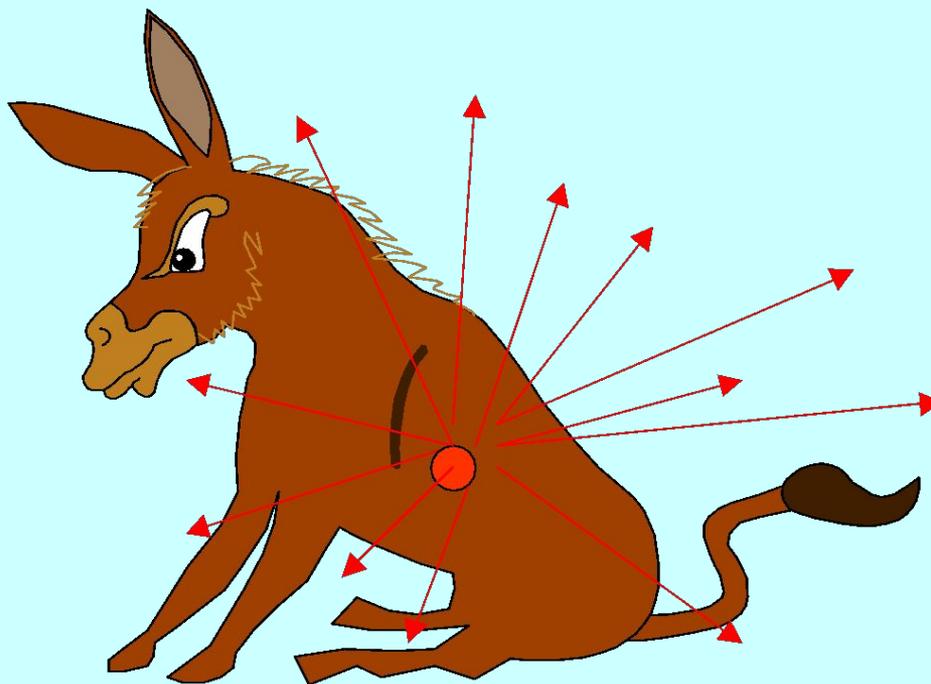


МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ



МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Раздел 3
Пособие ч.1

ОСОБЕННОСТЬ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- **Особенность ионизирующих излучений состоит в том, что они обладают высокой биологической активностью.**
- Наблюдается очень значительная диспропорция между количеством поглощенной энергии ионизирующей радиации и величиной вызванного ею биологического эффекта.
- Смертельная для человека и большинства млекопитающих поглощенная доза - 10 Гр (1000 рад) энергетически эквивалентна приблизительно 170 кал.
- Это соответствует тепловой энергии, передающейся человеку от выпитого стакана горячего чая, вызывая повышение температуры тела всего на 0,001 °С.
- Ионизирующие излучения индуцируют длительно протекающие реакции в живых тканях.
- **Результатом биологического действия радиации является, как правило, нарушение нормальных биохимических процессов с последующими функциональными и морфологическими изменениями в клетках и тканях животного.**

ТЕОРИИ МЕХАНИЗМА БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- В механизме биологического действия ионизирующих излучений можно условно выделить два этапа:
- **Первый этап - первичное (непосредственное) действие излучения** на биохимические процессы, функции и структуры органов и тканей;
- **Второй этап - опосредованное действие**, которое обуславливается нейрогенными и гуморальными сдвигами, возникающими в организме под влиянием радиации.
- Существуют две теории механизма первичного (непосредственного) действия ионизирующей радиации:
- Теория прямого действия излучений на составляющие молекулы вещества;
- Теория косвенного действия.

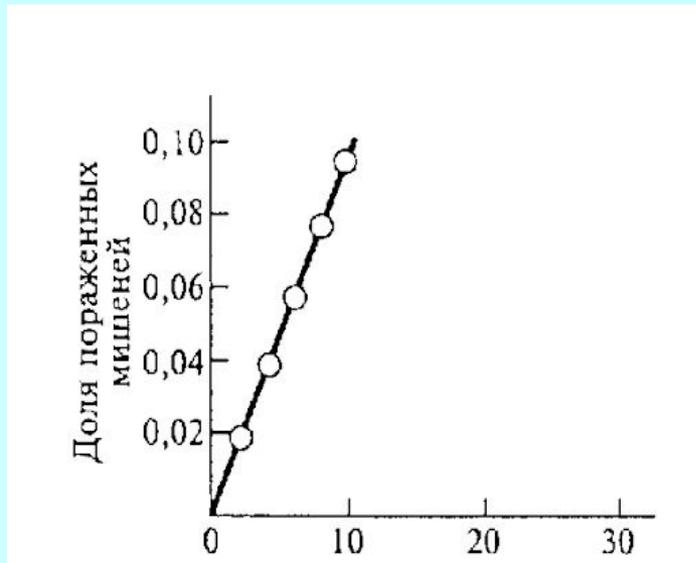
ТЕОРИИ МЕХАНИЗМА БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (продолжение)

