

ОГЛАВЛЕНИЕ

Авторы	4
Список сокращений	5
Введение	6
Глава 1. Физические основы действия ионизирующих излучений на биологические объекты	7
Глава 2. Основные радиобиологические эффекты	13
Глава 3. Биологические эффекты и последствия облучения организма. . .	19
Глава 4. Основные виды радиационных поражений	22
Глава 5. Судебно-медицинская характеристика смертельных повреждений от действия ионизирующего излучения	29
Глава 6. Патологическая анатомия лучевой болезни	31
Глава 7. Патоморфология лучевой болезни	33
Глава 8. Диагностика лучевой болезни	42
Глава 9. Судебно-медицинская экспертиза трупа в случаях подозрения на насильственную смерть от действия лучевой травмы . . .	45
Глава 10. Особенности проведения судебно-медицинской экспертизы трупов лиц, погибших при радиационных авариях	50
Глава 11. Особенности изъятия и направления трупного материала на дополнительные лабораторные исследования при проведении судебно-медицинской экспертизы трупов лиц, погибших при радиационных авариях	54
Глава 12. Выводы судебно-медицинской экспертизы	58
Случай из практики	59
Тестовые задания	71
Эталоны ответов на тестовые задания	73
Ситуационные задачи	74
Эталоны ответов к ситуационным задачам	77
Приложение	78
Список литературы	88

АВТОРЫ

Алябьев Федор Валерьевич — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой судебной медицины ФГБОУ ВО «Красноярский государственный медицинский университет им. В.Ф. Войно-Ясенецкого» Минздрава России

Баринев Евгений Христофорович — доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры судебной медицины и медицинского права НОИ клинической медицины им. Н.А. Семашко ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, профессор кафедры судебной медицины ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы», член Международной коллегии ученых МАН Сан-Марино, действительный член Международной академии естествознания, действительный член Международной академии наук экологии, безопасности человека и природы, член-корреспондент Российской академии естествознания (РАЕ), заслуженный деятель науки и образования РАЕ, заслуженный врач РФ

Ромодановский Павел Олегович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой судебной медицины и медицинского права НОИ клинической медицины им. Н.А. Семашко ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, заслуженный врач РФ

Сундуков Дмитрий Вадимович — доктор медицинских наук, профессор, заведующий кафедрой судебной медицины ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов им. П. Лумумбы»

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ДГТ	— дистанционная γ-терапия
ДНК	— дезоксирибонуклеиновая кислота
ЛПИ	— линейная плотность ионизации
ЛПЭ	— линейная передача энергии
ОЛБ	— острая лучевая болезнь
РНК	— рибонуклеиновая кислота
УЗИ	— ультразвуковое исследование
ХЛБ	— хроническая лучевая болезнь

ВВЕДЕНИЕ

Проблема изучения механизмов возникновения лучевых поражений человека является актуальной для судебной медицины и экспертной практики. Прежде всего это обусловлено небольшим количеством случаев возникновения лучевых поражений, относительно редкими экспертизами трупов лиц, погибших вследствие данной патологии, и, соответственно, отсутствием экспертного опыта в проведении подобных экспертиз, а также в пробелах по диагностике и оценке особенностей танатогенеза при лучевых поражениях различной степени тяжести.

На протяжении жизни человек постоянно подвергается воздействию радиационных факторов. Это фоновая радиация, обусловленная космическим излучением и излучением природных радионуклидов, содержащихся в биосфере — почве, воде, а также техногенным влиянием на окружающую среду, вызываемым прежде всего испытаниями ядерного оружия и широким распространением технологий, использующих источники ионизирующего излучения.

Причинение вреда здоровью человека в условиях мирного времени возможно при чрезвычайных ситуациях (техногенных катастрофах, авариях) на объектах атомной промышленности, а также при случайном или криминальном использовании источников ионизирующего излучения.

Врачи различных специальностей должны иметь объективное представление о биологическом действии радиации на живой организм и развивающихся при этом патологических состояний.

Судебно-медицинские аспекты радиационной травмы освещены явно недостаточно. События на Чернобыльской атомной электростанции, на станции Фукусима в течение короткого промежутка времени после аварии унесли жизни большого количества человек. При лечении людей с онкопатологией используется лучевая терапия, которая при ненадлежащих режиме и дозе облучения приводит к еще более негативным последствиям, чем то заболевание, которое пытались вылечить.

Цель данного учебного пособия — формирование комплекса знаний о патологических состояниях, вызванных действием радиации.

