

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Кафедра мобилизационной подготовки  
здравоохранения и медицины катастроф**

**ТЕМА № 8: «Основы биологического действия ионизирующих излучений»**

**Л е к ц и я**  
по Медицине катастроф  
раздел 2

Обсуждено на заседании кафедры  
мобилизационной подготовки  
здравоохранения и медицины  
катастроф  
26 мая 2017 г.  
Протокол № 23

Краснодар, 2017

**Учебные цели:**

1. Разъяснить основные понятия в радиобиологии. Основные механизмы действия ионизирующего излучения.

2. Довести до студентов характеристику очагов создаваемых радиоактивными веществами в военное время и в районах чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

**Учебные вопросы:**

1. Предмет радиобиологии. Цели и задачи радиобиологии как науки и учебной дисциплины. Структура радиобиологии как науки и направления практической деятельности врача. Основные разделы радиобиологии как учебной дисциплины.

2. Виды ионизирующих излучений и их свойства. Количественная оценка ионизирующих излучений. Основы дозиметрии. Источники радионуклидов в природе и народном хозяйстве. Факторы, вызывающие поражения людей при ядерных взрывах и радиационных авариях. Общая характеристика радиационных поражений, формирующихся при ядерных взрывах, радиационных авариях.

3. Понятие зон радиоактивного заражения. Очаги радиационного поражения.

4. Физическая, физико-химическая, химическая и биологическая стадии в действии ионизирующих излучений. Молекулярные механизмы лучевого повреждения биосистем. Биологическое усиление радиационного поражения.

5. Реакции клеток на облучение. Формы лучевой гибели клеток. Действие излучений на ткани, органы и системы организма.

6. Радиобиологические эффекты. Классификация радиобиологических эффектов. Значение радиобиологических эффектов для судьбы облученного организма.

**Время: 2 часа.**

Литература

Наименование	Автор(ы)	Год, место издания
Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита: учебник	Куценко С.А., Бутомо Н.В., Гребенюк А.Н.	СПб.: Фолиант, 2004
Медицина катастроф. Курс лекций: учебное пособие	Левчук И.П., Третьяков Н.В.	М.: ГЭОТАР- Медиа, 2013
Медицина катастроф. Избранные лекции: сборник	Под. ред. В.Б.Бобия, Л.В.Аполановой	М.: ГЭОТАР- Медиа, 2012
Медицина катастроф: учебное пособие	Сидоров П.И.	М.: Академия, 2012
Медицина катастроф: учебное пособие	М.М.Мельников	Новосибирск-М.: Арта, 2011
Руководство к практическим занятиям по военной гигиене: учебное пособие	Архангельский В.И., Бабенко О.В.	М.: ГЭОТАР- Медиа, 2007
Руководство к практическим занятиям по военной гигиене: учебное пособие	Архангельский В.И., Бабенко О.В.	М.: ГЭОТАР- Медиа, 2012
Медицина катастроф. Теория и практика: учебное пособие	Кошелев А.А.	СПб: ЭЛБИ, 2006
Экстремальная токсикология: руководство для врачей	Бадюгин И.С., Каратай М.С., Константинова Т.К.	М.: ГЭОТАР- Медиа, 2006

Руководство к практическим занятиям по военной гигиене: учебное пособие	Архангельский В.И., Бабенко О.В.	М.: ГЭОТАР-Медиа, 2007
Руководство к практическим занятиям по военной гигиене: учебное пособие	Архангельский В.И., Бабенко О.В.	М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012
Внутренние болезни. Военно-полевая терапия: учебное пособие	Ракова А.Л., Сосюкина А.Е.	СПБ: ООО «Издательство ФОЛИАНТ», 2006
Военно-полевая хирургия: учебник	Гуманенко Е.К.	СПБ: ООО «Изд-во ФО-ЛИАНТ», 2005
Медицина катастроф (организационные вопросы): учебник	Сахно И.И., Сахно В.И.	М.: ГОУ ВУНМЦ МЗ РФ, 2002

**Учебно-материальное обеспечение:**

а) наглядные пособия

1) Слайд-шоу к теме № 8.

б) технические средства обучения мультимедийный проектор.

## Текст лекции

### Введение

Всё на Земле, включая человека, постоянно находится в сфере воздействия естественного и техногенного радиационного фона. Постоянно возрастающее число людей подвергается облучению в процессе профессиональной деятельности, при применении радиоактивных источников в промышленном производстве и научных исследованиях. В онкологической практике все шире используется способность радиации убивать живые клетки. При этом наряду со злокачественно перерожденными неизбежно повреждаются и здоровые. Реально имели место радиационные аварии, при которых персонал аварийных установок получал высокие, порой смертельные дозы облучения, а обширные территории подвергались загрязнению радиоактивными продуктами в опасных для здоровья человека количествах. Радиоактивные загрязнения стали важным фактором, определяющим состояние среды обитания человека, благополучна или неблагоприятна экологическая обстановка. Несоизмеримы по масштабам с техногенными воздействиями и авариями последствия применения ядерного оружия.

### Учебные вопросы:

#### **1. Предмет радиобиологии. Цели и задачи радиобиологии как науки и учебной дисциплины. Структура радиобиологии как науки и направления практической деятельности врача. Основные разделы радиобиологии как учебной дисциплины.**

Предмет радиобиологии составляют многообразные проявления действия излучений на всех уровнях организации живого – от молекулярного до организменного, а часто и популяционного, механизмы возникновения этих проявлений, влияние на развитие конкретных биологических эффектов условий воздействия радиации (вида излучения, его дозы, мощности дозы, ее распределения в пространстве, продолжительности облучения), модифицирующие воздействия на эффекты облучения факторов нерадиационной природы.

На грани со смежными науками сформировались радиационная биохимия, радиационная иммунология, радиационная гематология, радиационная генетика, радиационная цитология и др. Эффекты, наблюдающиеся после воздействия излучений, позволяют понять механизмы функционирования этих систем и сущность этих процессов. Многие достижения последних десятилетий в биохимии, молекулярной биологии, иммунологии, генетике, геронтологии, вообще в медицине, стали возможны лишь благодаря тесным связям этих наук с радиобиологией. Это и открытие механизмов ферментативной репарации ДНК, и выяснение и конкретизация наиболее ранних этапов развития кроветворных клеток, и раскрытие сложных межклеточных кооперативных взаимодействий в иммунном ответе, и изучение процессов физиологической регенерации, и т.д., и т.п.

**Целью радиобиологических исследований является** познание закономерностей биологического действия ионизирующих излучений и обоснование таких важных прикладных аспектов, как:

- прогнозирование последствий радиационных воздействий;
- нормирование радиационных воздействий при работе с источниками ионизирующих излучений;
- разработка режимов поведения и защитных мероприятий при вынужденном пребывании в зонах воздействия ионизирующих излучений;
- разработка средств и методов профилактики радиационных поражений, диагностики и прогнозирования тяжести поражений, обоснование проведения при них неотложных мероприятий первой помощи и последующего лечения;
- разработка наиболее рациональных режимов терапевтического облучения и др.

Фундаментальные положения радиобиологии являются результатом анализа тщательно проведенных на четкой количественной основе экспериментальных исследований и клинических наблюдений.

В альянсе радиобиологии с другими дисциплинами оформились отдельные самостоятельные направления, такие, как радиационная гигиена и радиационная экология,

радиобиология опухолей, космическая радиобиология и др. Одно из таких направлений - **военная радиобиология**. Таким образом, сегодня радиобиологию справедливо относят к числу фундаментальных наук, и изучение ее полезно не только для ориентировки в проблемах медицинской противорадиационной защиты.

**2. Виды ионизирующих излучений и их свойства. Количественная оценка ионизирующих излучений. Основы дозиметрии. Источники радионуклидов в природе и народном хозяйстве. Факторы, вызывающие поражения людей при ядерных взрывах и радиационных авариях. Общая характеристика радиационных поражений, формирующихся при ядерных взрывах, радиационных авариях.**

Ионизирующие излучения (ИИ) получили своё название по свойству, отличающему их от большинства остальных излучений – способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе. Все ИИ подразделяются на электромагнитные и корпускулярные.

**Электромагнитные ионизирующие излучения**

В зависимости от источника электромагнитные ИИ подразделяются на **тормозное, характеристическое** и **γ-излучение**. Тормозное излучение возникает при замедлении в электрическом поле (например, окружающем атомные ядра), ускоренных заряженных частиц. Характеристическое излучение обусловлено энергетическими перестройками внутренних электронных оболочек возбуждённых атомов, а γ-излучение является продуктом ядерных превращений радиоактивных элементов (радиоизотопов).

Совокупность тормозного и характеристического излучения называют рентгеновским излучением (в англоязычной литературе чаще употребляют термин «х-излучение»). В земных условиях оно всегда имеет искусственное происхождение, в то время как γ-излучение может иметь как искусственное, так и естественное происхождение.

Наиболее важные свойства электромагнитных ИИ стали известны человечеству уже через 50 суток после их обнаружения В.К. Рентгеном. 28 декабря 1895 г. он вручил председателю вюрцбургского физико-медицинского общества тезисы, содержащие характеристику х-излучения, актуальную и в наши дни. Эта характеристика справедлива и для других электромагнитных ИИ; основные её положения приведены в таблице.

**Свойства электромагнитных ионизирующих излучений**

Общие со свойствами видимого света	Отличные от свойств видимого света
<p>Распространяются прямолинейно; не отклоняются в магнитном и электрическом полях; имеют интенсивность, обратно пропорциональную квадрату расстояния до их источника</p>	<p>Невидимы невооружённым глазом; Проникают сквозь непрозрачные для видимого света материалы; Частично задерживаются различными материалами в прямой зависимости от плотности этих материалов; не отражаются от зеркальных поверхностей; не фокусируются оптическими линзами и не преломляются оптическими призмами; не дают интерференционную картину при пропускании сквозь обычные дифракционные решётки; ионизируют газы, изменяют цвет стекла, минералов, засвечивают фотопластинки, завёрнутые в светонепроницаемую бумагу.</p>

Несмотря на значительные различия свойств рентгеновского излучения и видимого света, немецкому физику Максуду Лауэ в 1912 г. удалось выяснить, что они тождественны по своей природе, различаясь лишь длиной волн. Самые длинные из волн рентгеновского излучения на порядок короче, чем волны видимого света, что объясняет их разное поведение на зеркальных поверхностях, в линзах и на дифракционных решётках. С этим же связано и наличие у рентгеновских и  $\gamma$ -лучей ионизирующих свойств.

