков, норм поведения для сохранения и укрепления здоровья в условиях воздействия на организм человека ионизирующего излучения.

**Радиологическое воспитание и обучение**

Целенаправленная деятельность, призванная сформировать систему взглядов и убеждений, практических навыков, норм поведения для сохранения и укрепления здоровья в условиях воздействия на организм человека ионизирующего излучения техногенных источников.

**Радиометр**

Прибор, предназначенный для измерения активности определенных радионуклидов в образцах различного происхождения или определения удельной активности образцов путем регистрации излучения этих радионуклидов с помощью детекторов ионизирующих излучений.

**Радионуклиды**

Атомы с нестабильными ядрами, которые самопроизвольно превращаются в ядра атомов других химических элементов или других изотопов того же элемента с выделением в окружающую среду энергии в виде ионизирующего излучения.

**Радионуклиды естественного происхождения**

Радионуклиды, существующие в окружающей среде и образующиеся без участия человека. На Земле присутствует свыше 300 радионуклидов естественного происхождения.

**Радионуклиды искусственного происхождения**

Радионуклиды, получаемые при осуществлении ядерных реакций в искусственных условиях (например, в ядерных реакторах и при проведении ядерных взрывов). Известно свыше 1 000 искусственно полученных радионуклидов.

**Радиопротекторы**

Вещества, способные уменьшать негативное воздействие ионизирующего излучения на организм.

**Радиорезистентность (радиоустойчивость)**

Устойчивость клеток, тканей и всего организма к действию ионизирующего излучения.

**Радиочувствительность**

Способность биологических объектов изменяться под действием ионизирующего излучения. Мерой радиочувствительности является доза облучения, вызывающая гибель 50 % клеток или организмов. Чем меньше такая доза, тем более радиочувствителен биологический объект.

**Радиоэкология**

Наука, которая изучает особенности существования организмов и сообществ организмов, их взаимоотношения между собой и с окружающей средой в условиях постоянного воздействия ионизирующего излучения.

## Радон

Радиоактивный химический элемент (Rn), атомные ядра которого образуются в результате распада атомных ядер радия. В обычных условиях радон представляет собой инертный газ, который тяжелее воздуха. Повсеместно выделяется из земной коры. На открытом пространстве он не представляет опасности для человека, однако может накапливаться во внутренних, плохо проветриваемых помещениях жилых и производственных зданий. При вдыхании воздуха, содержащего радон, основную опасность представляют продукты его распада (радиоактивные изотопы полония, висмута, свинца), которые задерживаются в органах дыхания.

## Рацион питания

Состав и количество продуктов питания, потребляемых живым организмом за определенный промежуток времени (за сутки — суточный рацион, за месяц — месячный рацион и т. д.).

## Репарация ДНК

Свойственный клеткам всех организмов процесс восстановления структуры поврежденной ДНК.



## «След» радиоактивный

Территория, загрязненная радиоактивными веществами по пути движения радиоактивного облака, образованного при ядерном взрыве или выбросе радиоактивных веществ в атмосферу в результате ядерной аварии.

## Спектрометр

Прибор, предназначенный для определения качественного и количественного содержания радионуклидов в образце. Дает наиболее полную информацию об излучении радионуклидов. Позволяет определить энергетический спектр излучения, то есть распределение частиц или гамма-квантов по энергиям. Поскольку спектр излучения каждого радионуклида уникален, это позволяет определять, какие радионуклиды и в каком количестве содержатся в анализируемом образце.

## Среда обитания человека

Совокупность объектов, явлений и факторов окружающей среды (природной и искусственной), которая определяет условия жизнедеятельности человека.

## Стохастические эффекты

См. **Радиационные эффекты стохастические**

## Стратифицированные озера

Глубокие озера, в которых происходит слабое перемешивание воды. Температура озерной воды, ее химический состав (в том числе и концентрация радионуклидов) и другие характеристики заметно меняются с глубиной.

## Стратосфера

Слой воздуха, расположенный над тропосферой на высоте от 8–10 км в высоких широтах и от 16–18 км вблизи экватора до 50–55 км над поверхностью Земли.

## Стресс

Состояние, возникающее в организме под влиянием сильных внешних воздействий. При этом в организме происходят изменения, направленные на преодоление негативных последствий этих воздействий.

## Счетчик излучения человека (СИЧ)

Прибор, являющийся разновидностью радиометра, который предназначен для определения в теле человека содержания радионуклидов (например,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) по сопровождающему их распад гамма-излучению.





**Таксоны**

Систематические единицы или категории, лежащие в основе классификации организмов. Вид, род, семейство, отряд, класс, тип — все это таксоны. Основной систематической единицей является вид. Сходные виды объединяются в роды, сходные роды — в семейства, сходные семейства — в отряды и т. д.

**Теплоноситель**

Вещество, которое используется в ядерном реакторе для отвода из активной зоны тепловой энергии, в которую преобразуется ядерная энергия, освобождающаяся при делении тяжелых атомных ядер и сопутствующих ядерных превращениях.

**Томография**

Метод неразрушающего исследования внутренней структуры объекта с помощью излучения. Метод основан на послойном просвечивании объекта в различных направлениях и регистрации излучения, прошедшего через объект (так называемое сканирующее просвечивание).