- Под прямым действием ионизирующей радиации понимают такие изменения, которые возникают в результате поглощения энергии излучения самими молекулами, а поражающее действие связано с актом возбуждения и ионизации атомов и молекул.
- Под косвенным (непрямым) действием радиоактивных излучений понимают изменение молекул клеток и тканей, обусловленных радиолизом воды и растворенных в ней веществ, а не энергией излучения, поглощенной самими молекулами.
- Теории прямого действия радиации:
 - 1. Теория «мишени»
 - 2. Стохастическая (вероятностная теория).
- Теория непрямого действия ионизирующих излучений - теория свободных радикалов

ТЕОРИЯ «МИШЕНИ»

- В стремлении объяснить радиобиологический парадокс была сформулирована теория мишени.
- Теория мишеней (1920г., теория классического формализма) связывала сильно выраженное повреждение клетки с поглощением большой энергии ядерных частиц в некоторых **жизненно важных высокочувствительных точках** клетки — “мишенях”, размеры которых значительно меньше размеров самой клетки.
- Попадание в такую мишень (ген или ансамбль генов) одной или нескольких высокоэнергетических частиц атомной радиации достаточно для разрушения и гибели клетки.
- Чем больше доза, тем попадание вероятнее (доза-эффект); чем меньше, тем попадание менее вероятно, но **по закону случайности попадания оно всегда возможно.**

ТЕОРИЯ «МИШЕНИ» (продолжение)

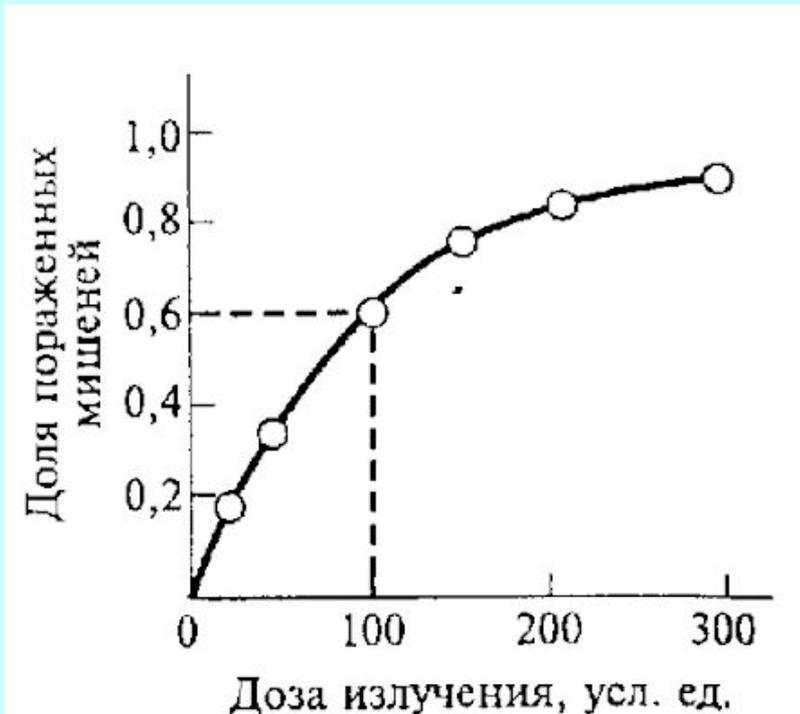


Доза излучения, условные ед.

Зависимость изменения эффекта при малых дозах

- **Вывод из теории мишени - количество попаданий должно быть прямо пропорционально дозе излучения.**
- В определенном диапазоне малых доз число пораженных мишеней строго пропорционально дозе (или числу попаданий).
- Это объясняется тем, что поражается лишь небольшая часть мишеней из общего количества.
- **Зависимость эффекта от дозы (для малых доз) имеет вид прямой линии**

ТЕОРИЯ «МИШЕНИ» (продолжение)



Зависимость изменения эффекта при больших дозах

- С повышением дозы излучения вероятность попадания в одну и ту же мишень увеличивается.
- Однако, общее число попаданий остается пропорциональным дозе, их эффективность (на единицу дозы) уменьшается, и количество пораженных мишеней возрастает медленнее, асимптотически приближаясь к 100%.
- Количество жизнеспособных единиц с увеличением дозы уменьшается в экспоненциальной зависимости от дозы.