Действительно, энергия фотона  $E$  прямо пропорциональна частоте электромагнитных колебаний  $\nu$  и обратно пропорциональна длине их волны  $\lambda$ :

$$E = h \nu = hc/\lambda,$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света.

В электрон-вольтах эту энергию можно рассчитать из уравнения:

$$E = 12400/\lambda,$$

где величина  $\lambda$  выражена в нм.

Поскольку минимальная энергия ионизации атома в веществе равна 34 эВ, легко определить, какие из электромагнитных излучений обладают ионизирующими свойствами: это те из них, длина волны которых меньше 365 нм. Несмотря на то, что энергия некоторых квантов ультрафиолетового излучения достаточна для ионизации вещества, термин «ионизирующие» закрепился лишь за первыми двумя из представленных в таблице 60 излучений.

#### Длины волн различных видов электромагнитного излучения

Название электромагнитного излучения		Диапазон длин волн, нм
$\gamma$ -излучение		< 0,01
Рентгеновское излучение		< 10
Ультрафиолетовое излучение		10 – 400
Видимый свет	Фиолетовый	400 – 420
	Синий	420 – 490
	Зелёный	490 – 540
	Жёлтый	540 – 640
	Красный	640 – 800
Инфракрасное излучение		800 – 100000
Радиоволны		> 10 <sup>5</sup>

Как будет показано далее, ионизация веществ лежит в основе биологической активности ИИ. Этот же феномен используется для их выявления и количественной оценки (дозиметрии).

Взаимодействие электромагнитного ИИ с атомами вещества может протекать в формах фотоэффекта, Комpton-эффекта и образования электрон-позитронных пар.

**Фотоэффект** – поглощение одной из внешних электронных оболочек атома всей энергии фотона с превращением её в кинетическую энергию «выбитого» из атома электрона. Этот эффект преобладает при энергии фотонов до 0,05 МэВ.

**Комpton-эффект** – передача электрону лишь части энергии фотона; остальная энергия передаётся вторичному («рассеянному») фотону, который взаимодействует с атомами по механизму фотоэффекта или комpton-эффекта. При энергиях квантов от 0,1 до

2,0 МэВ (например, в случае проникающей радиации ядерного взрыва) на долю комптон-эффекта приходится до 100% поглощённой веществом энергии  $\gamma$ -излучения.

**Образование электрон-позитронных пар** при прохождении  $\gamma$ -кванта в непосредственной близости от ядра атома. Это основной вид взаимодействия фотонов с веществом при их энергии более 50 МэВ, его удаётся наблюдать лишь в лабораторных условиях.

Образующиеся при поглощении квантов электромагнитного излучения ускоренные заряженные частицы (фотоэлектроны, комптоновские электроны) являются вторичным, но первостепенным по значимости фактором ионизации и возбуждения атомов в облучаемом веществе. Поэтому рентгеновы и гамма-лучи называют косвенно ионизирующими излучениями.

Энергия фотонов определяет не только их ионизирующую, но и проникающую способность. Высокоэнергетические («жёсткие» - по определению В.К. Рентгена) электромагнитные излучения легко проникают вглубь тела человека и животных, вызывая ионизацию во всех клетках организма. Напротив, «мягкие» рентгеновы лучи, которые получают при напряжении на аноде рентгеновской трубки величиной в несколько кВ, задерживаются, в основном, кожей, не оказывая существенного прямого действия на глубоко лежащие ткани.

При прохождении электромагнитных ИИ через вещество интенсивность их потока уменьшается в соответствии с уравнением закона Ламберта-Бера:

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего, а  $I$  – интенсивность прошедшего сквозь экран толщиной  $x$  потока излучения;  $e$  – основание натурального логарифма и  $\mu$  - коэффициент ослабления, величина которого зависит от энергетического спектра ИИ и свойств вещества.

Практически удобным показателем экранирующей способности материалов является толщина их слоя, ослабляющего излучение вдвое - слой половинного ослабления. Эта величина связана с коэффициентом ослабления ИИ зависимостью:

$$D = 0,693 / \mu .$$

Коэффициент ослабления электромагнитных ИИ растёт с увеличением порядкового номера в таблице Менделеева, а значит, и атомной массы входящих в вещество элементов. Поэтому наиболее эффективно экранируют от электромагнитных ИИ вещества, содержащие тяжёлые металлы («защита экранированием»). Свинец и барий вводят в состав материалов, используемых при сооружении помещений для лучевой диагностики и терапии. «Защита экранированием» дополняется «защитой расстоянием», основанной на зависимости интенсивности потока ИИ от расстояния до его источника, и «защитой временем» - минимизацией времени воздействия ИИ на персонал.

### **Корпускулярные ионизирующие излучения**

К корпускулярным ИИ относят нейтроны и ускоренные заряженные частицы.

Нейтронное излучение возникает при бомбардировке атомного ядра ускоренной заряженной частицей или фотоном высокой энергии. Помимо лабораторных условий, такой путь реализуется при взрывах атомных боеприпасов, где источником этих частиц служат цепные реакции деления ядер  ${}_{92}\text{U}^{235}$  или  ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ . Другой путь образования нейтронов – синтез ядер лёгких элементов – дейтерия ( ${}_{1}\text{D}^2$ ), трития ( ${}_{1}\text{T}^3$ ) и лития ( ${}_{3}\text{Li}^6$ ), происходящий при взрывах термоядерных (водородных) боеприпасов.

**Нейтроны** могут быть классифицированы по их энергии:

## Классификация нейтронов в зависимости от энергии

Название	Энергия частицы
Тепловые	$< 0,1$ эВ
Медленные	$0,1 - 500,0$ эВ
Промежуточные	$0,5 - 100,0$ кэВ
Быстрые	$0,1 - 10,0$ МэВ
Очень больших энергий	$10 - 1000$ МэВ
Сверхбыстрые (релятивистские)	$> 1000$ МэВ

Большинство нейтронов, образующихся при взрывах атомных боеприпасов, относится к быстрым нейтронам, а при взрывах водородных боеприпасов – к нейтронам очень больших энергий.

Так как нейтроны не имеют заряда, они не оказывают непосредственного влияния на электронную оболочку атомов, взаимодействуя только с ядрами. Сталкиваясь с ядрами, нейтроны либо отталкиваются от них (рассеяние), либо поглощаются ими (участие в ядерных перестройках). Ниже раскрывается содержание процессов взаимодействия нейтронов с атомами вещества.

**Упругое рассеяние.** При столкновении с ядрами углерода, азота, кислорода, фосфора нейтроны теряют 10-15 % , а при столкновении с ядрами водорода – до 2/3 своей энергии. Потерянная нейтронами энергия передаётся «ядрам отдачи» - положительно заряженным частицам, имеющим высокую ионизирующую способность. Упругое рассеяние – основной путь потери энергии нейтронами, возникающими при атомных и водородных взрывах.

**Неупругое рассеяние.** В этом случае часть энергии расходуется нейтронами на возбуждение (разновидность колебательного движения) ядер-мишеней. В исходное состояние ядра возвращаются, испуская фотоны  $\gamma$ -излучения.

**Ядерные перестройки.** При поглощении ядрами нейтронов происходит выброс протонов,  $\alpha$ -частиц,  $\gamma$ -квантов, возникают искусственные радиоактивные изотопы (это явление называется наведённой активностью).

Образующиеся при взаимодействии нейтронов с веществом ускоренные заряженные частицы – ядра отдачи – вносят основной вклад в ионизацию и возбуждение атомов вещества. Поэтому нейтроны, так же как рентгеновы и  $\gamma$ - лучи, называют косвенно ионизирующим излучением.

**Проникающая способность нейтронов** несколько меньше, чем у  $\gamma$ -излучения, но существенно больше, чем у ускоренных заряженных частиц. При ядерных и водородных взрывах нейтронный поток распространяется на сотни метров, легко проникая сквозь стальную броню и железобетон. Энергия нейтронов наиболее эффективно передаётся ядрам лёгких атомов. Поэтому вещества, богатые атомами водорода, бериллия, углерода, находят применение в экранировании от нейтронного излучения. Тяжёлые металлы, плохо задерживающие нейтроны, могут применяться для ослабления вторичного  $\gamma$ -излучения, возникающего в лёгких материалах в результате неупругого рассеяния нейтронов и ядерных перестроек.

**Ускоренные заряженные частицы** – это перемещающиеся в пространстве источники электрического поля (поток электронов -  $\beta$ -частиц, протонов, ядер атома гелия -  $\alpha$ -частиц). Естественными источниками ускоренных заряженных частиц являются некоторые из природных радиоизотопов. К искусственным источникам относятся искусственные радиоизотопы и ускорители заряженных частиц.

При прохождении через вещество заряженные частицы могут взаимодействовать с его атомами. Ниже раскрываются формы этого взаимодействия.

**Упругое рассеяние** – изменение траектории заряженной частицы в результате отталкивания от атомных ядер без потери энергии. Чем меньше масса частицы, тем больше

её отклонение от прямого направления. Поэтому траектории  $\beta$ -частиц в веществе изломаны, а протонов и  $\alpha$ -частиц – практически прямые.

**Неупругое торможение.** Электрон при прохождении вблизи атомного ядра теряет скорость и энергию. При этом может испускаться фотон тормозного излучения, летящий в том же направлении, что и электрон.

**Ионизация и возбуждение атомов** в результате взаимодействия частицы с их электронными оболочками – основной путь потери энергии ускоренных заряженных частиц в веществе. Под действием их электрического поля происходит возмущение электронных оболочек атомов с переходом последних в возбуждённое или ионизированное состояние. Способность ускоренных заряженных частиц непосредственно взаимодействовать с электронными оболочками атомов позволила определить их как первично ионизирующие излучения.

