



**MEDICAL UNIVERSITY – PLEVEN
FACULTY OF PUBLIC HEALTH
CENTER FOR DISTANCE LEARNING**

ФИЗИКА НА ЙОНИЗИРАЩИТЕ ЛЪЧЕНИЯ

Лектор: доц. д-р В. Шопова, д.м.,
катедра “Хигиена, медицинска
екология, професионални
заболявания и МБС”

I. Основни понятия, величини, единици

Йонизиращата радиация е излъчване, което взаимодейства с материалната среда, през която преминава, като образува електрически заряди с различни знаци.

Има 2 вида йонизиращи лъчения:

- Корпускулярни
- Електромагнитни (фотонни)

I. Основни понятия, величини, единици

Корпускулярните лъчения представляват поток от елементарни частици.

Такива са:

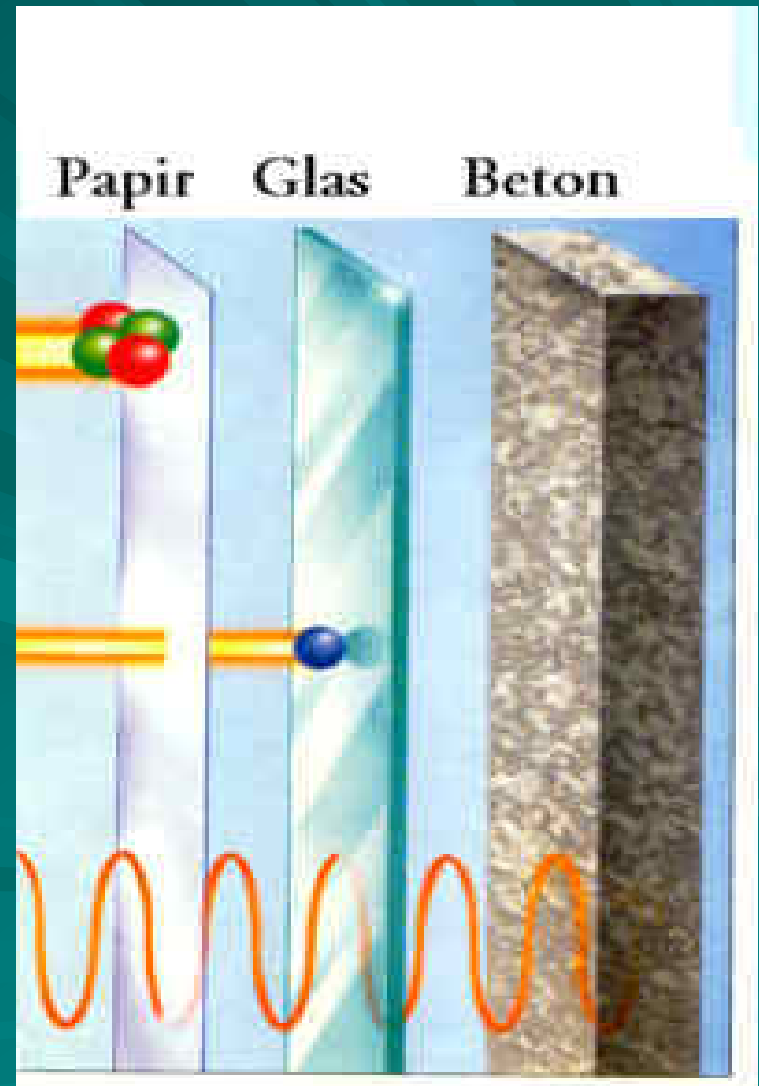
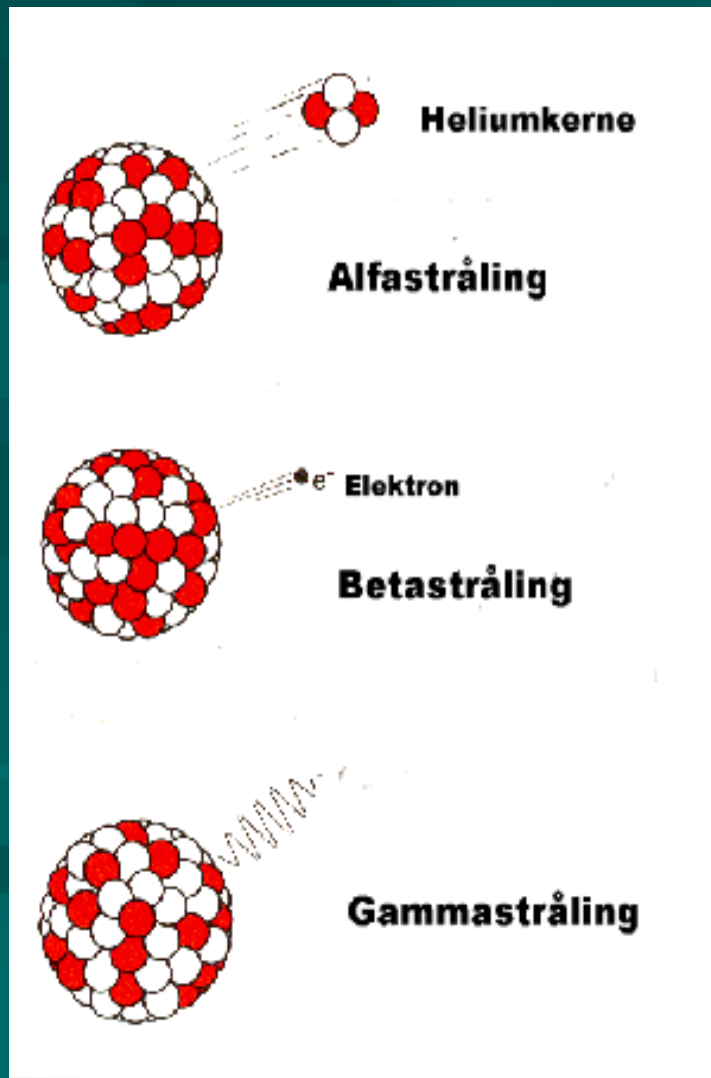
- Алфа лъчи $-(\alpha, {}^2_4\text{He})$
- Бета лъчи $-(\beta, e_{-1})$
- Нeutрони $-(n^1_0)$

Електромагнитните (фотонни) лъчения се състоят от фотони или кванти с много малка дължина на вълната.

Такива са:

- Гама лъчи $-(\gamma)$
- Рентгенови лъчи

Видове йонизиращи лъчения



I. Основни понятия, величини, единици

Всички йонизиращи лъчения имат много общи свойства:

- Предизвикват йонизация на атомите
- Проникват през непрозрачни тела
- Имат силно изразено биологично действие
- Предизвикват почерняване на филмова плака
- Предизвикват явленията сцинтилация
- Предизвикват и флуоресценция

I. Основни понятия, величини, единици

- **Погълната доза** е величина, която характеризира количеството енергия, погълната от облъчения обект. Измерва се с енергията, погълната от единица маса от облъчената среда по формулата:

$$D = \frac{\triangle E}{\triangle m}$$

- Единици за погълната доза: **Gy (Грей)** = $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$, нова единица по СИ

- **Rd (рад)** = $\frac{100 \text{ ерга}}{1 \text{ г}}$, стара единица , 1 rd е 100 пъти по-малък от 1 Gy

- **1 Gy = 100 рада**

I. Основни понятия, величини, единици

- **Експозиция** е величина, която характеризира йонизиращата способност на рентгеновите и гама лъчите във въздушната среда. Тя дава само косвена информация за реално абсорбираната енергия от тъканите. Експозицията се измерва с *отношението на сумарния електрически заряд на всички йони с еднакъв знак, образувани в определен обем въздух (m):*

$$X = \frac{\triangle Q}{\triangle m} \quad \text{Използвани единици: } \frac{\text{C}}{\text{kg}} \quad \frac{\text{Кулон}}{\text{kg}},$$

нова единица, по СИ

R (рентген) – стара единица

$$1R = 2,58 \cdot 10^4 \text{ C/ kg}$$

I. Основни понятия, величини, единици

- **Еквивалентна доза (H)** е величина, използвана при радиобиологичната защита. Тя отчита факта, че биологичният ефект на йонизиращата радиация зависи от вида и енергията на лъченията.

