

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
« СЕВЕРО-ОСЕТИНСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МЕДИЦИНСКАЯ  
АКАДЕМИЯ»  
Министерства здравоохранения Российской Федерации**

**Кафедра Лучевой диагностики с лучевой терапией и онкологией**

**Хасигов А.В., Кораева И.Х., Кривов А.А.**

*Биологические основы лучевой терапии. Классификация и планирование  
лучевой терапии*  
Учебное пособие для студентов 5 курса СОГМА

**Владикавказ 2020г.**

**Хасигов А.В., Кораева И.Х., Кривов А.А.**

Биологические основы лучевой терапии. Классификация и планирование лучевой терапии учебное пособие - Северо – Осетинская Государственная Медицинская Академия.- Владикавказ, 2020г.

Данное учебное пособие посвящено радиоактивности и радиоактивным излучениям, их свойствам. Строению атома. Биологическому действию ионизирующих излучений и основам лучевой терапии.

Учебное пособие разработано в соответствии с требованиями ФГОС ВО, предназначено для студентов старших курсов медицинских ВУЗов и факультетов, обучающихся по специальности Лечебное дело, Педиатрия, Стоматология, Медико-профилактическое дело (специалитет).

**Р е ц е н з е н т ы:**

Саутиева М.Г. – Заведующая О.Г.Ш. Г.Б.У.З. Р.О.Д. Минздрава РСО-Алания

Беслекоев У.С. – доцент, кандидат медицинских наук, заведующий кафедрой общей хирургии ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России Минздрава России

Утверждено и рекомендовано к печати Центральным координационным учебнометодическим советом ФГБОУ ВО СОГМА Минздрава России (протокол № 6 от 6 июля 2020 г)

**Тема: « Биологические основы лучевой терапии. Классификация и планирование лучевой терапии.**

**Цель занятия :** Иметь представление о радиоактивности и радиоактивных излучениях, их свойствах. Строение атома. Биологическое действие ионизирующих излучений и основы лучевой терапии.

**Конкретные цели занятия:**

***Знать:***

1. Строение атома.
2. Что такое радиоактивность, ее качественные и количественные характеристики.
3. Биологическое действие ионизирующих излучений и основы лучевой терапии.
4. Зависимость биологического действия от физических факторов ( дозы, мощности, времени облучения и площади облучаемой поверхности).
5. Классификация методов лучевой терапии.

***Уметь:***

1. Определить : активность радиоактивного вещества, выбор режима облучения.
2. Определить показания и противопоказания к лучевой терапии.
3. Определить метод лучевой терапии

***База проведения и материальное обеспечение занятия:***

1. Учебная комната.
2. Кабинет гамма-терапии отделения лучевой терапии РОД.
3. Тестовые карты.
4. Учебные таблицы.
5. Видеофильмы, мультимедийные презентации.
6. Истории болезней, рентгенограммы больных, обслуживаемых гамма-кабинетом.

**Литература.**

1. Кишковский А.Н., Дударев А.Л. «Лучевая терапия неопухолевых заболеваний». М, 1977г.
2. Зетгенидзе Г.А. «Клиническая рентгенорадиология». М. 1985г.
3. Линденбратен Л.Д., Королюк И.П., «Медицинская радиология и рентгенология», М. «Медицина», 2000г.
4. Г.Е. Труфанов «Лучевая диагностика и лучевая терапия», СПб, 2005.
5. «Лучевая диагностика». Учебник для вузов. Под ред. проф. Труфанова Г.Е. М, 2007г.

## Блок информации:

### ФОТОННОЕ И КОРПУСКУЛЯРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

**Электромагнитные излучения.** В лучевой терапии используют рентгеновское излучение рентгенотерапевтических аппаратов, гамма

-излучение радионуклидов и тормозное (рентгеновское) излучение высоких энергий.

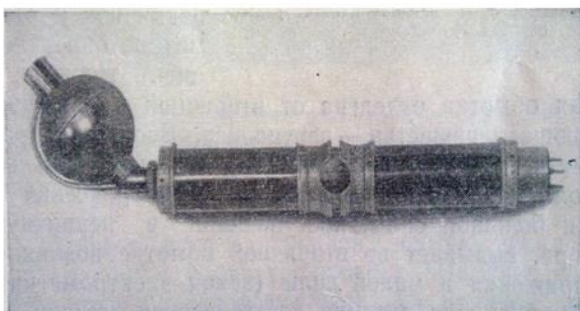
**Рентгеновское излучение** — фотонное излучение, состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения.

**Тормозное излучение** — коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при изменении скорости (торможении) заряженных частиц при взаимодействии с атомами тормозящего вещества (анода). Длины волн тормозного рентгеновского излучения не зависят от атомного номера тормозящего вещества, а определяются только энергией ускоренных электронов. Спектр тормозного излучения непрерывный, с максимальной энергией фотонов, равной кинетической энергии тормозящихся частиц.

**Характеристическое излучение** возникает при изменении энергетического состояния атомов. При выбивании электрона из внутренней оболочки атома электроном или фотоном атом переходит в возбужденное состояние, а освободившееся место занимает электрон из внешней оболочки. При этом атом возвращается в нормальное состояние и испускает квант характеристического рентгеновского излучения с энергией, равной разности энергий на соответствующих уровнях. Характеристическое излучение имеет линейный спектр с определенными для данного вещества длинами волн, которые, как и интенсивность линий характеристического спектра рентгеновского излучения, определяются атомным номером элемента  $Z$  и электронной структурой атома.

Интенсивность тормозного излучения обратно пропорциональна квадрату массы заряженной частицы и прямо пропорциональна квадрату атомного номера вещества, в поле которого происходит торможение заряженных частиц. Поэтому для увеличения выхода фотонов используют относительно легкие заряженные частицы — электроны и вещества с большим атомным номером (молибден, вольфрам, платину).

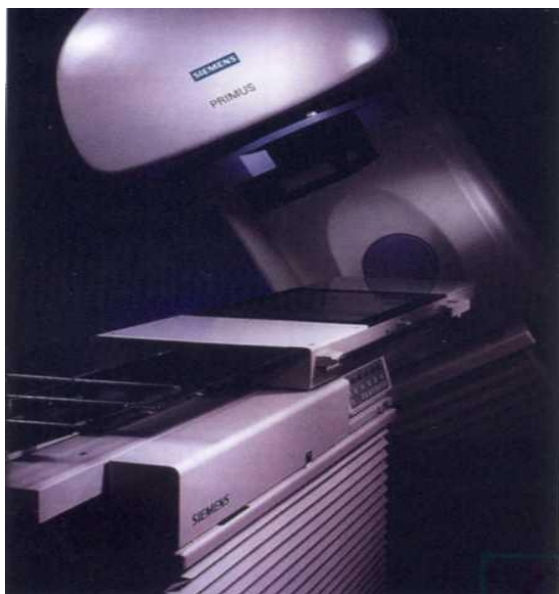
#### Рентгеновская трубка



*Источником рентгеновского излучения для целей лучевой терапии является рентгеновская трубка рентгенотерапевтических аппаратов, которые в зависимости от уровня генерируемой энергии делятся на близкофокусные и дистанционные. Рентгеновское излучение близкофокусных рентгенотерапевтических аппаратов генерируется при анодном напряжении менее 100 кВ, дистанционных — до 250 кВ.*

**Тормозное излучение высокой энергии**, как и тормозное рентгеновское излучение, — это коротковолновое электромагнитное излучение, возникающее при изменении скорости (торможении) заряженных частиц при взаимодействии с атомами мишени. Этот вид излучения отличается от рентгеновского высокой энергией. Источниками тормозного излучения высокой энергии являются линейные ускорители электронов — ЛУЭ с энергией тормозного излучения от 6 до 20 МэВ, а также циклические ускорители — бетатроны. Для получения высокоэнергетического тормозного излучения используют торможение резко ускоренных электронов в вакуумных системах ускорителей

### Линейный ускоритель электронов



**Гамма-излучение** — коротковолновое электромагнитное излучение, испускаемое возбужденными атомными ядрами при радиоактивных превращениях или ядерных реакциях, а также при аннигиляции частицы и античастицы (например, электрона и позитрона).

