

4.4. Биологическое действие ионизирующего излучения.

Особенности воздействия ионизирующего излучения на живой организм. При изучении действия излучения на организм были определены следующие особенности: – высокая эффективность поглощенной энергии. Малые количества поглощенной энергии излучения могут вызвать глубокие биологические изменения в организме:

- наличие скрытого, или инкубационного, проявления действия ионизирующего излучения. Этот период часто называют периодом мнимого благополучия. Продолжительность его сокращается при облучении большими дозами;

- действие от малых доз может суммироваться или накапливаться. Этот эффект называется кумуляцией;

- излучение воздействует не только на данный живой организм, но и на его потомство. Это так называемый генетический эффект;

- различные органы живого организма имеют свою чувствительность к облучению. При ежедневном воздействии дозы 20-50 мбэр (0,2-0,5 мЗв) уже наступают изменения в крови;

- не каждый организм в целом одинаково реагирует на облучение.

- облучение зависит от частоты. Одноразовое облучение в большой дозе вызывает более глубокие последствия, чем фракционирование.

В результате воздействия ионизирующего излучения на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биологические процессы.

Известно, что две трети общего состава ткани человека составляют вода и углерод. Вода под воздействием ионизирующего излучения расщепляется на Н и ОН, которые либо непосредственно, либо через цепь вторичных превращений образуют продукты с высокой химической активностью: гидратный окисел HO_2 и перекись водорода H_2O_2 . Эти соединения взаимодействуют с молекулами органического вещества ткани, окисляя и разрушая ее. В результате воздействия ионизирующего излучения нарушается нормальное течение биохимических процессов и обмен в организме.

Если рассматривать ткани органов в порядке уменьшения их чувствительности к действию излучения, то получим следующую последовательность: **лимфатическая ткань, лимфатические узлы, селезенка, зубная железа, костный мозг, зародышевые клетки**, больного такое соотношение нарушается. **Важным фактором** при воздействии ионизирующего излучения на организм является **время облучения**. С увеличением мощности дозы поражающее действие излучения возрастает. Чем более дробно излучение по времени, тем меньше его поражающее действие.

Биологическая эффективность каждого вида ионизирующего излучения находится в зависимости от удельной ионизации. Так, например, альфа-частицы с энергией 3 МэВ образуют 40000 пар ионов на одном миллиметре пути, бета-частицы с такой же энергией до 50-100 пар ионов, гамма-кванты – 5-10 пар ионов. Альфа- частицы проникают через верхний покров кожи до глубины до **40 мкм**, бета- частицы - до **0,13 см**. Наружное облучение **альфа-бета-излучениями менее опасно, т. к. альфа-и бета-частицы имеют небольшую величину пробега в ткани и не достигают кроветворных и других органов**. Эти излучения задерживаются одеждой, кожей и жировой прослойкой под кожей, они опасны только при внутреннем облучении.

Степень поражения **организма зависит от размера облучаемой поверхности. С уменьшением облучаемой поверхности уменьшается и биологический эффект**. Так при облучении фотонами поглощенной дозой 450 рад участка тела площадью 6 см²

заметного поражения организма не наблюдалось, а при облучении такой же дозой всего тела было 50% смертельных случаев. Индивидуальные особенности организма человека проявляются лишь при небольших поглощенных дозах. Чем моложе человек, тем выше его чувствительность к облучению, особенно высока она у детей. Взрослый человек в возрасте 25 лет и старше наиболее устойчив к облучению. Есть ряд профессий, где существует большая вероятность облучения. При некоторых чрезвычайных обстоятельствах

Экспозиционная доза в 500 Р в клетке (объем 10 мкм) создает примерно 10^6 ионизированных атомов, при общем числе атомов порядка 10^{14} , то есть 1 ионизированный атом на 10^8 неионизированных. Среднее время жизни иона около 1 мкс, следовательно все первичные химические реакции должны происходить тотчас же после образования иона и в месте его образования. Число возможных химических реакций значительно. В результате ионизации молекул воды образуются свободные радикалы. Неустойчивые свободные радикалы могут образовывать соединения H_2 и H_2O_2 , а также вступать в соединения с растворимыми веществами. Перекись водорода и продукты разложения воды, даже в очень малых количествах, действуют на внутриклеточные системы, целостность которых весьма существенна для нормального функционирования клетки, поскольку жизнь возможна лишь в весьма узких пределах физико-химических условий. Среди этих систем наибольшее значение имеют ферменты. Всякое проявление жизнедеятельности является, в конечном итоге, результатом той или иной химической реакции, течение которой регулируется каким-либо ферментом. Торможение активности ферментов нарушает химическое равновесие в клетке, обычно весьма неустойчивое, и приводит к гибели клетки.

Этапы действия ионизирующих излучений на организм человека. Длительность этапов действия излучения возрастает от момента облучения от первого к последующему.