Еквивалентната доза е равна на *произведението от погълнатата доза (D), коефициент качество на лъчението (Q) и коефициент (N)*, който включва всички други параметри на лъчението, включително скоростта на облъчването.

$$H = D \cdot Q \cdot N$$

I. Основни понятия, величини, единици

- **Коефициентът качество на лъчението Q** отчита главно линейната плътност на йонизацията. Измерва се в броя двойки йони, образувани при преминаване на елементарна частица (или фотон) във водна среда.

Сиверт (Sv) нова единица, по СИ

Бер (rem) стара единица. 1 Сиверт = 100 бера

Един сиверт е такава доза радиация, която предизвиква същия биологичен ефект като 1 Грей гама лъчение.

Еквивалентната доза се прилага главно при облъчване на организма с йонизиращи лъчения, с различна биологична активност и цели да се оцени общият биологичен ефект.

Така очакваният биологичен ефект може да бъде измерен като сума от еквивалентните дози на приложените видове йонизиращи лъчения.

II. Радиоактивни изотопи

■ **Естествена радиоактивност** е явление, при което атомите на някои химически елементи самопроизволно, без външно въздействие променят атомния си номер.

■ **Естествено радиоактивни елементи** са всички химически елементи, чиито ядра самопроизволно се разпадат, като изпускат елементарни частици и фотони (йонизиращи лъчения).

II. Радиоактивни изотопи

■ **Изотопи** са химични елементи, чиито атомни ядра имат еднакъв брой протони, но различен брой неутрони, т.е. имат еднакви поредни номера (Z), но различни масови числа (A).

Всички изотопи на даден химичен елемент *имат еднакво поведение* в протичащите в организма химични и биохимични реакции.

Освен естествено радиоактивните елементи, съществуват повече от хиляда **изкуствено радиоактивни елементи**.

- **Активността на радиоактивните вещества** се характеризира със скоростта на радиоактивния разпад. С течение на времето броят на активните атоми намалява по **закона за радиоактивния разпад**, според който *„броят на атомите, които се разпадат за 1 секунда е пропорционален на броя на наличните атоми.“*

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

N – брой на активните атоми

N_0 – изходен брой активни атоми

λ – постоянна на разпада

t – времето

Използвани единици:

Бекерел (Bq) = 1 разпад/сек. нова единица, по СИ

Кюри (Ci) = $3,7 \cdot 10^{10}$ разпади/сек. = 37 млрд. Bq

Период на полуразпад (T) е времето, за което се разпадат половината от наличния брой активни атоми.

^{32}P има **T = 14 дни**

^{238}U има **T = 4,5 млрд. години**

БИОЛОГИЧНО ДЕЙСТВИЕ НА ЙОНИЗИРАЩАТА РАДИАЦИЯ

Въздействието с
йонизираща радиация
върху живите организми
предизвиква
специфичен
биологичен ефект,
който е обект на
проучване от научната
дисциплина
радиобиология.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

1. Вид на йонизиращите лъчения.

□ Биологичният ефект на йонизиращата радиация зависи в значителна степен от **линейната и обемна плътност** на йонизацията, която е различна за различните видове лъчения.

Например: Относителната биологична активност на алфа лъчите и бързи неутрони е 10, на бавните неутрони – 5, а на гама лъчите – 1.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

Биологичният ефект при външно облъчване с йонизираща радиация зависи от **прониквателната способност на лъчението**.

Например: Локални поражения при α и β лъчения и увреждане на тъканите и органите в дълбочина при γ и неутронно лъчение.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

2. Доза и мощност на дозата.

❑ **Радиобиологичният ефект** зависи от количеството на погълната от тъканите енергия, т.е. от погълнатата доза.

За оценка на биологичния ефект на йонизиращите лъчения се използва величината **летална доза**.

За тази цел най-често се прилага **ЛД_{50/30}** – **средна доза** и **ЛД_{100/30}** – **абсолютна смъртна доза**, чийто ефект се отчита на 30-ия ден след облъчването.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

3. Фракционираност на дозата.

- **Разпределението на дозата** в няколко фракции с интервали между тях, понижава степента на увреждане на организма в сравнение с еднократно приложение на същата доза.
- Този ефект се обяснява с протичане на възстановителни процеси в интервалите между облъчванията.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

4. Размер на локализацията на облъчването.

- ❑ Например: 10 Gy при целотелесно облъчване е абсолютно летална доза, но приложена на ограничена площ не предизвиква летален изход.
- ❑ **Локализацията на облъчването** има важно значение, поради различната радиочувствителност на различните органи и тъкани.

I. Основни фактори, влияещи на лъчевото увреждане на организма при външно облъчване

5. Реактивност на организма.

- Значение за биологичния ефект, неговото протичане и крайния изход на лъчевите увреждания имат: **видовата, възрастовата, половата и индивидуалната радиочувствителност**

Например: ЛД 50/ 30 за:

Животно	Доза
Морско свинче	250 рада
Плъх	600 рада
Заек	800 рада
Кокошка	1200 рада

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Две основни теории:

- Теория за прякото действие
- Теория за непрякото действие

1. **Теория за прякото действие**, известна като **мишенна теория**.
Предложена е от **Dessaur, 1992**, по-късно е доразвита от **Lea**. ➡

- Обяснява лъчевото увреждане с директен сблъсък на йонизиращите частици (фотони) с жизнено важни структури на клетката.
- Лъчечувствителният участък в клетката (критичен обем, мишена) е с малки размери в сравнение с клетката

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

- Засягането на критичния обем (мишена) само от една йонизираща частица или гама квант, предизвиква необратимо увреждане и гибел на цялата клетка.
- Ако критичният обем не е засегнат от радиацията, клетката не се уврежда.
- **Доказателство** в подкрепа на мишенната теория е, че при разделно облъчване на ядрото, клетката загива, докато облъчването на цитоплазмата не води до летален изход.
- **Мишенната теория** е изградена въз основа на експерименти с нисши, предимно *едноклетъчни организми* и някои биохимични системи.

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Мултитаргентна теория – наличие на няколко лъчечувствителни участъци в клетката (няколко мишени).