Источниками гамма-излучения являются радионуклиды. Каждый радионуклид испускает  $\gamma$ -кванты своей определенной энергии. Радионуклиды производят на ускорителях и в ядерных реакторах.

Под активностью радионуклидного источника понимают количество распадов атомов в единицу времени. Измерения производят в Беккерелях (Бк). 1 Бк — активность источника, в котором происходит 1 распад в секунду. Несистемная единица активности — Кюри (Ки). 1 Ки =  $3,7 \times 10^{10}$  Бк.

Источниками  $\gamma$ -излучения для дистанционной и внутрисполостной лучевой терапии являются  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Наибольшее распространение получили препараты  $^{60}\text{Co}$  с энергией фотонов в среднем 1,25 МэВ (1,17 и 1,33 МэВ).

Для проведения внутрисполостной лучевой терапии применяют  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ .

**Корпускулярное излучение** — потоки заряженных частиц: электронов, протонов, тяжелых ионов (например, ядер углерода) с энергиями в несколько сот МэВ, а также нейтральных частиц — нейтронов. Облучение с помощью потока частиц в настоящее время начали называть адронной терапией. К адронам (от греческого слова *hadros* — «тяжелый») относятся нуклоны, входящие в них протоны и нейтроны, а также  $\Lambda$ -мезоны и др. Источниками частиц являются ускорители и ядерные реакторы.

**Электронный пучок высокой энергии** генерируется такими же ускорителями электронов, как и при получении тормозного излучения. Используют пучки электронов с

энергией от 6 до 20 МэВ. Электроны высокой энергии обладают большой проникающей способностью. Средняя длина свободного пробега таких электронов может достигать в тканях человеческого организма 10—20 см. Электронный пучок, поглощаясь в тканях, создает дозное поле, при котором максимум ионизации образуется вблизи поверхности тела. За пределами максимума ионизации происходит довольно быстрый спад дозы. На современных линейных ускорителях имеется возможность регулировать энергию пучка электронов, а соответственно, создавать требуемую дозу на необходимой глубине.

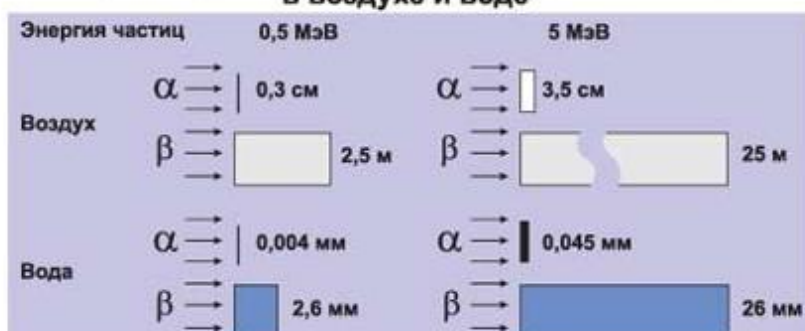
**Нейтрон** — частица, не имеющая заряда. Процессы взаимодействия нейтронов (нейтральных частиц) с веществом зависят от энергии нейтронов и атомного состава вещества. Основным эффектом действия тепловых (медленных) нейтронов с энергией 0,025 эВ на биологическую ткань происходит под действием протонов, образующихся в реакции (п, р) и теряющих всю свою энергию в месте рождения. Большая часть энергии медленных нейтронов расходуется на возбуждение и расщепление молекул тканей. Почти вся энергия быстрых нейтронов с энергией от 200 кэВ до 20 МэВ теряется в ткани при упругом взаимодействии. Дальнейшее выделение энергии происходит в результате ионизации среды протонами отдачи. Высокая линейная плотность энергии нейтронов препятствует репарации облученных опухолевых клеток.

**Протон** — положительно заряженная частица. Используется метод облучения на «пике Брэгга», когда максимальная энергия заряженных частиц выделяется в конце пробега и локализуется в ограниченном объеме облучаемой опухоли. В результате образуется большой градиент доз на поверхности тела и в глубине облучаемого объекта, после чего происходит резкое затухание энергии. Меняя энергию пучка, можно изменять место его полной остановки в опухоли с большой точностью. Применяются пучки протонов с энергией 70—200 МэВ и техника многопольного облучения с разных направлений, при которой интегральная доза распределяется на большой площади поверхностных тканей. При облучении на синхроциклотроне в ПИЯФ (Петербургский институт ядерной физики) используют фиксированную энергию выведенного протонного пучка — 1000 МэВ и применяют методику облучения напролет. Протоны такой высокой энергии легко проходят сквозь облучаемый объект, производя равномерную ионизацию вдоль своего пути. При этом происходит малое рассеяние протонов в веществе, поэтому сформированный на входе узкий с резкими границами пучок протонов остается практически таким же узким и в зоне облучения внутри объекта. В результате применения облучения напролет в сочетании с ротационной техникой облучения обеспечивается очень высокое отношение дозы в зоне облучения к дозе на поверхности объекта — порядка 200:1

**л-мезоны** — бесспиновые элементарные частицы с массой, величина которой занимает промежуточное место между массами электрона и протона. л-Мезоны с энергиями 25—100 МэВ проходят весь путь в ткани практически без ядерных взаимодействий, а в конце пробега захватываются ядрами атомов ткани. Акт поглощения л-мезона сопровождается вылетом из разрушенного ядра нейтронов, протонов, ос-частиц, ионов Li, Be и др. Активному внедрению в клиническую практику адронной терапии пока препятствует высокая стоимость технологического обеспечения процесса.

**альфа-излучение** — корпускулярное излучение, состоящее из ядер  ${}^4\text{He}$  (два протона и два нейтрона), испускаемых при радиоактивном распаде ядер или при ядерных реакциях, превращениях. альфа-частицы испускаются при радиоактивном распаде элементов тяжелее свинца или образуются в ядерных реакциях. Альфа-частицы обладают высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью, несут два положительных заряда.

**Длина пробега альфа-частиц и бета-частиц в воздухе и воде**



Радионуклид  $^{225}\text{Ac}$  с периодом полураспада 10,0 сут в соединении с моно-клональными антителами применяют для радиоиммунотерапии опухолей. В перспективе — использование для этих целей радионуклида  $^{149}\text{Tb}$  с периодом полураспада 4,1 ч. Ос-Излучатели начали использовать для облучения эндотелиальных клеток в коронарных артериях после проведения операций — аортокоронарного шунтирования.