Глава 1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

ВИДЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ионизирующее излучение — это поток частиц, электромагнитных квантов, взаимодействие которых с веществом приводит к ионизации и возбуждению атомов и молекул поглотителя. Способность ионизирующего излучения вызывать изменения в электрически нейтральных атомах и молекулах связывают с их высокой энергией, превышающей величину «потенциала ионизации», то есть 10–12 эВ.

В общем спектре электромагнитных волн такая энергия характерна для рентгеновского (Rö) γ -излучения радионуклидов. Перечисленные ионизирующие излучения относят к наиболее коротковолновым и высокочастотным электромагнитным излучениям (табл. 1.1).

К корпускулярным ионизирующим излучениям относят заряженные частицы: β -частицы (электроны и позитроны), ядра атомов водорода (протоны), дейтерия (дейтроны), трития (триконы), гелия (α -частицы), других химических элементов, полностью или частично лишенных электронных оболочек; не имеющие зарядов: нейтроны; нестабильные частицы: мезоны (π^+ , π^- , π^0).

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Все виды ионизирующих излучений прямо (заряженные частицы, нестабильные частицы) или косвенно (электромагнитные ионизирующие излучения, нейтроны), взаимодействуя с материей, вызывают ионизацию и возбуждение атомов вещества. Результат этого взаимодействия (эффект ионизирующей радиации) можно наблюдать по оставленному заряженной частицей ионизационному следу — *треку* частицы. При этом след косвенно ионизирующих излучений может проявиться при действии

Таблица 1.1. Спектр электромагнитных излучений

Излучение		Диапазон волн, м	Полоса частот, Гц	Энергия кванта, эВ	Природные источники, основные методы возбуждения
Тип	Вид				
Ионизирующее	γ-излучение	10^{-10} – 10^{-15} и менее	3×10^{18} – 3×10^{23} и более	$1,24 \times 10^4$ – $1,24 \times 10^9$ и более	Космические источники, вторичные космические лучи, взаимодействие ускоренных частиц с атомами, радиоактивный распад радионуклидов, ядерные реакции и космические процессы
	Рентгеновское	10^{-7} – 10^{-11}	3×10^{15} – 3×10^{19}	$12,40$ – $1,24 \times 10^5$	
Оптическое («свет»)	Ультрафиолетовое	4×10^{-7} – 10^{-8}	$7,5 \times 10^{14}$ – 3×10^{16}	$3,10$ – $1,24 \times 10^2$	Солнце и Луна, звезды и туманности, другие космические источники; земные объекты; ионизация молекул и атомов, излучение возбужденных атомов... любое нагретое тело
	Видимое	$7,6 \times 10^{-7}$ – 4×10^{-7}	$3,95 \times 10^{14}$ – $7,5 \times 10^{14}$	1,63–3,10	
	Инфракрасное	10^{-3} – $7,6 \times 10^{-7}$	3×10^{11} – $3,95 \times 10^{14}$	$1,24 \times 10^{-3}$ –1,63	
Радиочастотное	Децимиллиметровое	10^{-3} – 10^{-4}	3×10^{11} – 3×10^{12}	$1,24 \times 10^{-3}$ – $1,24 \times 10^{-2}$	Солнце и Луна, планеты, звезды и другие космические объекты; ряды молний, полярные сияния; любые электрические воздействия, живые организмы и т.д.
	Высокочастотное	10^2 – 10^{-3}	3×10^6 – 3×10^{11}	$1,24 \times 10^{-8}$ – $1,24 \times 10^{-3}$	
	Среднечастотное	10^3 – 10^2	3×10^5 – 3×10^6	$1,24 \times 10^{-9}$ – $1,24 \times 10^{-8}$	
	Низкочастотное	10^8 – 10^3	3 – 3×10^6	$1,24 \times 10^{-14}$ – $1,24 \times 10^{-9}$	

образующихся вторичных частиц (фотоэлектронов, электронов отдачи, протонов отдачи).

Возникающие изменения качественно не зависят от вида излучения. Однако при действии ионизирующего излучения на биологические объекты в одной и той же *дозе* (одно и то же количество энергии, поглощенной единицей массы вещества) возникают количественно разные биологические эффекты. Это связывают с различным пространственным распределением энергии ионизирующего излучения в облучаемом объеме. Величины, определяющие действие ионизирующих излучений на вещество, связывают с *линейной передачей энергии* (ЛПЭ) и *линейной плотностью ионизации* (ЛПИ). ЛПЭ — величина средних потерь энергии на единицу пути заряженной частицы в пределах объема ее трека. ЛПЭ характеризует распределение энергии, переданной веществу, вдоль трека частицы (**рис. 1.1**).

