

ВВЕДЕНИЕ В РАДИОЭКОЛОГИЮ

СОДЕРЖАНИЕ.

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ.
2. РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОРГАНИЗМОВ.
3. МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.
4. ПОСЛЕДСТВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЗМА.
5. ВИДЫ ОБЛУЧЕНИЯ.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ.

Под экологией (ойкос – дом, родина; логос – наука, знание) понимают науку о взаимоотношениях биологических систем между собой и окружающей их неживой природой. Первым трудом по экологии следует считать известную работу Ч. Дарвина (1859) “Происхождение видов”. В начале экологические проблемы рассматривались в среде естественных наук о живой природе – ботаники, зоологии, физиологии, анатомии. В качестве самостоятельной науки экология сформировалась к началу XX века. Роль экологии и её истинное значение стали осознавать лишь в последней четверти прошлого века, когда резкое возрастание численности населения планеты и усилившееся воздействие человека на природную среду, приведшее к её частичной деградации, поставили со всей остротой вопрос о существовании самой человеческой цивилизации. Принципиальной задачей экологии является определение места человека в окружающей природе и построение цивилизации гармонически сосуществующей с ней.

В настоящее время экология представляет собой совокупность системы 4-х основных разделов: глобальной экологии (учения о биосфере), аутоэкологии (учение об экологических факторах, действующих на отдельные организмы), экологии популяций (учение о жизнедеятельности отдельных популяций и причин их изменений под действием внешних и внутренних факторов, экологии сообществ (биоценозов) и экосистем, а также ряда других направлений.

Предметом нашего рассмотрения будет являться радиоэкология, т. е. влияние радиационного воздействия (естественного и антропогенного характера) на человека, а также радиационное загрязнение природы в результате жизнедеятельности человеческого сообщества и радиационный мониторинг.

Целесообразно предварительно дать определения некоторым терминам, которые будут часто использоваться в дальнейшем.

Окружающая среда – совокупность вещества, явлений и сил природы или продуктов жизнедеятельности человеческого сообщества, непосредственно контактирующие с рассматриваемым объектом или субъектом. Этот термин всегда подразумевает “кого” или “что” окружает среда. Иногда употребляют термин “внешняя среда”, но он более широкий, так как включает в себя и явления природы, не контактирующие непосредственно с объектом или субъектом.

Биосфера – область существования и функционирования живого вещества (среда обитания) и само это вещество. Эта область охватывает **аэробнобиосферу** (нижняя часть атмосферы до озонового слоя, примерно 25 км), **гидробнобиосферу** (совокупность всех вод Земли) и литобиосферу (верхние слои литосферы – твердой оболочки Земли – до 3-х км в глубину).

Экологический фактор – любое свойство окружающей среды, способное оказывать прямое или косвенное влияние на живой организм хотя бы на протяжении одной из фаз его индивидуального развития. В свою очередь, организм реагирует на экологический фактор специфическими приспособительными реакциями, т. е. адаптируется к нему. Экологические факторы очень разнообразны, иногда полезны для организмов, иногда вредны. Одним из множества экологических факторов является ионизирующее излучение.

Ионизирующее излучение – любой вид излучения, взаимодействие которого в веществе (в частности, в живой ткани) вызывает ионизацию и возбуждение составляющих его молекул и атомов. Все виды электромагнитного излучения начиная с ультрафиолетового и ниже ионизацию не вызывают. Различают непосредственно (заряженные частицы) и косвенно (нейтральные частицы и гамма-кванты) ионизирующее излучение. Природными ионизирующими излучениями являются космические лучи и излучения радиоактивных веществ, которые создают естественный фон радиации на Земле. Искусственное ионизирующее излучение создается при работе ускорителей частиц, при работе ядерных энергетических установок, при испытаниях ядерного оружия и т. д.

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ОРГАНИЗМОВ.