**В-излучение** — корпускулярное излучение с непрерывным энергетическим спектром, состоящее из отрицательно или положительно заряженных электронов или позитронов ( $\beta^-$  или  $\beta^+$  частиц) и возникающее при радиоактивном В-распаде ядер или нестабильных частиц. В-Излучатели используются при лечении злокачественных опухолей, локализация которых позволяет обеспечить непосредственный контакт с этими препаратами.

Источниками В-излучения являются  $^{106}\text{Ru}$ , В-излучатель с энергией 39,4 кэВ и периодом полураспада 375, 59 дня,  $^{106}\text{Rh}$ , В-излучатель с энергией 3540,0 кэВ и периодом полураспада 29,8 с. Оба В-излучателя  $^{106}\text{Ru} + ^{106}\text{Rh}$  входят в комплекты офтальмологических аппликаторов.

В-излучатель  $^{32}\text{P}$  с энергией 1,71 МэВ и периодом полураспада 14,2 дня используется в кожных аппликаторах для лечения поверхностных заболеваний. Радионуклид  $^{89}\text{Sr}$  является практически чистым В-излучателем с периодом полураспада 50,6 дня и средней энергией В-частиц 1,46 МэВ. Раствор  $^{89}\text{Sr}$  — хлорида используется для паллиативного лечения костных метастазов.

$^{153}\text{Sm}$  с энергиями р-излучения 203,229 и 268 кэВ и с энергиями у-излучения 69,7 и 103 кэВ, периодом полураспада 46,2 ч входит в состав отечественного препарата самария-оксабифора, предназначенного для воздействия на метастазы в костях, а также применяемого у больных с выраженным болевым синдромом в суставах при ревматизме.

$^{90}\text{Y}$  с периодом полураспада 64,2 ч и максимальной энергией 2,27 МэВ используется для различных терапевтических целей, включая радиоиммунотерапию с мечеными антителами, лечение опухолей печени и ревматоидного артрита.

Радионуклид  $^{59}\text{Fe}$  в составе таблетированного радиофармацевтического препарата применяют в Российском научном центре рентгенорадиологии (Москва) для лечения больных раком молочной железы. Принцип действия препарата, по мнению авторов, заключается в распространении железа током крови, избирательном накоплении в клетках опухолевой ткани и воздействии на них р-излучением.  $^{67}\text{Si}$  с периодом полураспада 2,6 сут соединяют с моноклональными антителами для радиоиммунной терапии опухолей.

$^{186}\text{Re}$  в составе препарата (рения сульфид) с периодом полураспада 3,8 сут используют для лечения болезней суставов, а баллонные катетеры с раствором перрената натрия применяют для проведения эндоваскулярной брахи-терапии. Считается, что есть перспектива для применения  $\text{P}^+$ -излучателя  $^{48}\text{V}$  с периодом полураспада 16,9 сут для проведения внутрикоронарной брахи-терапии с использованием артериального стента из сплава титана и никеля.

$^{131}\text{I}$  применяют в виде растворов для лечения заболеваний щитовидной железы.  $^{131}\text{I}$  распадается с испусканием сложного спектра Р- и у-излучения. Имеет период полураспада 8,06 дня.

## КЛИНИЧЕСКАЯ ДОЗИМЕТРИЯ

**Клиническая дозиметрия** — раздел дозиметрии ионизирующего излучения, являющийся неотъемлемой частью лучевой терапии. Основная задача клинической дозиметрии состоит в выборе и обосновании средств облучения, обеспечивающих оптимальное пространственно-временное распределение поглощенной энергии излучения в теле облучаемого больного и количественное описание этого распределения.

Клиническая дозиметрия использует расчетные и экспериментальные методики.

Расчетные методы основаны на уже известных физических законах взаимодействия различных видов излучения с веществом. С помощью экспериментальных методов моделируют лечебные ситуации с измерениями в тканеэквивалентных фантомах.

Задачами клинической дозиметрии являются:

- измерение радиационных характеристик терапевтических пучков излучения;
- измерение радиационных полей и поглощенных доз в фантомах;
- прямые измерения радиационных полей и поглощенных доз на больных;

измерение радиационных полей рассеянного излучения в каньонах с терапевтическими установками (в целях радиационной безопасности пациентов и персонала);  
проведение абсолютной калибровки детекторов для клинической дозиметрии;  
проведение экспериментальных исследований новых терапевтических методик облучения.

Основными понятиями и величинами клинической дозиметрии являются поглощенная доза, дозное поле, дозиметрический фантом, мишень.

**Доза ионизирующего излучения:** 1) мера излучения, получаемого облучаемым объектом, поглощенная доза ионизирующего излучения;

2) количественная характеристика поля излучения — экспозиционная доза и керма.

**Поглощенная доза** — это основная дозиметрическая величина, которая равна отношению средней энергии, переданной ионизирующим излучением веществу в элементарном объеме, к массе вещества в этом объеме:

$$D = E/m,$$

где  $D$  — поглощенная доза,

$E$  — средняя энергия излучения,

$m$  — масса вещества в единице объема.

В качестве единицы поглощенной дозы излучения в СИ принят Грей (Гр) в честь английского ученого Грея (L. H. Gray), известного своими трудами в области радиационной дозиметрии. 1 Гр равен поглощенной дозе ионизирующего излучения, при которой веществу массой в 1 кг передается энергия ионизирующего излучения, равная 1 Дж. В практике распространена также внесистемная единица поглощенной дозы — рад (radiation absorbed dose).  $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Дж/кг} = 100 \text{ эрг/г} = 10^{-2} \text{ Гр}$  или  $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ .

Поглощенная доза зависит от вида, интенсивности излучения, энергетического и качественного его состава, времени облучения, а также от состава вещества. Доза ионизирующего излучения тем больше, чем длительнее время излучения. Приращение дозы в единицу времени называется **мощностью дозы**, которая характеризует скорость накопления дозы ионизирующего излучения. Допускается использование различных специальных единиц (например, Гр/ч, Гр/мин, Гр/с и др.).

Доза фотонного излучения (рентгеновского и гамма-излучения) зависит от атомного номера элементов, входящих в состав вещества. При одинаковых условиях облучения в тяжелых веществах она, как правило, выше, чем в легких. Например, в одном и том же поле рентгеновского излучения поглощенная доза в костях больше, чем в мягких тканях.

