



# Лекция 4. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

**Дисциплина: Радиационные эффекты и современная спектроскопия твердого тела.**

**Преподаватель: Phd, и.о. доцента Мархабаева А.А.**

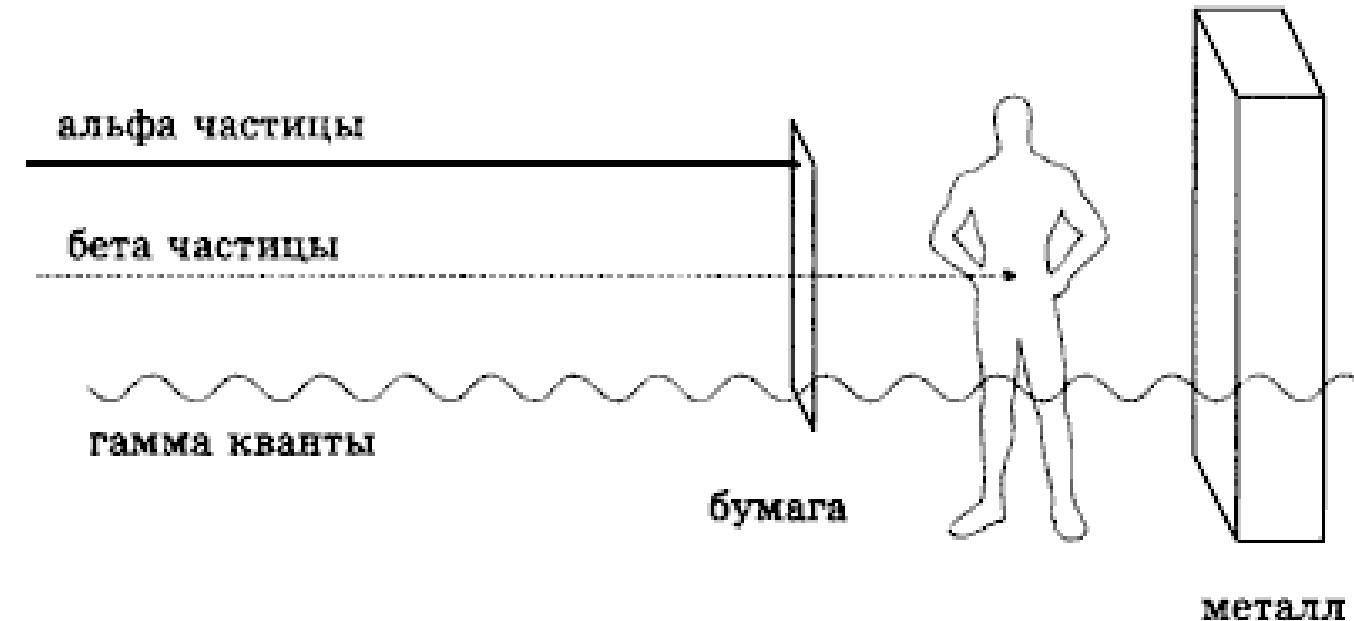


**Цель лекции:** Изучить механизмы взаимодействия ионизирующих излучений с живыми организмами, понять физические, химические и биологические стадии радиационного воздействия, а также рассмотреть дозиметрические характеристики, радиочувствительность тканей и принципы радиационной защиты человека.

### **Основные вопросы лекции**

- Этапы взаимодействия ионизирующего излучения с биологическими объектами.
- Первичные физические процессы и радиационно-химические эффекты.
- Радиационно-химическое воздействие на клетки и ткани.
- Типы биологических эффектов облучения: соматические, генетические, стохастические и детерминированные.
- Радиационная чувствительность различных органов и тканей.
- Дозы ионизирующего излучения и их измерение.
- Биологические последствия острого и хронического облучения.
- Принципы радиационной защиты и нормы безопасности.