Радиационная нагрузка **бионтов**, т. е. живых организмов возникает при его внешнем облучении и при попадании внутрь организма различными путями радиоактивных веществ. У растений поступающие из почвы и воздуха радионуклиды накапливаются в основном в растущих частях или плодах, у живых существ часть поступивших внутрь радионуклидов выводится из организма с отходами. По силе воздействия ионизирующее излучение существенно превосходит многие иные экологические факторы, т. к. его последствия проявляются как на генетическом, так и на соматическом уровнях. Все живые существа и растения в процессе эволюции приспособились к существующему естественному фону радиации, который поддерживает определенный уровень генетических мутаций, однако возрастание радиационной нагрузки представляет опасность для любого организма и популяции в целом. Чувствительность организмов к ионизирующим излучениям зависит от видовых особенностей. На рис. 1 показаны диапазоны поглощенных доз с 50 %-ой вероятностью вызывающие гибель популяций. В принципе, радиочувствительность организмов тем больше, чем ниже уровень организации. Наиболее устойчивы к излучениям микроорганизмы, наименее – млекопитающие. Несмотря на гигантское различие между животным и растительным миром критические дозы облучения могут быть близки для отдельных их видов, хотя диапазон радиочувствительности бионтов в целом очень велик. Даже одни и те же клетки в зависимости от стадии клеточного цикла имеют разную радиочувствительность. Рисунок 1 отражает прямые соматические последствия лучевого поражения. В действительности же

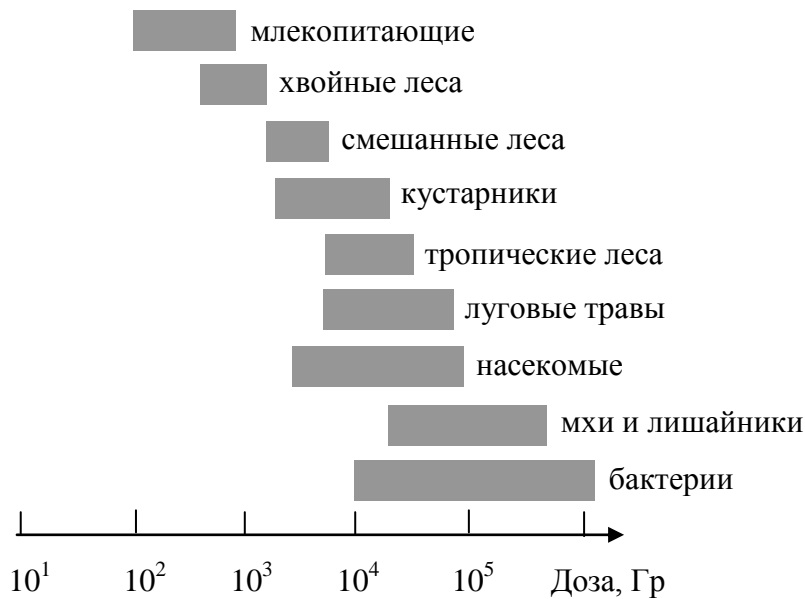


Рис. 1. Радиочувствительность организмов к гамма-излучению.

серьезные последствия для популяций могут наступать при значительно меньших дозах и нижние границы диапазонов на рис. 1 следовало бы сдвинуть левее. Например, доза в 2 Гр убивает эмбрионы многих насекомых, доза в 50 Гр приводит к полному их бесплодию, тогда как смертельная доза для взрослых особей составляет около 1000 Гр.

МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

Согласно современным представлениям механизм биологического воздействия ионизирующих излучений можно подразделить на:

- первичные физико-химические процессы, возникающие в молекулах живых клеток и окружающего их субстрата;
- нарушения функций целого организма как следствие первичных процессов. Физико-химические изменения в молекулах живой ткани под действием ионизирующего излучения происходят по двум причинам: непосредственное разрушение молекулярных связей вдоль трека заряженной частицы, а также вблизи него за счет ионизации атомов самой частицей или энергетичными δ -электронами.

Прямое действие ионизирующего излучения может вызывать расщепление молекул ткани, отрыв радикалов, изменение химических связей. Необходимо отметить, что прямая ионизация и непосредственная передача энергии излучения живым тканям не может объяснить столь сильного повреждающего действия облучения. Так, при абсолютно смертельной для человека поглощенной дозе 6 Гр на все тело в 1 см³ живой ткани образуется $\sim 10^{15}$ ионов, т. е. один ионизированный атом приходится на 20 миллионов нормальных. Теплопередача при этом также ничтожна. Действительно теплоемкость воды, на 75 % составляющей ткани человека, составляет 4200 Дж·кг⁻¹·град⁻¹. Переданная энергия 6 Дж·кг⁻¹ повысит температуру тела на $1/4200 = 2,4 \cdot 10^{-4}$ °С.