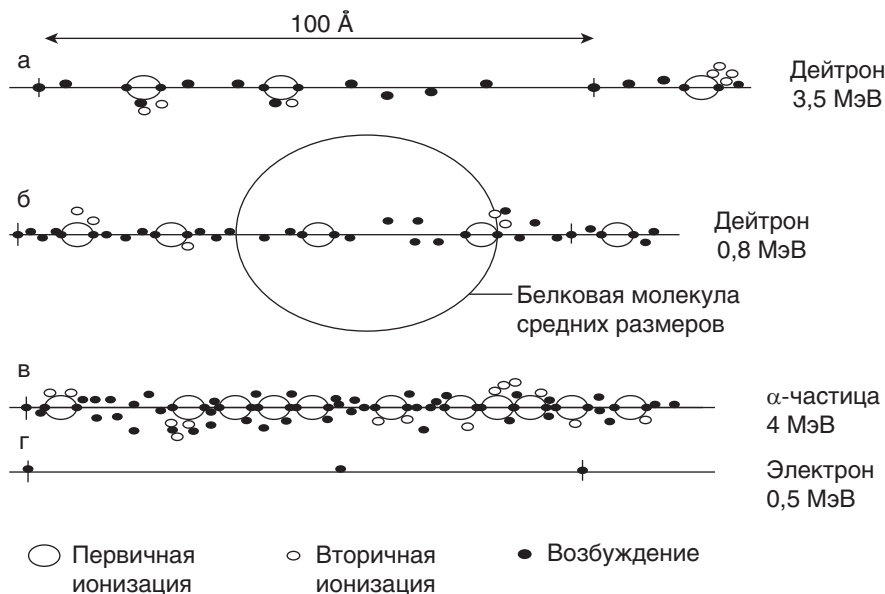


Рис. 1.1. Треки различных заряженных частиц в зависимости от линейной передачи энергии

Чем выше значение ЛПЭ, тем больше энергии теряет частица на единицу пути, тем плотнее распределены создаваемые ею ионы вдоль трека. В зависимости от величины ЛПЭ все ионизирующие излучения делят на редко- и плотноионизирующие. К *редкоионизирующим* относят β -, γ -, $R\ddot{o}$ -лучи. *Плотноионизирующие* виды излучения — протоны, α -частицы, другие тяжелые частицы и нейтроны.

Зная ЛПЭ, легко определить ЛПИ — среднее число ионов, образованных на единицу пути частицы. ЛПИ — показатель, количественно характеризующий *ионизирующую способность* излучения. Справочные значения ЛПИ указаны для сухого воздуха на 1 см пути частицы. Например, для α -частицы — 40 000 пар ионов, для протонов — 10 000, β -частицы — 400, фотонов электромагнитного излучения — 5. В тканях человека ЛПИ примерно в 800 раз больше, чем в воздухе: для α -частицы $\rightarrow$ 3200 пар ионов на 1 мкм. Различия в линейной плотности ионизации лежат в основе различий в *относительной биологической эффективности* разных видов излучения.

Другой важной характеристикой ионизирующих излучений является их *проникающая способность*. Кроме того, механизмы радиационного поражения во многом определяются путями (внешнее и/или внутреннее облучение), посредством которых излучение достигает и воздействует на ткани организма. Электрически нейтральные виды излучения характеризуются высокой проникающей способностью. Электромагнитные ионизирующие излучения «проходят» тело человека насквозь. Высокая проникающая способность характерна для нейтронов. Излучения с такой проникающей способностью представляют опасность при внешнем облучении и требуют соответствующих мер защиты (*защита экраном, временем, расстоянием*). Сравнительно высокой проникающей способностью характеризуются β -частицы, которые при аппликации на кожные покровы и слизистые оболочки способны вызывать местные лучевые поражения. Тяжелые заряженные частицы (начиная с протонов) обладают очень низкой проникающей способностью. Но они крайне опасны при попадании внутрь организма, так как вызывают высокую ионизацию атомов и молекул. Внутреннее облучение становится возможным при попадании в организм радионуклидов через легкие, алиментарно, через поврежденную и неповрежденную (путем абсорбции) кожу. В организме радиоактивные (нестабильные) изотопы распадаются с выделением энергии в виде излучения.

ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В РАДИОБИОЛОГИИ

Для оценки эффективности действия ионизирующих излучений принято учитывать следующие физические величины: *активность нуклида* в радиоактивном источнике, *экспозиционную дозу* (дозу излучения) или поглощение ионизирующего излучения в воздухе и *поглощенную дозу* (дозу облучения), при поглощении энергии излучения в облучаемом объекте.

