

Тема 10. ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Прежде чем сформировать основные принципы радиационной безопасности, необходимо было основательно изучить: свойства излучений радионуклидов; взаимодействие их с веществом; радиационные эффекты, которые они производят в облученном объекте, в том числе и организме человека. Проведенные исследования позволили выявить существующие особенности неблагоприятного радиационного воздействия на организм. Главным из них являются: вид излучений, выделяемая энергия при распаде радионуклида; пути поступления радионуклидов в организм; биологическая радиочувствительность облучаемых тканей и органов.

Для количественной оценки воздействия ионизирующих излучений на облучаемый объект введено понятие «доза». Выделяют экспозиционную, поглощенную, эквивалентную и эффективную эквивалентную дозу облучения.

Экспозиционная доза характеризует ионизационную способность рентгеновского и гамма-излучения в воздухе. Она является характеристикой радиационного фона в ограниченном диапазоне энергии и только для воздуха.

Экспозиционная доза X – это отношение суммарного заряда dQ всех ионов одного знака, образовавшихся в элементарном объеме воздуха при облучении его ионизирующим излучением к массе dm воздуха в этом объеме:

$$X = \frac{dQ}{dm}.$$

Единица измерения экспозиционной дозы в системе СИ – кулон на килограмм (Кл/кг). Кулон на килограмм равен экспозиционной дозе, при которой в воздухе массой 1 кг произведены ионы, несущие электрический заряд 1 Кл каждого знака. Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р). Один рентген соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 1 см³ воздуха при температуре 0 °С и нормальном атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (1013 гПа). Соотношение внесистемной и системной единиц имеет вид:

$$1\text{Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}.$$

Изменения, происходящие в облучаемом объекте под воздействием различного рода излучений, зависят от величины поглощенной энергии. Поэтому наиболее удобной характеристикой излучения, определяющей степень его воздействия на облучаемый объект, является поглощенная энергия излучения. Она показывает, какое количество энергии ионизирующего излучения поглощено в единице массы любого вещества.

Если в результате воздействия на вещество массой dm поглощается энергия ионизирующего излучения dE , то поглощенная доза D оценивается выражением

$$D = \frac{dE}{dm}$$

За единицу измерения поглощенной дозы в СИ принят грей (Гр). Это такая доза, при которой массе 1 кг любого вещества передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж, т.е.

$$D = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}} = 1 \text{ Грей} = 1 \text{ Гр}$$

Внесистемной единицей поглощенной дозы является рад – энергия в 100 эрг, поглощенная в 1 г любого вещества независимо от вида и энергии излучения. 1 Гр = 100 рад.

Эквивалентная доза вводится для оценки радиационной опасности облучения человека от разных видов излучения. Для уяснения особенностей радиационного эффекта в биологической ткани в зависимости от вида ионизирующего излучения при одной и той же поглощенной дозе D учитывается усредненный коэффициент качества излучения. Это дает возможность эквивалентную дозу H оценить выражением

$$H = \bar{K} \cdot D$$

Коэффициент качества дает количественную оценку биологического действия каждого вида излучения, которая зависит от его ионизирующей способности. Значения приведены в табл.

Таблица

Вид излучения	k
Рентгеновское и γ -излучение	1
Электроны, позитроны и β -излучение	1
α - излучение с энергией меньше 10 МэВ	20
Нейтроны с энергией меньше 20 кэВ	3
Нейтроны с энергией 0,1...10 МэВ	10
Протоны с энергией меньше 10 МэВ	10

Эффективная эквивалентная доза (H_e) вводится для того, чтобы оценить опасность для всего организма облучения отдельных органов и тканей, которые имеют неодинаковую восприимчивость к ионизирующим излучениям. Эффективная эквивалентная доза облучения определяется соотношением:

$$H_e = \sum_{i=1}^n H_i \cdot W_i$$

где – среднее значение эквивалентной дозы облучения i -го органа человека;

– взвешивающий коэффициент, равный отношению риска облучения данного органа (ткани) к суммарному риску при облучении всего организма.

