

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

Контрольные вопросы:

1. Ионизирующие излучения, применяемые в медицине, физическая характеристика.
2. Проникающая и ионизирующая способности излучения.
3. Строение атома, понятие об изотопах, способы получения изотопов.
4. Радиоактивность, виды радиоактивного распада, закон ядерного смещения.
5. Виды взаимодействия излучения с веществом.
6. Рентгеновские лучи и тормозное излучение высоких энергий. Механизм образования, характеристика и область применения.
7.  $\alpha$  – лучи и их свойства, область применения.
8.  $\beta$  – лучи и их свойства, область применения.
9.  $\gamma$  – лучи и их свойства, область применения.
10. Дозиметрия ионизирующих излучений.
11. Ионизационный метод дозиметрии.
12. Фотохимический метод дозиметрии
13. Сцинтиляционный метод дозиметрии.
14. Единицы экспозиционной дозы. Мощность дозы.
15. Единицы поглощённой дозы.
16. Единицы активности радиоактивных веществ.

В медицине применяются различные виды ионизирующих излучений. Излучение называется ионизирующим, если при взаимодействии с веществом в последнем появляются электрические заряды разных знаков, то есть ионов. Процесс ионизации заключается в отрыве одного или нескольких электронов от атомов вещества. Понятно, что на отрыв электрона от атома вещества требуется энергия, и этой энергией должно обладать излучение.

По характеру ионизирующее излучение можно разделить на два класса: на фотонное, то есть, такое которое представляет из себя только электромагнитные колебания, и корпускулярное, то есть представляет из себя поток частиц (рис1).



Рисунок 1. Виды ионизирующего излучения.

Рентгеновское излучение является электромагнитным, то есть фотонным. Энергия излучения 10-300 кэВ. Источником излучения является вакуумная трубка, в которой электроны разгоняются между анодом и катодом, и при торможении на аноде выделяют накопленную энергию в виде кванта излучения. Излучение, в свою очередь характеризуется энергией фотонов, которое измеряется в электроновольтах

(эВ). Различают два вида излучения: характеристическое, то есть такое которое зависит только от материала анода и имеет дискретный характер, и тормозное, имеющий непрерывный спектр.

Распределение поглощённых доз рентгеновского излучения в среде определяется двумя главными эффектами: фотоэлектрическим и комптоновским рассеиванием. В основе фотоэлектрического эффекта лежит ионизация вещества за счёт выбивания электрона  $e$  из атома фотоном  $P\gamma$  энергия которого при этом полностью поглощается (рис 2). При возвращении электрона в атом происходит выделение энергии в виде фотона, но так как уровни энергии в атоме на орбитах жестко определены, то и спектр излучения будет носить дискретный характер.

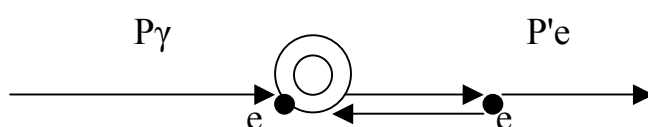


Рисунок 2. Схема фотоэффекта.

Комптоновский эффект (рассеивание) выглядит как упругое столкновение налетающего фотона и неподвижного электрона (рис 3).

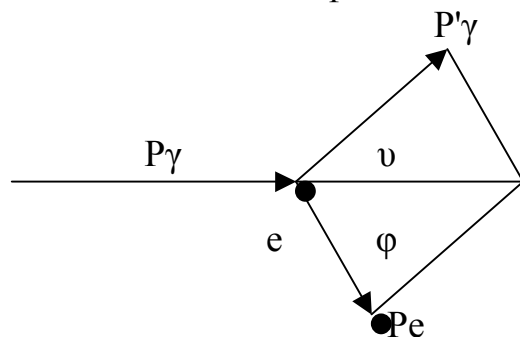


Рисунок 3. Схема комптоновского рассеивания

Фотон излучения с импульсом  $P\gamma$  сталкивается с неподвижным электроном  $e$ , после чего имеет импульс  $P'\gamma$  и изменяет направление под углом  $\nu$ , а электрон — с импульсом  $P'e$  движется под углом  $\phi$  по направлению движения падающего электрона. Фотон  $P'\gamma$  может снова взаимодействовать с веществом но, при этом изменит энергию на меньшую, что и обуславливает непрерывность спектра излучения. Проникающая способность рентгеновского излучения относительно невелика, поэтому применяется для облучения поверхностно расположенных образований.