- ❑ Увреждането на клетката настъпва след няколко независими едно от друго попадения на частици или кванти
- ❑ Изградена е въз основа на експериментални данни с *многоклетъчни организми*.
- ❑ **Сигмоиден характер** на кривата доза – летален ефект

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Съвременна интерпретация на мишенната теория:

- ❑ Биологичният ефект на йонизиращата радиация се дължи на увреждане на жизненоважни макромолекули (главно ДНК), таргентни молекули.
- ❑ Следователно увреждането на биологичните молекули от йонизиращата радиация се дължи на „директно действие“ или „директен ефект“
- ❑ „директно действие“ е водещ механизъм на увреждане от йонизиращите лъчения с висока енергия и висока плътност на йонизация

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Теория на Sparrow – изградена е на базата на мишенната теория:

- ❑ Радиочувствителността на клетките при растенията е в пропорционална зависимост от обема на хромозомите в интерфазата.
- ❑ Тази теория обяснява добре различията в радиочувствителността на някои клетки *от растителен произход*.
- ❑ Неподходяща е за обяснение на лъчевите увреждания при бозайниците

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

2. Теория за непрякото действие

- ❑ Пораженията на организма от йонизиращата радиация се дължат на образувани в клетката силно активни химични вещества, радиолизни продукти на водата, които усилват първичното поражение на клетките.

- Лъчевото увреждане протича в 3 фази:

а) Физична фаза:

- Продължава от 10^{-16} до 10^{-13} сек.
- През тази фаза водните молекули се йонизират – образуват се положително и отрицателно заредени йони – водни молекули.



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

б) Физико-химична фаза

- Продължава от 10^{-13} до 10^{-5} сек.
- Образуваните в първата фаза йонизирани водни молекули са нетрайни и бързо се разпадат на йони и свободни радикали:



- в резултат на реакциите на рекомбинация между $\text{H}^\bullet$, $\text{OH}^\bullet$ и e^- се образуват вода, молекулярен водород, водороден прекис и хидроксилни радикали

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

в) Биохимична фаза

- През тази фаза протичат реакции между радиолизните продукти на водата с важни макромолекули – белтъци, масти, въглехидрати, хормони и т.н.

- Странични групи (метилова, карбоксилна, сулфхидрилна, аминогрупа, фосфатна, водородна и т.н.) в *биологичните* макромолекули във взаимодействие с радиолизните продукти на водата.

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

По-често срещани реакции са:

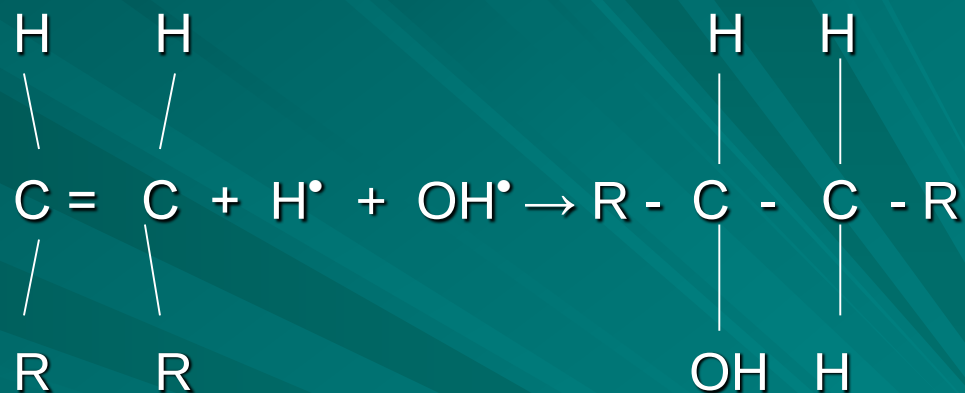
1. Откъсване на водороден атом:



2. Реакции на дисоциация:



3. Реакции на присъединяване:



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

4. Реакции на образуване на стабилни съединения



оксалова
киселина

II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

5. Реакции с участието на кислород



II. Теории за биологичния ефект на йонизиращата радиация.

Верижни реакции с участието на кислород:



- Хидропрекисите и прекисите са токсични вещества, които се натрупват в тъканите в резултат на йонизиращата радиация
- Пероксидацията на ненаситените мастни киселини води до функционални и структурни промени в клетъчните мембрани

Доказателства в подкрепа на теорията за непрякото действие

А) Кислороден ефект

- Облъчване на живи организми с йонизираща радиация в присъствие на кислород предизвиква образуването на токсични радикали, водороден перекис, супероксидни аниони и др.

Б) Температурен ефект

- Облъчване с йонизираща радиация при ниска температура предизвиква по-леки увреждания, поради забавяне на реакциите с участие на радиолизни продукти на водата и кислорода.

В) Ефект на обезводняването

- Облъчването на биосубстрата в сух вид (в сравнение с нормално водно съдържание) предизвиква по-слаби увреждания от йонизиращата радиация, поради намаляване количеството на токсични радиолизни продукти на водата.

ВЛИЯНИЕ НА ЙОНИЗИРАЩАТА РАДИАЦИЯ НА МОЛЕКУЛЯРНО НИВО

- Информацията за промените в организма на молекулярно ниво е получена главно в резултат на експериментални изследвания върху опитни животни, в опити *in vitro* и с тъканни култури.
- В голям брой експериментални изследвания са прилагани високи дози йонизиращи лъчения, често несъвместими с живота.

■ **Диапазон на изследваните дози:**

ниски - до 20 рада

средни - 20 - 150 рада

високи - над 150 рада

I. Влияние на радиацията върху белтъците

1. **Груби, структурни промени** в белтъците възникват след много високи дози, несъвместими с живота, например: денатурация на албумините настъпва над 720 Грей;
2. При високи дози протичат процеси на:
 - 2.1. дезаминиране
 - 2.2. декарбоксилиране
 - 2.3. окисление
 - 2.4. разкъсване на водородни връзки
 - 2.5. превръщане на някои циклични аминокиселини (тирозин, триптофан, **хистидин** и др.) в биологично активни вещества - тирамин, триптамин, **хистамин** и др., т.н. радиотоксини;
 - 2.6. увеличено образуване и отделяне с урината на нискомолекулярни азотни съединения, главно урея и възникване на отрицателен азотен баланс;
 - 2.7. активиране на протеолитични ензими и усилване на автолизните процеси;
 - 2.8. инактивиране на сулфхидрилните групи, главно в белтъците и клетъчните ядра, което потиска клетъчната митоза

3. В кръвната плазма:

3.1. **Намалява** количеството на **албумините** поради:

- ☐ намален синтез в черния дроб
- ☐ увеличено отделяне през червата

3.2. **Намалява** съдържанието на **гама глобулини**

3.3. **Увеличава** се съдържанието на **алфа и бета глобулини**

3.4. **Намалява** албумино-глобулиновия коефициент

II. Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

1. При високи дози **нуклеопротеидните комплекси се разпадат**, поради разкъсване връзката между белтъка и ДНК.
2. **Образува се свободна ДНК** (без протеинова компонента), която става по-достъпна за въздействие на радиолизните продукти и радиотоксините.
3. **Активират се ензимите**, разграждащи ДНК (дезоксирибонуклеаза).
4. Облъчване с над 130 рада **потиска синтеза на ДНК**, главно в костния мозък.
5. Облъчване с летални и сублетални дози усилва **разпада на нуклеиновите киселини и увеличава количеството на ксантин, хипоксантин** и др. разпадни продукти в урината.
6. **Молекулата на ДНК** е най-вероятната таргетна молекула в клетката.

II. Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

7. **Йонизиращата радиация** може да предизвика следните увреждания на ДНК в резултат на директно въздействие:
 - 7.1. **Увреждане на базите в ДНК:**
 - ☐ загуба на база
 - ☐ промяна в подреждането на базите, които съхраняват и предават информацията (може да доведе до мутация)
 - 7.2. **Разкъсване в едната верига в ДНК** - възстановява се най-лесно без съществени дългосрочни увреждания на клетката.