Взвешивающие коэффициенты или коэффициенты радиационного риска, позволяют выровнять риск облучения вне зависимости от того, облучается весь организм равномерно или неравномерно. Значения приведены в табл.

Таблица

Органы (ткани)	w
Половые железы	0,25
Молочная железа	0,15
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Щитовидная железа	0,03
Поверхности костных тканей	0,03
Остальные ткани	0,3

Важной характеристикой ионизирующих излучений является мощность дозы P , которая показывает, какую дозу облучения получает среда (вещество) за единицу времени, т.е. скорость изменения дозы, которая оценивается формулой

$$P = \frac{dD}{dt}$$

Для поглощенной дозы единицей измерения мощности дозы облучения являются Гр/с и рад/с, для эквивалентной дозы – Зв/с и бэр/с, экспозиционной дозы – Кл/кг·с (кулон на килограмм·с). Внесистемными единицами экспозиционной мощности дозы служат Р/с, Р/мин и Р/ч.

Для органического восприятия относительно большого числа единиц измерения доз облучения целесообразно показать их взаимосвязь (табл.).

Таблица

Наименование доз облучения	Единица измерения		Взаимосвязь
		В системе СИ	Внесистемная ед. измерения
Экспозиционная (Х)	Кулон на килограмм (Кл/кг)	Рентген (Р)	1 Кл/кг = $3,88 \cdot 10^3$ Р
Поглощенная (Д)	Грей (Гр) или Дж/кг	Рад	1 Гр = 100 рад
Эквивалентная (Н) и эффективная эквивалентная (?)	Зиверт (Зв)	Бэр	1 Зв = 100 бэр
Коллективная эквивалентная (?)	Человеко-зиверт (чел. Зв)	Человеко-бэр (чел. бэр)	1 чел.·Зв = 100 чел. бэр

Следует отметить, что с помощью приборов можно измерить экспозиционную дозу, а также, при определенных условиях, поглощенную дозу. Все остальные дозы приборами не измеряются, а могут быть оценены только расчетным путем.

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. Воздействия 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.).
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 ионизирующим излучением: прямой и косвенный (непрямой). Прямой путь поражения клетки характеризуется поглощением энергии излучения молекулами (мишенями) клеток, и в первую очередь молекулами ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты), входящими в структуру ядерных хромосом. При прямом воздействии ионизирующих излучений происходят возбуждение молекул, их ионизация, разрыв химических связей. Разрушаются ферменты и гормоны и соответственно в организме осуществляются физико-химические сдвиги. Происходит абберрация хромосом. Последние надрываются, разрываются на осколки или структурно перестраиваются. Тесная зависимость между степенью разрушения (аббераций) 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.). Ядро отделено от цитоплазмы мембраной. Оно

содержит ядрышко и хроматин. Последний представляет собой определенный набор нитевидных 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.

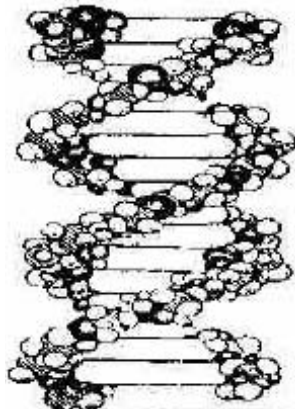


Рис. Участок молекулы ДНК

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.

Клетки при воздействии несмертельной для них дозы способны к репарации, т.е. восстановлению. Не все повреждения ДНК равнозначны по последствиям, радиационного воздействия. Восстановление одиночных разрывов нитей ДНК происходит достаточно эффективно. В клетках млекопитающих скорость репарации такова, что при нормальной температуре половина радиационных одиночных разрывов восстанавливается примерно в течение 15 мин, так что, вероятно, одиночные разрывы нитей ДНК не являются причиной гибели клеток в отличие от двойных разрывов нитей и повреждений оснований.