ТЕОРИЯ «МИШЕНИ» (продолжение)

- Таким образом, в основе теории мишени лежат два положения.
- Первое из них – принцип попадания – характеризует особенность действующего излучения. Эта особенность заключается в дискретности поглощения энергии излучения, т.е. поглощения порции энергии при случайном попадании в мишень.
- Второе положение – принцип мишени – учитывает особенность облучаемого объекта (клетки), т. е. различие в ее ответе на одно и тоже попадание.
- **Главное достоинство теории “мишени” состоит в том, что она дала простое объяснение радиобиологического парадокса - экстремальный эффект, возникающий в клетке в результате поглощения ничтожной по величине энергии, происходит вследствие дискретного акта ее размена (попадания) в крошечном, но жизненно важном микрообъеме (мишени), например, в уникальной молекуле ДНК.**
- **Под прямым действием ионизирующего излучения понимают такие изменения, которые возникают в результате утери или приобретения электрона самими молекулами-мишенями.**

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

- Дальнейшим развитием *теории прямого действия излучений* явилась стохастическая теория, которая, так же как и теория мишени, учитывает вероятностный характер попадания излучения в чувствительный объем клетки, но **в отличие от нее она еще учитывает и состояние клетки как биологического объекта, лабильной динамической системы.**
- Клетка как лабильная динамическая система постоянно находится в стадии перехода из одного состояния в другое путем клеточного деления — митоза.
- На каждой стадии деления существует вероятность повреждения ее вследствие различных факторов, в том числе и радиационного.
- Излучение влияет на все фазы и стадии клеточного цикла, однако радиочувствительность клетки в различные стадии митоза неодинаковая.
- **В зависимости от стадии деления излучение оказывает на клетку разное действие: наибольшую чувствительность к ионизирующему излучению имеет клетка в начале деления (стадия профазы) - облучение тормозит его завершение.**

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ (продолжение)

- Облучение в период интерфазы (стадия жизненного цикла клетки между двумя последовательными митотическими делениями) приводит к потере способности приступить к новому делению.
- В этих случаях легко нарушается структура хроматинового вещества, в результате чего клетка может погибнуть.
- Чувствительность клеток к облучению прямо пропорциональна интенсивности клеточного деления и обратно пропорциональна степени их дифференцировки (исключение составляют высокодифференцированные, но не делящиеся нервные клетки и лимфоциты крови) - правило Бергонье и Трибонда.
- Следовательно, наиболее повреждаемы клетки тех тканей, которые обладают высокой митотической активностью.
- К ним относятся клетки органов кроветворения (красный костный мозг, селезенка, лимфоузлы), половых желез, эпителия кишечника и желудка, а также клетки быстрорастущих опухолей.
- Главную ответственность за гибель клетки при облучении несет ядро.

ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ

- Теория “мишени” оказалась не в состоянии объяснить механизмы, приводящие к гибели клетки в результате ионизации всего лишь одного из 10^9 — 10^{11} атомов или гибели целого организма от ионизации примерно одной из 10^7 молекул.
- Новая теория свободных радикалов объясняет радиобиологический эффект не столько прямым действием поглощенной энергии ядерных частиц, как в теории мишеней, сколько косвенным, или вторичным, действием высокореакционных продуктов радиолиза (радиационного разложения) веществ, составляющих клетку.
- Под косвенным действием понимают изменения “мишеней”, вызванные продуктами радиолиза окружающей эти молекулы воды и растворенных в ней низкомолекулярных соединений, а не энергией излучения, поглощенной самими молекулами.
- **Ключевые роли в этой теории отведены воде, которая может составлять до 90% массы клетки, и свободным радикалам — вторичным продуктам ионизации вещества (в первую очередь — молекул воды), обладающим чрезвычайно высокой химической активностью.**

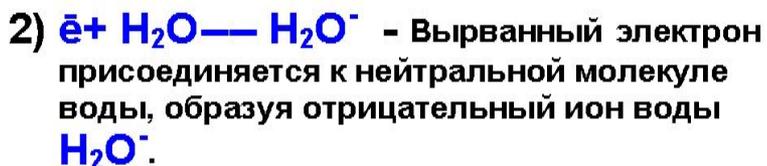
ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ (продолжение)

Физическая фаза радиолиза

Взаимодействие ионизирующего излучения с молекулой воды:



Выбивается электрон e^- внешней орбиты атома и образуется положительно заряженный ион воды H_2O^+ .