Тормозное излучение отличается от рентгеновского только энергией квантов (энергия более 1,02 МэВ). Электроны тормозят непосредственно в тканях. Пучок электронов получают при помощи линейного или циклического ускорителя (бетатроны, синхротроны, микротроны). Для тормозного излучения характерно наличие максимума дозы на глубине, что значительно уменьшает повреждение кожи. При увеличении дозы этот пик сдвигается в глубину. В основе получения пика лежит опять-таки комптоновский эффект.

Гамма- излучение ( $\gamma$ ) - тоже является фотонным и относится к электромагнитным, от рентгеновского отличается по происхождению и энергии фотона.  $\gamma$  -излучение получают при распаде изотопов радиоактивного элемента. Фотоны  $\gamma$  – излучения несут большую энергию и поэтому обладают большой проникающей способностью в ткани, что обуславливает его применение для облучения глубоко расположенных органов и объектов. Оно может применяться как для дистанционного облучения, так и для внутритканевого облучения.

Бета- излучение ( $\beta$ ) корпускулярное излучение состоящее из электронов, движущимися с большими скоростями. Получают за счёт распада изотопов фосфора – 32, иттрия – 90 или золота – 198. Учитывая, что это излучение обладает небольшой проникающей, но высокой ионизационной способностью, его целесообразнее применять для внутритканевой терапии.

Тяжёлые заряженные частицы –  $\alpha$ -частицы, протоны, дейтроны получают при распаде изотопов и с помощью ускорителей. Как правило, их проникающая способность невелика, поэтому в чистом виде они не используются. Но эти частицы можно разогнать в ускорителе, и тогда их дозные распределения становятся для облучения глубоко расположенных образований. Появляется так называемый пик Брэгга который прямо пропорционален энергии частицы.

Нейтроны применяются в лучевой терапии редко, чаще их источником служит какой либо вид ускорителя путём бомбардировки бериллиевой мишени электронами. Нейтроны захватываются ядрами лёгких элементов (водорода и азота) с образованием нестойких изотопов. Образовавшиеся изотопы, в свою очередь, распадаются с образованием заряженных ионов.

Проникающая и ионизирующая способность излучения находятся в тесной, обратной зависимости. То есть чем выше ионизирующая способность излучения, то есть способность взаимодействовать с веществом, тем ниже проникающая. Так, например, нейтрино практически не взаимодействует с веществом, что даёт ему возможность путешествовать в пространстве миллиарды лет не встречая преград, проходя насквозь атомы, звёзды и планеты.

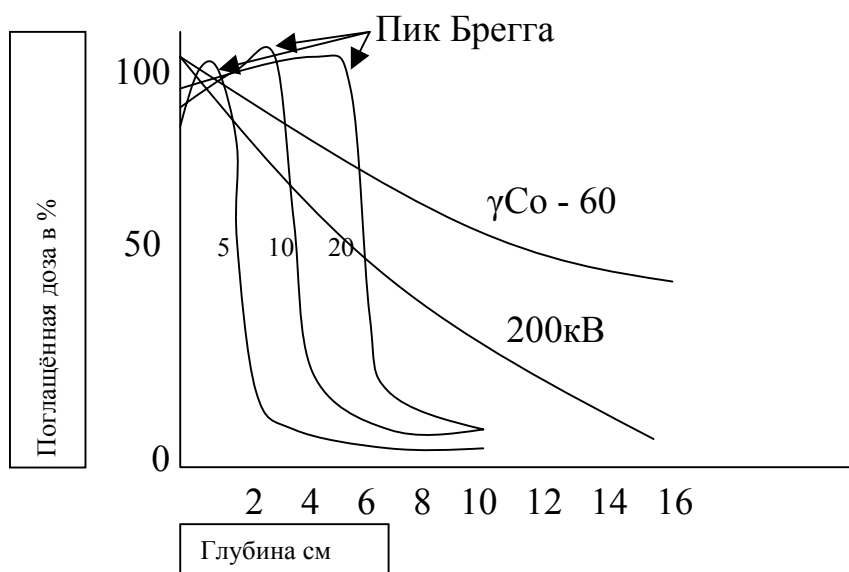
С другой стороны  $\alpha$  – излучение хотя имеет небольшой пробег в тканях ( табл. 1) но обладает исключительно большой ионизирующей способностью. Так же можно охарактеризовать  $\gamma$  и  $\beta$  излучение. Видно, что эта закономерность сохраняется.