На первом, физическом, этапе, который продолжается около 10^{-12} с, энергия излучения передается веществу. Первичное излучение создает вторичное: электроны, дельта-электроны, ядра отдачи, тормозное излучение и флуоресцентное. Все они могут возбуждать и ионизировать молекулы биоткани, причем вовлеченные молекулы распределяются в среде неравномерно, концентрируясь вокруг траекторий заряженных частиц. Пространственная микронеоднородность распределения возбужденных и ионизированных молекул зависит от параметров, характеризующих качество излучения и от дозы излучения.

Во втором этапе, который длится около 10^{-9} с, возбужденные и ионизированные молекулы разменивают энергию возбуждения и ионизации непосредственно и во взаимодействии между собой и с другими молекулами среды, не возбужденными излучением, образуя вторичные продукты радиационно-химических реакций – **свободные радикалы.**

Третий этап. При взаимодействии продуктов реакций, образованных в разных треках заряженных частиц, и проявляется зависимость радиационного эффекта от мощности дозы излучения. После того, как избыточная энергия тем или иным способом разменена, происходят химические реакции с участием вовлеченных молекул и продуктов радиолитиза, что приводит к модификации важных в биологическом отношении молекул (образование инородной ткани). Длительность этого химического этапа зависит от свойств облучаемой среды и для мягких тканей оценивается интервалом около 10^{-6} с.

Последующие **биологические** этапы характеризуются периодом от нескольких секунд до десятилетий, что приводит к старению организма, образованию раковых клеток или гибели организма.

Изменение функционирования субклеточных структур приводит к нарушению жизнедеятельности клеток – прекращению синтеза белков или его извращению, нарушению циклов деления клеток, нарушению взаимодействия клеток данной ткани.

При всех перечисленных этапах воздействия излучений на среду наряду с деструктивными процессами, поражением, происходят восстановительные процессы, репарация и регенерация, так что конечный результат является итогом их совокупного действия.

Временная макро - и микронеравномерность облучения сказывается на его результатах вследствие наличия восстановительных процессов, развития организма и конечной продолжительности жизни. Роль неравномерности облучения во времени проявляется в зависимости от мощности дозы. Поскольку действие излучения квантовано, ибо складывается из эффектов от отдельных частиц, малыми в указанном смысле можно несомненно считать такие дозы, при которых отдельные треки заряженных частиц в облучаемой среде пространственно не перекрываются, а их продукты не взаимодействуют.

С увеличением дозы возрастает вероятность наложения треков отдельных частиц. В тех областях, где треки перекрываются, они еще оказываются разделенными во времени. Если интервал времени между появлением перекрывающихся треков мал по сравнению с характеристическим временем процессов восстановления, то влияние последних не сказывается и взаимодействие треков наблюдается в полной мере. Если этот интервал велик по отношению ко времени восстановления, то восстановительные процессы могут существенно уменьшить или даже полностью скомпенсировать взаимодействие треков.

Еще более сложный характер имеет биологическое действие ионизирующих излучений на целостный многоклеточный организм, у которого имеются различные органы со специализированными тканями и функциями.

Радиобиологический эффект. Любые изменения в нормальной жизнедеятельности живого организма, возникающие под действием радиации, называется **радиобиологическим эффектом (РБЭ)**.

За тест биологического действия радиации можно выбрать любой признак, интересующий экспериментатора–радиобиолога.

Мерой или величиной радиобиологического эффекта является отклонение от нормы (контроля) количественной характеристики выбранного биологического признака.

При прочих равных условиях радиобиологический эффект зависит от энергии, теряемой частицей на единицу пути в ткани.

Энергия «ΔE», теряемая частицей на единицу пути «Δl», называется линейной плотностью поглощенной энергии (ЛПЭ):

$$L = \Delta E / \Delta l.$$

При изменении ЛПЭ меняется не только сам биологический эффект, но и характер зависимости этого эффекта от мощности дозы. При большой ЛПЭ, когда повреждения отдельных микроэлементов клетки велики и восстановительные процессы затруднены, биологический эффект слабо зависит от мощности поглощенной дозы.

В качестве единицы измерения ЛПЭ используют килоэлектронвольт на микрометр воды: 1 кэВ/мкм = 0,16 нДж/м.

Для разных видов излучения РБЭ при одинаковой дозе оказывается различным. Поэтому для оценки радиобиологического эффекта воздействия излучения произвольного состава потребовалось введение новой характеристики дозы. Для сравнения РБЭ производимых одинаковой поглощенной дозой различных видов излучения, используют понятие **относительной биологической эффективности излучения (ОБЭ)**. Под ОБЭ понимают отношение поглощенной дозы образцового рентгеновского излучения, вызывающего определенный РБЭ, к поглощенной дозе данного рассматриваемого вида излучения, вызывающего тот же РБЭ:

$$ОБЭ = \frac{\text{доза – рентгеновского – излучения, – необходимая – для – получения – эффекта – Д}}{\text{доза – другого – вида – излучения – необходимая – для – получения – эффекта – Д}}.$$

Таким образом, чем больше РБЭ данного вида излучения, тем меньше необходима

доза излучения для получения определенного биологического действия «Д».