В настоящее время в зависимости от используемого излучения существуют рентгеновская, магнитная, протонная, ультразвуковая, гамма- и другие разновидности томографии.

**Трансурановые элементы**

Радиоактивные элементы, расположенные в Периодической системе за ураном (*Np, Pu, Am* и др.).

**Тропосфера**

Самый нижний, примыкающий к земной поверхности слой атмосферы, простирающийся в среднем до высоты 10 км над полюсами и до высоты 16–18 км над экватором.

**Тротильный эквивалент**

Показатель, который используется для оценки мощности взрыва боеприпасов, в том числе и ядерных. Определяется по количеству взрывчатого вещества тротила (тринитротолуола), которое требуется взорвать, чтобы взрыв по энергии соответствовал (был эквивалентен) взрыву боеприпаса.



**Углеводы (сахара)**

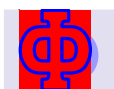
Органические соединения, общая формула которых может быть представлена в виде  $C_n(H_2O)_m$ . Большинство природных углеводов являются производными циклических форм моносахаридов. Углеводы — источник энергии в организме.

**Ударная волна**

Область сильно сжатого воздуха, распространяющаяся со сверхзвуковой скоростью по всем направлениям от места взрыва.

**Управление цепной реакцией ядерного деления**

Регулирование скорости реакции ядерного деления (числа актов деления тяжелых атомных ядер в единицу времени) путем поддержания в активной зоне реакции определенного количества нейтронов, способных вызывать ядерное деление.



**Факторы среды обитания**

Биологические (вирусные, бактериальные и иные), физико-химические (шум, вибрация, ультразвук, тепловые, ионизирующие и другие излучения), социальные (питание, водоснабжение, условия труда, быта, отдыха) и другие свойства среды обитания, которые оказывают воздействие на человека и его здоровье.

**Ферми (Ф)**

Внесистемная единица измерения расстояния в масштабах атомного ядра. Названа по имени итальянского физика Энрико Ферми.  $1 \text{ ферми (Ф)} = 10^{-15} \text{ м}$ .

**Физическая культура**

Составная часть культуры, представляющая собой совокупность духовных и материальных ценностей, создаваемых и используемых обществом в целях физического развития человека, укрепления здоровья и повышения его двигательной активности.

**Физическое воспитание**

Часть общего процесса воспитания человека. Этот процесс направлен на укрепление здоровья, гармоническое развитие форм и функций организма человека. Способствует повышению работоспособности, продлению жизни и творческому долголетию человека.

**Фотон**

Квант (порция) электромагнитного излучения, обладающий свойствами волны и частицы (в узком смысле — квант света).

**Фотоэлектроны**

Электроны, утратившие связь с атомным ядром в результате взаимодействия с электромагнитным излучением.

**Фотоэффект**

Появление в веществе фотоэлектронов под действием электромагнитного излучения.



**Химический элемент**

Вид атомов, в ядрах которых содержится определенное количество протонов. Число протонов определяет величину положительного заряда ядра и положение элемента в Периодической системе Д.И. Менделеева. Порядковый номер химического элемента в Периодической системе соответствует количеству протонов в ядрах атомов этого элемента.

**Хромосомные aberrации**

Структурные перестройки хромосом, сопровождающиеся их разрывом, за которым обычно следует соединение разорванных концов в новых сочетаниях. При этом возможна утрата части генного материала клетки.

**Хромосомы**

Органоиды клеточного ядра, состоящие из хроматина. При делении клетки весь хроматин конденсируется в хромосомы — своеобразные «сейфы» для хранения информации. В закодированной форме (в виде последовательности нуклеотидов **ДНК**) содержат информацию о каждой клетке и обо всем организме, включая его индивидуальные особенности.

**Хроническое облучение**

*См. Облучение хроническое*



**Цепная реакция ядерного деления**

Процесс деления тяжелых атомных ядер в условиях, когда нейтроны, освобождающиеся в результате ядерного деления, вызывают новые акты деления тяжелых ядер, обеспечивая дальнейшее протекание реакции ядерного деления.

**Цепная реакция ядерного деления управляемая**

Цепная реакция ядерного деления, протекающая с нарастающей скоростью в результате увеличения числа свободных нейтронов, инициирующих новые акты деления.

**Цепная реакция ядерного деления управляемая**

Цепная реакция ядерного деления, скорость протекания которой регулируется за счет поддержания определенного количества нейтронов, инициирующих деление ядер тяжелых элементов.

**Цитоплазма**

Высокоорганизованная многокомпонентная система сложной структуры, расположенная между ядром клетки и плазматической мембраной. Цитоплазма состоит из жидкого вещества — гиалоплазмы (матрикса) и клеточных органоидов. Гиалоплазма представляет собой сложную коллоидную систему на основе воды, в состав которой входят белки, нуклеиновые кислоты, углеводы и другие вещества. Органоиды — митохондрии, рибосомы, лизосомы, эндоплазматический ретикулум, комплекс Гольджи и др. находятся в гиалоплазме во взвешенном состоянии.