3) При эффекте возбуждения образуется нейтрально заряженная молекула воды с избытком энергии, обусловленным ионизирующим излучением:



- Физико-химические свойства ионизированных и возбужденных молекул воды будут отличаться от молекул воды электрически нейтральных.
- Продолжительность существования ионизированных и возбужденных молекул воды очень короткая.
- Молекулы распадаются - наступает фаза первичных физико-химических реакции

ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ (продолжение)

ФАЗА ПЕРВИЧНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

$\text{H}_2\text{O}^+ \text{---} \text{H}^+ + \text{OH}^\bullet$ - образование
гидроксильных радикалов OH^\bullet ;

$\text{H}_2\text{O}^- \text{---} \text{H}^\bullet + \text{OH}^-$ -
свободного радикала водорода H^\bullet ;

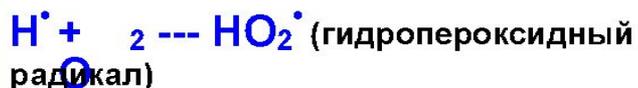
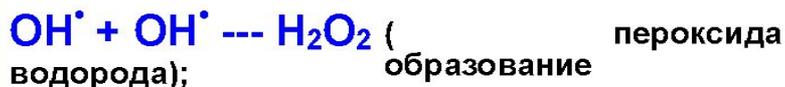
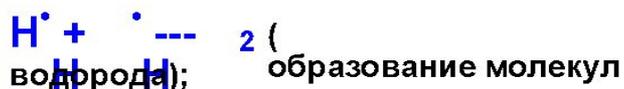
$\text{H}_2\text{O}_{\text{нейтр.}} \text{---} \text{H}^\bullet + \text{OH}^\bullet$ - образование
свободного радикала водорода H^\bullet и
гидроксильных радикалов OH^\bullet .

- При диссоциации (распаде) ионизированных и возбужденных молекул воды образуются высокореактивные свободные радикалы водорода и гидроксильные радикалы.
- Гидроксильные радикалы - сильные окислители.
- Радикал водорода - восстановитель.

ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ (продолжение)

ФАЗА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ

Реакции могут идти следующим путем:



- Свободные радикалы, обладая очень высокой химической активностью (за счет наличия неспаренного электрона) взаимодействуют друг с другом и с растворенными в воде веществами.
- При наличии в среде растворенного кислорода возможно образование гидропероксидов и их дальнейшее взаимодействие между собой с образованием пероксидов водорода и высокотоксичных высших пероксидов

ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ (продолжение)

- Взаимодействие свободных радикалов с органическими и неорганическими веществами идет по типу окислительно-восстановительных реакций и составляет эффект непрямого (косвенного) действия.
- Таким образом, под косвенным действием понимают изменения «мишеней», вызванные продуктами радиолиза окружающей эти молекулы воды и растворенных в ней низкомолекулярных соединений, а не энергией излучения, поглощенной этими молекулами.
- Ключевые роли в этой теории отведены воде, которая может составлять до 90% массы клетки, и свободным радикалам — вторичным продуктам ионизации вещества (в первую очередь — молекул воды), обладающим чрезвычайно высокой химической активностью.

ТЕОРИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ (продолжение)

- Именно в воде растворены белки, нуклеиновые кислоты, ферменты, гормоны и другие жизненно важные вещества, являющиеся основными компонентами клетки, которым легко может быть передана энергия, первоначально поглощенная водой.
- Первичные радиационные повреждения на биохимическом уровне приводят к образованию новых химически высокоактивных продуктов, которые вызывают дополнительные повреждения биологически важных макромолекул.
- Такие повреждения касаются не только ядерных компонентов, но и цитоплазматических и других структур клетки, вовлекая в радиобиологические эффекты все важные системы живой клетки — ферментативные, регуляторные, защитные и другие.

Структурно-метаболическая теория радиационного поражения А.М.Кузина

- В этой теории ведущая роль в радиационном эффекте отводится нарушениям в клеточном ядре и биомембранах.
- Биомембраны играют исключительно важную роль в делении клетки.
- Экспериментально показано, что ДНК связана с биомембранами: начало расплетания спирали и синтеза ДНК происходит в точках ее прикрепления к мембране.
- На поверхности биомембран имеются особые рецепторы, передающие сигналы гормонов через липиды мембран (обширная группа природных органических соединений, включающая жиры и жироподобные вещества).
- Липиды мембран, подвергаясь воздействию ионизирующей радиации, в присутствии кислорода образуют пероксиды и продукты их распада.