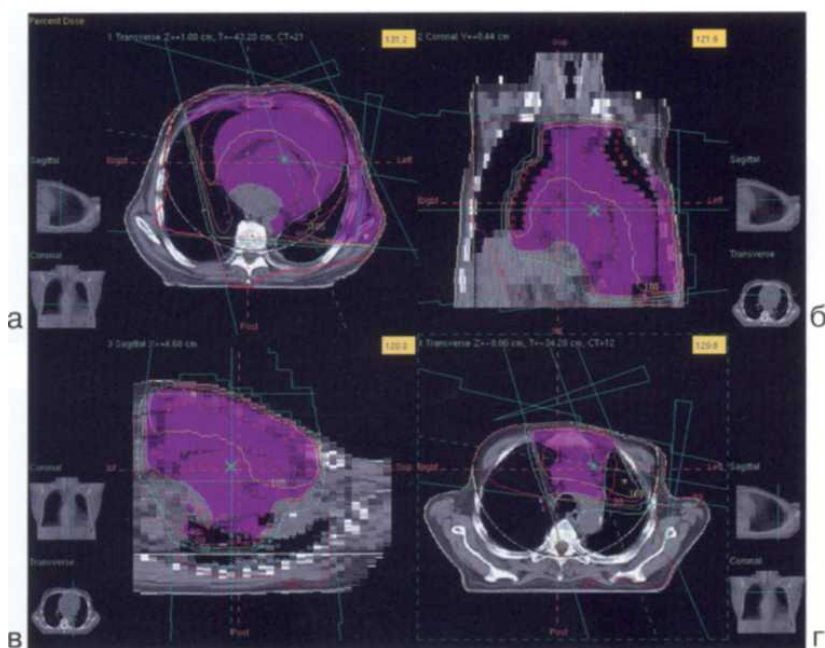
В поле нейтронного излучения главным фактором, определяющим формирование поглощенной дозы, является ядерный состав вещества, а не атомный номер элементов, входящих в состав биологической ткани. Для мягких тканей поглощенная доза нейтронного излучения во многом определяется взаимодействием нейтронов с ядрами углерода, водорода, кислорода и азота. Поглощенная доза в биологическом веществе зависит от энергии нейтронов, так как нейтроны различной энергии избирательно взаимодействуют с ядрами вещества. При этом могут возникать заряженные частицы,  $\alpha$ -излучение, а также образовываться радиоактивные ядра, которые сами становятся источниками ионизирующего излучения.



*Разные виды ионизирующего излучения при одной и той же поглощенной дозе оказывают на ткани живого организма различный биологический эффект, что определяется их относительной биологической эффективностью – ОБЭ*

**Дозное поле** — это пространственное распределение поглощенной дозы (или ее мощности) в облучаемой части тела больного, тканеэквивалентной среде или дозиметрическом фантоме, моделирующем тело больного по физическим эффектам взаимодействия излучения с веществом, форме и размерам органов и тканей и их анатомическим взаимоотношениям. Информацию о дозном поле представляют в виде кривых, соединяющих точки одинаковых значений (абсолютных или относительных) поглощенной дозы. Такие кривые называют **изодозами**, а их семейства — картами изодоз. За условную единицу (или 100%) можно принять поглощенную дозу в любой точке дозного поля, в частности максимальную поглощенную дозу, которая должна соответствовать подлежащей облучению мишени (то есть области, охватывающей клинически выявленную опухоль и предполагаемую зону ее распространения)

*Центральный рак легкого. Конформное облучение с двух параллельных полей клиновидными фильтрами. Распределение доз: схемы поперечного сечения разного уровня. а) схема фронтального сечения; б) схема саггитального сечения*



Физическая характеристика поля облучения характеризуется различными параметрами. Число частиц, проникших вперёд, называют **флюенсом**. Сумма всех проникших частиц и рассеянных в данной среде частиц составляет **поток** ионизирующих частиц, а отношение потока к площади составляет **плотность потока**. Под **интенсивностью излучения**, или плотностью потока энергии, понимают отношение потока энергии к площади объекта. Интенсивность излучения зависит от плотности потока частиц. Кроме **линейной передачи энергии (ЛПЭ)**, характеризующей средние энергетические потери частиц (фотонов), определяют линейную **плотность ионизации**

(ЛПИ), количество пар ионов на единицу длины пробега (трека) частицы или фотона.

Физическая величина	Единица, ее наименование, обозначение (междунар., русское)		Соотношение между единицами
	СИ	внесистемная	
Активность нуклида в р/а источнике	Беккерель (Bq, Бк)	Кюри (Ci, Ки)	$1 \text{ Бк} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ки}$ $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$
Экспозиционная доза излучения	Кулон на кг (C/kg, Кл/кг)	Рентген (R, Р)	$1 \text{ Кл/кг} = 3876 \text{ Р}$ $1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^4 \text{ Кл/кг}$
Мощность экспозиционной дозы	Ампер на кг (A/Kg, А/кг)	Рентген в секунду (R/s, Р/с)	$1 \text{ А/кг} = 3876 \text{ Р/с}$ $1 \text{ Р/с} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ А/кг}$
Поглощенная доза излучения	Грей (Gy, Гр)	рад (Rad, рад)	$1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ $1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
Мощность поглощенной дозы	Грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	рад в секунду (rad/s, рад/с)	$1 \text{ Гр/с} = 100 \text{ рад/с}$ $1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Гр/с}$
Интегральная доза излучения	Джоуль (J, Дж)	Радиант (rad · g, рад · г)	$1 \text{ Дж} = 10^9 \text{ рад} \cdot \text{г}$ $1 \text{ радг} = 10^{-5} \text{ Дж}$
Эквивалентная доза излучения	Зиверт (Sv, Зв)	бэр (бэр)	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$ $1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Зв}$
Мощность эквивалентной дозы	Зиверт в секунду (Sv/s, Зв/с)	бэр в секунду (бэр/с)	$1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ бэр/с}$ $1 \text{ бэр/с} = 0,01 \text{ Зв/с}$

Формирование дозного поля зависит от вида и источника излучения. При формировании дозного поля при фотонном излучении учитывают, что интенсивность фотонного излучения точечного источника падает в среде обратно пропорционально квадрату расстояния до источника. При дозиметрическом планировании используют понятие средней энергии ионизации, которая включает в себя энергию непосредственной ионизации и энергию возбуждения атомов, приводящую ко вторичному излучению, также вызывающему ионизацию. Для фотонного излучения средняя энергия ионизации равна средней энергии ионообразования электронов, освобожденных фотонами.

Дозное распределение пучка у-излучения неравномерно. Участок 100% изодозы имеет сравнительно небольшую ширину, и далее относительная величина дозы падает по кривой

достаточно круто. Размер поля облучения определяется по ширине 50 % дозы. При формировании дозного поля тормозного излучения имеется крутой спад дозы на границе поля, определяемый малым размером фокусного пятна. Это приводит к тому, что ширина 100% изодозы близка к ширине 50 % изодозы, которая определяет дозиметрическую величину размера поля облучения. Таким образом, в формировании дозного распределения при облучении пучком тормозного излучения имеются преимущества перед пучком у-излучения, так как уменьшаются дозы облучения здоровых органов и тканей вблизи патологического очага

### Глубина расположения 100 %, 80 % и 50 % изодоз при наиболее часто используемых энергиях излучения

вид и энергия излучения	Глубина расположения процентно-глубинных доз (см)		
	100%	80%	50%
Рентгеновское излучение 230 кВ (2 мм Си)	0,5	3,0	6,8
У-Излучение <sup>60</sup> Co 1,25 МэВ	0,5	4,7	11,6
Фотоны 6 МВ	0,2	6,8	15,6
Фотоны 10 МВ	0,0	7,8	19,0
Электроны 6 МэВ	0,2	1,4	1,8
Электроны 10 МэВ	0,0	2,8	3,6

**Дозиметрические приборы.** Дозиметрические приборы могут служить для измерения доз одного вида излучения или смешанного излучения. Радиометрами измеряют активность или концентрацию радиоактивных веществ.