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.

Два последних вида репараций приводят к возникновению мутаций т.е. видоизменение в клетках. Появление мутации означает, что клетка содержит генетический материал, отличный от генетического материала, содержащегося в исходных (нормальных) клетках. Мутации могут усиливать, уменьшать или качественно изменять признак, определяемый геном. Ген – единица наследственного материала, ответственная за формирование какого-либо элементарного признака, обычно представляющая собой часть молекулы ДНК.

Последствия возникновения мутаций не так велики в соматических (неполовых) клетках организма в отличие от мутаций в половых клетках. Мутация в соматической клетке может привести к нарушению функции или даже гибели этой клетки или ее потомков. Но поскольку каждый орган состоит из многих миллионов клеток, влияние одной или нескольких мутаций на жизнедеятельность всего организма не будет значительным. Однако соматические мутации впоследствии могут явиться причиной раковых заболеваний или преждевременного старения организма.

Мутации, происходящие в половых клетках, могут оказать губительное действие на потомство: ведут к гибели потомства или вызывают появление потомства с серьезными аномалиями.

Если большие дозы облучения приводят к прекращению всех обменных процессов в клетке и даже к разрушению клетки, т.е. ее фактической гибели, то при облучении небольшими дозами часто происходит подавление способности клеток делиться, что называется репродуктивной гибелью. Клетка, утратившая способность делиться, не всегда имеет признаки повреждений, она может еще долго жить и после облучения. В настоящее время считается, что большинство острых и отдаленных последствий облучений организма – результат репродуктивной гибели клеток, которая проявляется при «попытке» таких клеток разделиться.

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 слюнных желез, клетки волосяных фолликулов, клетки потовых желез, клетки эпителия хрусталика, хрящевые клетки, клетки сосудов;

3. Достаточно высокая устойчивость к излучениям: клетки печени, нервные клетки, мышечные клетки, клетки соединительной ткани, костные клетки.

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.

Большая часть лучевых поражений возникает спустя длительный срок после острого однократного или хронического облучения. Они являются так называемыми отдаленными эффектами облучения в отличие от непосредственных эффектов, к которым относят острую лучевую болезнь и сопутствующий ей симптомокомплекс. Указанные отдаленные эффекты зависят от дозы; с возрастанием дозы растет тяжесть поражения. Помимо названных эффектов, в отдаленном периоде могут возникать еще два вида, которые называют стохастическими (т.е. вероятностными, случайностями): соматические (телесные) эффекты – злокачественные опухоли и генетические эффекты – врожденные уродства и нарушения, передающиеся по наследству. В основе обоих указанных видов стохастических эффектов лежат генерирующиеся излучением мутации и другие нарушения в клеточных структурах, ведающих наследственностью: в первом случае (соматические заболевания) – рак – в неполовых соматических клетках разных органов и тканей, во втором (в половых клетках яйчников и семенников) – генетические изменения.

Системы органов, играющие решающую роль в гибели организма при радиационном облучении, называются критическими. Сочетание признаков, характерных для течения болезни, называют синдром. При общем облучении организма в зависимости от эквивалентной поглощенной дозы может преобладать один из синдромов, связанных с критическими системами: 1) костномозговой (кроветворный), 2) желудочно-кишечный, 3) церебральный. Они развиваются вследствие необратимого поражения соответствующих критических систем организма – системы кроветворения, желудочно-кишечного тракта или центральной нервной системы.

Костномозговой (кроветворный) синдром связан с повреждением стволовых клеток красного костного мозга. Это является смертельным для организма. Зрелые клетки крови не делятся, характеризуются специализированными функциями, быстро изнашиваются, а поэтому должны постоянно заменяться новыми. Поражение костного мозга приводит к падению количества разных типов клеток в крови. Сокращение числа клеток

периферической крови обуславливает симптомы, предшествующие гибели организма: уменьшение количества крови, кровотечения, инфекции.