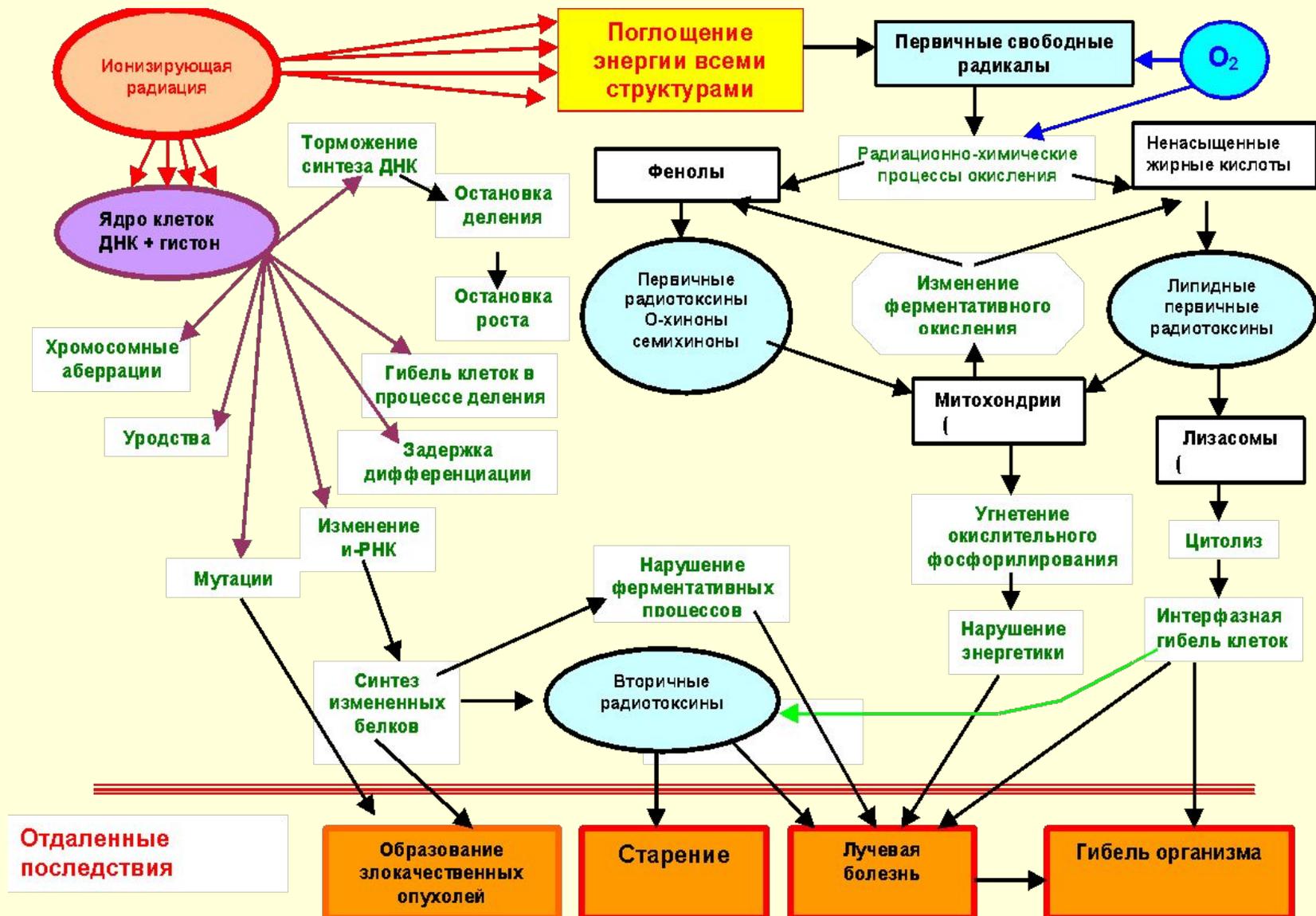


Схема участия первичных радиотоксинов в развитии лучевого поражения организма

Структурно-метаболическая теория радиационного поражения (продолжение)

- Эти изменения приводят к нарушению проницаемости мембран и важных метаболических процессов: инактивации ферментов, гормонов, подавлению энергетических функций митохондрий и синтеза ДНК и РНК, расстройству управляющих систем и другим тяжелым последствиям.
- Таким образом в структурно-метаболической теории к радиационному поражению ядерных макромолекул (фактор прямого действия в теории «мишени») добавляются нарушения цитоплазматических структур и изменение их нормального функционирования.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ АСПЕКТЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

- При облучении клетки поражаются все её структуры.
- Вероятность поражения тех или иных молекул определяется их размером: чем крупнее молекула, тем больше вероятность её повреждения.
- **Именно поэтому в качестве основной мишени радиационного поражения клетки рассматривается ДНК.**
- В результате прямой ионизации самой молекулы ДНК и её атаками радикалами происходит разрыв химических связей между атомами, что нарушает непрерывность нити ДНК.
- Если разорвана одна из нитей - одиночный (однонитевой) разрыв. При облучении возникают «комплексные» разрывы, при которых в скелете ДНК рядом находится несколько разорванных связей.
- Совпадение разрывов противоположных нитей ДНК в одной точке - двойной (двунитевой) разрыв.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ АСПЕКТЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ (продолжение)

- Тяжесть поражения клетки с увеличением доли двойных разрывов возрастает.
- **Нарушение непрерывности ДНК препятствует считыванию с неё генетической информации, последующему распределению генетического материала между клетками.**
- При воздействии ионизирующего излучения в дозе 2 Гр, вызывающем гибель от 10% до 90% клеток разных тканей человека, в ДНК одной клетки образуется около 2000 однонитевых и 80 двунитевых разрывов, повреждается 1000 оснований и формируется 300 сшивок с белком.
- **Именно эти поражения лежат в основе радиационной гибели клетки, длительного нарушения эффективности деления ее потомков и злокачественного перерождения.**
- **В случае воздействия на половые клетки эти поражения вызывают генетические последствия для потомков облученных родителей.**