II. Влияние на радиацията върху нуклеиновите киселини

7.3. Разкъсване на двете вериги на ДНК:

- възстановяват се трудно
- имат съществено влияние върху клетката, особено разположените проксимално;
- ако не се възстанови веригата на ДНК, тя може да се разкъса (фрагментира);

7.4. Крослинк

- Радиацията може да предизвика ковалентни връзки:
- крослинк между две части на една и съща верига ДНК;
- крослинк между две странични вериги на ДНК;
- крослинк между две различни молекули ДНК;
- крослинк между ДНК и белтъчна молекула;

III. Влияние на радиацията върху въглехидратите

1. Облъчване в диапазон 5 - 50 Грей **увеличава** съдържанието на **гликоген** в черния дроб:
 - ☐ поради увеличен синтез, с участието на хипофизата и надбъбреците;
 - ☐ липсват данни за участие на ензимите;
2. **Количеството на глюкозата в кръвта се повишава** - кривата на хипергликемията е с два върха, подобна на кривата при обременяване със захар.
3. **Ускорява се цитратният цикъл**, което води до намалено образуване на лактат.

IV. Влияние на радиацията върху мастния обмен

1. Ненаситените мастни киселини се окисляват до **липопрекиси**, които са силно реактивоспособни и взаимодействат с други биохимични вещества главно със сулфхидрилните групи;
2. При висока доза настъпва **декарбоксилиране на висшите мастни киселини**;
3. **Понижава се всмукването на масти в червата**;
4. **Активността на липазата намалява**;
5. **Мобилизират се мастите от мастните депа**, като се депонират в черния дроб (до 50%);
6. **Ефектът** на радиацията върху мастите е **по-слабо изразен *in vivo***, поради присъствие на естествени антиоксиданти в тъканите (алфатокоферол, аскорбинова киселина);

V. Влияние на радиацията върху ензимите

1. Облъчване с дози *над 15 Грей*, ускорява **отделянето на ензимите от клетките**.
2. При *по-ниски дози* се **променя функционалната активност на много ензими**.
 - ☐ увеличена ензимна активност - дезоксирибонуклеаза, рибонуклеаза, аденозинтрифосфатаза, хидролитични ензими.
3. Облъчване с дози в диапазон *10 - 50 Грей* **променя водния баланс на организма**.
 - ☐ масивна загуба на течности, поради увреждане на чревната бариера;

ВЛИЯНИЕ НА ЙОНИЗИРАЩАТА РАДИАЦИЯ НА КЛЕТЪЧНО НИВО

- **Цитоморфологичните изменения**, предизвикани от облъчване с йонизираща радиация нямат специфичен характер.
- **Радиочувствителността** на различните видове клетки варира в широк диапазон – от 5 до 8000 рад.
- **Радиочувствителността** на клетките и тъканите се определя по **закона на Бергониé и Трибондó**, според който:

Радиочувствителността на клетките и тъканите е право пропорционална на тяхната репродуктивна способност и обратно пропорционална на тяхната диференцираност.

- Изключения от закона са **лимфоцитите и ооцитите, които са силно радиочувствителни**, макар че са диференцирани и че не се делят.

Уврежданията на клетките от йонизиращата радиация са 2 вида:

I. Интерфазни (дифузни):

1. Възникват при облъчване до започване на митоза.
2. Появяват се веднага или след няколко минути след облъчване.
3. Изразяват се в:
 - поява на грануляции в цитоплазмата
 - повишение на пермеабилитета на клетъчната мембрана
 - вгъвания на ядрената мембрана
 - задържане на митозата
4. Интерфазните изменения имат временен характер.
5. При много високи дози може да настъпи интерфазна смърт.
6. Клетките в интерфазен покой са по-радиорезистентни.

Уврежданията на клетките от йонизиращата радиация са 2 вида:

II. Увреждания на клетката по време на митозата:

1. Увреждат се предимно хромозомите.
2. По-чести структурни промени в хромозомите, предизвикани от йонизиращата радиация са:
 - ☐ Единично разкъсване на една хромозома
 - ☐ Единични разкъсвания в отделни хромозоми
 - ☐ Две или повече разкъсвания в една и съща хромозома
 - ☐ Слепване на хромозомите

3. **Последствия за клетката** от структурните промени в хромозомите могат да бъдат:

- Разкъсаните краища могат да се свържат без видими изменения (**възстановяване**).
- **Загуба на част от хромозома** в следващата митоза може да е причина за поява на **аберация**. В този случай се образуват **ацентрични фрагменти**.
- **Разместване на фрагментите**, което води до **груби нарушения** в структурата на хромозомите и образуване на: ринг форми, дицентрични хромозоми, анафазни мостове.
- Подреждане на фрагментите **без видими** хромозомни **изменения**. В тези случаи има преподреждане на генетичен материал, но хромозомата изглежда непроменена (транслокации, инверсии).

- Този вид хромозомни увреждания предизвикват разместване на гените в хромозомите и появата на мутации.

4. Освен цитоморфологичните промени в клетките, **йонизиращата радиация предизвиква 3 специфични ефекта:**

4.1. Потискане на митозата

- ☐ наблюдава се **във всички годни** за деление **клетки**
- ☐ ефектът настъпва и при много ниски дози (1 рад)
- ☐ **най-силно** е изразено в **първото пострадиационно деление**
- ☐ по-късно може да се наблюдава усилване на митотичната активност
- ☐ увеличението на дозата не увеличава броя на засегнатите клетки, а удължава времето на потискащия ефект

4.2. Интерфазна смърт

- възниква само в летално облъчени клетки
- не е дегенеративен процес, подобен на некрозата
- клетката се разкъсва на малки фрагменти, но цитоплазмените органели остават интактни
- клетъчните фрагменти са фагоцитирани от други клетки

4.3. Поява на мутации

- наследствените промени не се отличават от възникналите при спонтанни мутации
- йонизиращата радиация увеличава само броя на мутацията, т.е. тяхната честота
- дозата, удвояваща мутациите е 50 – 250 бера – в зависимост от вида на клетките

ВЛИЯНИЕ НА ЙОНИЗИРАЩАТА РАДИАЦИЯ НА ТЪКАННО НИВО

Радиочувствителността на тъканите, подобно на клетките се оценява по закона на Бергоние и Трибондо:

„Радиочувствителността на тъканите е правопрпорционална на тяхната репродуктивна способност и обратно пропорционална на тяхната диференцираност”.

Днес се приема **следната градация** на тъканите според тяхната радиочувствителност:

- ☐ кръвотворна
- ☐ епителна
- ☐ съединителна
- ☐ мускулна
- ☐ костна
- ☐ нервна

Острите лъчеви увреждания на тъканите и органите протичат като възпаление, оток, кръвоизливи, некроза на епитела и оголване на лигавиците.

Хроничните лъчеви увреждания протичат като атрофия, фиброза, улцерации и стенози.