**Эквивалентная доза**

*См. Доза эквивалентная*

**Экологическая система (экосистема)**

Сообщество совместно обитающих живых организмов различных видов в совокупности с жизненным пространством, которое оно занимает и где осуществляется круговорот веществ и обмен энергией. В природной экосистеме есть все необходимое для ее самостоятельного и длительного существования.

**Экология**

Наука о взаимоотношениях живых организмов между собой и с окружающей средой.

**Электрон**

Элементарная частица с массой покоя  $9,11 \cdot 10^{-31}$  кг и зарядом «минус»  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл (Кулон). Абсолютная величина заряда электрона принята за единицу измерения заряда в атомной и ядерной физике.

**Энергия излучения**

Энергия частиц (в случае корпускулярного излучения) или фотонов (в случае электромагнитного излучения). Единица измерения в системе СИ — Джоуль (Дж). Внесистемная единица измерения — электронвольт (эВ).  
 $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

**Эффективная годовая доза**

*См. Доза эффективная годовая*

**Эффективная доза**

*См. Доза эффективная*

**Эффективная коллективная доза**

*См. Доза эффективная коллективная*

**Эффективная коллективная полная (ожидаемая) доза**

*См. Доза эффективная коллективная полная (ожидаемая)*

**Эффективный период полувыведения ( $T_{\text{эф}}$ )**

*См. Период полувыведения эффективный*

**Эффективный период полуочищения почвы**

*См. Период полуочищения почвы эффективный*

**Эффекты радиационные**

*См. Радиационные эффекты*



**Ядерная зима**

Возможное изменение климата вследствие выброса в атмосферу огромного количества веществ при ядерных взрывах в случае крупномасштабной ядерной войны. В результате длительного присутствия этих веществ в атмосфере могут резко измениться ее свойства — увеличиться поглощение солнечных лучей за счет находящихся в воздухе посторонних частиц. Это может привести к понижению температуры у поверхности Земли и глобальному изменению климата.

**Ядерное оружие**

Оружие массового поражения, действие которого основано на использовании внутриядерной энергии, освобождающейся при протекании неуправляемой цепной реакции деления тяжелых атомных ядер или реакции термоядерного синтеза легких атомных ядер.

**Ядерный взрыв**

Мощный взрыв, вызванный высвобождением ядерной энергии при быстроразвивающейся цепной реакции деления тяжелых ядер, а также при реакции термоядерного синтеза легких атомных ядер (термоядерный взрыв).

**Ядерный реактор**

Устройство для осуществления управляемой цепной реакции деления тяжелых атомных ядер.

**Ядерный топливный цикл (ЯТЦ)**

Весь процесс получения тепловой и электрической энергии за счет деления тяжелых атомных ядер — от разработки урановой руды до утилизации радиоактивных отходов.

**Ядро атома**

Положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся его масса. Масса атомного ядра примерно в 4 000 раз больше массы всех электронов атома. Ядро атома состоит из протонов и нейтронов, связанных между собой ядерными силами. Протон и нейтрон имеют общее название «нуклон», что в переводе с греческого означает «ядро». Число протонов определяет электрический заряд атомного ядра и число электронов в атоме. Общее количество нуклонов в ядре называют массовым числом атома.

**Ядро клетки**

Составная часть клетки, ограниченная двумембранной оболочкой, которая отделяет ее от цитоплазмы. Внутри ядра в жидкой среде (*кариоплазме*) расположены *хроматин*, одно или несколько плотных образований — *ядрышек* и синтезируемые в ядре структуры. При делении клетки хроматин конденсируется в хромосомы. В хромосомах (*носителях генов*), состоящих преимущественно из **ДНК** и белка, хранится генетическая (наследственная) информация клетки. Ядро — это главный управляющий центр клетки, выполняющий функции передачи дочерним клеткам генетического материала и функции регуляции клеточной активности.

**Некоторые физические и дозовые величины и единицы измерения**

**Таблица 1. Активность, ее производные и единицы измерения**

Величина, обозначение	Единицы измерения		
	СИ	Уста- ревшая	Соотношение между единицами измерения
<p><b>Активность, <math>A</math></b>  <math>A = \Delta N / \Delta t</math>,                      где <math>\Delta N</math> — число ядерных превра-                      щений за промежуток времени</p>	Бк	Ки	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
<p><b>Удельная активность, <math>A_{уд}</math></b>  <math>A_{уд} = A / m</math>,                      где <math>A</math> — активность вещества,                      масса которого равна <math>m</math>.</p>	Бк/кг	Ки/кг	$1 \text{ Ки/кг} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/кг}$
<p><b>Объемная активность, <math>A_{об}</math></b>  <math>A_{об} = A / V</math>,                      где <math>A</math> — активность вещества,                      объем которого равен <math>V</math>.</p>	Бк/м <sup>3</sup>	Ки/м <sup>3</sup>	$1 \text{ Ки/м}^3 = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/м}^3$
<p><b>Поверхностная плотность загрязнения, <math>A_s</math></b>  <math>A_s = A / S</math>,                      где <math>A</math> — активность радионуклида                      на площади <math>S</math></p>	Бк/м <sup>2</sup>	Ки/км <sup>2</sup>	$1 \text{ Ки/км}^2 = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк/км}^2$ $= 37 \text{ кБк/м}^2$