Таблица 1.

Характеристика некоторых видов излучения.

Вид излучения	Скорость км/сек	Энергия до (МэВ)	Длина пробега		Плотность ионизации
			воздух	ткани	
$\alpha$	15-20	9	5-7см	50-70мк	3000-4000 пар на 1 мк.
$\beta$	87-258	3	20м	До 10 мм	50-70 пар на 1 мк.
$\gamma$	300	3	600м	До 20-30 см	3000 пар на всем пути.

Однако ионизирующая способность излучения зависит не только от характеристики самого излучения, но и от его энергии. Так электроны (собственно то же  $\beta$  – излучение ) могут обладать огромной проникающей возможностью, если их разогнать в ускорителе. В таком случае они проявляют свои ионизационные способности только снизив скорость и энергию в тканях. С этой способностью связано наличие пика Брегга, то есть максимума ионизации в тканях, который сдвигается в глубину с ростом энергии частиц (рис 4). На рисунке изображена ионизирующая способность электронов с энергией 5, 10 и 20 МэВ и, для сравнения  $\gamma$  – излучения изотопа Со-60 и рентгеновского излучения, получаемого на трубке при напряжении 200 кВ.



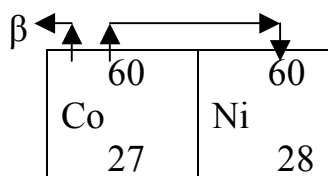
Ионизирующие излучения в большинстве получают с помощью радиоактивных элементов. Радиоактивность это свойство атомов к самопроизвольному распаду с испусканием излучения в виде частиц и квантов излучения.

Для того, чтобы понять природу радиоактивности, необходимо вспомнить строение атома. Атом любого вещества состоит из ядра и оболочки из электронов. Ядро в свою очередь, состоит нуклонов (протонов (положительно заряженных частиц) и нейтронов (частиц без заряда)). Как выяснилось, масса ядра всегда меньше, чем простая сумма масс всех входящих в него протонов и нейтронов. Недостающая масса (дефект массы) превратилась в энергию связи, и наоборот, при освобождении нуклонов требуется какая то энергия. От водорода для многонуклонных ядер энергия связи постепенно растёт. Энергия связи обладает насыщением, когда она максимальная. Это условие выполняется для железа ( $\text{Fe} - 56$ ). После железа с увеличением массы ядра энергия связи уменьшается, делая ядро атома нестабильным. При распаде ядра выделяются элементарные частицы (если они меньше ядра гелия) и гамма излучение. Гамма излучение несёт в себе ту разность энергии связи начального и конечных продуктов распада ядра.

В начале прошлого века было выявлено, что большинство элементов в природе находится в виде смеси атомов с различным весом, но одинаковым зарядом ядра. Первый масс- спектрограф был сконструирован Д. Томсоном, а детальное исследование изотопов предпринял его ученик – Ф. Астон. Оказалось, что любой химический элемент однозначно определяется его атомным номером  $Z$  – числом протонов в ядре. Но число нейтронов  $N$  может быть различным. Атомы элемента, различающиеся только числом нейтронов называют изотопами. Атомная масса соответствует сумме нуклонов  $A = Z + N$  (без учёта энергии связи). При одинаковой химической активности, могут сильно различаться физические характеристики, и в первую очередь устойчивость. Было выявлено, что существуют стабильные и нестабильные изотопы для каждого элемента. Существует три вида распада ядра.  $\alpha$  – распад ( испускание ядра гелия состоящего из двух протонов и двух нейтронов) из ядра с исходными  $A$  и  $Z$  получаем ядро с характеристиками  $A-4$  и  $Z-2$ .