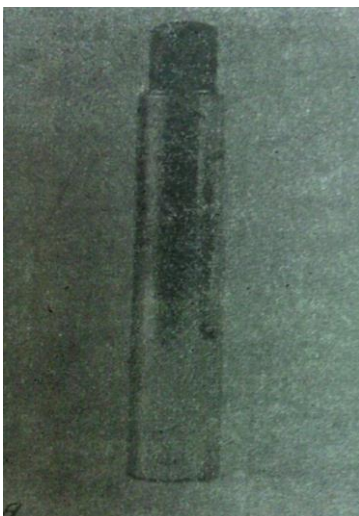
По способу эксплуатации различают дозиметрические приборы стационарные, переносные (можно переносить только в выключенном состоянии) и носимые. Дозиметрический прибор для измерения дозы излучения, получаемой каждым человеком, находящимся в зоне облучения, называется индивидуальным дозиметром.

В зависимости от типа детектора различают ионизационные дозиметры, сцинтилляционные, люминесцентные, полупроводниковые, фотодозиметры и т.д.

## Дозиметры



**Ионизационная камера** — это прибор для исследования и регистрации ядерных частиц и излучений. Его действие основано на способности быстрых заряженных частиц вызывать ионизацию газа. Ионизационная камера представляет собой воздушный или газовый электрический конденсатор, к электродам которого приложена разность потенциалов. При попадании ионизирующих частиц в пространство между электродами там образуются электроны и ионы газа, которые, перемещаясь в электрическом поле, собираются на электродах и фиксируются регистрирующей аппаратурой.

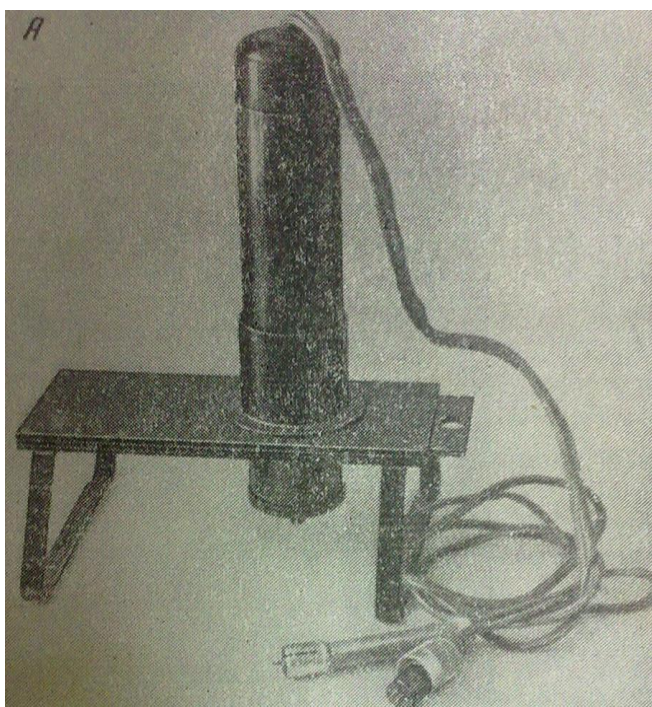


### **Внешний вид ионизационной камеры с подставкой**

*В сцинтилляционных дозиметрических приборах световые вспышки, возникающие в сцинтилляторе под действием излучения, преобразуются с помощью фотоэлектронного умножителя в электрические сигналы, которые затем регистрируются измерительным устройством. Сцинтилляционные дозиметры применяются чаще всего в дозиметрии радиационной защиты.*

В люминесцентных дозиметрических приборах используется тот факт, что люминофоры способны накапливать поглощенную энергию излучения, а затем освободить ее путем люминесценции под действием дополнительного

возбуждения, которое осуществляется либо нагревом люминофора, либо его облучением.



### **Люминисцентный счетчик**

**Полупроводниковые** (кристаллические) дозиметры меняют проводимость в зависимости от мощности дозы. Широко используются наряду с ионизационными дозиметрами.

### **Биологическое действие ионизирующего излучения.**

Биологическое действие ионизирующего излучения представляет собой сложное явление, характеризующееся многообразием взаимосвязанных и взаимозависимых реакций, возникающих в облученном организме. Внешнее проявление его, и в частности повреждающее действие ионизирующих излучений, является лишь конечным звеном в цепи реакций, развивающихся в облученном организме. Биологическое действие ионизирующих излучений по силе и характеру значительно превышает биологические эффекты других видов излучений.

Неоспоримой заслугой отечественной школы радиобиологии является постановка и глубокое изучение проблемы участия нервной системы в лучевом поражении организма.

Спустя некоторое время после открытия рентгеновых лучей, И.Р. Тарханов впервые поставил ряд опытов на животных, позволивших изучить двигательные рефлексы на химические раздражения после облучения животного рентгеновыми лучами.

Тарханов подчеркивал, что на основании его работ следует сделать вывод, что химическими лучами можно не только фотографировать и диагностировать (как это было известно до сих пор), но и влиять на ход жизненных функций, умеряя их главного регулятора, т.е. центры цереброспинальной оси.

Гольдберг в 1904г. своими исследованиями так же подчеркнул, что животные, подвергавшиеся воздействию радия, погибают от «поражения» нервной ткани.

Лондон – крупный советский патофизиолог, биохимик и радиобиолог. Изучая биологическое действие излучений на организм, выявил ряд закономерностей, имевших решающее значение для развития радиобиологии. Им впервые было установлено, что излучения радия в определенных дозах может убивать животных. Лондон был первым исследователем, который показал, что под влиянием лучей радия наиболее ранние и выраженные изменения происходят в кроветворных, половых и лимфатических органах.

Уже спустя некоторое время после открытия рентгеновских лучей были обнаружены лучевые повреждения кожи. Уже в 1897 году на Международном медицинском конгрессе была предложена классификация и описана патология и клиника лучевых повреждений кожи. Недостаточные сведения о дозировке излучения, отсутствие точной аппаратуры для определения дозы вело к тому, что рентгенологи и радиологи, работавшие в те годы, подвергались систематическому действию больших радиаций и в короткий срок получали те или иные кожные повреждения. Ряд специалистов, работавших с источниками проникающего излучения, должны были прекратить работу в этой области, а некоторые из них погибли в дальнейшем от профессионального рака кожи. В числе этих специалистов были ученые Розенблат, Исаченко, Гольдберг, который для изучения морфологических изменений облучал собственную кожу. Этим ученым в Берлине воздвигнут обелиск.

Переходя к вопросу о механизме биологического действия излучений следует, прежде всего, ответить на вопрос: имеет ли место непосредственная ионизация и возбуждение высокомолекулярных полимеров, составляющих основу живого вещества (белки, ферменты, нуклеопротеиды, глюкотеиды, липопротеиды), или эти процессы сначала происходят в воде, в которой растворены и взвешены указанные вещества, а на них действуют уже продукты разложения воды. В первом случае говорят о прямом действии излучений, во втором о непрямом действии лучей через продукты радиолиза воды.

Даже при небольшом количестве облученных клеток прямое действие может иметь очень важные биологические последствия, если относится к молекулам таких образований, как ферменты или такие внутриклеточные структуры как гены или хромосомы.

Вероятность поражения молекулы пропорциональна ее объему. Чем больше молекулы, тем больше данных для поглощения ими энергии. Так молекулы нуклеиновой кислоты, роль которой является основной в жизнедеятельности клеток, являются очень крупными молекулами.