**Таблица 2. Дозовые величины и единицы их измерения**

Величина, обозначение	Единицы измерения		
	СИ	Уста- ревшая	Соотношение между единицами измерения
<p><b>Поглощенная доза, <math>D</math></b>  <math>D = \Delta E / \Delta m</math>,                      где <math>\Delta E</math> — количество энергии, пе-                      реданное излучением веществу                      в элементарном объеме, <math>\Delta m</math> —                      масса вещества в этом объеме</p>	Гр (Грей) мГр мкГр	Рад	$1 \text{ рад} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр}$
<p><b>Мощность поглощенной дозы, <math>MД_0</math></b>  <math>MД_0 = \Delta D / \Delta t</math>,                      где <math>\Delta D</math> — измерение поглощенной                      дозы за промежуток времени <math>\Delta t</math>.</p>	Гр/с мкГр/час	Рад/с	$1 \text{ рад/с} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ Гр/с}$

Продолжение таблицы 2.

Величина, обозначение	Единицы измерения		
	СИ	Устаревшая	Соотношение между единицами измерения
<p><b>Эквивалентная доза, <math>H_T</math></b>  <math>H_T = D_T / W_R,</math>                      где <math>D_T</math> — средняя поглощенная доза излучения <math>R</math>-типа в биологической ткани или органе человека;  <math>W_R</math> — взвешивающий коэффициент излучения.                      Например, <math>W_\gamma = W_\beta = 1; W_\alpha = 20</math>  <math>W_\gamma, W_\beta, W_\alpha</math> — взвешивающие коэффициенты соответственно гамма-, бета- и альфа-излучения.</p>	<p><b>Зв</b>                      (Зи-верт)                      мЗв                      мкЗв</p>	Бэр	$1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$
<p><b>Мощность эквивалентной дозы, <math>MД_H</math></b>  <math>MД_H = \Delta H / \Delta t,</math>                      где <math>\Delta H</math> — приращение эквивалентной дозы за время <math>\Delta t</math>.</p>	<p><b>Зв/с</b>                      мкЗв/ч</p>	Бэр/с	$1 \text{ бэр/с} = 10^{-2} \text{ Зв/с}$
<p><b>Эффективная доза, <math>E</math></b>  <math>E = H_{T1} \cdot W_{T1} + H_{T2} \cdot W_{T2} + \dots,</math>                      где <math>H_{T1}, H_{T2}</math> и т. д. — эквивалентные дозы облучения тканей или органов человека, которые обозначены индексами <math>T1, T2, \dots</math> и т. д.;  <math>W_{T1}, W_{T2}</math> и т. д. — взвешивающие коэффициенты для тканей и органов, которые характеризуют относительную чувствительность соответствующих тканей и органов человека к воздействию ионизирующего излучения.</p>	<p><b>Зв/с</b>                      мкЗв/ч</p>	—	$1 \text{ Зв/с} = 300 \text{ мкЗв/ч}$
<p><b>Мощность эффективной дозы, <math>MД_E</math></b>  <math>MД_E = \Delta E / \Delta t,</math>                      где <math>\Delta E</math> — приращение эффективной дозы за время <math>\Delta t</math>.</p>	<p><b>Зв/с</b>                      мкЗв/ч</p>	—	—
<p><b>Коллективная эффективная доза, <math>E_{кол}</math></b>  <math>E_{кол} = E_{ср} \cdot n,</math>                      где <math>E_{ср}</math> — средняя величина индивидуальной эффективной дозы членов рассматриваемого коллектива людей, состоящего из <math>n</math> человек.                      Коллективная эффективная доза относится к определенному промежутку времени (например, продолжительностью 1 год).</p>	<b>Чел-Зв</b>	—	—

Таблица 3. Единицы измерения доз облучения

Наименование приставки	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение приставки	
		русское	международное
<b>Атто</b>	$10^{-18}$	а	A
<b>Фемто</b>	$10^{-15}$	ф	F
<b>Пико</b>	$10^{-12}$	п	P
<b>Нано</b>	$10^{-9}$	н	N
<b>Микро</b>	$10^{-6}$	МК	$\mu$
<b>Милли</b>	$10^{-3}$	м	m
<b>Сантим</b>	$10^{-2}$	с	c
<b>Деци</b>	$10^{-1}$	д	d
<b>Дека</b>	10	да	da
<b>Гекто</b>	$10^2$	г	h
<b>Кило</b>	$10^3$	к	K
<b>Мега</b>	$10^6$	М	M
<b>Гига</b>	$10^9$	Г	G
<b>Тера</b>	$10^{12}$	Т	T
<b>Пета</b>	$10^{15}$	П	P
<b>Экса</b>	$10^{18}$	Э	E