Непрямое повреждающее действие излучения связано с образованием в организме свободных радикалов за счет радиолиза воды, содержащейся в

организме. При облучении воды образуются химически высокоактивные свободные радикалы водорода H^* , гидроксила OH^* и др. и повреждающее действие этого фактора связано с последующими цепными каталитическими реакциями (в основном, окислением этими радикалами молекул белка). По некоторым данным основное повреждающее действие радиации связано именно с образованием свободных радикалов, приводящих к химическим изменениям в организме и последующим функциональным расстройствам.

ПОСЛЕДСТВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОРГАНИЗМА.

Наиболее важные изменения в клетках определяются повреждением механизма деления созревающих половых клеток, повреждением механизма непрямого деления ядра клетки и её тела и хромосомного аппарата облученной клетки, блокированием процессов разрастания тканей организма (пролиферации), блокированием процессов обновления и дифференциации клеток. Самыми радиочувствительными являются наиболее интенсивно делящиеся клетки (стволовые и профилиративные) и клетки тканей постоянно обновляющихся органов (костный мозг, половые железы, селезенка и др.). Последствия облучения организма могут быть самыми различными в зависимости от дозы облучения и ряда других факторов. Для людей обычно выделяют следующие основные последствия облучения:

- соматические эффекты;
- соматико-стохастические эффекты;
- генетические эффекты.

Классификация эффектов и возможных последствий облучения человека показаны на рис. 2.

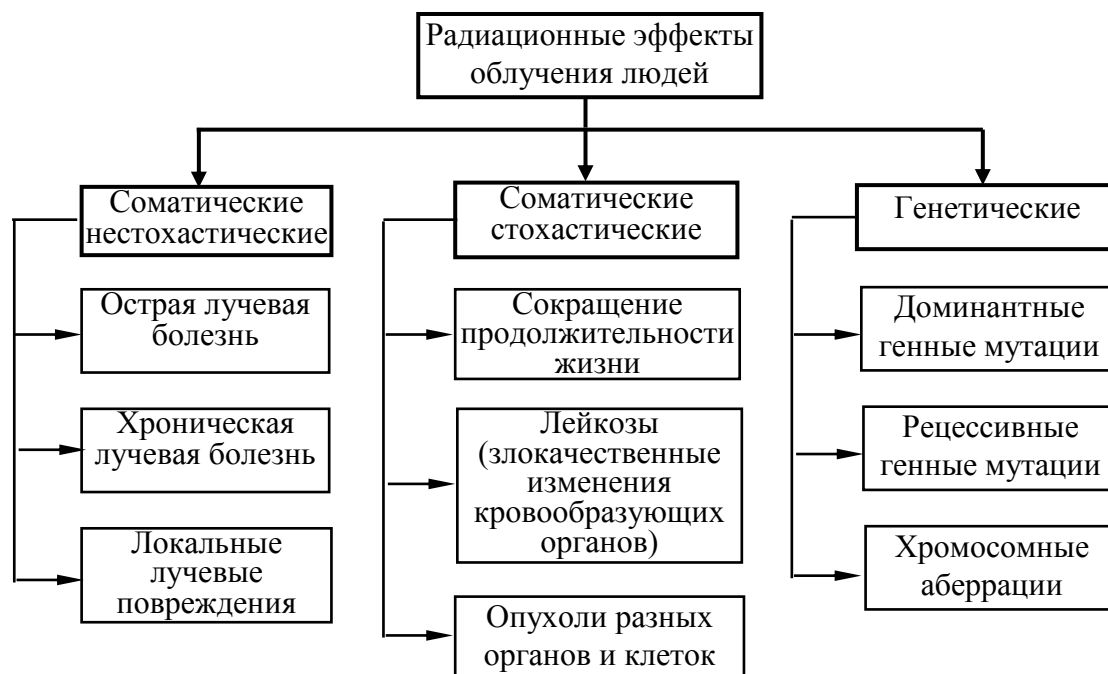


Рис. 2. Классификация последствий облучения человека.