При  $\beta$  -распаде ( испускании электрона) один из нейтронов превращается в протон а ядро с  $A$  и  $Z$  - в ядро с  $Z + 1$  и тем –же  $A$ .



При испускании  $\gamma$  – кванта ядро теряет энергию в виде фотона но остаётся с теми же  $A$  и  $Z$ . Полное число изотопов сегодня превышает 2000.

Таким образом при  $\alpha$  –распаде образуется элемент, расположенный в таблице Менделеева на две клетки левее исходного, а при  $\beta$  –распаде - на одну клетку правее. ( Правило смещения)

Радиоактивные изотопы получают двумя путями: это естественные изотопы элементов такие как уран – 238 радий –226. Период полураспада урана –238 составляет 4.5 млрд лет, что сопоставимо с возрастом Земли 4,7 млрд. лет. То есть на Земле найти в естественных условиях трансурановые элементы невозможно (то есть их период полураспада значительно короче возраста Земли). Такие изотопы можно получить искусственно, подвергнув бомбардировке какой- то элемент в реакторе частицами. Изотопы, наиболее часто использующиеся в лучевой терапии приведены ниже в таблице (табл. 2).

Таблица 2.

Радиоактивные изотопы, применяемых в медицине.

Название изотопа	Период полураспада	Энергия МэВ	
		$\beta$	$\gamma$
Цезий –137	30 лет	0,51	0,66
Кобальт –60	5,27 года	0,31	1,17-1,33
Золото – 138	2,7 дня	0,96	0,41
Иридий – 192	74,4 дня	0,57	0,30-0,61
Радий –226	1622 года	3,17	0,18-2,20
Радон – 222	3,8 года	3,17	0,18-2,20
Стронций –90	28 лет	0,2	
Тантал – 182	11,5 дней		0,07-1,2
Иттрий – 90	64 часа	0,93	
Йод –131	8 дней	0,19	0,284
Фосфор – 32	14,3 дня	0,69	
Стронций – 89	50,5 дней	0,58	

Для того, чтобы правильно планировать проведение лучевой терапии у больных, необходимо знать такие характеристики как мощность

излучения, поглощённую дозу, распределение излучения в тканях и т.д. Вопросами, касающимися клинического использования ионизирующих излучений занимается раздел медицинской физики, называемый клинической дозиметрией.

Для того чтобы измерять излучение и биологические эффекты, связанные с облучением необходимо ввести какие –то единицы (табл 3).

Таблица 3.  
Единицы измерения в радиологии

Физическая величина	Единица		Соотношение между внесистемной и СИ
	внесистемная	СИ	
Активность изотопа в источнике	Кюри (Ci, Ки)	Беккерель (Bq, Бк)	$1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$
Экспозиционная доза излучения	Рентген (R, Р)	Кулон на килограмм (C/kg, Кл/кг)	$1 \text{ Р} = 0,000258 \text{ Кл/кг}$
Поглощённая доза излучения	Рад (rad, рад)	Грей (Gy, Гр)	$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Гр}$
Эквивалентная доза излучения	бэр (rem, бэр)	Джоуль на килограмм (J/kg, Дж/кг)	$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Дж/кг}$
Мощность экспозиционной дозы	Рентген в секунду (R/s, Р/с)	Ампер на килограмм	$1 \text{ Р/с} = 0,000258 \text{ А/кг}$
Мощность поглощённой дозы	Рад в секунду (rad/s, рад/с)	Грей в секунду (Gy/s, Гр/с)	$1 \text{ рад/с} = 0,01 \text{ Гр/с}$
Мощность эквивалентной дозы	Бэр в секунду (rem/s, бэр/с)	Ватт на килограмм (W/kg, Вт/кг)	$1 \text{ бэр/с} = 0,01 \text{ Вт/кг}$
Интегральная доза излучения	Рад-грамм (radxg, рад/г)	Грей/килограмм (Gy/kg, Гр/кг)	$1 \text{ рад} \times \text{кг} = 0,00001 \text{ Гр/кг}$