Наиболее ранней гипотезой радиобиологии была теория попаданий и чувствительных объемов или так называемая теория мишеней. Согласно этой теории, внутри каждой клетки имеется чувствительный объем (мишень), во много раз меньший, чем объем клетки, а протоплазма клетки к излучению не чувствительна. Поражающее действие оказывают только те ионизирующие частицы, которые попадают в этот чувствительный объем. Различная чувствительность клеток связывалась с разным объемом мишеней. Авторы теории мишени пытались связать это предположение с реально существующими в клетках морфологическими структурами. Основными чувствительными элементами

клетки считается ядро, ядрышко хромосомы, гены, а также биохимические вещества, которые входят в состав ферментов, нуклеопротеидов, липопротеидов.

Значение этой теории признается многими авторами и в настоящее время. Хотя был накоплен ряд фактов, противоречащих теории. Однако если раньше радиобиология придерживалась, главным образом, теории чувствительных объемов, то в настоящее время большую долю биологического эффекта относят за счет непрямого действия излучения, связанного с физическими или химическими явлениями, возникающими при прохождении ионизирующей частицы.

Известно, что все ткани организма, находящиеся в состоянии активной жизнедеятельности, содержат воду, являющуюся средой для живых организмов. Она составляет 70-80% их веса. Для молодых или эмбриональных тканей это соотношение доходит до 90-95%. Начиная с Кюри (1901г.) было известно, что излучения способны разлагать воду, а сравнительно недавние исследования показали, что вещества, выделяющиеся при этом, могут быть очень активными.

Начальным процессом является ионизация воды, требующая всего 13 электронвольт. И так образуется два свободных радикала Н и ОН, обладающие большой активностью. При наличии в воде растворенного кислорода водородный радикал, реагируя с ним, образует новый неустойчивый радикал НО<sub>2</sub>, возможно образование такого сильного окислителя как Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>. Свободные радикалы взаимодействуют не только между собой, но и вступают в связи с биологически важными веществами клетки, и в первую очередь с сульфгидрильными группами SH, входящими в состав большинства ферментов. Связывание сульфгидрильных групп, изменение, инактивация ферментов и других важных систем сопровождается нарушением обменных и биохимических процессов.

Особое значение в этих условиях приобретает расстройство тканевого дыхания, способности синтеза определенных типов белка и нарушение вследствие этого редублирования сложных макромолекул. В результате нарушения редублирования белковых молекул возникают мутации, т.е. появляются клетки с генетически измененными свойствами. В развитии биологического эффекта особую роль играют нервная, эндокринная, гуморальная системы, в которых так же происходят ионизация атомов и молекул и первичные радиационно-химические процессы. В этой связи сразу же нарушается нейроэндокринная регуляция физиологических процессов различных органов и систем организма.



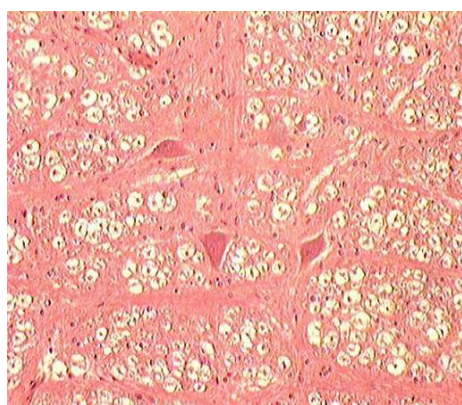
Таким образом, биологическое действие ионизирующих излучений представляет собой сложный процесс, разыгрывающийся в живых организмах. Первичная ионизация атомов и молекул является пусковым механизмом, за которым обязательно следуют вторичные изменения, развивающиеся в виде цепной реакции по биологическим закономерностям. Вторичные процессы, представляющие по своему существу поражения организма в целом, являются главными в клинической картине биологического действия радиации.

Структурные изменения проявляются вакуолизацией клеток, пикнозом и распадом ядер, а также грубыми повреждениями клеточных органелл, заканчивающихся их гибелью. Одновременно с этим имеют место и процессы восстановления погибших элементов, аутосенсibilизации, и компенсация нарушенных функций.

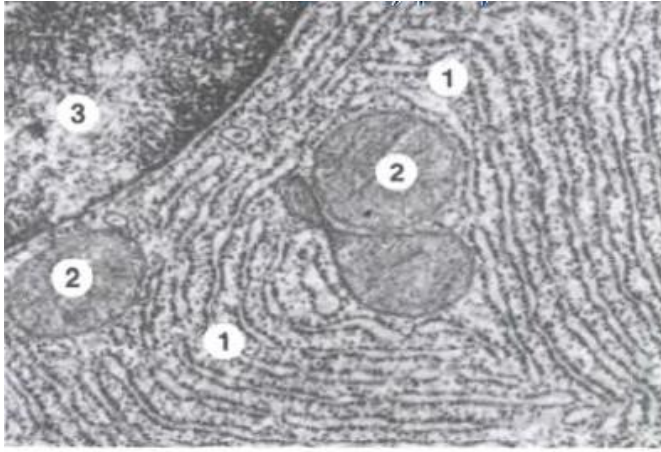
### Вакуолизация клеток

Угнетение и подавление функции клеток:

- ограничение их подвижности
- способность к росту и размножению
- изменение проницаемости клеточных мембран
- перестройка и дезорганизация обмена веществ в ядре и протоплазме.







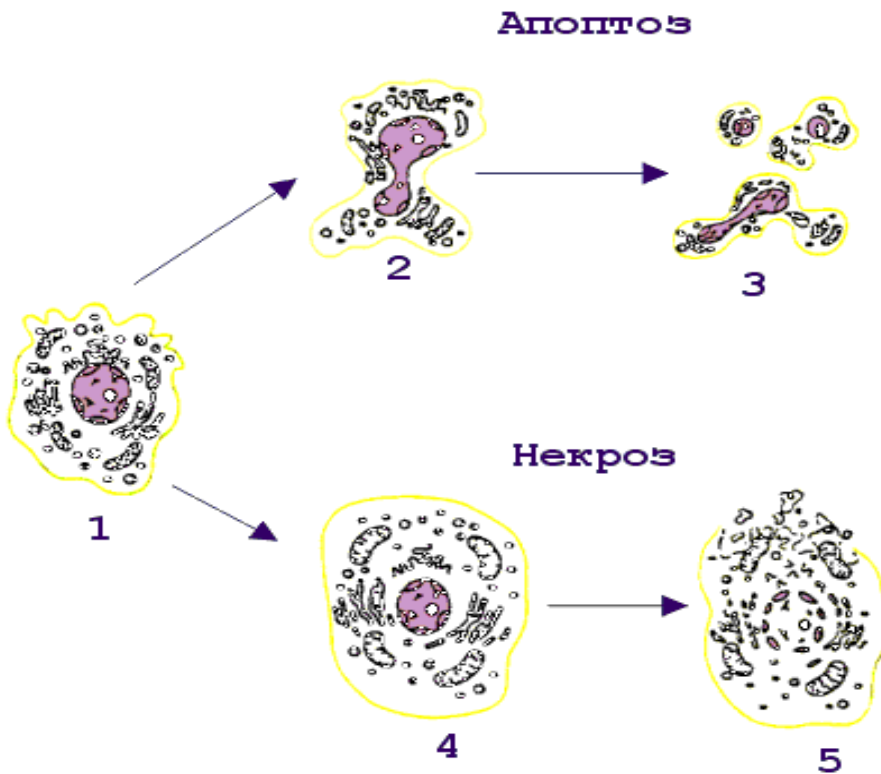
1 — гранулярная ЭПС: содержит мембраносвязанные рибосомы (на которых идет синтез экспортных и мембранных белков).