С целью радиационной безопасности введена величина *эквивалентная доза* облучения (учитывает вид поглощенного биообъектом излучения) (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Основные физические величины, используемые в радиационной биологии, и их единицы

Физическая величина	Наименование единицы и ее обозначение		Соотношение между единицами
	Внесистемное	Системное (СИ)	
Активность нуклида	Ки	Бк	1 Ки = $3,7 \times 10^{10}$ Бк 1 Бк = $2,7 \times 10^{-11}$ Ки
Экспозиционная доза излучения	Р	Кл/кг	1 Р = $2,58 \times 10^{-4}$ Кл/кг 1 Кл/кг = 3876 Р
Мощность экспозиционной дозы	Р/с	А/кг	1 Р/с = $2,58 \times 10^{-4}$ А/кг 1 Кл/кг = 3876 Р/с
Поглощенная доза	рад	Гр	1 рад = 1×10^{-2} Гр 1 Гр = 100 рад
Мощность поглощенной дозы	рад/с	Гр/с	1 рад/с = 1×10^{-2} Гр/с 1 Гр/с = 100 рад/с
Эквивалентная доза	бэр	Зв	1 бэр = 1×10^{-2} Зв 1 Зв = 100 бэр
Мощность эквивалентной дозы	бэр/с	Зв/с	1 бэр/с = 1×10^{-2} Зв/с 1 Зв/с = 100 бэр/с

МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Механизм *первичного* действия ионизирующих излучений на биологические ткани включает несколько стадий: *физическую, физико-химическую и химическую*. Продолжительность процессов, протекающих на этих стадиях действия излучений, составляет тысячные доли секунды. Процессы, характеризующие физическую стадию, включают поглощение энергии и образование ионизированных и возбужденных атомов и молекул. На физико-химической стадии идет перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между соседними молекулами с последующим образованием свободных радикалов. Химической стадии свойственны различные реакции между образовавшимися свободными радикалами, а также свободными радикалами и интактными молекулами. В результате чего

образуется широкий спектр молекул с измененной структурой и функциональными свойствами. Это, в свою очередь, не может не отразиться на организации биологической материи, развитии следующей, *биологической*, стадии в механизме поражающего действия ионизирующего излучения.

Множественные межатомные перестройки в биомолекуле могут образовываться, во-первых, при непосредственном выделении энергии в молекулу, во-вторых, при атаке ее водными радикалами, образующимися при ионизации окружающих ее молекул воды. В первом случае речь идет о *прямом действии радиации*, во втором — о *непрямом*, обусловленном химическим взаимодействием с продуктами радиолиза воды. При взаимодействии первичных продуктов радиолиза воды с кислородом образуются новые продукты (активные формы кислорода: OH , O_2 , HO_2 , H_2O_2 ; активные соединения азота: пероксинитрит и др.), часто с большей реакционной способностью. Повышенная эффективность (поражающее действие) излучения в присутствии кислорода известна как *кислородный эффект*.

Облучение, с одной стороны, индуцирует в биологических объектах появление изменений в структуре биополимеров, с другой — активных радикалов и молекулярных продуктов, в частности перекисей, способных вторично изменять структуру биологически важных молекул. Активные формы кислорода могут реагировать практически с любыми органическими соединениями, входящими в состав биологических объектов, приводя к появлению в структуре биополимеров органических гидроперекисей, перекисей и эпоксидов. Оксидативная деградация биологических мембран и дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) рассматривается как результат действия различных водо- и жирорастворимых прооксидантов.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Прямое и не прямое действие излучения на биологические молекулы приводит к тому, что в организме отмечается много разных биологических эффектов, наблюдаемых после облучения (**рис. 2.1**). Количество и качество биологических повреждений зависят от дозы и мощности дозы облучения, а также распределения дозы излучения в тканях.

При облучении биологического объекта ионизирующая радиация поглощается не избирательно, а любыми молекулами. Множественная ионизация молекул может, в свою очередь, привести к разнообразным деструктивным и функциональным изменениям в клетке. Эти нарушения ведут к утрате клеткой способности делиться и, следовательно, к ее гибели или запускают *радиационно-индуцированный мутагенез* при неполном восстановлении клетки.

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ И КЛЕТОЧНЫЕ РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Пострадиационные нарушения клеточного деления связывают с повреждением *«критической структуры»*, основной мишени при действии ионизирующего излучения на клетку — макромолекулы ДНК. Деструкция уникальных структур, обеспечивающих передачу и хранение наследственной информации, а также согласованность прохождения сложнейших ферментативных реакций наиболее значимы для клетки.