Регламентированные значения ОБЭ (НРБ-2000), установленные для контроля степени радиационной опасности при хроническом облучении называют **коэффициентом качества излучения или взвешивающими коэффициентами (W_R)**:

- фотоны любых энергий1;
- электроны и мюоны любых энергий1;
- нейтроны с энергией менее 10 кэВ5;
- от 10 до 100 кэВ.....10;
- от 100 кэВ до 2 МэВ.....20;
- от 2 МэВ до 20 МэВ10;
- более 20 МэВ5;
- протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи5;
- альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра20.

Концепция безпороговой линейной зависимости доза-эффект. Прямые данные, полученные при изучении образования опухолей при накопленных дозах 1-10 Зв, свидетельствуют о том, что в этом случае зависимость между дозой и частотой индукции опухолей, как, правило, линейна:

во сколько раз повышается доза, во столько раз увеличивается частота новообразований. Естественно предположить, что в области малых доз, где эффект не может непосредственно наблюдаться, эта зависимость сохраняет свое значение.

В настоящее время вопрос о существовании порога канцерогенез в радиобиологии остается открытым.

В радиационной безопасности принято считать, что порога и полностью безопасных доз нет.

После многолетних дискуссий и специального рассмотрения этого вопроса Научным комитетом по действию атомной радиации (НКРЗ) в 1985 году было принято решение, согласно которому: **дополнительное облучение в любой, сколь угодно малой дозе, сопряжено с дополнительным, отличным от нуля риском канцерогенеза.**

Это признание отсутствия порога для канцерогенного действия излучения основано на современных представлениях о механизмах канцерогенеза.

В основе развития опухоли лежит одиночная онкогенно-трансформированная клетка, способная к нерегулируемому делению и не различимая для иммунного надзора. Процесс онкогенной трансформации имеет вероятностный характер, причем это событие весьма редкое. Установлено, что такое событие происходит **1 раз на 10^{18} взаимодействий** ионизирующих частиц с клетками. Если учесть, что в организме человека **10^{14} клеток**, то это означает, что одна из них может стать родоначальницей клинической формы рака в среднем при **10^4 взаимодействий** излучений с каждой клеткой организма. Явление онкогенной трансформации – процесс вероятностный. Поэтому справедливо допустить, что онкогенную трансформацию может претерпеть клетка и при единичном акте ионизации, вызвавшем активацию онкогена (разрушение депрессирующего гена).

Зависимость доза-эффект в радиобиологии. Для радиационной безопасности особый интерес представляют эффекты тех доз, которые встречаются в реальных условиях производства и проживания людей. Накопленная в течение всей жизни человека доза за счет естественного радиационного фона не превышает, как правило, **0,1 Зв**. Профессиональное облучение и облучение за счет природных источников в подавляющем большинстве случаев не превышает за жизнь дозы 1 Зв.

Дозы, накопленные за период всей жизни, составляющие величину порядка 1 Зв, при условии, что годовые мощности доз находятся в пределах от естественного фона до 10 мЗв, называются малыми.

Многолетние наблюдения за персоналом и населением, подвергшихся воздействию повышенных доз в силу различных причин, позволяют сделать вывод, что длительное, многолетнее облучение при мощности дозы до **50 мЗв в год у персонала** или дозах до **10 мЗв в год у населения** в целом не вызывает никаких неблагоприятных соматических сдвигов, реально регистрируемых современными методами исследования.

В настоящее время нет прямых доказательств влияния малых и сверхмалых доз облучения на канцерогенез. Способность ионизирующего излучения вызывать рак и генетические нарушения у человека была выявлена только в тех случаях, когда накопленные дозы облучения составляли 100-1000 Зв, но никак не менее 1 Зв. Однако из этого не следует, что малые или даже сверхмалые дозы не могут вызвать стохастических эффектов.

Согласно современным представлениям о природе канцерогенеза, в основе ракового перерождения клетки лежат основы ее наследственного аппарата – молекул ДНК, приводящие к активации онкогена. Такая активация может быть связана физическими факторами (ионизирующее и ультрафиолетовое излучения), химическими (канцерогены) и биологическими (вирусы, гормоны). Она спонтанно возникает и при обычной жизнедеятельности клеток, обусловленной пролиферацией и старением. Большое значение в канцерогенезе могут иметь промотеры – вещества и факторы, дающие толчок к пролиферации онкогенно-трансформированной клетки, а также коканцерогены – вещества, способствующие преобразованию метаболитов в канцерогены и облегчающие последним контакт с клеткой. В живом нормальном организме постоянно протекают эти процессы, обуславливающие повсеместно существующую так называемую спонтанную заболеваемость раком. Ионизирующее излучение является лишь одним из многих канцерогенных факторов, воздействующих на человека в реальной жизни.