Соматические (телесные) эффекты – это прижизненные последствия воздействия облучения на самого облученного, а не на его потомство. К соматическим эффектам относятся все формы лучевой болезни, локальные

лучевые повреждения (например, лучевой ожог кожи или язва, катаракта глаза, кратковременная или постоянная стерилизация и т.д.), лейкемия и злокачественные новообразования, подавление иммунитета и ряд сопутствующих болезней и т. д. Соматические эффекты облучения делят на стохастические (вероятностные) и нестохастические. Нестохастические соматические эффекты – это те последствия, для которых существует достаточно выраженный порог по дозе облучения, например, лучевая болезнь при облучении всего тела (если человек получит разовую дозу 2 Гр, то лучевая болезнь у него гарантированно будет, хотя и с разной степенью тяжести в зависимости от индивидуальных особенностей облученного). Нестохастические соматические эффекты появляются при достаточно высоких уровнях облучения всего тела или отдельных органов. Порог эффекта зависит от конкретного органа или ткани.

Стохастические соматические последствия облучения могут проявиться или нет при жизни человека, но вероятность их возникновения пропорциональна дозе облучения (например, раковые опухоли). К ним же относят и возможное сокращение продолжительности жизни человека. Эти эффекты могут проявляться с малой вероятностью и при облучении небольшими дозами, поэтому условно предполагают, что они порога не имеют.

Генетические эффекты (отклонения от нормы, уродства и т.д.) возникают в результате мутаций генов в половых клетках или других нарушений, влияющих на наследственность и имеют стохастическую природу. Основными стохастическими последствиями являются хромосомные aberrации (изменения числа и структуры генов) и доминантные и рецессивные мутации. Генетически значимые изменения в половых клетках могут проявляться сразу же после облучения (в первом поколении) – это следствие доминантных мутаций генов, а могут скрыто существовать в поколениях и проявляться в них случайным образом (например, во втором или третьем поколении) – это следствие рецессивных мутаций генов. Эти эффекты также не имеют порога. В частности, у людей, получающих малые дозы облучения, наблюдается повышенное содержание клеток крови с хромосомными нарушениями. Поскольку стохастические соматические и генетические эффекты облучения имеют длительный латентный период (в случае их проявления), измеряемый десятками лет, то они трудно обнаруживаемы. Выход обоих эффектов определяется только при рассмотрении больших групп облученных людей (сотен тысяч). Для оценки вероятности возникновения соматических стохастических эффектов облучения были использованы статистические данные по заболеваниям японцев, переживших взрывы атомных бомб в Хиросиме и Нагасаки и данные по последствиям рентгеноскопии. Сейчас исследуются данные по облучению населения в районе Киштымского следа (авария на предприятии “Маяк” в 1957 г.) и в районах, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате Чернобыльской аварии.

Соотношения между некоторыми эффектами и поглощенной дозой на все тело или отдельные органы и ткани (отмечены звездочкой) показаны на рис. 3. В результате длительных наблюдений было установлено, что длительное облучение взрослого человека дозами до 50 мЗв в год практически не вызывает никаких неблагоприятных соматических изменений, реально регистрируемых с помощью современных методов исследований. Разовая (полученная в течение достаточно короткого времени) доза в 0,25-0,3 Зв не приводит к стохастическим эффектам, хотя после её получения могут быть зарегистрированы

кратковременные изменения характеристик крови. Поэтому доза в 0,25 Зв принята за предельную годовую дозу планового облучения профессиональных работников при ликвидации аварий. При дозе в 1 Гр на все тело у отдельных людей могут проявляться симптомы лучевой болезни в легкой форме. Смертельной дозой для человека (без медицинского вмешательства) является доза в 6 Гр на все тело, хотя известны единичные случаи, когда человека удавалось спасти при дозах до 10 Гр. Смертность людей при средних дозах обусловлена, главным образом, практически полным подавлением иммунитета к инфекционным заболеваниям и кровоизлияниями во внутренние органы. Локальное облучение отдельных органов или участков тела вызывает заведомо более легкие общие последствия для организма, что является основанием применения лучевой терапии раковых опухолей, когда отдельные органы облучаются дозами 10-100 Гр.