Радиация (лат.radio – излучать) представляет собой излучение, идущее от какого – либо тела. Она сопутствовала людям всегда, ибо она гораздо старше человеческого рода. Одно только Солнце испускает огромное количество быстрых частиц – электронов, протонов, ионов и - лучей. Земля выделяет радиоактивный газ - радон. Искусственные источники, используемые в медицине, промышленности и энергетике ведут к повышению уровня радиации.



Излучение бывает ионизирующим и неионизирующим. Ионизация – это процесс образования положительных и отрицательных ионов или свободных электронов из электрически нейтральных атомов и молекул. Радиация бывает ионизирующей, если она способна разрывать химические связи молекул, составляющие живые организмы и тем самым вызывать биологические изменения. При средней работе на один акт ионизации, равной 34 эВ (1 эВ=1,602·10<sup>-19</sup>Дж), минимальная частота электромагнитных волн, обладающих ионизирующими способностями, определяется из :

$$\nu_{\min} = \frac{E_u}{h} = \frac{34 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{Дж}}{1,055 \cdot 10^{-34} \text{Дж} \cdot \text{с}} = 5 \cdot 10^{16} \text{Гц.} \quad (1.5)$$



Она соответствует глубокой ультрафиолетовой области спектра. Следовательно, к ионизирующему относятся ультрафиолетовые, рентгеновские излучения и - кванты. Еще большей ионизирующей способностью обладают электроны, нейтроны, протоны и другие заряженные частицы, обладающие высокой кинетической энергией. Световое излучение, инфракрасное излучение, радиоволны не могут вызвать ионизации, хотя могут оказывать биологические эффекты виде ожогов.

*Радиоактивность* – это естественный самопроизвольный распад неустойчивых ядер атомов. К ним относятся в первую очередь уран, полоний, радий и торий. Искусственная радиоактивность – это результат продуктов ядерных реакций. Из общего числа (3000) известных радионуклидов лишь 300 – природные изотопы. Остальные получены в результате ядерных реакций. Между ними нет принципиальной разницы и связаны с состоянием атомного ядра.

Ядро состоит из элементарных частиц – протонов и нейтронов, названных нуклонами (лат.nucleus - ядро). Ядро обозначается через  ${}^A_Z X$ , где  $A$  - массовое число,  $Z$  число протонов в ядре. Тогда  $N = A - Z$  – число нейтронов. Например, в изотопе урана содержится  ${}^{238}_{92} U$ ;  $N = 238 - 92 = 146$  нейтронов при суммарном числе нуклонов в ядре  $A = 238$ .

Протон был открыт Э.Резерфордом по реакции



и представляет ядро атома водорода. Свободный протон – стабильная элементарная частица с зарядом  $q = e$ ;  $m_p / m_e = 1836,2$  обладает спином  $S = 1/2$

Нейтрон открыт 1932 г. Дж. Чедвиком. Нейтрон  $\left({}^1_0 n\right)$  со спином  $S = \hbar/2$

имеет магнитный момент. Нейтрон нестабилен и распадается по схеме  ${}^1_0 n \rightarrow {}^1_1 p + {}^0_1 e + \tilde{\nu}$

Среднее время жизни свободного нейтрона – 15 мин. В 1932 г. была сформирована гипотеза Гейзенберга и Иваненко о протонно-нейтронной модели ядра. Ядра с одинаковым зарядовым числом  $Z$ , но разными массовым числом  $A$  называются изотопами. Например, водород имеет три изотопа:

${}_1^1H(Z = 1, N = 0)$  - протон;  ${}_1^2H(Z = 1, N = 1)$  - тяжелый водород (дейтерий);

${}_1^{23}H(Z = 1, N = 2)$  - тритий. Причем протий и дейтерий устойчивы, тритий – неустойчив.

Уран природный имеет три изотопа:  ${}_{92}^{238}U - 99,27\%$ ;  ${}_{92}^{235}U - 0,72\%$ ;  ${}_{92}^{234}U - 0,01\%$ . Деление испытывает ядро  ${}_{92}^{235}U$ .