РАЗВИТИЕ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ВО ВРЕМЕНИ

- Радиобиологические эффекты удобнее рассматривать во временном аспекте, разделяя их развитие на четыре основных стадии: 1) физические взаимодействия, 2) физико-химические взаимодействия, 3) биологические реакции, 4) медицинские эффекты.
- **Физические взаимодействия.** В этот период протекают первичные процессы поглощения энергии излучения атомами и молекулами биологического объекта, в результате они могут претерпевать возбуждение, ионизацию или диссоциацию (расщепление). Это самая короткая стадия.
- **Физико-химические взаимодействия.** Характер действующих процессов весьма разнообразен: реакции окисления; реакции восстановления; реакции деструкции (расщепление крупных молекул, отщепление активных групп, разрывы цепей); реакции димеризации (удвоенной молекулы в результате реакции присоединения), полимеризации и другие усложнения молекул; внутримолекулярные изменения.

РАЗВИТИЕ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ВО ВРЕМЕНИ

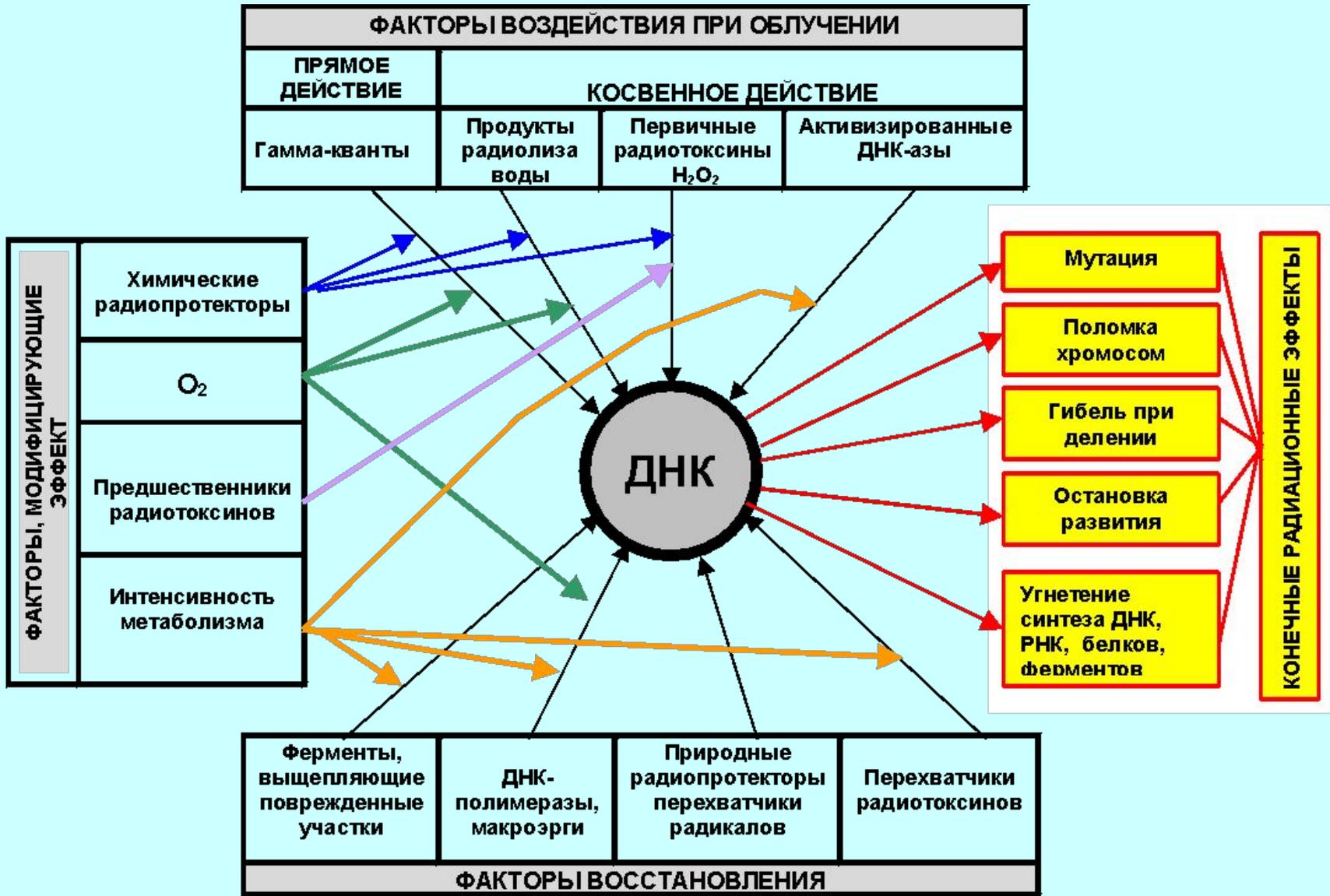
- **Биологическая стадия.** Как правило, собственно биологические эффекты проявляются не сразу, а спустя некоторое время после облучения, что свидетельствует о вторичности этих явлений. Действие ионизирующей радиации на живые организмы может приводить к нарушениям биологической организации на всех ее уровнях, от молекулярного и клеточного до организменного и популяционного.
- **Медицинские эффекты**
- Все эти проявления являются следствием поглощения физической энергии излучения и последующего индуцирования изменений на молекулярном уровне, поэтому никакие эффекты на любом более высоком уровне биологической организации невозможны без соответствующих изменений на более низких уровнях.
- На рисунке схематически изображен многоступенчатый процесс стохастических эффектов облучения.