Понятно, что основной единицей является характеристика источника – активность радиоактивного вещества. Единицей такой активности является 1 беккерель (Бк), то есть активность источника в котором в течении секунды происходит один акт распада. Ранее использовалась единица, являющаяся производной от активности 1 грамма радия – кюри.



Для фотонных излучений с энергией менее 3 МэВ применяется такое понятие как экспозиционная доза. Экспозиционная доза  $X$  – энергия фотонного излучения, затраченная на ионизацию массы сухого воздуха. В качестве единицы применяется эквивалент электрических зарядов в 1 кулон созданный в объёме воздуха с массой в 1 Кг.

Мощность экспозиционной дозы это экспозиционная доза за какой-то промежуток времени. Измеряется в Амперах/кг.

Поглощённая доза ионизирующего излучения служит для количественной оценки энергии излучения, переданного объекту. Доза излучения это поглощённая энергия излучения в единице массы вещества. Единицей является грей (Гр) = 1 дж/кг. Поглощённая доза, отнесённая к единице времени является мощностью поглощённой дозы. Единица измерения является 1 Гр/с.

Эквивалентная доза это произведение поглощённой дозы на средний коэффициент качества  $Q$  в данной точке в зависимости от линейной потери энергии. Внесистемной единицей измерения является 1 бэр, в системе СИ - Вт/кг. Собственно, это биологическая характеристика самой облучаемой ткани.

Интегральная доза –это доза излучения поглощённая в определённой массе вещества. Единица измерения 1Гр/кг.

Кроме физической и биологической характеристики ионизирующих излучений, то обстоятельство, что оно используется для лечения злокачественных новообразований выделяют некоторые специфические характеристики, которые включаются в клиническую дозиметрию. Сам термин «клиническое дозирование» включает в себя все факторы, связанные с подведением дозы излучения к специфической точке или объёму в теле больного.

Другим фактором, обуславливающим дозу облучения является толерантная доза облучаемой ткани и дозы излучения, необходимые для достижения местного излечения опухоли.

Толерантной (переносимой) дозой обычно называют дозу при которой частота поздних осложнений не превышает 5%. Толерантная доза зависит от режима облучения и объёма (площади) облучаемых тканей. Для определения толерантного уровня при различных условиях фракционирования было разработано несколько способов оценки. Наиболее приемлемым в настоящее время является эмпирический показатель время-фракция-доза ВДФ (TDF) предложенный Orton C. и Ellis F. В результате имеется возможность определить фактор ВДФ в виде отвлечённой цифры при различных курсах и фракционировании.

$$\text{ВДФ} = N \times d^{1.538 \left( \frac{T}{N} \right)^{-0.169} \times 10^{-3}}$$

Где N - количество фракций (сеансов) облучения, T- длительность курса облучения, включая первый и последний дни, d - разовая доза. Показатели для некоторых тканей и органов приведены в таблице 4. Как видно из приведённых данных увеличение объёма облучения ведёт к увеличению ВДФ и снижению толерантности облучаемых тканей.

Таблица 4.