**Проникающая способность** ускоренных заряженных частиц, как правило, невелика. Она прямо пропорциональна энергии, массе и квадрату скорости частицы. Напротив, связь проникающей способности с абсолютной величиной заряда частиц является отрицательной. Пробег  $\beta$ -частиц в воздухе составляет десятки сантиметров, а  $\alpha$ -частиц – миллиметры. Одежда надёжно защищает человека от воздействия этих излучений извне. Однако поступление их источников внутрь организма является опасным, поскольку пробег  $\alpha$  или  $\beta$ -частиц в тканях превышает размеры клеток, что создаёт условия для воздействия излучения на чувствительные к нему субклеточные структуры.

### Плотнoионизирующие и редкoионизирующие излучения

Первичные изменения атомов и молекул сводятся к ионизации или возбуждению и качественно не зависят от вида действующего на них ИИ. Однако при одном и том же количестве энергии, поглощённой единице массы вещества, микропространственное распределение этой энергии в облучённом объёме различно. Это различие определяется линейной передачей энергии (ЛПЭ) - количеством энергии, передаваемой частицей веществу в среднем на единицу длины пройденного в нём пути:

$$\text{ЛПЭ} = dE/dx,$$

где  $E$  – энергия частицы (эВ);  $x$  – путь частицы (мкм).

ЛПЭ зависит от вида ИИ и плотности вещества. Значения этого показателя, приводимые в справочных таблицах, обычно соответствуют величине ЛПЭ конкретного ИИ в воде. ЛПЭ электромагнитных ИИ и нейтронов определяется величиной ЛПЭ первичных ионизирующих факторов (электронов и ядер отдачи, соответственно).

Зная величину ЛПЭ, можно определить среднее число ионов, образующихся на единицу длины пути частицы ИИ. Для этого надо разделить величину ЛПЭ на величину энергии, необходимой для образования одной пары ионов (как отмечалось, эта величина составляет 34 эВ). Количество пар ионов, образующихся в среднем на 1 мкм пути частицы ИИ в веществе, называется линейной плотностью ионизации (ЛПИ).

В зависимости от величины ЛПЭ, все ионизирующие излучения делят на редко- и плотнoионизирующие (табл. 62).

### Редкoионизирующие и плотнoионизирующие излучения

Критерий	Ионизирующие излучения	
	Редкoионизирующие	Плотнoионизирующие
Величина ЛПЭ, КэВ/мкм	Менее 10	Более 10
Название ИИ	Все электромагнитные ИИ; $\beta$ -излучение	Протоны, другие ядра отдачи;

		α-частицы; нейтроны
--	--	------------------------

Редкоионизирующие излучения отличаются сравнительно высокой проникающей способностью, и, в силу этого, их энергия распределяется в объёме облучаемых тел более равномерно, чем в случае воздействия плотноионизирующих ИИ. Для микроскопических тел (по размерам сопоставимых с клетками) эта разница несущественна, и различия в эффекте равных по энергии количеств излучения определяются исключительно величиной ЛПЭ. С величиной ЛПЭ прямо связана и относительная биологическая эффективность (ОБЭ) излучения в отношении микроскопических биообъектов.

При воздействии на вещество нейтронов образуются ядра отдачи, величина ЛПЭ которых велика. Поэтому и нейтроны относят к плотноионизирующим ИИ. Вместе с тем, нейтроны обладают и большой проникающей способностью; образующиеся при их действии плотноионизирующие частицы возникают на разной глубине в толще облучаемого объекта.

### **Количественная оценка ионизирующих излучений. Основы дозиметрии**

Выявление ИИ и количественная оценка уровня радиационных воздействий называется дозиметрией. Для количественной характеристики уровня лучевого воздействия введено понятие дозы излучения. Применяются три основных вида дозы – экспозиционная, поглощённая и эквивалентная.

**Экспозиционная доза (X)** – мера количества ИИ, физическим смыслом которой является суммарный заряд ионов одного знака, образующихся при облучении воздуха в его единичной массе:

$$X = dQ/dm ,$$

где  $dQ$  – суммарный заряд всех ионов одного знака, возникающих в воздухе при полном торможении всех вторичных электронов, образовавшихся в малом объёме пространства,  $dm$  – масса воздуха в этом объёме.

В системе СИ единицей экспозиционной дозы является кулон, делённый на килограмм (Кл/кг). Более часто, однако, применяется внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р), соответствующая образованию  $2,1 \cdot 10^9$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  сухого воздуха при нормальных условиях.  $1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ ;  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

Изменения, вызываемые излучением в воздухе и в других средах, количественно различны. Это связано с разным количеством энергии, передаваемой излучением одинаковым по массе количествами разных веществ. Учесть этот фактор можно, выражая количество ИИ в единицах **поглощённой дозы (D)**. Физический смысл поглощённой дозы – количество энергии, передаваемой излучением единичной массе вещества:

$$D = dE/dm ,$$

где  $dE$  – энергия излучения, поглощённая малой массой вещества  $dm$ .

В системе СИ поглощённую дозу выражают в греях (Гр).  $1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ . Часто пользуются внесистемной единицей поглощённой дозы – рад (аббревиатура «radiation absorbed dose»). Рад равен сантигрею ( $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр}$ ).

Непосредственно измерить биологически значимые величины поглощённых доз не всегда возможно из-за незначительности соответствующей им энергии. Так, при общем облучении человека массой 76 кг в смертельной дозе 4 Гр его телу сообщается энергия 305 Дж. Её достаточно лишь для нагревания тела на  $0,001^\circ\text{C}$ . Поэтому непосредственно измеряется, как правило, экспозиционная доза ИИ, а поглощённая доза рассчитывается с

учётом свойств облучаемой среды. В воздухе 1 рентген соответствует 0,89 рад, а в тканях организма, в среднем, 0,95 рад.

**Эквивалентная доза.** Различные ИИ вызывают в биосистемах количественно различные эффекты даже при одинаковой поглощённой дозе. Это связано, главным образом, с такими характеристиками ИИ, как ЛПЭ и коэффициент ослабления  $\mu$ . Для малоразмерных биологических объектов (например, для макромолекул, клеточных органелл и клеток), большему значению ЛПЭ воздействующего на них излучения соответствует большее число актов ионизации и возбуждения, возникающих в пределах конкретного биообъекта. Соответственно, большим оказывается и повреждающий эффект плотнойизирующих излучений в отношении клеток и субклеточных структур. Данное различие выражается величиной ОБЭ. Для рентгеновского и  $\gamma$ -излучения её принимают равной 1, а для каждого из остальных ИИ значение ОБЭ рассчитывают как отношение равноэффективных поглощённых доз рентгеновского и рассматриваемого ИИ. Значения ОБЭ для некоторых видов ИИ представлены в таблице

### Относительная биологическая эффективность ионизирующих излучений для клеток

Ионизирующее излучение	Величина ОБЭ
Рентгеновское, $\gamma$ - и $\beta$ -излучение	1
Нейтроны медленные	3
Нейтроны быстрые и очень больших энергий	10
$\alpha$ -излучение	20

Эквивалентная доза (Н) позволяет учесть различия биологической активности ИИ:

$$H = D \cdot \text{ОБЭ} ,$$

где D – поглощённая доза ИИ в данной точке биообъекта. В системе СИ единицей эквивалентной дозы служит зиверт (Зв), а внесистемной единицей является бэр (аббревиатура «биологический эквивалент рада»).  $1\text{Зв} = 100\text{бэр}$ .

Приборы, предназначенные для измерения дозы облучения объекта внешним источником, называются измерителями дозы (дозиметрами).

**Мощность дозы излучения (уровень радиации).** Этот показатель характеризует интенсивность лучевого воздействия. Мощность дозы понимают как дозу (экспозиционную, поглощённую или эквивалентную), регистрируемую за единицу времени. В системе СИ мощность экспозиционной дозы выражают в Кл/(кг•с), т.е. А/кг. Весьма часто пользуются внесистемной единицей мощности дозы – Р/час и её производными (мР/час, мкР/час). Единицами мощности поглощённой дозы служат Гр/с, рад/с и их производные. При длительных воздействиях недифференцированных потоков ИИ используют внесистемные единицы мощности эквивалентной дозы – Зв/год и бэр/год.

В зависимости от величины мощности дозы различают *кратковременное, пролонгированное и хроническое облучение*. Кратковременным облучение считается при мощности дозы свыше 0,02 Гр/мин. Непрерывное радиационное воздействие в течение нескольких месяцев или лет называют хроническим, а пролонгированное облучение занимает промежуточное положение между первыми двумя. В случае облучения организма человека, если не менее 80% всей дозы регистрируются не более чем за 4 суток, облучение называется однократным.

В зависимости от распределения дозы во времени различают *непрерывное и фракционированное облучение*. Если доза ИИ разделена на части (фракции), чередующиеся с интервалами времени, в течение которых облучение не происходит, облучение называют

фракционированным. Если эти интервалы меньше суток, то по результатам действия на человека фракционированное облучение приближается к пролонгированному.

Значение мощности дозы излучения состоит в том, что при равной дозе облучения радиобиологические эффекты выражены тем сильнее, чем больше мощность дозы излучения. Основные дозиметрические величины и единицы их измерения представлены в таблице

### Основные дозиметрические величины и единицы их измерения

Дозиметрическая величина	Единица, её наименование, обозначение		Соотношение единиц
	Внесистемная	СИ	
Экспозиционная доза	Рентген (Р)	Кулон на килограмм (Кл/кг)	1 Кл/кг = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы	Рентген в час (Р/час)	Ампер на килограмм (А/кг)	1 А/кг = 1,4 · 10 <sup>7</sup> Р/час
Поглощённая доза	Рад (рад)	Грей (Гр)	1 Гр = 100 рад
Мощность поглощённой дозы	Рад в час (рад/час)	Грей в секунду (Гр/с)	1 Гр/с = 3,6 · 10 <sup>5</sup> рад/час
Эквивалентная доза	Бэр (бэр)	Зиверт (Зв)	1 Зв = 100 бэр
Мощность эквивалентной дозы	Бэр в год (бэр/год); зиверт в год (Зв/год)	Зиверт в секунду (Зв/с)	1 Зв/с = 3,15 · 10 <sup>9</sup> бэр/год

Приборы, предназначенные для измерения мощности дозы облучения объекта из внешнего источника, называются измерителями мощности дозы (рентгенметрами).