Показанные на рис. 3 радиационные эффекты сильно зависят от темпа облучения, интервалов между циклами излучения и качеством излучения (линейных передач энергии). Временная зависимость тяжести последствий от временного распределения полученной дозы является следствием восстановительных процессов в человеческом организме (репарации повреждений). Последствия облучения также сильно зависят от возраста и пола. Особо чувствительны к радиации дети в возрасте до 10 лет. Например, даже небольшие дозы могут замедлить или даже остановить рост костей, т. е. привести к аномалиям в развитии скелета.

Как уже отмечалось, считается, что при хроническом облучении дозами 20-50 мЗв в год соматические последствия для отдельного человека не проявляются. Тем не менее, остается открытым вопрос о стохастических генетических последствиях такого облучения для популяции. Дело в том, что современные методы исследований позволяют даже на большом статистическом материале регистрировать лишь серьезные генетические последствия облучения. При этом есть основания полагать, что число не очень существенных дефектов значительно превышает число серьезных аномалий, так что наносимый ими суммарный эффект может быть для популяции даже вреднее, чем от серьезных эффектов. Поэтому исследования радиационных мутаций при малых дозах облучения являются принципиально важными.

ВИДЫ ОБЛУЧЕНИЯ.

Когда речь идет о возможных последствиях облучения, очень важен вопрос о том, какому типу облучения подвергся человек, внутреннему, внешнему или комбинированному? Известно, что проникающая способность сильно различается в зависимости от вида излучения. При внешнем облучении альфа-частицы от распада ядер с энергией до нескольких МэВ, например, не могут привести к значительному повреждению организма, несмотря на большие значения линейной передачи энергии. Однако, ситуация становится принципиально иной при попадании радионуклидов альфа-эмиттеров внутрь организма. Облучение внешним излучением длится, пока существует его источник. При попадании долгоживущих радионуклидов внутрь организма облучение становится хроническим. Мало того, отдельные органы (их называют критическими) могут избирательно накапливать те или иные радионуклиды. Так, до 30 % всего иода, содержащегося в теле, депонируется в щитовидной железе, масса которой составляет только 0,03 % массы тела. При содержании в потребляемом иоде его радиоактивных изотопов, последние накапливаются в

щитовидной железе и создают в ней значительную дозу. Все эти причины приводят к повышенной опасности внутреннего облучения человека. Радионуклиды, тем или иным путем попавшие в организм, называют **инкорпорированными радионуклидами**. К счастью у животных, в отличие от, например, растений, существуют цепи вывода отходов после переработки поступающих в организм веществ. Растения на протяжении всей жизни постоянно растут, трансформируя впитываемые ими вещества в свою массу. Животные, начиная с определенного момента своей жизни, перестают увеличивать массу, а потребляемые ими вещества расходуют на энергетику механических перемещений. Поэтому поступившие в растения радионуклиды в них только накапливаются, а в животном мире часть поступивших в организм радионуклидов будет из него выводиться. Таким образом, содержание того или иного радионуклида в организме человека определяется скоростью его поступления в организм, периодом полураспада радионуклида и скоростью его биологического выведения из организма, определяемой вовлеченностью данного вещества в метаболические процессы. В предположении, что выведение радионуклидов из органов происходит по экспоненциальному закону и характеризуется периодом полувыведения по аналогии с радиоактивным распадом, можно считать, что после поступления в организм определенного количества радионуклидов, их концентрации в организме будут снижаться пропорционально $\exp(-0,693 \cdot \lambda_{\text{эфф}} \cdot t)$, где $\lambda_{\text{эфф}} = \lambda_{\text{расп}} + \lambda_{\text{биол}} = T_{1/2} \cdot T_{\text{биол}} / (T_{1/2} + T_{\text{биол}})$. В таблице 4 приведены радиобиологические свойства некоторых радионуклидов при поступлении в организм человека.

Таблица 4.