I. Кръвотворна тъкан

Промени в костния мозък

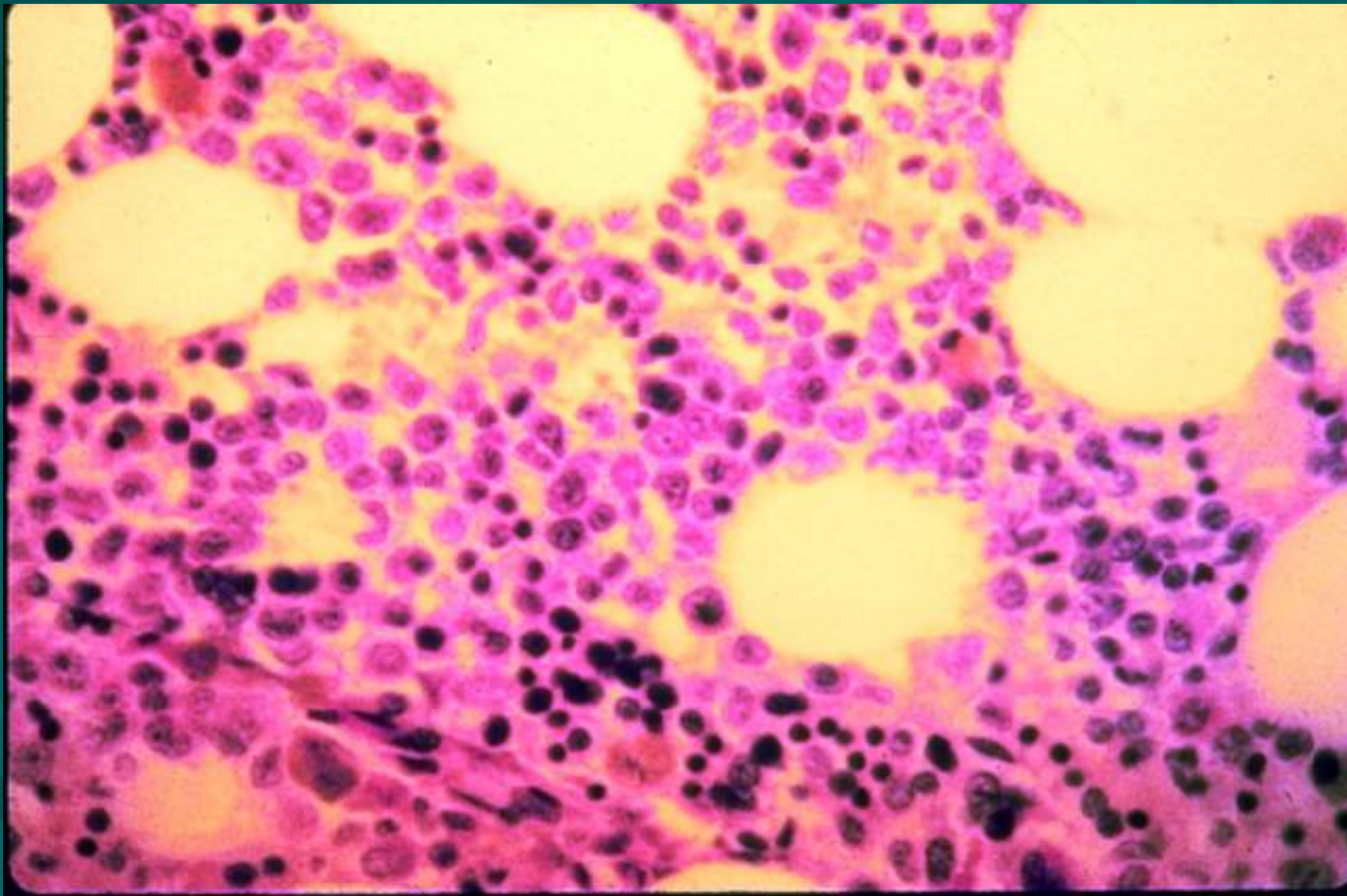
А. Основният ефект на йонизиращата радиация върху костния мозък се изразява в намаляване на стволовите клетки:

1. Ниските дози предизвикват слабо понижение на броя на стволовите клетки. Възстановяването настъпва до няколко седмици след облъчването.
2. Средно високите и високите дози понижават по-силно броя на стволовите клетки:
 - възстановяването става бавно и непълно
 - в костния мозък се увеличава съдържанието на мазнини и съединителна тъкан

Б. Радиочувствителността на стволовите клетки е в следната градация:

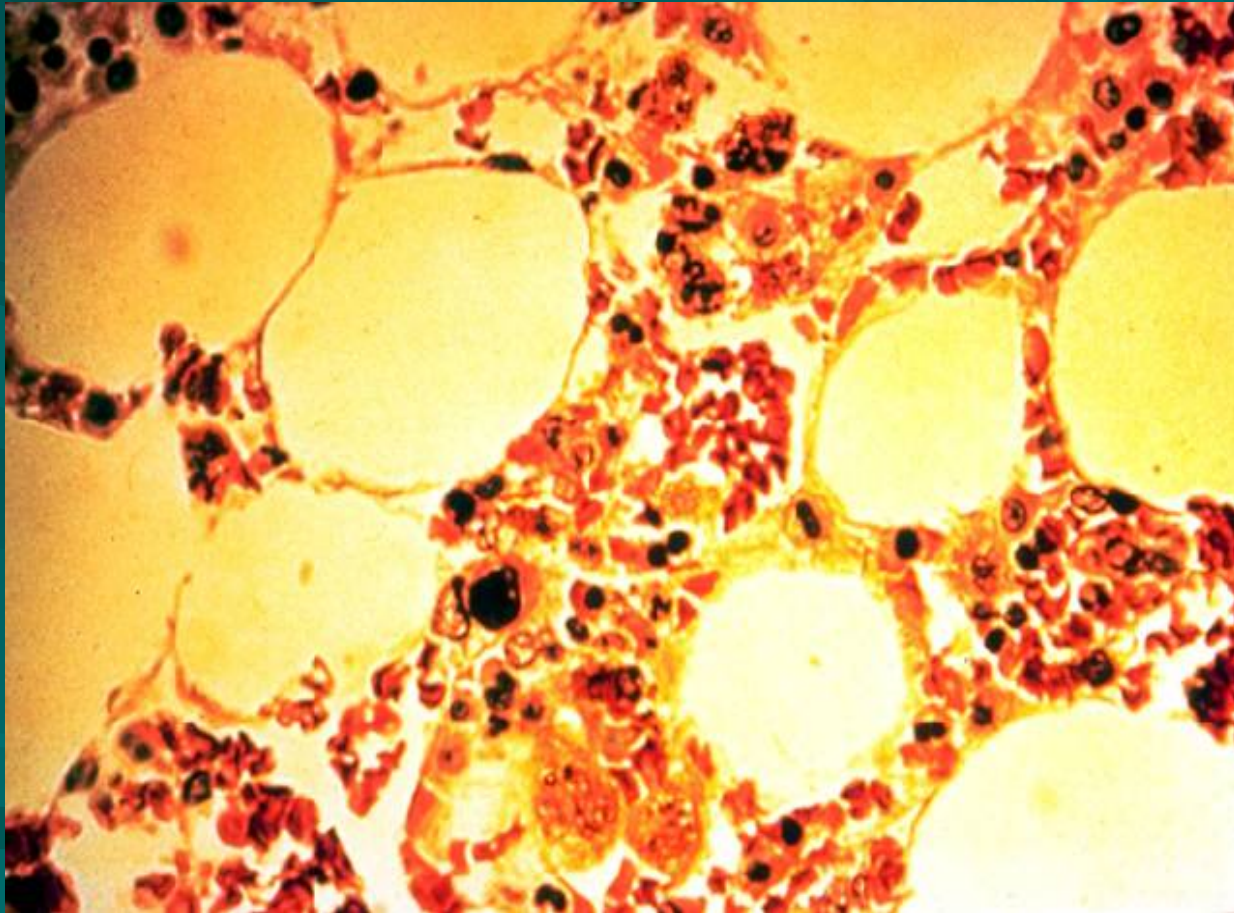
1. **еритробласти** – най-радиочувствителни
2. **миелоцити** – по-слабо чувствителни
3. **мегакариоцити** – най-слабо чувствителни