2 — митохондрии;

3 — ядро клетки.

В клетках наблюдается повреждение:

- хромосом ядра, ядрышек микросом, лизосом, митохондрий, цитоплазмы.
- появление в клеточных популяциях мутаций
- появление необычных форм дочерних клеток
- грубые морфологические изменения
- набухание клетки, образование в ней вакуолей, пикноз ядра, его распад.



Таким образом, биологическое действие это сложный процесс, где сочетаются регрессивные явления с восстановительными и компенсаторными процессами. Это служит основой для использования ионизирующих излучений в лечебных целях в одних случаях для подавления патологического роста и уничтожения опухолевой ткани, в других – для реактивного повышения восстановительных, регенераторных способностей отдельных тканей и органов.

Необходимо отметить, что выраженность радиационных реакций зависит от вида излучений и содержания в тканях кислорода. Если легкие кванты рентгеновских или гамма лучей без труда проскальзывают между атомами вещества, лишь изредка задевая их электронные оболочки, то тяжелые альфа-частицы как мощные «танки» сокрушают все встречающиеся на их пути препятствия, ломают электронные оболочки и быстро растрачивают свою энергию.

На пути в 1 микрон альфа-частицы образуют 5000 пар ионов, электроны  $\beta$  – частицы в зависимости от скорости и энергии --от 5 до 20 пар, а  $R_0$  и  $\gamma$ -кванты от 0,5 до 2 пар. Следовательно, на единицу пробега альфа-частицы оказывают действие в 1000 раз большее, чем  $\gamma$ -кванты и в сотни раз более интенсивное, чем  $\beta$ -частицы.

Для оценки разрушительного действия разных видов излучений большое значение имеет не только удельная плотность ионизации, но и глубина проникновения лучей внутрь организма. По этому признаку излучения лучи располагаются в обратном порядке. Гамма излучение проходит насквозь, а альфа излучение поглощается поверхностным слоем кожи. Следовательно, если сравнивать эти излучения по их опасности для здоровья и жизни здорового организма, то ясно, что наибольшую опасность представляют гамма и  $R_0$ - лучи.

Установлено, что определенное значение для выраженности биологического эффекта имеет содержание в тканях кислорода в момент облучения. А именно, отсутствие или снижение парциального давления в тканях снижает эффективность рентгеновского и гамма излучения. Это явление известно в радиобиологии под названием кислородного эффекта.

Биологическому действию присущи и другие особенности, играющие положительную роль при их использовании в лечебных целях. Первой из них является субъективная неощутимость воздействия, что обуславливает безболезненность диагностических и лечебных процедур. Вместе с тем эта особенность требует большой осторожности персонала, чтобы не подвергнуться незаметно для себя вредному облучению.

Второй особенностью является зависимость степени повреждения тканей от величины поглощенной дозы. Эту зависимость хорошо проследить на реакциях кожи на облучение.

## Лучевая реакция кожи.



Третья особенность биологического действия излучений – наличие скрытого периода. Изменения в тканях хотя и сразу возникают после облучения, но проявляются клинически спустя определенное время. При этом длительность скрытого периода обратно пропорциональна поглощенной дозе.

Заслуживает внимание еще одна особенность биологического действия: заключается она в том, что разные органеллы клеток, разные клетки и ткани и даже разные организмы обладают различной чувствительностью. Вследствие этого, для получения одинакового эффекта в разных тканях, необходима различная доза.

Под радиочувствительностью понимают способность организма отвечать на воздействие ионизирующего излучения различными функциональными, деструктивными или дегенеративными нарушениями.

В радиобиологии различают видовую радиочувствительность. Так, смертельная доза для собаки составляет 600 рад, крысы – 800 рад, мыши – 550 рад, кролика – 1250 рад.

Существует внутривидовая или индивидуальная чувствительность. Так, некоторые собаки выживают при общем облучении 600 рад, а другие погибают при 275 рад.

Различные клетки организма также имеют неодинаковую радиочувствительность.. В одних органах не выявляются какие либо деструктивные изменения, в других наблюдаются глубокие морфологические и генетические эффекты. Многолетние экспериментальные и клинические исследования позволили составить схематическую классификацию радиочувствительности здоровых клеток и тканей по убывающей степени на основании грубых морфологических проявлений лучевых поражений.

На заре изучения механизма биологического действия был сформулирован закон, который и теперь является ориентиром в оценке радиочувствительности тканей.

Это положение, названное тогда законом Бергонье и Трибондо, гласит, что чувствительность тканей прямо пропорциональна митотической активности и обратно пропорциональна дифференцированности тканей. (Шкала радиочувствительности).

Подтверждением этого правила является высокая чувствительность лимфатической ткани, селезенки и т.д. Однако, на практике встречается много противоречий и исключений из этого правила. Исходя из этого правила, селезенка и яичники очень чувствительны к радиации. Считалось раньше, что лучевой эффект прекрасное средство для безболезненной стерилизации. Однако в дальнейшем оказалось, что половые клетки поражаются сублетально. Доза в 250 г делает человека стерильным, однако через год бесплодие прекращается, клетки ставшие носителями мутации, участвуют в оплодотворении и, следовательно, могут принести потомству непоправимый вред.

Двойко решается вопрос и о радиочувствительности патологических тканей.....

Исходя из правила Бергонье и Трибондо, можно объяснить и радиочувствительность патологических тканей.

Вследствие этого для получения какого-либо определенного эффекта для различных клеток требуется различная доза излучения. Это свойство принято называть относительной или дифференцированной радиочувствительностью.

Различают еще действительную и условную радиочувствительность. Действительная радиочувствительность является постоянной для данного вида клеток. Условная радиочувствительность зависит от функционального состояния клетки, изменения среды и других факторов.

Существующая разница в чувствительности между здоровой и патологической тканью называется радиотерапевтическим интервалом.

### **Канцерицидные дозы.**

В свете всего изложенного способность ионизирующих излучений оказывать биологическое действие, выражающееся в подавлении функции роста и размножения, а также в глубоком повреждении и гибели элементов тканей и органов является основой лечебного применения их, т.е. лучевой терапии злокачественных новообразований. С точки зрения радиобиологии, лечение должно отвечать двум условиям: стерилизовать раковую ткань и не вызвать в окружающих здоровых тканях тяжелых повреждений, способных угрожать жизни пациента.

Помимо этого к основным принципам лучевой терапии следует отнести:

1) своевременность применения лучевой терапии в возможно ранних стадиях заболевания,

2) выбор наиболее рациональной методики,

- 3) подведение к опухоли необходимой дозы,
- 4) одновременное лучевое воздействие на первичную опухоль и регионарные пути метастазирования,
- 5) комплексность лечения больного, т.е. наряду с лучевой терапией использование средств, направленных на улучшение общей и местной реактивности организма.