Радио- нуклид	Критический орган	Периоды полурас- пада и полувыве- дения (сутки)		Доля радионуклида, попадаю- щая в рассматриваемый орган		
		$T_{1/2}$	$T_{\text{биол}}$	с пищей	дыхание	от общего количества
^3H	Все тело	$4,5 \cdot 10^3$	12	0,75	1,0	1,0
^{14}C	Все тело	$2 \cdot 10^6$	10	1,0	0,75	1,0
	Жировая ткань	$2 \cdot 10^6$	12	0,5	0,38	0,6
	Кости	$2 \cdot 10^6$	40	0,025	0,02	0,1
^{137}Cs	Все тело	$1,1 \cdot 10^4$	70	1,0	0,75	1,0
^{90}Sr	Кости	10^4	$1,8 \cdot 10^4$	0,09	0,12	0,99
^{235}U	Все тело	$2,6 \cdot 10^{11}$	100	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,25	1,0
	Кости	$2,6 \cdot 10^{11}$	300	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,028	0,85
	Почки	$2,6 \cdot 10^{11}$	15	$1,1 \cdot 10^{-5}$	0,028	0,065
^{239}Pu	Все тело	$8,9 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,25	1,0
	Кости	$8,9 \cdot 10^6$	$7,3 \cdot 10^4$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,2	0,9
	Печень	$8,9 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	0,038	0,07
	Почки	$8,9 \cdot 10^6$	$3,2 \cdot 10^4$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,01
^{144}Zr	Все тело	290	563	$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,25	1,0
	Кости	290	1500	$3,0 \cdot 10^{-5}$	0,075	0,38
	Печень	290	293	$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,06	0,19
^{210}Po	Все тело	138,4	30	0,06	0,28	1,0
	Почки	138,4	70	$4,0 \cdot 10^{-3}$	0,02	0,13
	Печень	138,4	40	0,01	0,05	0,22
	Кости	138,4	24	$6,0 \cdot 10^{-3}$	0,03	0,08

Для представителей животного мира существуют три главных пути попадания радионуклидов из окружающей среды в организм: пероральный путь (через органы пищеварения), ингаляционный путь (через органы дыхания) и резорбционный (через кожу). Органы пищеварения, дыхания и кожи в течение некоторого времени содержат поступившие радионуклиды (их называют поэтому входными депо), а затем часть радионуклидов разносится кровью и лимфой по внутренним органам и тканям. В каждом депо механизм попадания в кровь разный, важны химический состав вещества, его растворимость, состояние организма (в частности, недостаток или избыток в организме данного вещества) и т. д. По характеру распределения радионуклидов в организме отчетливо выделяются три группы, распределяющиеся относительно равномерно по всему телу (три первых нуклида в таблице 4 – ^3H , ^{14}C , ^{137}Cs и др.), концентрирующиеся в костях (^{90}Sr , ^{235}U , ^{239}Pu и др.) и печени (^{144}Ce , ^{210}Po и др.).

Из трех перечисленных путей попадания радионуклидов в организм наиболее опасен ингаляционный, т. к. за сутки взрослый человек вдыхает $\sim 20 \text{ м}^3$ воздуха, а воды с пищей потребляет в среднем 2,2 л. Третий, резорбционный путь, не имеет существенного значения по сравнению с первыми двумя (только редкие радионуклиды легко проникают через кожу – иод, оксид трития). За счет разветвленной системы легочных альвеол обильно насыщенных кровью, усвоение радионуклидов при дыхании, как правило, происходит интенсивнее, чем через желудок. Ингаляционное поступление сильно зависит от размера (дисперсности) аэрозольных частиц. Дело в том, что только некоторые радионуклиды могут существовать в газообразной форме, основная часть вдыхаемых радионуклидов содержится на пылинках или капельках воды (аэрозолях). Крупные частички (более 5 мкм) эффективно задерживаются носоглоткой и только 8 % из них достигают альвеол легких. При расчетах ингаляционных поступлений обычно полагают, что средний диаметр аэрозолей равен 1 мкм и что при дыхании 35 % аэрозолей выдыхается, 30 % задерживается носоглоткой, 25 % оседает в альвеолах легких, 8 % откладывается в трахеях.