Нормална миелограма



Normal bone marrow cells

Миелограма след облъчване



Bone marrow damaged by radiation injury

I. Кръвотворна тъкан

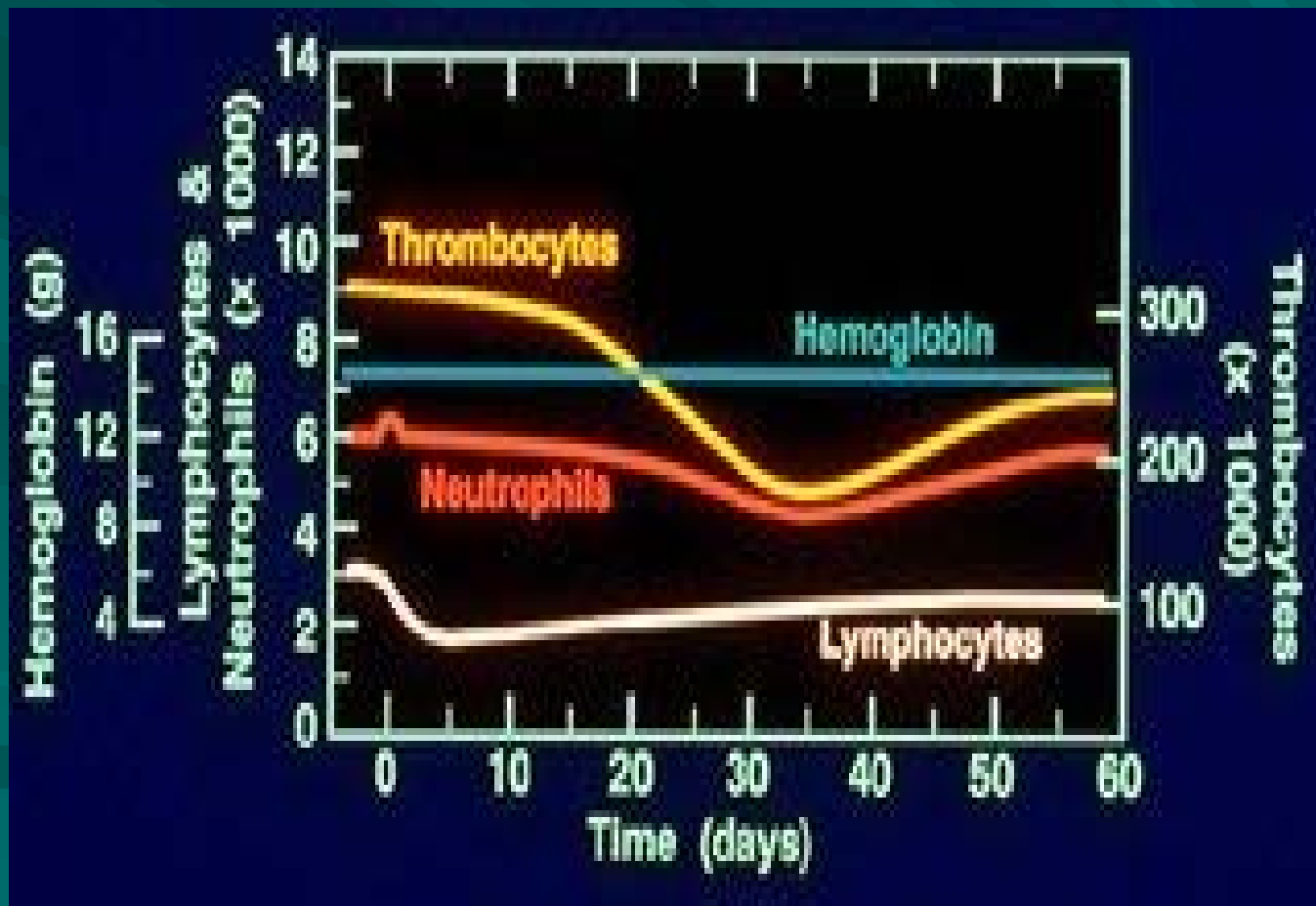
Промени в периферната кръв

- A.** С изключение на лимфоцитите, клетките в периферната кръв са радиорезистентни (те са неделящи се и не са диференцирани)
- B.** Промените в броя на формените елементи в периферната кръв зависят от два фактора:
- ☐ Радиочувствителността на съответните стволови клетки
 - ☐ Продължителността на живота на клетките в периферната кръв

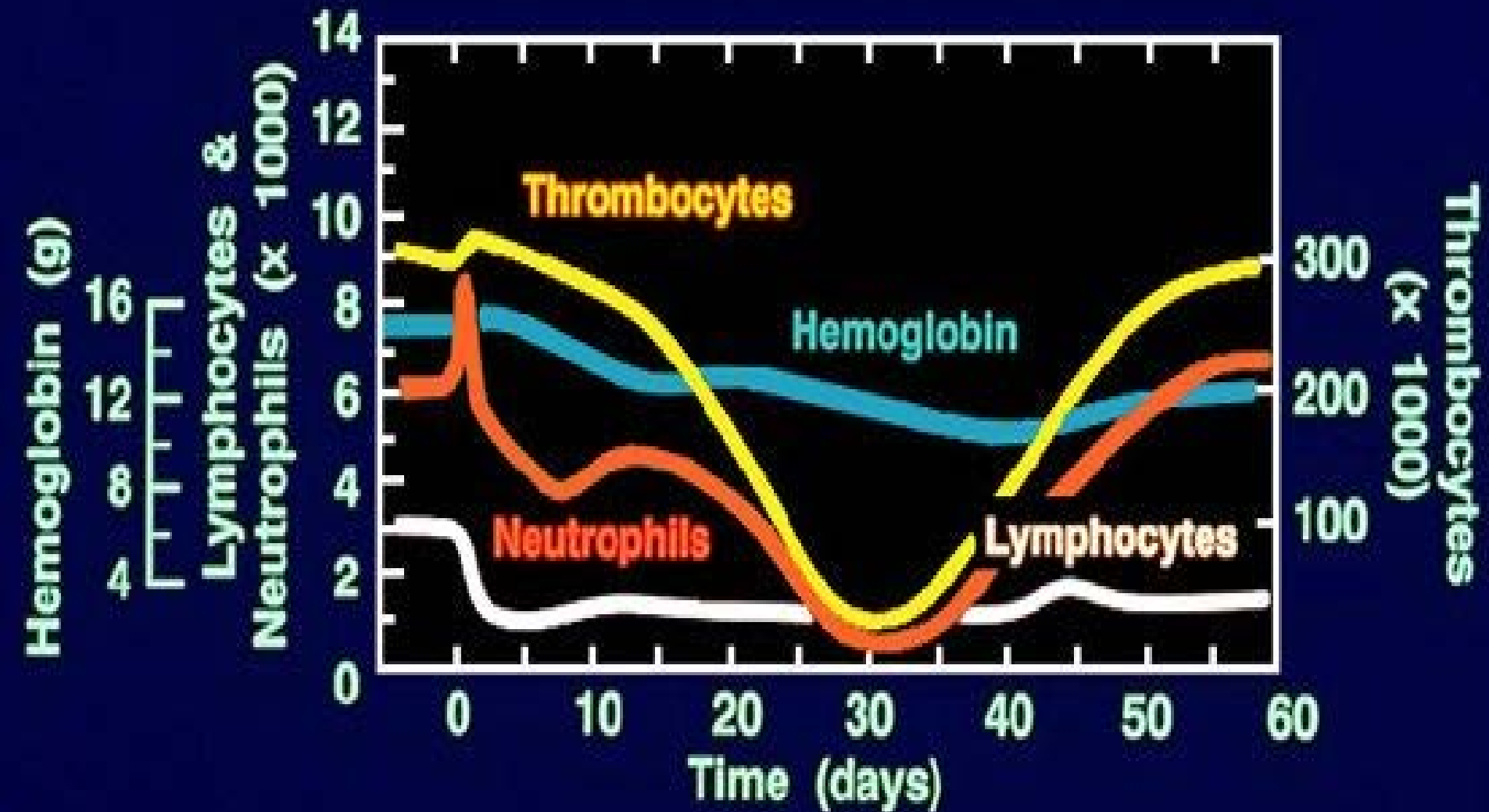
Хронологично броят на клетките в периферната кръв намалява в следния ред:

- ☐ **Най-рано намалява** броя на **лимфоцитите** – при облъчване с 0,1 Gy
- ☐ следват неутрофилите (при облъчване с 0,5 Gy).
- ☐ **Най-късно** намаляват **еритроцитите** (също при 0,5 Gy).

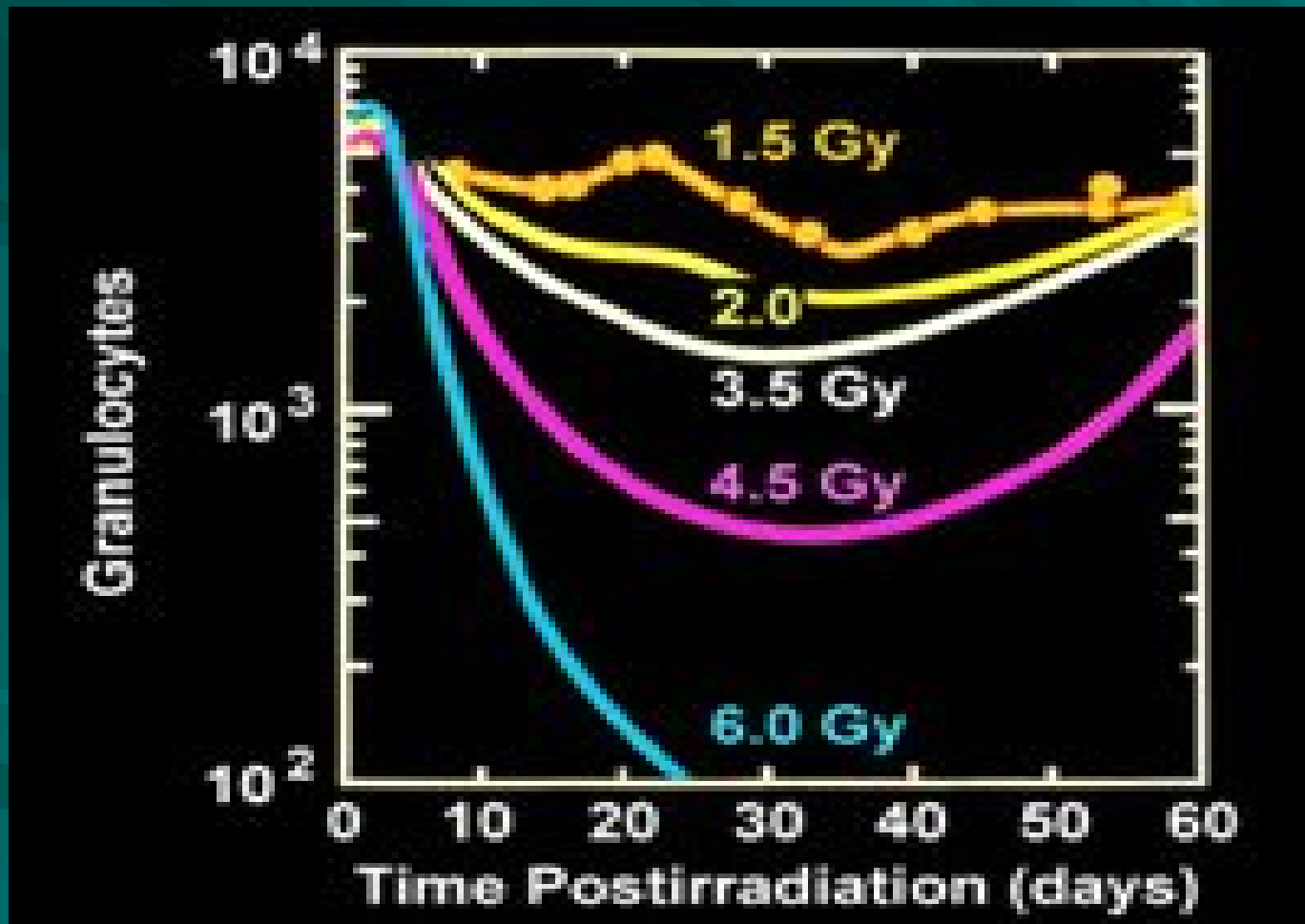
Хематологичен отговор след облъчване с 1 Gy



Хематологичен отговор след облъчване с 3Gy



Брой на гранулоцити и връзка с дозата на облъчване



I. Кръвотворна тъкан

Промени в периферната кръв

Облъчване със средно високи (умерени) дози йонизираща радиация предизвиква:

- ❑ Намаляване броя на лимфоцитите – те могат да изчезнат след няколко дена. Пълно възстановяване се наблюдава след няколко месеца.
- ❑ Броят на гранулоцитите достига минимални стойности след около една седмица. Възстановяване на броя им започва скоро след облъчването и се нормализира след един месец.
- ❑ По-ниските дози в диапазона на средновисоките дози оказва несъществен ефект върху броя на тромбоцитите и еритроцитите, но по-високите дози на средно-високия диапазон понижава съществено техният брой

II. Полова тъкан:

А) Мъжка половая тъкан:

- С изключение на тестисите, другите тъкани на мъжката репродуктивна система са **радиорезистентни**.
- Тестисите съдържат:
 - неделящи се, недиференцирани радиочувствителни клетки – зрели сперматозоиди
 - делящи се, недиференцирани радиочувствителни клетки – незрели сперматогонии

II. Полова тъкан:

А) Мъжка полова тъкан:

- Най-важният ефект на йонизиращата радиация върху мъжката репродуктивна тъкан е намаляването (или изчезването) на сперматогониите, което впоследствие води до изчезване на зрелите сперматозоиди в тестисите
 - след облъчване с йонизираща радиация има период на запазен фертилитет (с различна продължителност), който се дължи на радиорезистентността на зрелите сперматозоиди
 - този период е последван от временен или постоянен стерилитет (в зависимост от дозата). Стерилитетът се дължи на загуба на незрели сперматогоии, които се делят и заместват увредените зрели сперматозоиди в тестисите
- Друг тип увреждане на тестисите от йонизиращата радиация е образуването на хромозомни аберации

II. Полова тъкан:

Б) Женска полова система:

- **яйчниците и яйцеклетките** са **по-радиочувствителни** от тестисите и незрелите мъжки полови клетки
- различните видове фоликули имат различна радиочувствителност:
 - малките фоликули са най-радиорезистентни
 - междинните фоликули – най-радиочувствителни
 - зрелите фоликули – умерено радиочувствителни
- След облъчване на яйчниците със **средни дози** се наблюдава период на запазен фертилитет, който се дължи на присъствието на умерено чувствителни зрели фоликули.
- Този фертилен период е последван от **временен или постоянен стерилитет**, поради увреждане на радиочувствителни междинни фоликули
- Облъчването с **доза над 6,25 Gy** предизвиква стерилитет у жената

- Зависимостта между дозата на облъчване и стерилитета при хора е дадена в следващата таблица 1
- При инцидентно целотелесно външно облъчване на трима мъже с дози в диапазон 12 - 190 R, през първите 10 дни броят на сперматозоидите беше нормален, след това - силно потиснат или липсва за 7 - 10 месеца при двама от тях, като се възстановява на 20-ия месец.