–

*Радиоактивность* – это самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое излучением элементарных частиц. К числу радиоактивных явлений относятся:  $\alpha$  - распад;  $\beta$  - превращение;  $\gamma$  - излучение; нейтронное излучение; протонная и двухпротонная радиоактивности, кластерная радиоактивность и др. Во всех видах радиоактивных превращений выполняются законы сохранения энергии, импульса, момента количества движения, электрического, барионного и лептонного зарядов. За единицу радиоактивности принят  $1\text{Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{Бк}$ . Закон радиоактивного распада записывается в виде:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.8)$$

Гл. 1

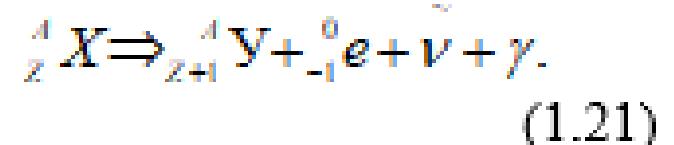
Альфа ( $\alpha$ ) - частица – это ядро атома гелия ( ${}^4_2He$ ). В результате  $\alpha$ -распада «материнское ядро»  ${}^A_ZX$  превращается в новое «дочернее» ядро по схеме:



Дочернее ядро находится в возбужденном состоянии. Оно возвращается в исходное состояние испустив  $\gamma$ -квант:



Существует три разновидности  $\beta$ -превращения: с излучением электрона ( ${}^0_{-1}e$ ), с излучением позитрона ( ${}^0_{+1}e$ ) и путем  $K$ -захвата. Схематическое представление  $\beta$ -превращения с испусканием  $\bar{\nu}$  и  $\gamma$ :





## **Механизмы повреждения клеток и тканей при воздействии ионизирующих излучений**

В 1898 году Анри Беккерель в течение шести часов носил в карманном жилете пробирку с радием, которую подарила ему Мария Склодовская-Кюри и через некоторое время на его теле там, где хранилась пробирка с радием, образовался ожог. Так впервые было обнаружено особое свойство радия воздействовать на живую ткань. Это положило начало новой отрасли науки – радиационной биологии. Поступая в тело живого организма, энергия излучения изменяет протекающие в нем биологические и физиологические процессы, нарушает обмен веществ.



Воздействие ионизирующих излучений на биологические объекты подразделяют на пять видов:

1.Физико-химические (вызывающие перераспределение энергии за счет ионизации). Продолжительность  $-10^{-12} - 10^{-8}$ с.

2.Химические повреждения клеток и тканей (образование свободных радикалов, возбужденных молекул и т.д.). Продолжительность – от  $10^{-7}$ с до нескольких часов.

3.Биомолекулярные повреждения (повреждение белков, нуклеиновых кислот и т.д.). Продолжительность –от микросекунд до нескольких часов.

4.Ранние биологические эффекты (гибель клеток, органов, всего организма). Длится стадия от нескольких часов до нескольких недель.

5.Отдаленные биологические эффекты (возникновение опухолей, генетические нарушения, сокращение продолжительности жизни и т.д.). Длится годами, десятилетиями и даже столетия.



Выделяют два пути поражения клеток ионизирующими излучениями: прямой и косвенный (непрямой). Прямой путь поражения клетки характеризуется поглощением энергии излучения молекулами (мишениями) клеток, и в первую очередь молекулами ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), входящими в структуру ядерных хромосом. При прямом воздействии ионизирующих излучений происходит возбуждение молекул, их ионизация, разрыв химических связей. Разрушаются ферменты и гормоны и соответственно в организме осуществляются физико-химические сдвиги. Происходит аберрация хромосом. Последние надрываются, разрываются на осколки или структурно перестраиваются. Тесная зависимость между степенью разрушения (аберраций) хромосом и летальным эффектом облучения свидетельствует о решающей роли поражения ядерного материала в исходе лучевого поражения клеток.

Для более полного уяснения данного пути поражения следует рассмотреть строение клетки. Она состоит из оболочки, ядра и ряда клеточных органелл (рис. 1). Ядро отделено от цитоплазмы мембраной. Оно содержит ядрышко и хроматин. Последний представляет собой определенный набор нитевидных 46 частиц – хромосом. Вещество хромосом состоит из нуклеиновых кислот, которые являются хранителями наследственной информации и специальных белков. Индивидуальная особенность каждого типа белка зависит от того, сколько аминокислот и какие именно составляют его цепь.