Рассмотрим некоторые факторы, влияющие на эффективность лучевой терапии. Чувствительность опухоли зависит от гисто-структуры, степени дифференцировки клеточных элементов, от соотношения стромы и паренхимы. Опухоли богатые стромой обладают большой резистентностью. Это обусловлено плохим обеспечением кислородом. Небольшие опухоли с хорошо развитым кровоснабжением более радиочувствительны. Большие опухоли, как известно, менее чувствительны, кроме их периферических отделов. Большое влияние на радиочувствительность оказывает предшествовавшее облучение в дозе не вызвавшей гибели опухолевых клеток. В результате такого лечения опухоль обретает резистентность к последующему применению лучистой энергии. Это лишний раз доказывает, что I курс лучевой терапии должен быть полноценным.

Успех лучевой терапии злокачественных новообразований в значительной степени зависит от применяемой методики облучения, которая определяется глубиной залегания, размерами опухоли, вовлечением в процесс регионарных узлов, а также величиной дозы. Выбор оптимальной дозы определяет степень ответной реакции организма на облучение.

Биологический эффект определяется не только качеством излучения, величиной разовой и суммарной поглощенной дозы, но и распределением ее во времени. При этом учитывается протяженность и дробность облучения. Под протяженностью понимают время, в течение которого подводится доза излучения без перерыва.

Терапевтический эффект значительно повышается при увеличении времени экспозиции и фракционировании дозы. То есть суммарную дозу разделяют на отдельные фракции – порции и опухоль облучается многократно, каждый раз одной фракцией дозы. Этим же самым достигается повышение радиотерапевтического интервала, т.е. разницы в радиочувствительности здоровых измененных участков тканей.



Другим способом увеличения радиотерапевтического интервала является протрагирование дозы. В этом случае каждое облучение удлиняют путем снижения мощности дозы. Благоприятное влияние протрагирования и фракционирования связано с тем, что окружающие опухоль здоровые ткани после каждого облучения восстанавливаются быстрее, чем раковые клетки. Принимая во внимание положение и величину опухоли, выбирают размеры и направление пучка излучений таким образом, чтобы энергия излучений поглощалась в пределах опухоли и в минимальной степени в окружающих тканях.

В каждом индивидуальном случае, для каждого больного, подвергающегося лучевому лечению, составляется план лучевой терапии. При составлении плана лучевой терапии принимаются во внимание как физические, так и биологические и, прежде всего, основные информационные комплексы: полный диагноз, данные о радиотерапевтическом интервале и картина распределения поглощенной энергии излучения в объекте при разных условиях облучения.

Чтобы выполнить основные задачи лучевой терапии, необходимо подобрать такие физико-технические условия облучения, чтобы произошло максимальное поглощение намеченного количества энергии в облучаемом объекте, максимально щадящее здоровые ткани. А для этого нужно точно определить местоположение, величину и форму опухоли в том положении, в каком больной будет облучаться. Локализацию опухолей внутренних органов определяют путем рентгенологического и радиометрического исследования и строят поперечные срезы тела на уровне середины опухоли. (Топометрические карты). Затем на поперечный срез накладываются шаблоны изодозных кривых и, таким образом, рассчитывается глубинная поглощенная доза. Выбираются наиболее оптимальные условия облучения.

Мы рассмотрели общие, основные принципы лучевой терапии, которые должны учитываться в каждом частном случае лучевого лечения.

Рассмотрим классификацию лучевой терапии.

В зависимости от целей и задач различают следующие разновидности лучевой терапии:

1. Радикальную: цель – создание в очаге необходимой для разрушения дозы.
2. Предоперационную: цель – подавление способности роста и метастазирования.
3. Послеоперационную: цель – подавление способности роста и метастазирования.
4. Профилактическую – направленную на предупреждение возможного метастазирования при существующем первичном очаге.
5. Паллиативную – облегчающую страдания больного, болеутоляющую.

В зависимости от характера излучений, используемого для терапии, различают также 5 видов:

1. рентгенотерапия;
2.  $\beta$ -терапия;
3. гамматерапия;
4. лучевая терапия тормозным излучением высокой энергии;
5. лучевая терапия электронами высокой энергии.

В зависимости от взаимоотношения между источником излучения и облучаемым объектом методики лучевой терапии делятся на:

1. дистанционную наружную,
2. внутрисполостную,
3. внутритканевую,
4. контактную,
5. внутреннюю.

## Контрольные вопросы.

1. Что понимают под биологическим действием проникающей радиации?
2. Каков первичный механизм биологического действия проникающей радиации?
3. В чем сущность биохимических и патоморфологических процессов, происходящих под влиянием проникающей радиации.
4. Радиочувствительность тканей, биологические закономерности радиочувствительности.
5. Действие ионизирующего излучения на опухоль.
6. Основные задачи лучевой терапии.
7. Выбор оптимальных условий облучения.
8. Понятие оптимальной дозы.
9. Значение фракционного облучения.
10. Управление радиочувствительностью.
11. Подготовка больных к лучевой терапии.
12. Понятие о поглощенной дозе. Единицы измерения. Мощность экспозиционной дозы. Единицы измерения.



Тестовые задания:

**1. Естественную радиоактивность открыл**

- А. Кюри М.
- Б. Рего К.
- В. Кюри П.
- Г. Беккерель А.

**2. Что измеряют при помощи радиометров?**

- А. Активность радиоактивных веществ
- Б. Дозу проникающей радиации
- В. Степень проникающей способности излучений
- Г. Энергию излучаемых частиц и квантов

**3. Что такое изотопы?**

- А. Разновидности одного и того же элемента с различным атомным весом
- Б. Разновидности химических элементов с разным числом протонов
- В. Разновидности химических элементов с различным числом электронов
- Г. Элементы с различным числом электронных уровней
- Д. Элементы с различным порядковым номером

**4. Как можно изменить скорость радиоактивного распада?**

- А. Путем нагревания
- Б. Путем охлаждения сверхнизких температур
- В. Путем химического воздействия
- Г. Путем повышения давления
- Д. Невозможно изменить

**5. Каковы составные части естественного радиационного фонда?**

- А. Излучения промышленных предприятий
- Б. Излучение атомных электростанций
- В. Излучения рентгеновских кабинетов
- Г. Излучение естественно распределенных радиоактивных веществ и космическое излучение
- Д. Излучения живых организмов

**6. Единица поглощенной дозы**

- А.Грей
- Б. Зиверт
- В. Рентген
- Г Кюри

**7.Что произойдет с атомом вещества при альфа-распаде?**

- А. сместится в таблице Менделеева на две клетки вправо
- Б. атомный вес не изменится
- В сместиться в таблице Менделеева на две клетки влево
- Г. выделит два электрона

**8. Радиофармацевтический препарат должен отвечать следующим требованиям :**

- А . быть безвредным
- Б. быстро выводится из организма
- В. обладать тропностью к исследуемому органу
- Г. период полураспада должен быть коротким
- Д все правильно

**9. Какие физические изменения происходят в атомах клеток тканей и жидкостей организма под влиянием воздействия проникающей радиации?**

- А. Ионизация и возбуждение атомов.
- Б. Увеличение количества электронных слоев.
- В. Превращение протона ядра в нейтрон.

**10. К ионизирующим излучениям относятся:**

- А. квантовое (фотонное) и корпускулярное
- Б. световое (видимая часть спектра).
- В. ультрафиолетовое.
- Г. лазерное
- Д. инфракрасное.

**Ответы :**

- 1. Г**
- 2. А**
- 3. А**
- 4. Д**
- 5. Г**
- 6. А**
- 7. В**
- 8. Д**
- 9. А**
- 10. А**