Пол	Доза (R)	Стерилитет
Мъжки	500 - 600	Постоянен стерилитет
Мъжки	250	Временен стерилитет (за 12 месеца)
Женски	320 - 625	Постоянен стерилитет
Женски	125 - 150	Аменорея при 50% от жените
Женски	170	Временен стерилитет за 1 - 3 години

III. Кожа

- Средните и високи дози радиация предизвикват остри радиационни увреждания на кожата, които протичат като **възпаление, еритем и десквамация на епитела**

- ☐ След въздействие със средно-високи дози уврежданията на епидермиса се възстановяват напълно
- ☐ Високите дози предизвикват **хронични увреждания на кожата – атрофия, фиброза, увеличена или намалена пигментация, улцерация, некроза, кожен рак**

- Космените фоликули са радиочувствителни

- ☐ Средно-високите дози предизвикват **временна епиляция**
- ☐ Високите дози предизвикват **трайна епиляция**

- Мастните и потните жлези са умерено радиочувствителни

- ☐ Облъчването с високи дози предизвиква **атрофия, фиброзиране на жлезите, намаляване и пълна загуба на функция**

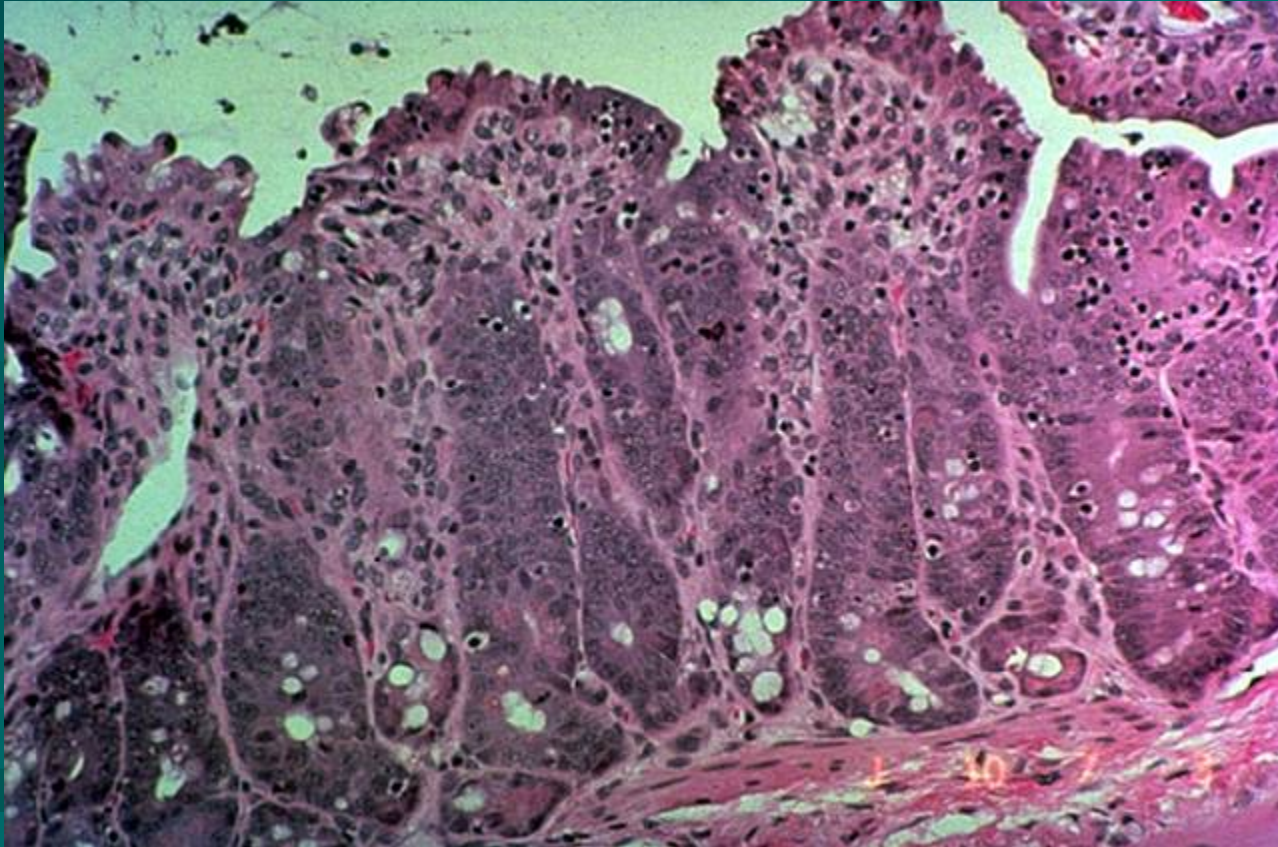
IV. Храносмилателна система

- Средно-високите и високите дози радиация предизвикват **възпаление на лигавиците на устната кухина и хранопровода**
 - След облъчване *със средни дози* настъпва възстановяване с минимални хронични увреждания
 - Облъчването *с високи дози* радиация в късните фази след облъчването предизвикват атрофия, улцерации, фиброзни стеснения на хранопровода

IV. Храносмилателна система

- **Стомахът** е по-радиочувствителен от хранопровода
- *Средните дози* предизвикват улцерации, атрофия и фиброзиране
- **Тънките черва** са **най-радиочувствителната част** на стомашно-чревния тракт
- Високата радиочувствителност на тънките черва се дължи на клетките, покриващи чревната лигавица – недиференцирани, бързо делящи се клетки
- *Средно-високите дози* радиация предизвикват скъсяване на чревните въси
- Ректумът е радиорезистентен

Чревни въси след облъчване



V. Очи

- **Лещите на очите** съдържат популация от активно делящи се клетки, които могат да бъдат силно увредени от йонизиращата радиация.
- Тъй като в очните лещи липсва механизъм за отстраняване на увредените клетки, те формират катаракта.
- *Средно-високите дози (около 2 Gy) образуват катаракта само в някои индивиди, докато високите стойности (7 Gy) предизвикват катаракта в 100% от облъчените хора.*

VI. Централна нервна система

- Клетките, изграждащи нервната система са неделящи се и диференцирани, което означава, че те са радиорезистентни. Има експериментални данни и клинични наблюдения, които показват, че нервната тъкан е най-резистентната тъкан у човека.
- *Ниските и средните дози* имат минимален ефект или не оказват вредно въздействие.
- Има автори, които обаче намират ранни функционални изменения след облъчване *с ниски дози*.
- След облъчване *с високи дози*, в ЦНС се наблюдава възпаление, преминаващо в некроза, фиброзни процеси в главния и гръбначния мозък. Тези ранни изменения се дължат на загуба на глия, докато хроничните изменения се дължат на съдово увреждане.