Библиография

1. Андриюшин И.А., Чернышов А.К., Юдин Ю.А. Укрощение ядра: Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР, Саров: Аналитич. Центр по проблемам нераспространения. – 2003. – 481 с. – ISBN 5-7493-0621-6.
2. Артемов Н.Е., Бондарев А.А., Карпов В.И. и др. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы. – М.: Атомиздат, 1980.
3. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. Люксембург: Европейская Комиссия, 176, А 3, 1998. – ISBN 92-828-3140-X.
4. Атом без грифа «секретно»: точка зрения. – Москва – Берлин, 1992. – 144 с.
5. Аугуста И., Буриан З. По путям развития жизни. – Прага: Артия, 1963. – 176 с.
6. Биологический энциклопедический словарь / Гл. ред. М.С. Гиляров; Редкол. А.А. Баев, Г.Г. Винберг Г.А. Зварзин и др. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – 864 с. – ISBN 5-85270-002-9.
7. Браун Т., Лемей Г.Ю. Химия в центре наук. Т. 1, 2. – М.: Мир, 1983.
8. Бударко В.А., Киршин В.А., Антоненко А.Е. Радиобиологический справочник. – Мн.: Ураджай, 1992. – 336 с. – ISBN 5-7860-0622-0.
9. Буддаков Л.А. Радиоактивные вещества и человек. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 160 с. – ISBN 5-283-03018-0.
10. Быховский А.В., Зараев О.М. Горячие аэрозольные частицы при техническом использовании атомной энергии. – М.: Атомиздат, 1974. – 256 с.
11. Вдовенко В.М. Современная радиохимия. – М.: Атомиздат, 1969. – 544 с.
12. Войткевич Г.В. Химическая эволюция Солнечной системы. – М.: Наука, 1979. – 176 с.
13. Вопросы социальной защиты граждан, пострадавших от катастрофы на Чернобыльской АЭС. – Гомель: Комчернобыль при Совете Министров РБ – РНИУП «Институт радиологии», 2005. – 36 с.
14. Гигиена и здоровый образ жизни / Дурейко Л.И., Трофимова Г.А., Романенко Н.Э. и др.; под ред. Л.Ф. Кузнецовой – Мн.: Тонпик, 2003. – 164 с. – ISBN 985-6673-29-1.
15. Гладков К.А. Атом от А до Я. М.: Атомиздат, 1974. – 272 с.
16. Гофман Дж. Чернобыльская авария: радиационные последствия для настоящих и будущих поколений. Мн.: Высшая школа, 1994. – 574 с. – ISBN 5-339-00869-X
17. Гуманитарные последствия аварии на Чернобыльской АЭС. Стратегия реабилитации: Отчет, подготовленный по заказу ПРООН и ЮНИСЕФ при поддержке УКГД ООН и ВОЗ. – Мн.: Юнипак, 2002. – 80 с. – ISBN 985-6418-40-2.
18. Долежал Н.А., Емельянов И.Я. Канальный ядерный энергетический реактор. – М.: Атомиздат, 1980. – 208 с.
19. Дорожко С.В., Бубнов В.П., Пустовит В.Т. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях. Радиационная безопасность: Уч.пособие в 3-х частях. Часть 3. Радиационная безопасность. – Мн.: Технопринт, 2003. – 209 с. – ISBN 985-464-123-6.
20. Дубинин Н.П. Некоторые проблемы современной генетики. – М.: Наука, 1994. – 224 с. – ISBN 5-02-005765-7.
21. Животный мир в зоне аварии Чернобыльской АЭС / Под ред. Л.М. Сущени, М.М. Пикулика, А.Е. Пленина. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. – 263 с. – ISBN 5-343-0136-1.
22. Защита от радиации. Учебное пособие / Пер. с англ. – Игналинская АЭС. – GKD – 001Ru, 2001-04 – 124 с.



23. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. – М.: Просвещение, 1989. – 224 с.
24. Итоги научных исследований в области радиэкологии окружающей среды за десятилетний период после аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. С.К. Фирсаковой. – Гомель, 1996. – 206 с. – ISBN 5-09-000622-9.
25. Казимерчук З. Всеведующие изотопы. – Мн.: Вышэйшая школа, 1989. – 224 с. – ISBN 5-339-00235-7 (СССР); ISBN 83-7001-052-0 (ПНР).
26. Кальвин М. Химическая эволюция / Пер. с англ.; ред. и предисловие А.И. Опарина. – М.: Мир, 1971. – 240 с.
27. Картель Н.А., Макеева Е.М., Мезенко А.М. Генетика: Энциклопедический словарь. – Мн: Тэхналогія, 1999. – 448 с. – ISBN 985-6234-57.
28. Кейда Р. Твердые частицы в атмосфере и космосе. – М.: Мир, 1969. – 284 с.
29. Кеньон Д., Стейнман Г. Биохимическое предопределение / Пер. с нем.; под ред. А.И. Опарина. – М.: Мир, 1972. – 336 с.
30. Козлов Б.Ф. Справочник по радиационной безопасности. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
31. Колевич Т.А., Матулис В.Э., Матулис В.Э. Химия: Учебное пособие по общей и неорганической химии для учащихся лицея БГУ. – Мн.: Изд. центр БГУ, 2003. – 152 с. – ISBN 985-476-131-2.
32. Кудельский А.В. Современные проблемы гидрогеологии и геоэкологии. – Мн.: Технопринт, 2005. – 536 с. – ISBN 985-464-752-8.
33. Кульмянёва Л.Р., Котаў М.М. Радыёбіялогія: Вучэб. дапам. для 10–11-х кл. сярэд. шк. – Мн.: Нар. асвета, 1993. – 112 с. – ISBN 5-341-01098-1.
34. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1969. – 280 с.
35. Лес и Чернобыль (Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС, 1986–1994 гг.) / Ипатьев В.А., Булавик И.М., Багинский В.Ф.; под ред. В.А. Ипатьева. – Мн.: МНПП «СТЕНЕР», 1994. – 248 с.
36. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации. / Под общей ред. Ипатьева В.А. – Гомель: Институт леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
37. Люцко А.М. Фон Чернобыля. – Мн.: Бел. Сов. Энциклопедия, 1990. – ISBN 5-85700-064-5.
38. Люцко А.М., Качарская Л.В. Радыяцыйная бяспека. Вучэбны дапаможнік для 5–9-х класаў базавай школы. – Мн.: Нар. асвета, 1994. – 107 с. – ISBN 985-03-0018-3.
39. Люцко А.М. Радиационная безопасность. Учеб. пособ. для 10–11 кл. средней шк. – Мн.: Нар. асвета, 1994. – 94 с.
40. Люцко А.М., Ролевич И.М., Тернов В.И. Выжить после Чернобыля. – Мн.: Высшая школа, 1990. – 108 с. – ISBN 5-339-00493-7.
41. Маврищев В.В. Общая экология. Курс лекций. – Мн.: Новое знание, 2005. – 299 с. – ISBN 985-475-131-7.
42. Максимов М.Т., Оджагов Г.О. Радиоактивные загрязнения и их измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 204 с.
43. Манолов К.Р., Тютюнник В.М. Биография атома. Атом – от Кембриджа до Хиросимы / Переработанный пер с болг.; Под ред. Д.Н. Трифонова. – М.: Мир, 1985. – 246 с.
44. Маргулова Т.Х., Кабанов Л.П., Плютинский В.И., Байбаков В.Д. Атомная энергетика сегодня и завтра / Под ред. Т.Х. Маргуловой. – М.: Высш. шк., 1989. – 168 с. – ISBN 5-06000548-8.