### Основные источники ионизирующих излучений

По происхождению источники ИИ подразделяются на *естественные и искусственные*. В промышленно развитых странах от естественных источников население получает около 2/3 суммарной дозы облучения. Медицинские процедуры (лучевая диагностика и лучевая терапия) обуславливают около трети этой дозы, а вклад в неё атомной энергетики, других мирных форм применения источников ИИ и испытаний ядерного оружия пренебрежимо мал (рис. 64).

Совокупность потоков ИИ, происходящих из естественных источников, называется природным радиационным фоном Земли. Согласно современным представлениям, последний играет важную роль в качестве движущей силы изменчивости биологических видов, а также одного из факторов поддержания неспецифической резистентности организма.

Извне на организм воздействует, преимущественно,  $\gamma$ -излучение, источником которого являются, преимущественно, радиоактивные вещества, присутствующие в земной коре. В каменных зданиях интенсивность внешнего  $\gamma$ -облучения в несколько раз ниже, чем на открытой местности, что объясняется экранирующими свойствами конструкционных материалов. Используя специальные приёмы экранирования, удаётся практически полностью устранить внешнее  $\gamma$ -облучение организма. По мере увеличения высоты над поверхностью моря роль земных источников внешнего облучения уменьшается. При этом возрастает космическая составляющая природного радиационного фона.

Большинство естественных источников ИИ таковы, что избежать их излучения невозможно: это радиоактивные вещества, входящие в состав организма. Их вклад в суммарную дозу от естественных источников составляет около 2/3.

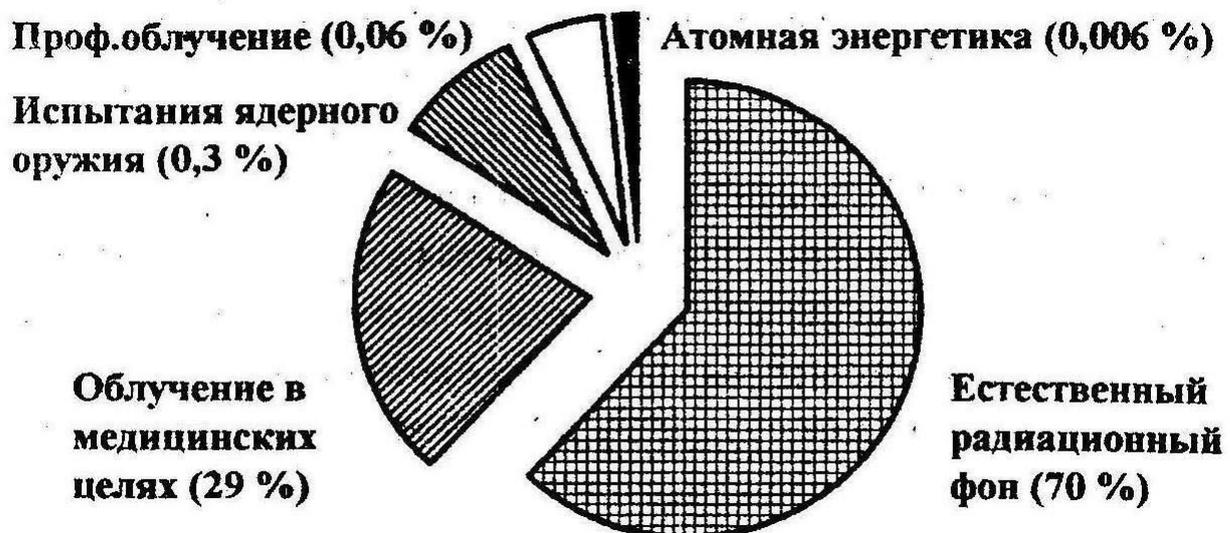


Рисунок. Вклад основных источников ионизирующих излучений в облучение населения промышленно развитых стран

Искусственные (техногенные) источники ИИ включают в себя рентгеновские трубки, ускорители заряженных частиц, а также устройства, содержащие радионуклиды. Последняя группа подразделяется на открытые (имеющие непосредственный контакт с атмосферой) и закрытые (заклочённые в герметичную оболочку) источники ИИ. Как правило, закрытые источники ИИ используют с целью внешнего лучевого воздействия на объекты. Они являются конструктивным элементом  $\gamma$ -терапевтических установок, дефектоскопов, атомных реакторов, а также некоторых дозиметрических и радиометрических приборов.

Источниками слабого рентгеновского излучения могут служить радиолампы и электронно-лучевые трубки, широко представленные в производственной и бытовой технике. Однако в штатных условиях эксплуатации интенсивность лучевого воздействия на человека со стороны этих устройств не выходит за основные дозовые пределы, регламентируемые нормами радиационной безопасности.

Основной вклад в дозу, получаемую человеком от искусственных источников ИИ, в настоящее время вносят лечебные и диагностические процедуры. Лучевая нагрузка при некоторых из них указана в таблице 65. В развитых странах дозы облучения населения с медицинскими целями втрое выше, чем в мире в среднем.

#### Ориентировочные значения поглощенной дозы излучения при некоторых медицинских процедурах

Медицинская процедура	Доза излучения, сГр
Рентгенография грудной клетки	1
Флюорография грудной клетки	5
Рентгеноскопия грудной клетки	5 – 10
Рентгеноскопия брюшной полости	10 - 20
Лечение злокачественных опухолей	2000 - 10000

*Источники ИИ, наиболее актуальные в военное время.* В случае применения ядерного оружия или крупномасштабных аварий на объектах ядерной энергетики ожидается многократное возрастание интенсивности лучевых воздействий на организм. Основными радиационными факторами ядерного взрыва являются проникающая радиация и радиоактивное заражение местности (РЗМ).

## Радионуклиды как источник радиационной опасности

### Радиоактивность. Параметры радиоактивного распада

Свойство самопроизвольного испускания некоторыми элементами ИИ называется радиоактивностью. Радиоактивные свойства впервые обнаружены А. Беккерелем у урана в 1896 г. После того как в 1934 г. Ирен и Фредерик Жолио-Кюри открыли искусственную радиоактивность, были не только получены радиоактивные изотопы всех без исключения элементов, но и заполнены свободные до того времени клетки в периодической системе элементов. В 40-х годах удалось получить элементы с атомными номерами, превышающими 92 («трансурановые элементы»). Радиоактивность присуща также и нейтронам: за 11 мин. один из двух свободных нейтронов превращается в протон, испуская при этом электрон.

Установлено, что источником ИИ, испускаемых радиоизотопами, служат внутриядерные перестройки, сопровождающиеся распадом атомного ядра и образованием нового химического элемента. Химические элементы, имеющие атомные ядра, подверженные самопроизвольному радиоактивному распаду, получили название радионуклидов.

Радиоактивный распад вызывает непрерывное уменьшение числа атомов радиоактивного элемента. Интервал времени, в течение которого распадается половина атомов радионуклида, называется периодом полураспада. Зная эту величину, можно рассчитать число нераспавшихся атомов радионуклида в любой момент времени  $t$ :

$$N = N_0 \cdot 2^{-t/T},$$

где  $N_0$  – начальное число атомов;  $N$  – число атомов в момент  $t$ ;  $T$  – период полураспада.

Период полураспада является одной из основных характеристик радиоактивного вещества, поскольку его величина строго постоянна и не зависит от условий внешней среды. Если период полураспада измеряется секундами – часами, говорят о короткоживущих радионуклидах, если годами – о долгоживущих радионуклидах. Период полураспада основного природного изотопа урана -  ${}_{92}\text{U}^{238}$  - составляет 4,5 миллиарда лет. Медицинское значение скорости радиоактивного распада состоит в том, что при равном количестве радиоактивных веществ, поступивших в организм или загрязнивших кожные покровы, более длительное облучение (а, следовательно, и более высокую дозу облучения) обусловит то из них, которое содержит радионуклид с большим периодом полураспада.

*По характеру испускаемых ИИ радионуклиды делят на  $\alpha$  и  $\beta$ -излучатели.* Наряду с этими корпускулами, некоторые радионуклиды излучают также  $\gamma$ -кванты. Характер излучения весьма важен для обнаружения радионуклидов во внешней среде и в организме.  $\gamma$ -лучи легко проникают наружу из толщи тел, содержащих радиоактивные вещества. Поэтому наличие  $\gamma$ -составляющей ИИ радионуклидов способствует их выявлению и измерению их количества.

### Количество радиоактивных веществ. Радиометрия

Выражать количество радиоактивных веществ в традиционных единицах (массы, веса или объёма) неудобно из-за незначительности этих величин для биологически значимых количеств радионуклидов, а также из-за того, что последние, как правило, находятся в смеси с нерадиоактивными веществами и друг с другом. Поэтому критерием оценки количества радиоактивных веществ служит их **радиоактивность (активность)**, т.е. способность к испусканию ИИ. В системе СИ за единицу радиоактивности принят 1 распад в секунду (беккерель, Бк), а традиционной единицей служит кюри (Ки). Активность, отнесённая к единице объёма или единице массы заражённого радионуклидами вещества, называется удельной активностью. Активность, отнесённая к единице площади заражённой

радионуклидами поверхности, называется плотностью поверхностного радиоактивного заражения. Единицы радиоактивности и производные от них представлены в таблице 66.

Выявление радиоактивных веществ и количественная оценка их содержания в различных объектах и на поверхностях называется радиометрией. В связи с тем, что радиоактивные вещества определяются по испускаемым ими ИИ, для радиометрических исследований могут применяться некоторые дозиметрические приборы – в частности, измерители мощности дозы  $\gamma$ -излучения.