Сокращение числа эритроцитов (красных кровяных телец), а соответственно, и понижение гемоглобина в крови приводит к анемии (малокровию). Уменьшение числа тромбоцитов, участвующих в процессе свертывания крови, приводит к возникновению кровотечений, что усиливает анемию. Уменьшение числа лейкоцитов (белых кровяных телец) приводит к снижению сопротивляемости организма различным болезням.

Желудочно-кишечный синдром связан с повреждением слоя клеток, выстилающих внутреннюю стенку тонкой кишки, которое приводит к проникновению в организм инфекции из кишечника за счет кишечной флоры и возникновению инфекционных заболеваний.

Внутренняя, всасывающая поверхность кишечника имеет ворсинки, направленные в просвет кишечника. У основания этих ворсинок находятся быстроделющиеся клетки. Нарушение процесса обновления этих клеток и приводит к желудочно-кишечному синдрому, признаками которого являются боли в желудочно-кишечном тракте, потеря аппетита, тошнота, рвота, понос, изъязвление слизистой оболочки рта и зева, вялость, инертность. Все это происходит на фоне костномозгового синдрома.

Церебральный синдром связан с нарушениями центральной нервной системы. В центральной нервной системе в отличие от костного мозга и кишечника клетки достаточно устойчивы к воздействию радиации, так как зрелая нервная ткань состоит из высокоспециализированных клеток, которые в течение жизни не замещаются. Воздействие радиационных излучений приводит к функциональным нарушениям на тканевом уровне.

Признаки церебрального синдрома – головные боли, полное безразличие ко всему окружающему, нарушение сознания (возможна временная потеря его), судороги. Эти симптомы связаны с повреждением головного мозга.

Облучение всего организма человека дозой от 1 до 10 Зв приводит к протеканию у него типичной формы острой лучевой болезни. Различают четыре степени тяжести болезни: легкая (I) степень – при облучении дозой 1-2 Зв; средняя (II) степень – доза облучения 2-4 Зв; тяжелая (III) степень – доза 4-6 Зв; крайне тяжелая (IV) степень – доза 6-10 Зв и более. Доза, вызывающая гибель 50% облученных людей в течение 30 дней после облучения, если не приняты соответствующие медицинские меры, составляет 3-5 Зв.

В типичной форме лучевой болезни различают четыре периода:

1. Период первичной реакции – длится от несколько часов до несколько суток, в зависимости от тяжести поражения.

2. Период мнимого благополучия (скрытый период). Он длится 2-5 недель. Причем чем больше была поглощенная доза, тем короче скрытый период и при достаточно больших дозах он вообще может отсутствовать. В это время нарушения в организме нарастают: опустошается костный мозг, развиваются изменения в кишечнике, коже, выпадают волосы, но общее состояние остается удовлетворительным.

3. Период разгара болезни – расстройство функций кишечника, нарушение проницаемости сосудов, сопровождающееся кровотечениями и кровоизлияниями в кожные покровы и слизистые оболочки; глубокое поражение кроветворной и иммунной систем; развитие инфекционных осложнений, которые могут привести к гибели организма.

4. Период восстановления – при благоприятном исходе начинается на втором – пятом месяце после облучения с нормализации кроветворения, постепенного уменьшения и прекращения кровоточивости, роста волос, улучшения общего состояния и восстановления двигательной активности и аппетита.

При лучевой болезни I (легкой) степени первичная реакция, если она развивается, стихает в день воздействия. Скрытый период длится 30-40 суток. В период разгара (на пятой-седьмой неделе) изменения периферической крови ограничиваются снижением числа лейкоцитов, человек ощущает общее недомогание. Выздоровление, как правило, наступает без лечения.