45. Николаев Л.А. Химия жизни. Пособие для учителей. – М.: Просвещение, 1977. – 239 с.
46. Обербайль К. Витамины-целители / Пер. С. Борича – И. Лившиц: Спутники вашего здоровья. – Мн.: Парадокс, 2003. – 446 с. – ISBN 985-451-129-4.45.
47. Общая биология. Учебное пособие для 10 класса общеобразовательной школы / Под ред. Н.Д. Лисова. – Мн.: Ураджай, 2001. – 244 с. – ISBN 985-04-0477-9.
48. Общая биология. Учебное пособие для 11 класса 11-летней общеобразовательной школы для базового и повышенного уровня / Под ред. Н.Д. Лисова. – Мн.: Беларусь, 2002. – 279 с. – ISBN 985-04-0553-8.
49. Одум Ю. Экология в 2-х т. / Пер. англ.; под ред. В.Е. Соколова. – М.: Мир, 1986. – Т. I. – 326 с. – Т. II. – 376 с.
50. Опарин А.И. Происхождение жизни / Факсимильное издание. – Тбилиси: Мецниереба, 1985.
51. Основные положения обследования, оценка радиационной обстановки и построение карт загрязнения радионуклидами территории Республики Беларусь. – Мн.: МЧС РБ, 1993.
52. Панфилова Н.Е. Молоко и здоровье. – Мн.: Ураджай, 1985. – 160 с.
53. Памятка «Вы собираетесь в лес...». Рекомендации для населения по пользованию лесами в окрестности г. Гомеля и г. Добруша (Гомельский лесхоз). – Мн.: МЧС РБ – Минлесхоз, 1998. – 32 с.
54. Памятка «Вы собираетесь в лес...». Рекомендации для населения по пользованию лесами на территории Столинского лесхоза. – Мн.: МЧС РБ – Минлесхоз РБ, 1998. – 41 с.
55. Памятка «Вы собираетесь в лес...». Рекомендации по пользованию лесами на территории Лельчицкого лесхоза. – Мн.: – МЧС РБ – Минлесхоз РБ, 1998. – 49 с.
56. Памятка «Вы собираетесь в лес...». Рекомендации по пользованию лесами на территории Лунинецкого лесхоза. Мн.: – МЧС РБ – Минлесхоз РБ, 1998. – 41 с.
57. Памятка для населения, проживающего на территории, загрязненной радиоактивными веществами. – Мн.: Комчернобыль, 2000. – 10 с.
58. Памятка «Сельскохозяйственное производство на радиоактивных землях». – Мн.: НИРУП ИПА, 2001. – 30 с.
59. Политехнический словарь / Под ред. А.Ю. Ишлинского. – М.: Сов. энциклопедия, 1989. – 655 с. – ISBN 5-85270-003-7.
60. Последствия Чернобыльской катастрофы в Республике Беларусь. Национальный доклад / Под ред. Е.Ф. Конопки, И.В. Ролевича. – Мн.: МЧС РБ – АН Беларуси, 1996. – 95 с.
61. Последствия Чернобыльской катастрофы в Республике Беларусь. Национальный доклад // Под ред. Е.Ф. Конопки. – Мн.: МЧС РБ – АН Беларуси, 2002.
62. Правила ведения агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель Республики Беларусь на 2002 – 2005 гг. / Под ред. И.М. Богдевича. – Мн.: Министерство сельского хозяйства и природо-пользования РБ, 2002. – 73 с.
63. Природа Белоруссии. Популярная энциклопедия. – Мн.: Бел. Сов. энциклопедия им. П. Бровки, 1986. – 598 с.
64. Проблемы сельскохозяйственной радиологии // Под ред. Лоцилова Н.А. – Киев, 1992. – 204 с.
65. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде // Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с. – ISBN 5-03-003016-6.