Повреждения молекул ДНК не компенсируются за счет оставшихся не пострадавших макромолекул, как это может быть при деструкции молекул белка, полисахаридов и др. При этом в делящихся клетках значимость повреждения ДНК для жизнедеятельности клетки будет максимальной.

Количество повреждений ДНК, возникающих в результате облучения, достаточно велико. Так, например, при облучении в дозе 1 Гр в каждой клетке возникает около тысячи одиночных и до двухсот двойных разрывов нитей ДНК. Каждое из этих событий могло бы иметь фатальные

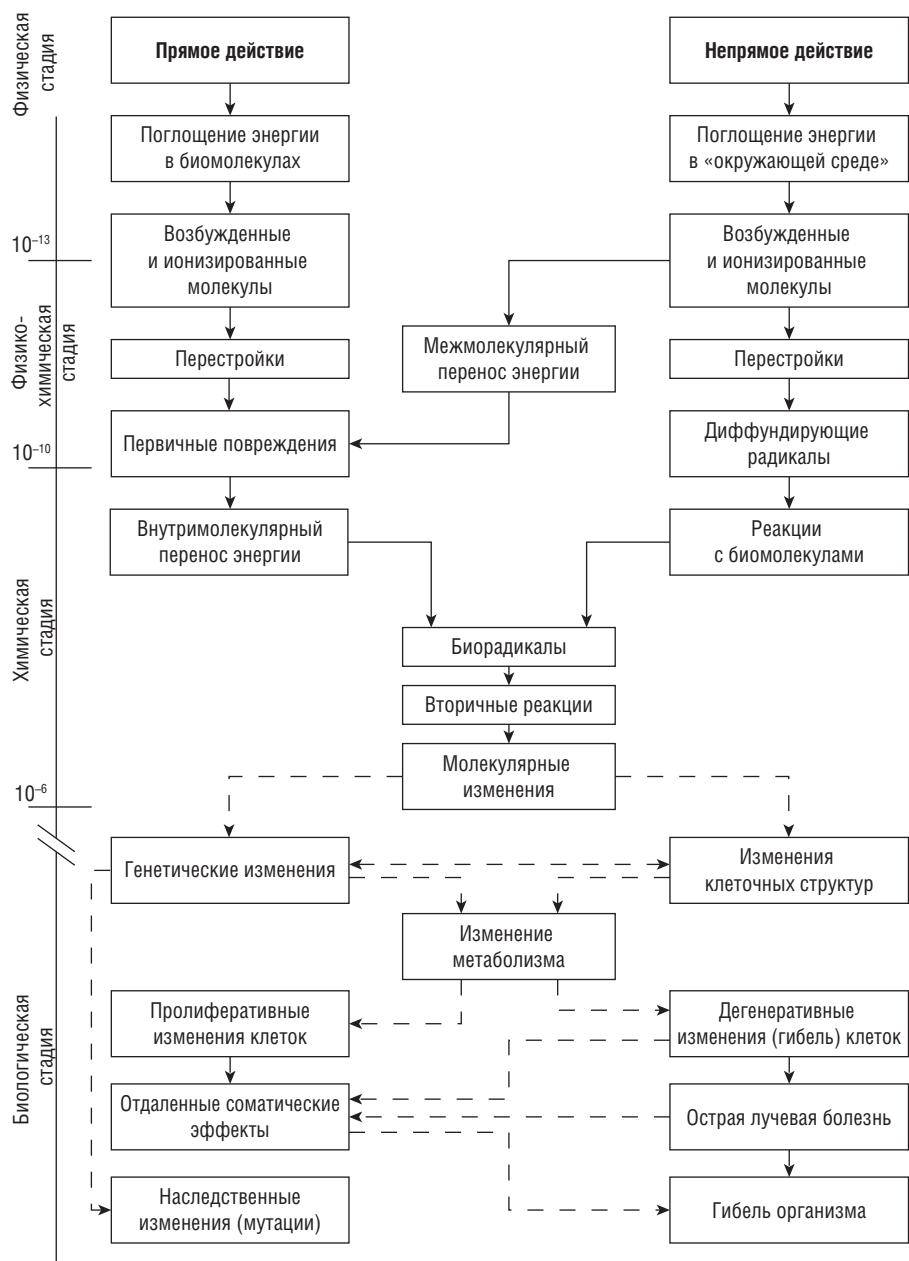


Рис. 2.1. Стадии действия излучений (Г. Дертингер, Х. Юнг, 1973)