При II (средней) степени лучевой болезни первичная реакция длится до 24 ч. наблюдаются двух-, трехкратная рвота, общее недомогание, иногда незначительное повышение температуры. Скрытый период продолжается 16-28 суток. В период разгара значительно снижается содержание лейкоцитов в крови, выражены общие клинические проявления: инфекционные осложнения, кровоточивость, общее недомогание. Больные нуждаются в специализированной медицинской помощи.

При III (тяжелой) степени лучевой болезни первичная реакция длится до двух суток и сопровождается многократными рвотами, недомоганием, значительным повышением температуры, возможно покраснение кожи и слизистых оболочек. Скрытый период продолжается 8-17 сут. Однако уже к концу первой недели возможно возникновение отечности, покраснения и изъязвления слизистой оболочки рта и зева, значительное изменение состава крови, лихорадка, тяжелые инфекционные осложнения. Смертельные исходы возможны начиная с третьей недели. Больные нуждаются в своевременном специализированном лечении.

IV (крайне тяжелая) степень лучевой болезни в зависимости от дозы облучения проявляется в различных клинических формах.

В диапазоне доз 6-10 Зв развивается лучевая болезнь с ярко выраженным костномозговым (кроветворным) синдромом, но в клинической картине существенное место занимает также поражение желудочно-кишечного тракта. Первичная реакция продолжается в течение трех-четырех суток. Возможны общее покраснение кожи, жидкий стул. На 8-12-е сутки могут выявляться кишечные нарушения. В дальнейшем – типичная клиника лучевой болезни тяжелой степени. Смертельные исходы наступают с конца второй недели. Выздоровление небольшой части пораженных возможно лишь при лечении в условиях специализированного стационара. Кратко указанные симптомы приведены в табл.

Таблица

Характеристика острой лучевой болезни по степени тяжести и последствиям для организма человека

Степень тяжести, (доза облучения, рад)	Время проявления первичной реакции	Характер первичной реакции	Косвенные признаки первичной реакции	Латентный (скрытый) период	Смертность (без лечения)
легкая (100-200)	через 2,0-2,5 часа после облучения	тошнота, однократная рвота	несильная головная боль, легкая слабость	4-5 недель	нет
средней тяжести (200-400)	через 1,0-2,0 часа после облучения	тошнота, рвота 2 и более раз	слабость, постоянная головная боль, температура тела повышена до 37,5°C	3-4 недель	40%
тяжелая (400-600)	через 0,5-1,0 часа после облучения	многократная рвота длится до 2 суток	выраженное недомогание, сильная головная боль, температура тела повышена до 38-38,5°C	10-20 суток	до 95%

крайне тяжелая (свыше 600)	через 2-30 ми-нут после об- лучения	неукроти- мая рвота, длится 3-4 суток	сознание по- мутнено, силь- ная головная боль, темпера- тура тела по- вышена до 39-40°C. Покрас-нение кожных покровов	3-4 суток, или вовсе отсутству- ет	100%
----------------------------------	--	---	--	---	------

6.4. Действие на организм малых доз излучения

Длительное воздействие малых доз радиации может привести к возникновению хронической лучевой болезни, проявляющейся через полтора – три года после начала облучения, протекающей вяло, без ярко выраженных проявлений периода разгара болезни. Высокая уязвимость красного костного мозга, вырабатывающего лейкоциты, приводит к ослаблению иммунной системы организма, а, следовательно, к повышенной восприимчивости к любым инфекциям, быстрой утомляемости, малокровию.

Следует также учесть радиобиологические эффекты на тканевом уровне, которые подразделяются на стохастические и нестохастические.

Стохастическими называются такие эффекты, вероятность которых при малых дозах пропорциональна дозе. Подобные эффекты признаются беспороговыми, при которых даже самая малая доза облучения не является безвредной. Стохастические эффекты возникают в результате повреждения нескольких или даже одной клетки (например, яйцеклетки).