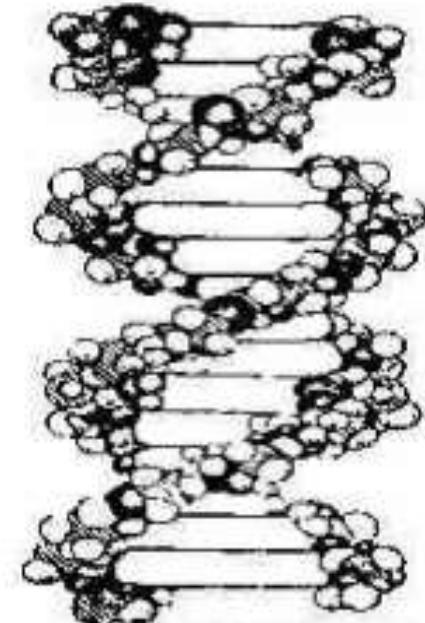


Рис. 1.5 Участок молекулы ДНК

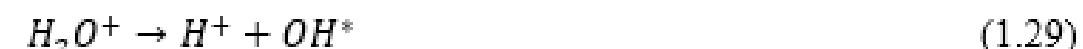


При воздействии больших доз излучения клетка выглядит под микроскопом почти так же, как и при воздействии высокой температуры нарушается: целостность ее оболочки и составных частей цитоплазмы, ядро уплотняется, разрывается, но может и разжижаться. Клетки погибают. При небольших дозах излучения наиболее опасным является повреждение ядерных ДНК, у которых закодирована структура белков. Повреждение ДНК дает толчок для повреждения генетического кода. Косвенное воздействие ионизирующих излучений проявляется в химических реакциях, происходящих в результате разложения или диссоциации воды. Поскольку организм человека состоит на 85-90 % из воды, этот путь поражения является важным в формировании последствий радиационных поражений. Под воздействием ионизирующих излучений в воде идут процессы ее ионизации с образованием быстрых свободных электронов и положительно заряженных ионов воды.

Образовавшийся электрон постепенно теряет свою энергию за счет соударения с другими молекулами, пока его не захватит другая молекула:



$H_2O^-$  и  $H_2O^+$  не являются стабильными и распадаются, образуя ион и свободный радикал:



$OH^*$  и  $H^*$  вступают в химические реакции с образованием перекиси водорода  $H_2O_2$ , гидропероксида  $HO_2^*$ . Радикалы гидропероксида, соединяясь, дают высшую перекись:





Пероксидные вещества обладают сильными окислительными и токсичными свойствами. Вступая в соединения с органическими веществами и, прежде всего, с молекулами, получившими высокую химическую активность в результате ионизации или возбуждения, они вызывают значительные химические изменения в клетках и тканях, что приводит к деполимеризации нуклеиновых кислот, нарушению проницаемости клеточных мембран, повышению проницаемости стенок кровеносных сосудов, сопровождающемуся кровотечениями и кровоизлияниями.

Свободные радикалы  $[\text{OH}]^*$  и  $\text{H}^*$  также вступают в реакции с органическими молекулами. Если обозначить органическую молекулу  $\text{RH}$ , где  $\text{R}$  – вся молекула (за исключением одного атома водорода), то можно записать реакции таких молекул со свободными радикалами  $[\text{OH}]^*$  и  $\text{H}^*$ , приводящие к образованию новых радикалов, следующим образом:





Репарация ДНК – основа нормального функционирования клетки. Установлено, что уже при дозе 1 Гр в каждой клетке человека повреждается 5000 оснований молекул ДНК, возникает 1000 одиночных и 10-100 двойных разрывов. Различают три вида репараций:

1. Безошибочные репарации, основанные на удалении поврежденного участка ДНК и замене его новым, что приводит к восстановлению нормальной функции ДНК;
2. Ошибочные репарации, приводящие к потере или изменению части генетического кода;
3. Неполные репарации, при которых непрерывность нитей ДНК не восстанавливается.