### Единицы измерения количества радиоактивных веществ

Показатели количества РВ	Единица, её наименование, обозначение		Соотношение единиц
	внесистемная	СИ	
Активность	кюри (Ки)	беккерель (Бк)	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк
Удельная активность	Ки/кг; Ки/м <sup>3</sup>	Бк/кг; Бк/м <sup>3</sup>	-
Плотность поверхностного радиоактивного заражения	Ки/см <sup>2</sup> ; Ки/м <sup>2</sup> ; Ки/км <sup>2</sup> ; распад/(мин. см <sup>2</sup> )	Бк/м <sup>2</sup>	-

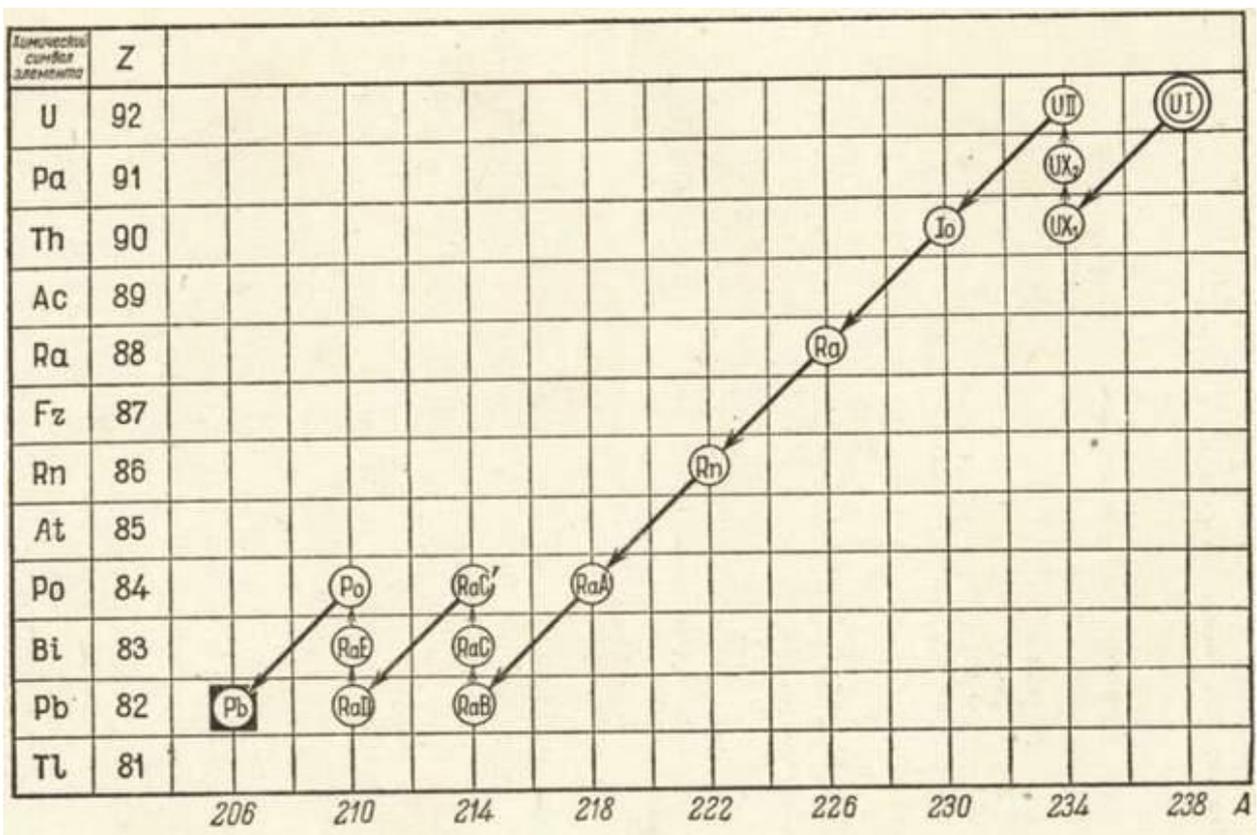
Активность – главный параметр, определяющий дозу облучения тканей, а следовательно, и повреждающий эффект радионуклидов при поступлении в организм и при наружном радиоактивном заражении тела. Вместе с тем, опасность радионуклидов зависит от агрегатного состояния и других физических свойств (адгезивности, липофильности) содержащих их радиоактивных веществ, а также от характера поступления, распределения и выведения радионуклидов из организма.

### Источники радионуклидов.

#### Радионуклиды в природе и народном хозяйстве

**Природные радионуклиды.** Ранее отмечалась роль радионуклидов как источника естественного радиационного фона. Его земная составляющая включает в себя внешнее и внутреннее облучение от радионуклидов, присутствующих в земной коре и атмосфере.

Внешнее облучение организма на уровне моря обусловлено, в основном,  $\gamma$ -излучением радионуклидов уранового ряда, присутствующих в грунте и строительных материалах.



**Рисунок. Урановый ряд радионуклидов**

A – массовое число ядра; Z – порядковый номер элемента в таблице Менделеева; кружки – радиоактивные изотопы; Pb – устойчивый изотоп; жирные наклонные стрелки - α-распад; тонкие вертикальные стрелки - β-распад

Помимо семейства  $^{238}\text{U}$ , в природе существуют ещё два радиоактивных семейства – тория ( $^{232}\text{Th}$ ) и редкого изотопа урана –  $^{235}\text{U}$ . Разумеется, мощность дозы внешнего облучения зависит от концентраций радионуклидов в том или ином участке земной коры. В местах проживания основной массы населения они - примерно одного порядка. Однако есть и такие места, где содержание природных изотопов урана значительно выше. В Бразилии, в 200 км к северу от Сан-Паулу, есть небольшая возвышенность, где уровень радиации в 800 раз превосходит средний и достигает 250 мЗв в год. Чуть меньшие значения (175 мЗв в год) регистрируются на пляжах морского курорта Гуарапаи, также расположенного в Бразилии. Известны и другие места с многократно повышенным уровнем радиации – в Индии, во Франции, Нигерии, на Мадагаскаре. По данным Научного комитета ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН), средняя доза внешнего облучения, которую человек получает от земных источников ИИ естественного происхождения, составляет примерно 350 мкЗв.

Внутреннее облучение организма обуславливают, преимущественно, радиоизотопы, происходящие из земной коры ( $^{37}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  и радионуклиды уранового ряда). Включение в состав организма (инкорпорация) радионуклидов происходит, в основном, за счёт их поступления с пищей. Поэтому интенсивность внутреннего облучения зависит от состава почв и характера питания населения. Так, например, десятки тысяч людей на Крайнем севере питаются, в основном, мясом северного оленя, в котором в высокой концентрации присутствуют изотопы уранового ряда –  $^{210}\text{Po}$  и  $^{206}\text{Pb}$ . Они попадают в организм оленей зимой, когда единственным источником корма животным служат лишайники, накапливающие оба радионуклида. Дозы внутреннего облучения от  $^{210}\text{Po}$  и  $^{206}\text{Pb}$  при этом в 35 раз превышают средний уровень. А в Западной Австралии, на почвах с

повышенной концентрацией  ${}_{92}\text{U}^{238}$ , облучение, обусловленное этим радионуклидом, в 75 раз превосходит средний уровень у аборигенов, питающихся мясом и требухой овец и кенгуру.

Радионуклидом уранового ряда, проникающим в организм ингаляционным путём, является радон ( ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ ). Этот инертный газ высвобождается из почвы и строительных материалов, накапливаясь в закрытых непрветриваемых помещениях. Воздействуя на бронхиальный эпителий  $\alpha$  и  $\gamma$ -излучением, радон и радиоактивные продукты его распада оказывают канцерогенный эффект. Задолго до открытия радона вызываемое этим радионуклидом заболевание (позже идентифицированное как рак лёгких) наблюдал у работников плохо вентилируемых шахт Парацельс, в 1567 году описавший его в трактате “Uber die Bergsuht und andere Bergkrankheiten”.

Вклад в дозу внутреннего облучения радионуклидов «космического» происхождения, т.е. образующихся в земной атмосфере под влиянием космического излучения, существенно меньше. Содержание в тканях живого организма одного из них –  ${}_{6}\text{C}^{14}$  - отличается постоянством, но после смерти, вследствие радиоактивного распада, экспоненциально снижается. Это служит основой для радиоуглеродного метода определения возраста палеонтологических находок.

**Техногенные источники радионуклидов.** В процессе хозяйственной деятельности человека возникает необходимость концентрировать радионуклиды, находящиеся в природном сырье (этот процесс называется обогащением) и накапливать их большие количества в ограниченных объёмах. Некоторая часть радиоактивных изотопов, используемых в народном хозяйстве и научных исследованиях, никогда не встречается в естественных условиях. В отличие от естественно-радиоактивных веществ, встречающихся в природных минералах, искусственно-радиоактивные вещества образуются в ходе ядерных реакций при целенаправленной бомбардировке природных изотопов нейтронами или тяжёлыми ускоренными заряженными частицами.

К техногенным объектам, содержащим радиоактивные вещества, относятся атомные энергетические установки, атомные исследовательские реакторы, объекты радиохимического производства, а также боевые части ядерного оружия. Кроме того, радиоактивные вещества широко применяются в практике лучевой диагностики (радиография), лучевой терапии (внешнее, внутреннее облучение), при  $\gamma$ -дефектоскопии промышленных изделий, при изготовлении постоянно светящихся (люминесцентных) красок. Радионуклиды служат весьма ценным средством научных исследований. Так, радиоизотопные методы применяются для изучения метаболизма у человека, животных и растений. В среднем, доза облучения организма человека от радиоактивных изотопов техногенного происхождения на порядок меньше, чем от природных.

Роль радионуклидов техногенного происхождения как источника облучения организма существенно возрастает при радиационных авариях и применении ядерного оружия.

### **3. Факторы, вызывающие поражения людей при ядерных взрывах и радиационных авариях. Общая характеристика радиационных поражений, формирующихся при ядерных взрывах, радиационных авариях. Понятие зон радиоактивного заражения. Очаги радиационного поражения.**

В случае применения ядерного оружия или крупномасштабных аварий на объектах ядерной энергетики на личный состав войск могут действовать различные виды ИИ, неблагоприятные факторы нелучевой природы, а также их комбинации. При ядерных взрывах именно эти воздействия выводят из строя личный состав войск, поэтому наиболее важные из них называются поражающими факторами ядерного взрыва.