Схема развития событий, приводящих к стохастическим радиационным эффектам

РЕПАРАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

- Изменения, возникающие в клетках на биохимическом и более высоких уровнях частично или полностью могут быть устранены в процессе репарации (восстановления).
- **Чем сложнее нарушения, возникшие в клетке, тем меньше вероятность их восстановления.**
- Степень поражающего действия зависит не только от величины полученной дозы радиации, но и от того, имелись ли при этом условия и время для осуществления процессов биохимического восстановления.
- **Если клетка в момент облучения находилась вне цикла деления, то у нее больше возможностей для восстановления, чем у клетки, активно реплицирующей ДНК и готовящейся к митозу.**
- **При одинаковой дозе облучения результат воздействия на организм тем меньше, чем более дробно получена доза или чем больше она растянута во времени.**
- У животных восстановление происходит быстрее, чем у человека.



МЕХАНИЗМ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДНК ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

РЕПАРАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ (продолжение)

- **Разновидности облучения:**
- острое – за короткий промежуток времени, не более нескольких часов;
- пролонгированное (более длительное),
- фракционированное – с перерывами между получаемыми порциями облучения;
- хроническое – длительное время, при малой интенсивности облучения.
- Доза радиации, поглощенная организмом в течение длительного периода времени, может привести к существенно более сильному поражению, чем такая же доза, полученная сразу или за более короткий период (так называемый эффект Петко).
- **Проблема малых доз радиации, их накопления в организме и последующее воздействие сейчас становится весьма актуальной.**

РЕПАРАЦИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ (продолжение)

- **Отмечается эффекты взаимодействия радиации с другими факторами риска, порознь не так опасными.**
- **Малые количества пестицидов могут усиливать действие радиации.**
- **То же самое происходит при действии радиации в присутствии небольших количеств ртути.**
- **Недостаток селена в организме усиливает тяжесть радиационного поражения.**
- **Известно, что у курильщиков, подвергающихся облучению в 15 мЗв/год, риск заболеть раком легких возрастает более чем в 16 раз по сравнению с некурящими.**
- **Известно также, что на фоне небольшого по величине хронического облучения разовое кратковременное дополнительное облучение дает эффект, много более значимый, чем при простом суммировании этих доз.**

ВОЗДЕЙСТВИЕ СРЕДНИХ И МАЛЫХ ДОЗ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

Доза на все тело, Гр	Немедленный результат	Отдаленный результат
До 0,1	Нет реакций	<ul style="list-style-type: none"> • Преждевременное старение. • Увеличение числа небольших мутаций (связанных с астмой, аллергиями и т.п.) в потомстве. • Дополнительный риск возникновения рака. • Возникновение уродств в потомстве.
0,1- 0,5	<p>У большинства нет реакции.</p> <p>У чувствительных людей развивается лучевая болезнь</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Поражение лимфоцитов и нейтрофилов. • Преждевременное старение. • Генетическое поражение потомства. • Увеличение риска возникновения рака.

ОПОСРЕДОВАННЫЕ И ОТДАЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ

- **Воздействие на наследственность;**
- **Возникновение лейкозов и злокачественных опухолей;**
- Иммунодепрессия, иммунодефицит;
- Повышение чувствительности организма к возбудителям инфекционных заболеваний;
- **Нарушение обмена веществ и эндокринного равновесия;**
- Возникновение катаракты;
- **Временная или постоянная стерильность;**
- Сокращение средней ожидаемой продолжительности жизни;
- Задержка психического развития;
- Появление рака в более молодом возрасте;
- Физиологические расстройства (нарушение работы щитовидной железы);

МУТАЦИИ СОМАТИЧЕСКИЕ И НАСЛЕДУЕМЫЕ

- Наибольшее внимание человека привлекают те радиационные повреждения клеток, которые связаны с мутациями, как следствием действия ионизирующего излучения.
- Мутация — это любое обнаруживаемое и наследуемое изменение в генетическом аппарате клетки, которое передается дочерним клеткам или индивидуумам.
- **Виды мутаций:**
- **Соматические** - произошедшие в соматических (неполовых) клетках, развиваются у самих облученных индивидуумов.
- **Генетические (наследственные) мутации** — в половых (генеративных) клетках, наследственные заболевания, развивающиеся в потомстве облученных родителей
- **Наиболее заметные мутации** — это хромосомные аберрации (или перестройки) в ядерных структурах клеток. Фрагменты хромосом после разрывов могут воссоединиться неполностью или в неверном порядке.