66. 15 лет после Чернобыльской катастрофы: Последствия для Республики Беларусь и их преодоление. Национальный доклад / Под ред. В.Е. Шевчука и В.Л. Гурачевского. – Мн.: Комчернобыль. – 98 с.
67. 20 лет после Чернобыльской катастрофы: последствия в Республике Беларусь и их преодоление. Национальный доклад / Под ред. В.Е. Шевчука и В.Л. Гурачевского. – Мн.: Издательство «Беларусь», 2006. – 111 с. – ISBN 985-0100627-1.
68. Радиационная безопасность. Нормы радиационной безопасности (НРБ-2000). Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСП-2002). – Мн.: Министерство здравоохранения РБ, 2003. – 180 с.
69. Радиоактивное загрязнение растительности Беларуси // Под общ. ред. В.И. Парфенова, Б.И. Якушева. – Мн.: Навука і тэхніка, 1995. — 582 с. ISBN 5-343-01420-8.
70. Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Труды международной конференции. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – Т. 1. – 786 с. – ISBN 5-286-01391-0. – Т. 2. – 576 с. – ISBN 5-286-01390-2.
71. Радиационная безопасность. Рекомендации Международной комиссии по радиологической защите 1990 года. Публикация 60 МКРЗ, часть 2. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
72. Радиоэкология: успехи и перспективы. Материалы научного семинара. – Севастополь, 1994. – 129 с.
73. Республиканские допустимые уровни содержания радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в пищевых продуктах и питьевой воде (РДУ-99). – Мн.: 1999. – 6 с.
74. Руководство по ведению агропромышленного производства в условиях радиоактивного загрязнения земель РБ на 1997 – 2000 гг. / Под ред. И.М. Богдевича. – Мн.: Академия аграрных наук, 1997. – 78 с.
75. Руководство по ведению лесного хозяйства в зонах радиоактивного загрязнения. – Мн.: МЧС РБ, 1995. – 112 с.
76. Рэмсен Э.Н. Начала современной химии: Справ. изд.: Пер. с англ. Под ред. В.И. Барановского, А.А. Белюстина, А.И. Ефимова, А.А. Потехина. – Л.: Химия, 1989. – 784 с. ISBN 5-7245-0127-9.
77. Рябов И.Н., Белова Н.В., Крышев И.И., Рябцев И.А. Радиоэкологическая безопасность: Пособие для учителей. – Тула: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцева Российской АН, 2001. – 216 с. – ISBN 5-8125-0140-8.
78. Современная Беларусь: энциклопедический справочник. В 3 т. Т. 2. Экономический и научный потенциал. – Мн.: Беларус. наука, 2007. – 680 с. – ISBN 985-08-0781-4.
79. Сборник нормативных, методических, организационно-распорядительных документов Республики Беларусь в области радиационного контроля и безопасности. – Мн.: МЧС РБ – Гомельский филиал НИКИ Радиационной медицины и эндокринологии Минздрава РБ, 2000. – 272 с.
80. Сельскохозяйственная радиоэкология // Под ред. Алексахина Р.М. и др. – М.: Экология, 1991. – 396 с.
81. Солодовникова И.И., Сандаков Д.Б. Биология в терминах и понятиях. – Мн.: Аверсэ, 2003. – 160 с. – ISBN 985-478-126-7.
82. Трансурановые элементы в окружающей среде // Под ред. У.С. Хэнсона. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 345 с.
83. Физические величины. Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с. – ISBN 5-283-04013-5.

84. Физический энциклопедический словарь. – М.: Сов. энциклопедия, 1989. – 656 с.
85. Физический энциклопедический словарь / Под ред. Ю.В. Прохорова. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. – 928 с.
86. Фор Х. Основы изотопной геологии. – М.: Мир, 1989. – 590 с. – ISBN 5-03-00927-2.
87. Химия окружающей среды. / Под ред. Бокриса Дж.О.М. – М.: Химия, 1982. – 671 с.
88. Холл Э. Дж. Радиация и жизнь / Пер с англ.; под ред. Л.А. Ильина. – М.: Медицина, 1989. – 256 с. – ISBN 5-225-01650-2; ISBN 0-08-028819-7.
89. Чернобыль. Десять лет спустя. Радиационные и медицинские последствия. – Париж: Агенство по ядерной энергии – Организация экономического сотрудничества и развития, 1996. – 128 с. – ISBN 5-7602-0018-6.
90. Шеннон С. Питание в атомном веке. Как уберечь себя от малых доз радиации / Пер. с англ. П.М. Добрусова, С.Г. Скоморохова. – Мн.: Беларусь, 1991.
91. Экологическая безопасность и актуальные проблемы рационального природопользования. Законодательное и информационное обеспечение. // Матер. Междунар. научно-практической конф. 13–14 декабря 2002 г., Гомель. – Гомель: РУП «Центр научно-технической и деловой информации», 2003. – 124 с. – ISBN 985-6522-38-2.
92. Экология. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Под ред. В.В. Денисова. – Ростов-на-Дону: Изд. центр «МарТ», 2002. – 640 с.
93. Ядерные технологии в XXI веке. Россия на мировом рынке услуг по обращению с ядерным топливом. – М.: Пресс-центр Минатома России. – 20 с.
94. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. – М: Высшая школа, 1988. – 424 с.
95. Chernobyl Catastrophe / Ed. Baryakhtar V.G. – Kyiv: Editorial House of Annual Issue “Export of Ukrain”, 1997. – 576 p. – ISBN 966-2259-01-6.
96. Kaplan N.O., Kennedy E.R. Current Aspects of Biochemical Energetic. – New-York, 1966. – 27 p.
97. Radiation, People and the Environment. – Viena: IAEA, 2004. – 81 p.