К числу поражающих факторов ядерного взрыва относятся *ударная волна, световое излучение, проникающая радиация, радиоактивное заражение местности (РЗМ) и электромагнитный импульс*. Прямым поражающим действием на организм человека обладают первые четыре фактора; электромагнитный импульс вызывает повреждения

электронных и электротехнических устройств. По продолжительности действия различают кратковременно действующие поражающие факторы ядерного взрыва (ударная волна, световое излучение и проникающая радиация) и длительно действующий фактор – РЗМ. По физической природе поражающие факторы ядерного взрыва могут быть радиационными либо нерадиационными.

### **Радиационные поражающие факторы ядерного взрыва**

Радиационными факторами ядерного взрыва являются проникающая радиация и радиоактивное заражение местности (РЗМ).

**Проникающая радиация** ядерного взрыва представляет собою поток  $\gamma$ -излучения и нейтронов, распространяющийся в воздухе во все стороны из центра взрыва на расстояние до 3 км. Источником проникающей радиации являются ядерные реакции деления и синтеза, протекающие в боеприпасах в момент взрыва, а также радиоактивный распад продуктов ядерного деления.

$\gamma$ -кванты могут быть мгновенными, испускаемыми в ходе протекания ядерных реакций взрыва, при взаимодействии нейтронов с конструкционными материалами боеприпаса, осколочными, образуемыми при радиоактивном распаде осколков деления, или захватными, возникающими при ядерных перестройках, вызываемых нейтронами в атомах воздуха и грунта.

Нейтроны проникающей радиации могут быть мгновенными, испускаемыми в ходе протекания ядерных реакций взрыва, и запаздывающими, образующимися в процессе распада продуктов ядерного деления в первые 2-3 с после взрыва.

Время действия проникающей радиации при атомных и водородных взрывах не превышает нескольких секунд и определяется временем подъёма облака взрыва на такую высоту, при которой  $\gamma$ -излучение практически полностью поглощается толщей воздуха. Поражающее действие проникающей радиации на человека определяется дозой облучения, а также (в случае частичного экранирования) фактором неравномерности распределения этой дозы по телу.

**Радиоактивное заражение местности** возникает в результате выпадения радиоактивных веществ из облака ядерного взрыва. Его значение как поражающего фактора определяется тем, что высокие дозы облучения личного состава войск и населения могут наблюдаться не только в районе, прилегающем к месту взрыва, но и за сотни километров от него. Кроме того, радиационное воздействие, обусловленное РЗМ, более продолжительно, чем действие проникающей радиации. Спад активности выпавших на местность продуктов ядерного взрыва происходит экспоненциально:

$$A_t = A_0 (t/t_0)^{-1,2},$$

где  $A_0$  и  $A_t$  - активность продуктов ядерного взрыва ко времени  $t_0$  и  $t$  после взрыва.

Наиболее существенное РЗМ происходит при наземных ядерных взрывах, когда площади заражения с опасными значениями мощности дозы излучения многократно больше размеров зон поражения ударной волной, световым излучением и проникающей радиацией. Масштабы РЗМ зависят также от мощности ядерного взрыва и метеоусловий (скорости ветра в слое атмосферы, ограниченном высотой подъёма облака, наличия осадков). При воздушных ядерных взрывах РЗМ незначительно и не вызывает санитарных потерь личного состава.

Лучевое поражение людей, находящихся на РЗМ, обусловлено (в порядке убывания значимости) равномерным внешним  $\gamma$ -облучением тела, внешним  $\beta$ -облучением открытых участков кожи, конъюнктив и слизистых оболочек, а также излучениями радионуклидов, которые могут проникать в организм ингаляционным либо пероральным путём.

Последствия пребывания личного состава на РЗМ с достаточной точностью могут прогнозироваться по величине дозы внешнего  $\gamma$ -облучения тела. Такой расчёт наиболее целесообразно производить заблаговременно, что позволяет избежать неоправданного переоблучения и минимизировать потери личного состава. Для удобства расчёта доз облучения вся территория, подвергшаяся радиоактивному заражению, разделяется на участки, различающиеся величинами мощности дозы излучения на местности – зоны РЗМ. Воображаемые границы между ними представляют собою изолинии эллиптической формы, все точки каждой из которых характеризуются одинаковыми значениями мощности дозы. Характеристика зон РЗМ, данные для расчёта их размеров, а также интенсивности радиационных воздействий на личный состав (дозы, мощности дозы  $\gamma$ -излучения, плотности поверхностного радиоактивного заражения кожных покровов и обмундирования) содержатся в Справочнике по поражающему действию ядерного оружия. Эти данные необходимы для прогнозирования величины, структуры и динамики возникновения санитарных потерь среди личного состава, находившегося на РЗМ.

### Нерадиационные поражающие факторы ядерного взрыва

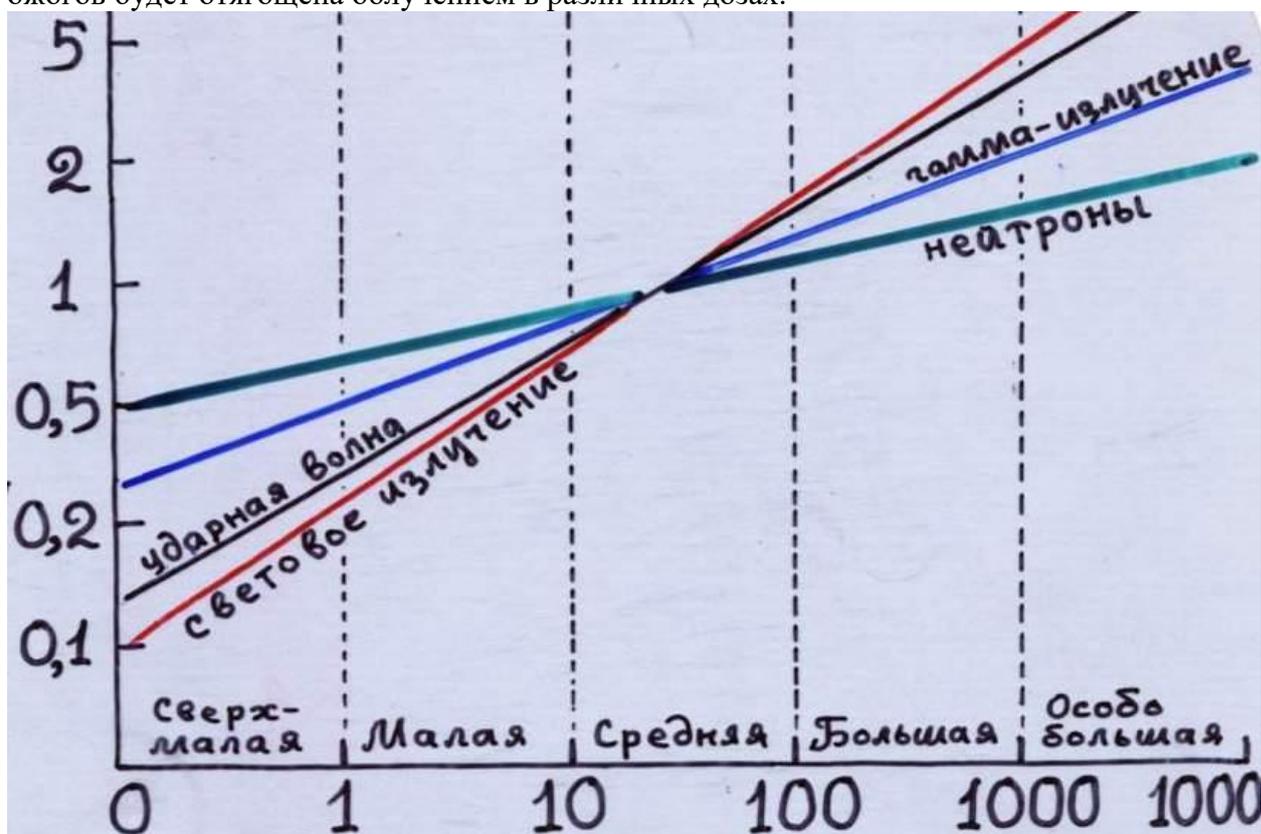
**Ударная волна** является основным поражающим фактором ядерных взрывов средней и большой мощности. Она представляет собою область резко сжатого воздуха, распространяющегося во все стороны от центра взрыва. Поражения людей ударной волной возникают в результате действия избыточного давления во фронте ударной волны, скоростного напора воздуха и действия вторичных ранящих снарядов (предметов, отброшенных скоростным напором воздуха).

В результате действия ударной волны у незащищённых людей могут возникать разнообразные травмы. В Хиросиме их получили 40% поражённых, её воздействием было обусловлено 20% смертельных исходов. Показателем, позволяющим достаточно точно предсказать действие ударной волны на личный состав, сооружения и военную технику, является величина избыточного давления во фронте ударной волны.

**Световое излучение** ядерного взрыва представляет собою поток видимого света, ультрафиолетового и инфракрасного излучения, исходящий из светящейся области взрыва. Поражающее действие этого фактора обусловлено нагревом подлежащих поверхностей и вторичными ожогами от воспламенившегося обмундирования. При формировании зон обширных пожаров могут возникать «огненные бури», при которых возможны термические ожоги не только кожи, но и верхних дыхательных путей, а также массовые отравления оксидом углерода.

**Радиус поражающего действия ударной волны, светового излучения и проникающей радиации** представляет собою расстояние, на котором они могут выводить из строя открыто расположенный личный состав. Для проникающей радиации этот показатель возрастает с увеличением мощности ядерного боеприпаса медленнее, чем радиус поражающего действия ударной волны и светового излучения ядерного взрыва (рис. 69). При взрывах сверхмалой (до 1 кт) и малой (1 – 10 кт) мощности он больше у проникающей радиации, чем у других кратковременно действующих поражающих факторов ядерного взрыва. При взрывах средней (10 – 100 кт), большой (100 – 1000 кт) и особо большой (> 1 Мт) мощности радиус поражающего действия ударной волны и светового излучения больше или равен таковому для проникающей радиации (рис.4). У нейтронных боеприпасов, создающих повышенную интенсивность нейтронной компоненты проникающей радиации ядерного взрыва, радиус её поражающего действия существенно превосходит таковые для ударной волны и светового излучения. Эти соотношения учитываются при прогнозировании структуры санитарных потерь от ядерного оружия. При взрывах малой и сверхмалой мощности (включая нейтронные) можно ожидать появления большого количества больных с

изолированными лучевыми поражениями. Санитарные потери в зоне кратковременно действующих факторов более мощных ядерных взрывов будут характеризоваться преобладанием комбинированных радиационных поражений, при которых клиника травм и ожогов будет отягощена облучением в различных дозах.