В желудочно-кишечный тракт радионуклиды поступают с водой и пищей растительного или животного происхождения. Пищевые цепочки поступления радионуклидов включают в себя растения, накапливающие их из почвы с питательными веществами, животных, потребляющих эти растения в пищу и человека. Некоторые из радионуклидов эффективно переходят по пищевой цепи из почвы в организм человека, например, ^{90}Sr , сходный с калием по химическим свойствам, переходит в костную систему человека из окружающей среды с коэффициентом 7,6 %. Вместе с растительной пищей и водой поступает в организм и основное количество ^{137}Cs (эффективность пищевой цепи $\sim 3 \%$). Радиоактивные нуклиды иода поступают в организм через органы дыхания и с коровьим молоком. Очень эффективно поступление радионуклидов растворенных в питьевой воде. Те же ^{90}Sr и ^{137}Cs , являясь щелочными металлами, легко растворяются в воде, так же как и нуклид водорода тритий. Рыба очень хорошо аккумулирует растворенные в воде радионуклиды и концентрация радионуклидов в ней может быть в тысячи раз выше, чем в окружающей воде. Многие растения так же являются биоаккумуляторами радионуклидов.

В дальнейшем мы познакомимся с естественными и антропогенными источниками внешнего и внутреннего облучения человека и более детально рассмотрим его последствия.

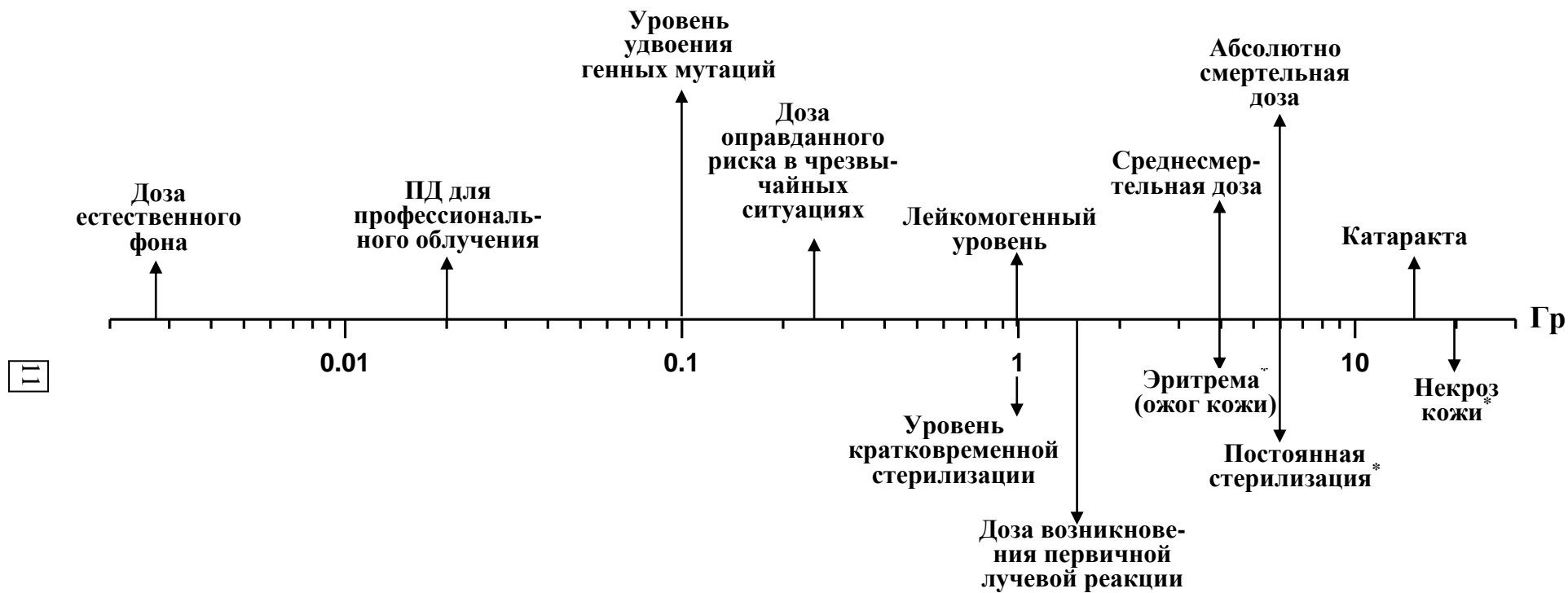


Рис. 3. Шкала наступления различных эффектов облучения человека.