Из отдаленных стохастических эффектов на первом месте стоят раковые заболевания, а среди них – лейкозы (рак крови), пик которых в зависимости от возраста облученных приходится на 5 – 25-й год после облучения. У детей до 15 лет наибольшая вероятность заболевания лейкозом приходится на пятый год после облучения; у людей, подвергшихся облучению в возрасте 15 – 29 лет, – через десять лет облучения, у людей в возрасте 30-34 лет – через пятнадцать лет и у людей старше 45 лет – через 25 лет после облучения.

Эффекты, которые имеют пороговую дозу, и тяжесть которых зависит от дозы, называются нестохастическими. Они возникают в результате изменений в большом количестве клеток и характерны для отдельных тканей. К ним относятся: катаракта, незлокачественные повреждения кожи, снижение костномозгового кроветворения, бесплодие. Для нестохастических эффектов существует четкий порог дозы, ниже которого вредных эффектов не наблюдается. Это связано с тем, что при малых дозах радиации поврежденные и погибшие клетки распределены в тканях случайным образом и небольшое количество функционально неполноценных клеток в большинстве тканей не играет существенной роли, хотя в будущем эти клетки могут послужить основой для новообразований.

К другим отдаленным последствиям облучения относятся, как уже упоминалось, уменьшение продолжительности жизни, катаракта, бесплодие, а также уплотнение и омертвление облученных участков кожи, потеря ее эластичности, нарушение функций половых желез и волосяных фолликулов, замедленное заживление кожи после травм даже спустя длительное время после облучения.

Таким образом, оценивая возможные последствия хронического облучения, следует иметь в виду, что последствия могут суммироваться и накапливаться в организме в течение длительного времени, так как риск стохастических поражений связан с возможностью мутаций, способных возникнуть под влиянием дополнительных взаимодействий клеток с излучением (табл.).

Основные клинические эффекты воздействия
ионизирующих излучений на человека

Условия (время) облучения	Доза (накопленная) или мощность дозы	Эффекты
1	2	3
Однократное острое, продолжительное, дробное, хроническое – все виды	Любая доза, отлич- ная от 0	Увеличение риска отдаленных стохастических последствий – рака и генетических нарушений; верхний предел этого риска на коллективную дозу (млн чел-бэр): летальных исхо-дов от рака – 120 случаев, генетиче-ских нарушений – 45 на 100 000 чел.
Хроническое в течение ряда лет	0,1 Зв (10 бэр) в год и более	Снижение неспецифической рези-стентности организма, которое не выявляется у отдельных лиц, но мо-жет регистрироваться при эпиде- миологических обследованиях
Хроническое в течение ряда лет	0,5 Зв (50 бэр) в год и более	Специфические проявления лучево-го воздействия, с н и ж е н и е им м у н о - реактивности, катаракта (при дозах 30 бэр (0,3 Зв) в год)
Острое однократное	1,0 Зв (100 бэр) и бо-лее 4,5 Зв (450 бэр) и бо-лее	Острая лучевая болезнь разной сте-пени тяжести Острая лучевая болезнь со смер-тельным исходом у 50 % облучен-ных
Продолжительное, 1-2 мес на щитовидную железу от ?	10,0 Зв (1000 бэр) и более	Гипофункция щитовидной железы; возрастание риска развития опухо-лей (аденом и рака) с вероятностью около $1 \cdot 10^{-2}$

Ко всему изложенному выше следует добавить, что большое значение имеет время, в течение которого определенная ткань организма подвергалась воздействию облучения. Если длительность облучения такова, что новые клетки успевают заменить пораженные, то эффект радиационного воздействия понижается. Это наблюдается, если облучение малыми дозами является хроническим, т.е. если человек живет при постоянном повышенном радиационном фоне. При этом быстро обновляющиеся клетки не будут значительно повреждены за счет этого фона, а для медленно делящихся или совсем неделящихся клеток доза, которую они набирают в течение длительного времени, будет соответствовать той же дозе при сильном однократном облучении.