Толерантная доза, дающая 5% вероятность значительных повреждений здоровых тканей

Тип тканей	Объём	Уровни доз (Гр в течении X недель)	ВДФ (TDF)
Соединительная ткань	< 500 см <sup>3</sup>	63/6	107
	> 500 см <sup>3</sup>	60/6	100
Печень	Весь орган	30/3	50
	< 50% органа	40/4	66
Почка	Весь орган	20/2	33
	< 30% органа	60/6	100
Лёгкое	Весь орган	30/3	50
	< 100 см <sup>3</sup>	60/6	100
Кожа	< 2 см (диаметр)	90/3	125
	< 10 см (диаметр)	55/3	92
	< 30 см (диаметр)	45/3	92
Спинной мозг	5 см (длина)	45/3	92
	< 10 см (длина)	50/5	82
	< 10 см (длина)	45/4,5	75
Кишечник	< 100 см <sup>3</sup>	45/4,5	75
	Весь живот	30/3	50

Поскольку мы пытаемся излечить больного толерантными дозами облучения, необходимо реально оценить риск лучевых осложнений. Принципиально можно добиться излечения практически любой опухоли, однако, осложнения возникающие при

этом ставят под сомнение необходимость такого лечения. Поэтому Приходится ориентироваться на дозы которые можно реально подвести к облучаемому органу. Ориентиром служит доза обеспечивающая 90% местное излечение (таблица 5).

При анализе таблицы видно, что для излечения с 90% вероятностью (то есть одного и того же эффекта) одного и того же заболевания в одной стадии возможно с помощью разных доз, но подведённых в различных режимах. Так, для рака T2-3 возможен одинаковый эффект при суммарной дозе в 70 Гр за 7 недель по 5 сеансов в неделю, и 58 Гр, подведённых за 4 недели по 5 сеансов в неделю.

Таблица 5.

Дозы необходимые для достижения 90% вероятности местного излечения опухоли

Тип опухоли	Стадия или объём	Уровни доз (Гр в течении X недель)	ВДФ(TDF)
Аденокарцинома или плоскоклеточный рак	N0 (субклинический)	50 /5	82
	T1	50/4	93
	Ранний T2	52/4 60/6	100
	T2-T3 N1	70/7 66/6 58/4	115
Лимфогрануломатоз	< 100 см <sup>3</sup>	30/3	50
	> 100 см <sup>3</sup>	40/4	66
Семинома	N1-3	30/3	60
Лимфосакома	< 100 см <sup>3</sup>	30/3	50
Саркомы	T1-2	70/6	>125

При анализе таблицы видно, что для излечения с 90% вероятностью (то есть одного и того же эффекта) одного и того же заболевания в одной стадии возможно с помощью разных доз, но подведённых в различных режимах. Так, для рака T2-3 возможен одинаковый эффект при суммарной дозе в 70 Гр за 7 недель по 5 сеансов в неделю, и 58 Гр, подведённых за 4 недели по 5 сеансов в неделю.

Для измерения параметров ионизирующего излучения используют методы, основанные на регистрации различных эффектов взаимодействия излучения с веществом.

Ионизационный метод основан на эффекте ионизации газовой среды и регистрации возникающих электрических зарядов, то есть тока в газовой

среде вследствие ионизации. Регистрируя величину тока можно судить об интенсивности излучения в какой то определённой точке, а умножив этот показатель на время можно получить его мощность.

Полупроводниковый метод основан на регистрации изменения электрической проводимости материалов под воздействием облучения. Для измерения гамма-излучения используют кристаллы сульфида кадмия, кремния, германия, для регистрации быстрых нейтронов – кристаллы германия с активацией индием.

Термолюминисцентный метод основан на способности при нагревании после облучения LiF, соединений кальция, алюмофосфатного стекла давать вспышку света. Метод удобен тем, что даёт возможность «запоминания» эпизода облучения, детектор имеет незначительные размеры.

Фотографический метод дозиметрии основан на способности ионизирующего излучения засвечивать фотоплёнку. Метод прост, не требует специального сложного оборудования. Однако, этот метод неудобен тем, что дозиметрия проводится не в реальном времени, а *post factum*.

Сцинтилляционные методы дозиметрии основаны на способности веществ преобразовывать поглощённую энергию в световое излучение. Световое излучение регистрируется с помощью фотоумножителей. Обычно регистрируется число вспышек (плотность потока) и сила вспышки (энергия кванта)

Калориметрический метод основан на прямом измерении выделяемого при поглощении излучения тепла.