**Рисунок 69. Зависимость радиуса поражающего действия факторов ядерного взрыва от мощности ядерного боеприпаса.**

По оси абсцисс – мощность ядерного боеприпаса, кт тротилового эквивалента; по оси ординат – радиус поражения, км

При авариях или разрушениях ядерных реакторов основным радиационным фактором, способным вызвать поражения личного состава войск и населения на прилегающих территориях, является РЗМ. Особенности последнего являются более медленный, чем в случае ядерного взрыва, спад мощности дозы излучения на местности, более сложная конфигурация заражённых участков местности, а также более высокие адгезивность и контаминирующая способность выпадающих на местность радиоактивных веществ. Кроме того, внешнее  $\beta$ - и  $\gamma$ -облучение в поражающих человека дозах может происходить в момент прохождения радиоактивного паро-аэрозольного облака аварийного радиационного выброса. Масштаб РЗМ определяется типом аварийного ядерного реактора, степенью его разрушения и метеоусловиями (скорость ветра, устойчивость приземного слоя атмосферы, наличие осадков).

При радиационной аварии риск поступления радионуклидов в организм выше, чем при ядерном взрыве, что обусловлено пребыванием некоторой их части в газообразном состоянии и способностью преодолевать противогазы и респираторы. В ранние сроки (несколько суток) после начала аварии наибольшую опасность представляет инкорпорация смеси радиоактивных изотопов йода. В более поздние сроки (спустя годы после аварии) на первый план выходит внутреннее облучение организма за счёт поступивших в него долгоживущих радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

Потери личного состава, обусловленные пребыванием в зоне следа облака аварийного радиационного выброса, так же как и на следе облака ядерного взрыва, определяются дозой внешнего  $\gamma$ -облучения. Для удобства её расчёта на местности, подвергшейся

радиоактивному загрязнению, выделяют зоны РЗМ. Характеристика зон РЗМ, методика расчёта их размеров и показателей уровня облучения находящегося в них личного состава (дозы, мощности дозы) содержится в соответствующих справочниках.

#### **4. Физическая, физико-химическая, химическая и биологическая стадии в действии ионизирующих излучений. Молекулярные механизмы лучевого повреждения биосистем. Биологическое усиление радиационного поражения.**

Лучевые поражения личного состава, как при применении ядерного оружия, так и вследствие техногенных аварий на радиационно-опасных объектах, могут стать результатом внешнего облучения и проникновения радионуклидов во внутренние среды организма. При этом выделяют:

1. Лучевые поражения от внешнего облучения
  - поражения в результате общего (тотального) облучения
  - местные лучевые поражения от внешнего облучения
2. Поражения от наружного заражения покровных тканей радионуклидами
3. Поражения от внутреннего радиоактивного заражения

Формирующаяся при этом патология характеризуется многообразием клинических форм, закономерностью развития, четкой зависимостью между величиной лучевого воздействия и тяжестью заболевания. Медицинская защита личного состава и лечение пораженных предполагает использование специальных медикаментозных средств. Их разработка, совершенствование и практическое применение основывается на понимании сущности лучевых поражений.

#### ***Радиобиологические эффекты***

Радиобиологическими эффектами называются изменения, возникающие в биологических системах при действии на них ИИ. Сложность организма как биологической системы предопределяет многообразие радиобиологических эффектов. Критериями их классификации служат уровень формирования, сроки появления, локализация, характер связи с дозой облучения, значение для судьбы облучённого организма, возможность передачи по наследству последующим поколениям и другие.

#### **Уровень формирования**

На *молекулярном уровне* облучение биосистем вызывает набор характерных изменений, обусловленных взаимодействием биомолекул с самим излучением либо продуктами радиолиза воды. К таким изменениям относят разрывы, сшивки, изменения последовательности мономеров в молекулах биополимеров, потерю ими фрагментов, окислительную модификацию, образование аномальных химических связей с другими молекулами. Доля повреждённых биомолекул положительно связана с их молекулярной массой. Например, после облучения в дозе 10 Гр в клетке оказываются повреждёнными 0,015% молекул олигосахаридов, 0,36% - аминокислот, 1% - белков и 100% нуклеиновых кислот. С уязвимостью ДНК и её уникальной ролью генетической матрицы связана ведущая роль повреждений ДНК как основы радиобиологических эффектов, формирующихся на более высоких иерархических уровнях биосистемы. Во время митоза повреждения ДНК в клетке проявляется хромосомными aberrациями, основными видами которых являются фрагментация хромосом, формирование хромосомных мостов, дицентриков, кольцевых хромосом, внутри- и межхромосомных обменов и т.п. Однако многие клетки погибают после облучения ещё до митоза, а следовательно, и до появления хромосомных aberrаций.

На *клеточном уровне* воздействие ИИ вызывает интерфазную или репродуктивную гибель клеток, временный блок митозов и нелетальные мутации.

Действие ИИ на *системном уровне* характеризуется цитопеническим эффектом, в основе которого лежат, преимущественно, гибель клеток и радиационный блок митозов.

Радиобиологические эффекты, возникающие *на уровне организма и популяции*, классифицируются в соответствии с критериями, перечисленными ниже.

### **Сроки появления**

По этому признаку радиобиологические эффекты, возникающие в организме и популяции, принято подразделять *на ближайшие и отдалённые*. Ближайшие эффекты проявляются в сроки до нескольких месяцев после облучения и связаны с развитием цитопенических состояний в различных тканевых системах организма. Примерами ближайших эффектов облучения могут быть острая лучевая реакция, острая лучевая болезнь, лучевая алопеция, лучевой дерматит.

Отдалённые эффекты возникают спустя годы после облучения, на фоне полной регрессии основных клинических проявлений острого поражения. Несмотря на причинную связь с облучением, отдалённые радиобиологические эффекты не являются специфическими для радиационного воздействия – эта патология вызывается и нелучевыми факторами.

Примерами отдалённых последствий облучения являются опухоли, гемобластозы, гипопластические, дистрофические, склеротические процессы. Интегральным проявлением этих последствий служит сокращение продолжительности жизни организмов, перенесших острое лучевое поражение. В случае общего внешнего однократного облучения млекопитающих данный эффект составляет 2-6% средней видовой продолжительности жизни на каждый грей, хотя в области малых доз облучения (по разным данным, менее 4-15 сГр) он, по-видимому, не проявляется.

### **Локализация**

Радиобиологические эффекты могут быть классифицированы в зависимости от органа или части тела, в которых они регистрируются. Весьма актуальна такая классификация в практике лечения онкологических заболеваний, когда поражённый опухолью участок тела облучается в высокой дозе при тщательном экранировании здоровых тканей. При локальном облучении органа или сегмента тела наиболее сильное поражающее действие ИИ проявляется именно в нём (такой эффект называют местным действием ИИ). Однако изменения возникают и в необлучённых тканях. В последнем случае говорят о дистанционном действии ИИ. Его примером может служить уменьшение числа миелокариоцитов в костном мозгу экранированной конечности после облучения животных. Данный эффект обусловлен миграцией форменных элементов в опустошённые участки кроветворной ткани, подвергшиеся облучению, подавлением митотической активности «радиотоксинами», поступающими с кровью в экранированные ткани из облучённых, физиологическим стрессом, сопровождающим облучение. Конечно, эти факторы влияют и на ткани в зоне облучения, однако в ней непосредственное действие ИИ преобладает над опосредованным.

Местное действие ИИ имеет решающее значение для возникновения не только ближайших, но и отдалённых радиобиологических эффектов. Поэтому для оценки риска канцерогенного эффекта, сопровождающего неравномерное облучение, каждому органу присвоен взвешивающий коэффициент, величина которого меньше 1. Умножением эквивалентной дозы облучения органа на соответствующий ему взвешивающий коэффициент получают эффективную дозу облучения органа. Суммируя эффективные дозы для органов, подвергшихся облучению, получают эффективную дозу неравномерного облучения организма. Последняя численно равна эквивалентной дозе равномерного облучения организма, при которой вероятность развития потенциально смертельной опухоли соответствует рассматриваемому варианту неравномерного облучения.

### **Характер связи с дозой облучения**

По данному критерию радиобиологические эффекты чётко разграничены на *стохастические (вероятностные) и нестохастические (детерминированные)*.

Признаками стохастического эффекта являются (1) беспороговость и (2) альтернативный характер. Беспороговость стохастических эффектов означает, что сколь угодно малые дозы облучения способны влиять на частоту их возникновения. Альтернативный характер проявляется в том, что стохастические эффекты, подчиняясь закону «всё или ничего», не могут быть охарактеризованы таким показателем, как «выраженность». Примером стохастического эффекта облучения на клеточном уровне может служить гибель клетки; на уровне целостного организма – возникновение злокачественной опухоли. С увеличением дозы облучения вероятность возникновения стохастического эффекта растёт (рис. 66, слева), но его качество остаётся неизменным. При достаточно больших дозах часть облучённых организмов погибает до развития у них соответствующих стохастических эффектов, что объясняет «плато» на графике, показанное пунктиром.

Признаками нестохастического эффекта являются (1) пороговый характер и (2) градиентная связь амплитуды с дозой облучения. Если доза облучения превышает пороговую величину ( $D_n$ ), то нестохастический эффект возникает со 100% вероятностью, причём его амплитуда монотонно возрастает с увеличением дозы (рис. 66, справа).

### **Отдаленные последствия общего (тотального) облучения**

У больных, перенесших острую лучевую болезнь, в течение длительного времени, иногда всю жизнь, могут сохраняться остаточные явления и развиваться отдаленные последствия.