# СОДЕРЖАНИЕ

К читателям

3

## ЧАСТЬ I ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЭКОЛОГИИ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

### Глава 1 Общие вопросы радиэкологии

- 1.1. Экология и радиэкология ..... 5
- 1.2. Радиэкология как наука ..... 9
- 1.3. Основные понятия радиэкологии ..... 13

### Глава 2 Радиоактивность и ядерные излучения

- 2.1. Из истории открытия ионизирующих излучений ..... 16
- 2.2. Что мы знаем об атомах ..... 17
- 2.3. Радиоактивность. Радионуклиды. Радиоактивные семейства ..... 20
- 2.4. Искусственная радиоактивность ..... 24
- 2.5. Закон радиоактивного распада. Период полураспада. Активность ..... 26
- 2.6. Основные виды ионизирующих излучений ..... 28

### Глава 3 Основы дозиметрии и радиометрии

- 3.1. Дозиметрич. понятия. Основные дозиметрич. величины ..... 40
- 3.2. Способы измерения ионизирующих излучений и определения доз облучения ..... 59
- 3.3. Формирование доз внутреннего и внешнего облучения человека ..... 68

### Глава 4 Радиационный фон окружающей среды

- 4.1. Космическое излучение ..... 77
- 4.2. Радиация земной коры ..... 83
- 4.3. Ионизирующие излучения искусственного происхождения ..... 92
- 4.4. Эволюция радиационного фона под влиянием природных и антропогенных факторов ..... 93

### Глава 5 Биологические эффекты ионизирующего излучения

- 5.1. Роль излучений в зарождении и поддержании жизни на Земле ..... 104
- 5.2. Действие ионизирующего излучения на биологические молекулы и клетки ..... 114
- 5.3. Действие ионизирующего излучения на ткани, органы и системы органов ..... 130
- 5.4. Действие ионизирующего излучения на организм человека ..... 137
- 5.5. Последствия облучения организма человека ..... 149
- 5.6. Принципы радиационной безопасности ..... 156

### Глава 6 Радиация на службе у человека

- 6.1. Использование источников ионизирующего излучения в медицине, промышленности, науке и сельском хозяйстве ..... 168
- 6.2. Принцип действия ядерных реакторов и их типы ..... 180
- 6.3. Атомные электростанции ..... 189
- 6.4. Ядерный топливный цикл и проблема радиоактивных отходов ..... 199
- 6.5. Аварии на ядерных установках и предприятиях ядерного топливного цикла ..... 207

### Глава 7 Испытания ядерного оружия

- 7.1. Что такое ядерное оружие ..... 216
- 7.2. Испытательные ядерные полигоны ..... 229
- 7.3. Последствия ядерных взрывов ..... 231

## **ЧАСТЬ II КАТАСТРОФА НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ: ПРИЧИНЫ, ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА, ПОСЛЕДСТВИЯ**

### **Глава 8 Загрязнение биосферы радионуклидами чернобыльского выброса**

8.1. Почему произошла Чернобыльская катастрофа?.....	237
8.2. Как чернобыльские радионуклиды попали в окружающую среду?.....	239
8.3. Загрязнение радионуклидами территории Республики Беларусь.....	242
8.4. Загрязнение радионуклидами воздушной и водной сред.....	251
8.5. Поведение чернобыльских радионуклидов в почве .....	257
8.6. Загрязнение радионуклидами природной растительности .....	261
8.7. Последствия катастрофы для животного мира .....	266
8.8. Содержание радионуклидов в продуктах питания .....	269

### **Глава 9 Последствия Чернобыльской катастрофы**

9.1. Экономический ущерб .....	277
9.2. Дозы облучения населения .....	279
9.3. Здоровье населения .....	282
9.4. Социально-психологические последствия.....	286

### **Глава 10 Преодоление последствий Чернобыльской катастрофы в Республике Беларусь**

10.1. Что делает государство, чтобы преодолеть последствия катастрофы и защитить пострадавшее население.....	290
10.2. Защитные мероприятия.....	297
10.3. Правильное питание.....	312
10.4. Здоровый образ жизни .....	325

### **ПРИЛОЖЕНИЕ**

Словарь терминов.....	333
Некоторые физические и дозовые величины и единицы их измерения.....	357
Библиография.....	360