В соответствии с убыванием степени радиочувствительности клетки организма можно расположить в такой последовательности:

1. Высокая чувствительность к радиоактивному излучению: лимфоциты (белые кровяные тельца), кроветворные клетки костного мозга, зародышевые клетки семенников и яичников, клетки эпителия тонкого кишечника;
2. Средняя чувствительность: клетки зародышевого слоя кожи и слизистых оболочек, клетки сальных желез, клетки волосяных фолликулов, клетки потовых желез, клетки эпителия хрусталика, хрящевые летки, клетки сосудов;
3. Достаточно высокая устойчивость к излучениям: клетки печени, нервные клетки, мышечные клетки, клетки соединительной ткани, костные клетки.



**Радиочувствительность клеток и тканей.** Клетки имеют разное строение и выполняют различные функции (например, нервные, мышечные, костные и т.д.). Группы клеток образуют ткани, из которых состоят органы и системы (пищеварительная, нервная, кровеносная системы, железы внутренней секреции и т.д.). Ткань – это не просто сумма клеток, это уже система, имеющая свои функции. Она имеет свою систему саморегуляции. Установлено, что клетки ткани, которые активно делятся, более подвержены действию радиации. Поэтому мышцы, мозг, соединительные ткани у взрослых организмов достаточно устойчивы к воздействию радиации. Клетки же костного мозга, зародышевые клетки, клетки слизистой оболочки кишечника являются наиболее уязвимыми. Так как наибольшее деление клеток происходит в растущем организме, воздействие радиации на детский организм особенно опасно. Влияние облучения на плод может привести к рождению неполноценного потомства, причем самый опасный период – 8-15-я недели беременности, когда происходит закладка органов будущего человека.



***Реакции целостного организма на воздействие ионизирующих излучений.*** При воздействии разных доз облучения могут наблюдаться следующие радиационные эффекты:

1. Соматические (нестохастические). Это непосредственные телесные повреждения организма, возникающие вскоре после воздействия облучения;
2. Соматико-стохастические эффекты. Это последствия, которые выявляются на больших группах людей в более отдаленные периоды после облучения;
3. Генетические эффекты. Они проявляются в виде возникновения хромосомных aberrаций, доминантных генных мутаций.



## Вопросы для контроля изучаемого материала

1. Что такое ионизация? Какие виды излучений относятся к ионизирующему и почему?
2. Чем ионизирующее излучение отличается от неионизирующего по биологическому действию?
3. Дайте определение радиоактивности. Чем естественная радиоактивность отличается от искусственной?
4. Из каких нуклонов состоит ядро? Что такое  $A$  и  $Z$ , и как связаны  $A$ ,  $Z$  и число нейтронов?
5. Опишите основные виды радиоактивных превращений:  $\alpha$ -распад,  $\beta^-$ -распад,  $\beta^+$ -распад, К-захват,  $\gamma$ -излучение.
6. В каких энергетических диапазонах доминируют фотоэффект, комптоновское рассеяние и рождение пар?
7. Что означает закон радиоактивного распада и физический смысл величины активности?
8. Какие реакции лежат в основе нейтронного излучения (на примере Be)?
9. Перечислите пять этапов биологического действия излучений (от физико-химического до отдалённых эффектов).
10. Что такое прямое и косвенное (радиационно-химическое) действие на клетку?



**Рекомендуемая литература:**

1. В. М. Широков. Физика ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 2010.
2. И. А. Каплан. Введение в ядерную физику и реакторы. М.: Мир, 1985.
3. А. А. Абрамов. Основы ядерной энергетики. СПб.: Политех-пресс, 2014.
4. С. В. Кузнецов. Физика ионизирующих излучений. М.: Академия, 2018.
5. J. Lamarsh, A. Baratta. Introduction to Nuclear Engineering, 4th ed. Pearson, 2018.