МУТАЦИИ СОМАТИЧЕСКИЕ

- **Соматические мутации могут переноситься в новые клетки, происходящие из исходных, но не передаются потомству.**
- **Соматические отдаленные последствия облучения:**
 - Сокращение продолжительности жизни,
 - Злокачественные новообразования,
 - Радиационная катаракта,
 - Кроме того, отдаленные последствия облучения отмечают в коже, соединительной ткани, кровеносных сосудах почек и легких в виде уплотнений и атрофии облученных участков, потери эластичности и других морфо-функциональных нарушениях, приводящим к фиброзам и склерозу, развивающимся в следствие комплекса процессов, включающих уменьшение числа клеток,
 - Накопление повреждений генетического аппарата соматических клеток во многом сходно с эффектами старения организма,
 - нарушение процесса формирования иммунитета.
 -

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МУТАЦИИ

- **Генетические мутации могут (но не обязательно должны) проявляться у потомства.**
- Обычно они возникают при облучении организма малыми и сублетальными (не угрожающими жизни) дозами радиации (при облучении большими дозами человек или животное становятся бесплодными или погибают).
- **Генетические мутации являются следствием радиационных мутаций в зародышевых клетках облученных родителей, в отличие от злокачественных новообразований, возникающих в результате мутаций в соматических клетках самих облученных объектов.**
- Геном человека содержит от 50000 до 100000 генов. Поэтому потенциальное число возможных мутаций и, следовательно, вероятность возникновения различных генетических нарушений в принципе огромна.

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МУТАЦИИ (продолжение)

- **Различают три категории наследственных заболеваний - менделианские, хромосомные и мультифакториальные.**
- **Менделианские (генные) нарушения** являются следствием мутаций в единичных генах одной или двух аутосом или половых хромосом. Они могут быть доминантными, рецессивными и связанными с полом.
- **Хромосомные нарушения** проявляются в виде изменения (увеличения или уменьшения) числа хромосом, а также изменения их структуры (хромосомные aberrации), при которых разорванные концы хромосом соединяются неправильно, а отдельные их фрагменты могут при делении клетки утрачиваться.
- **Мультифакториальные (имеющие несколько причин) нарушения** обязательно имеют генетический компонент, но не могут быть описаны как просто менделианские.

НАСЛЕДСТВЕННЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ

Тип генетического эффекта	Примеры
Генные мутации	
Одиночные доминантные	Полидактилия, хоря Гентигтона
Рецессивные	Серповидная анемия, ретинобластома
Сцепленные с полом	Цветовая слепота, гемофилия
Хромосомные изменения	
Изменение числа хромосом	Синдром Дауна (трисомия, дополнительная 21-)
Хромосомные aberrации	Гибель эмбриона, умственная отсталость, физические дефекты
Мультифакториальные расстройства	
Врожденные ненормальности и уродства	Неврологические дефекты, врожденное расщепление губы, расщепление мягкого нёба
Хронические болезни	Диабет, эссенциальная гипертония, коронарная болезнь сердца.

МУТАЦИИ

- **Действие радиации не имеет направленного характера, и значительное число мутаций может не приводить к каким-либо последствиям.**
- **Экспериментально установлено, что в первом поколении облученных организмов проявляется около половины всех выявляемых мутаций, остальные могут обнаружиться в течение следующих 15—20 поколений.**
- **Новые признаки, возникающие в связи с мутацией, например у животных, могут быть и положительными и отрицательными.**
- **Но в большинстве случаев они отрицательны, часто проявляются в повышенной восприимчивости животных к заболеваниям, сокращением продолжительности жизни, возникновением злокачественных новообразований и другими патологическими состояниями.**
- **Что касается диких животных, а также растений, микроорганизмов и вирусов, то здесь повышение уровня радиации будет иметь значение фактора, влияющего на темпы и формы эволюции.**
- **Попадая в условия повышенной радиоактивности, виды подвергаются широкому отбору, который идет на фоне повышенной изменчивости (радиомутабельности).**
- **В этих условиях отбор, уничтожая часть популяции, приводит к появлению свойств, нужных виду для обитания в новых условиях среды.**