Остаточные явления чаще всего проявляются гипоплазией и дистрофией тканей, наиболее сильно поврежденных при облучении. Они представляют собой следствия неполного восстановления повреждений, лежавших в основе острого поражения: лейкопения, анемия, нарушения иммунитета, стерильность и др. В отличие от них отдаленные последствия - это развитие новых патологических процессов, признаки которых в остром периоде отсутствовали, таких как катаракты, склеротические изменения, дистрофические процессы, новообразования, сокращение продолжительности жизни. У потомства облученных родителей в результате мутаций в герминативных клетках могут проявиться генетические последствия.

Среди форм отдаленной лучевой патологии будут рассмотрены:

- *неопухолевые отдаленные последствия;*
- *канцерогенные эффекты;*
- *сокращение продолжительности жизни.*

### **Неопухолевые отдаленные последствия облучения**

Неопухолевые (нестохастические) отдаленные последствия относятся к числу детерминированных эффектов облучения, тяжесть которых зависит, главным образом, от степени дефицита числа клеток соответствующих тканей (гипопластические процессы). К числу наиболее важных компонентов комплекса причин, определяющих развитие отдаленных последствий облучения, относятся повреждения мелких кровеносных сосудов и расстройства микроциркуляции, ведущие к развитию тканевой гипоксии и вторичному поражению паренхиматозных органов. Имеют также существенное значение клеточный дефицит в тканях, в которых пролиферация недостаточна для восполнения числа погибших после облучения клеток (рыхлая соединительная ткань, гонады и др.), сохранение изменений, возникших во время облучения в клетках непролиферирующих и медленно пролиферирующих тканей.

В большинстве некритических тканей возникновение тяжелых отдаленных последствий после общего кратковременного облучения маловероятно. Дозы, которые при общем облучении не абсолютно летальны, как правило, не превышают порога толерантности для некритических тканей и не могут привести к существенному дефициту клеток в них (как

исключение из этого общего правила могут быть названы **хрусталик, семенники**). В критических же тканях регенераторные процессы, если организм не погибает, обычно довольно быстро восстанавливают клеточный состав. Поэтому отдаленные последствия, развивающиеся по причине дефицита клеток, более характерны для локального облучения, когда и в относительно радиорезистентных тканях могут быть поглощены дозы, превышающие их толерантность. Развитие названных изменений во взаимодействии с естественными возрастными процессами определяет развитие функциональных расстройств. Отдаленные последствия лучевого поражения могут проявиться функциональными расстройствами регулирующих систем: нервной, эндокринной, сердечно-сосудистой (астено-невротический синдром, вегето-сосудистая дистония).

К отдаленным нестохастическим эффектам относят и некоторые гиперпластические процессы, развивающиеся как компенсаторная реакция на снижение функций определенного типа клеток. Такие реакции характерны для эндокринных органов. Например, очаговая гиперплазия ткани щитовидной железы при повреждении других ее участков в случае инкорпорации радиоактивного йода.

### **Канцерогенные эффекты облучения.**

Радиационный канцерогенез относится к числу стохастических эффектов. Основной причиной злокачественной трансформации облученной клетки являются нелетальные повреждения генетического материала. На первых порах исследования радиационного канцерогенеза господствовало представление, о том, что прямой причиной злокачественной трансформации клетки является мутация, возникшая в результате поглощения порции энергии излучения соответствующим участком генома клетки. Хотя в отдельных случаях такой ход событий и может иметь место, более вероятны другие возможности.

Наиболее распространена гипотеза, в соответствии с которой под влиянием облучения повышается нестабильность ядерной ДНК. В процессе репарации ее нелетальных повреждений возникают условия, способствующие включению онковируса в геном соматической клетки или активация онковируса уже находившегося в репрессированном состоянии в составе генома, с последующей раковой трансформацией.

Злокачественной трансформации клетки, сохранившей жизнеспособность после облучения, может способствовать ее контакт с большим количеством клеточного детрита. Вследствие повреждения мембранных структур может измениться чувствительность клеток к регулирующим воздействиям со стороны гормонов, ингибиторов и т.п.

Фактором, способствующим злокачественной трансформации клетки бывают расстройства гормональной регуляции. Особенно велико значение этого фактора при внутреннем радиоактивном заражении, когда радионуклиды длительное время воздействуют на железу, нарушая выработку ею гормонов, влияющих на функции других органов. В результате создаются условия для возникновения гормон-зависимой опухоли (например, опухоли гипофиза у животных с вызванной введением  $^{131}\text{I}$  гипоплазией щитовидной железы). Щитовидную железу рассматривают как критический орган в формировании отдаленной патологии при поступлении в организм продуктов ядерного деления.

Способствуют развитию опухоли и вызванные облучением нарушения иммунитета, в результате чего облегчается развитие опухоли не только из трансформированных облучением клеток, но и из клеток, мутации в которых возникли спонтанно или под влиянием других факторов.

Латентный период между радиационным воздействием и возникновением новообразования составляет, в среднем, 5 - 10 лет, но в некоторых случаях может достигать 35 лет (рак молочной железы).

Вероятность возникновения опухоли в результате радиационного воздействия оценивается как один дополнительный случай на 20 человек, облученных в дозе 1 Гр. Относительный риск возникновения злокачественного новообразования в течение всей

жизни выше для облученных в детстве. Выход опухолей на единицу дозы зависит от ряда факторов, таких как качество излучения (ОБЭ нейтронов по риску возникновения злокачественного новообразования после облучения в малых дозах может превышать 10), мощность дозы и др.

### **Сокращение продолжительности жизни**

Интегральным показателем состояния здоровья популяции может служить средняя продолжительность жизни (СПЖ) составляющих эту популяцию особей. Важным проявлением отдаленных последствий действия облучения как раз и является сокращение СПЖ.

У грызунов оно составляет от 1 до 5 % на 1 Гр. При длительном воздействии малых доз гамма-излучения сокращение СПЖ у грызунов наблюдали, начиная с ежесуточной дозы 0,01 Гр, причем суммарная накопленная доза, после достижения которой начинало достоверно проявляться сокращение СПЖ, составляла не менее 2 Гр (для нейтронов значения суточной дозы и общей накопленной дозы, при которых СПЖ сокращалась, были на порядок меньше).

При анализе феномена сокращения СПЖ не удается выделить какой-нибудь типичный патологический процесс, непосредственно приводящий облученных животных к преждевременной гибели. В тех случаях, когда причину смертельного исхода у отдельных особей удавалось связать с каким-то конкретным патологическим процессом, это мог быть и сосудистый криз, и новообразование, и склеротические изменения, и лейкоз и т.д.

Основной причиной сокращения СПЖ после облучения в сублетальных дозах в настоящее время называют повреждение капилляров и мелких артериол, нарушения микроциркуляции, приводящие к гипоксии и гибели паренхиматозных клеток, преимущественно, в органах иммунитета и железах внутренней секреции. Отчасти сокращение СПЖ может быть связано с более частым развитием у облученных злокачественных новообразований.

Сокращение продолжительности жизни у человека может составить по разным оценкам от 100 до 1000 сут на 1 Гр при однократном кратковременном облучении и порядка 8 сут при хроническом. В то же время, как уже отмечалось, при дозах ниже 2 Гр само наличие сокращения продолжительности жизни признается не всеми исследователями.

Продолжительность жизни врачей-рентгенологов в период 1932 - 1942 гг. составила, в среднем, 60,5 лет против 65,7 лет у врачей других специальностей, то есть была на 5,2 года меньше. Расчеты показывают, что за 35 лет практики накопленная в то время рентгенологами доза могла составить 5 Гр.

Наиболее частыми причинами преждевременной гибели оказались новообразования, в том числе, лейкозы, смертность от которых была в 3 раза выше, чем среди прочего взрослого населения, дегенеративные изменения, инфекционные процессы и др. После 1945 г. в результате внедрения мер противорадиационной защиты, различия в продолжительности жизни рентгенологов и врачей других специальностей исчезли.

### **Заключение**

У больных, перенесших лучевые поражения, в течение длительного времени, иногда всю жизнь, могут сохраняться остаточные явления и развиваться отдаленные последствия.

Остаточные явления чаще всего проявляются гипоплазией и дистрофией тканей, наиболее сильно поврежденных при облучении. Они представляют собой следствия неполного восстановления повреждений, лежавших в основе острого поражения: лейкопения, анемия, нарушения иммунитета, стерильность и др. В отличие от них отдаленные последствия - это развитие новых патологических процессов, признаки которых в остром периоде отсутствовали, таких как катаракты, склеротические изменения, дистрофические процессы, новообразования, сокращение продолжительности жизни. У

потомства облученных родителей в результате мутаций в герминативных клетках могут проявиться генетические последствия.

**ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ ПО ЛЕКЦИЯМ К РАЗДЕЛУ:  
«МЕДИКО-САНИТАРНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ЧС ХИМИЧЕСКОЙ  
И РАДИАЦИОННОЙ ПРИРОДЫ**

Тема №8.

1. Классификация видов ионизирующих излучений.
2. Дайте сравнительную характеристику проникающей способности электромагнитных и корпускулярных излучений. Приведите пример.
3. Назовите 3 вида защиты от электромагнитных ионизирующих излучений.
4. Какие защитные материалы используются для защиты от электромагнитных ионизирующих излучений и от нейтронного излучения?
5. Назовите единицы измерения экспозиционной дозы, поглощенной дозы и биологической (эквивалентной) дозы ионизирующих излучений.
6. В каких единицах измеряются мощность дозы и активность излучения?
7. Классификация источников ионизирующих излучений.
8. Классификация видов лучевых поражений.
9. Перечислите ближайшие и отдаленные радиобиологические эффекты.
10. Классификация клинических форм острой лучевой болезни в зависимости от поглощенной дозы излучения.
11. Зависимость степени тяжести острой лучевой болезни в зависимости от поглощенной дозы излучения.
12. Назовите предельно допустимые дозы излучения в условиях ЧС мирного и военного времени.
13. Назовите предельно допустимые дозы излучения для населения и отдельных профессиональных категорий вне ЧС (в режиме повседневной деятельности).
14. В каком случае облучение принято считать однократным?