

Сибирский государственный медицинский университет
Кафедра физики

А. В. Соловьев

Применение ионизирующих излучений в медицине

Учебное пособие для студентов

Томск-2002

Сибирский государственный медицинский университет
Кафедра физики

Пректор по учебной работе
Профессор Венгеровский А. И.

«Утверждаю»: _____

« ____ » _____ 2002г.

А. В. Соловьев

Применение ионизирующих излучений в медицине

Учебное пособие для студентов

Томск-2002

УДК: 615.849
ББК: Р365

Соловьев А.В. Применение ионизирующих излучений в медицине:
Пособие для самостоятельной подготовки. – Томск, 2002.- 31с.

Соловьев А.В.

В данном пособии дана классификация ионизирующих излучений, описываются законы взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, представлена информация о воздействии этого излучения на живые системы и о дозиметрии, а также описываются различные применения ионизирующего излучения в медицине. Пособие предназначено для студентов врачебных факультетов и является дополнением к соответствующему разделу лекционного курса по физике для этих факультетов.

Содержание

1.	Классификация ионизирующих излучений.....	5
1.1.	Радиоактивное излучение.....	5
1.2.	Рентгеновское излучение.....	9
1.3.	Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.....	9
1.4.	Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.....	141
2.	Элементы дозиметрии.....	174
3.	Особенности воздействия ионизирующих излучений на живые системы.....	185
3.1.	Радиолиз воды.....	185
3.2.	Ионизация на клеточном уровне. Свободно радикальные реакции.....	207
3.3.	Биосфера и ионизирующие излучения. Радиочувствительность животных и растений.....	19
3.4.	Иммунитет и радиация.....	230
3.5.	Пути поступления радиоактивных веществ в организм.....	241
3.6.	Нарушения обмена веществ вследствие облучения.....	242
4.	Применение ионизирующих излучений в медицине.....	26
4.1.	Рентгеноскопия (рентгеновское просвечивание).....	26
4.2.	Флюорография.....	26
4.3.	Томография – послойное рентгеновское исследование.....	27
4.4.	Ионная медицинская радиография.....	28
4.5.	Лучевая терапия.....	29
4.6.	Лучевая терапия злокачественных опухолей.....	29
4.7.	Лучевая терапия неопухолевых заболеваний.....	27
4.8.	Радоновая терапия.....	28
	Литература.....	330

1. Классификация ионизирующих излучений.

Ионизирующим излучением называют потоки частиц и электромагнитных квантов, взаимодействие которых со средой приводит к ионизации ее атомов и молекул. Ионизирующим излучением являются рентгеновское и γ - излучение, потоки α -частиц, электронов, позитронов, протонов, нейтронов.

1.1. Радиоактивное излучение.

Основным источником ионизирующего излучения является радиоактивный распад атомных ядер. Самопроизвольный распад неустойчивых ядер с испусканием других ядер или элементарных частиц называют радиоактивностью, а возникающее излучение - радиоактивным излучением. Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β -, γ -излучение.

Различают радиоактивность естественную и искусственную. Естественная радиоактивность встречается у неустойчивых ядер, существующих в природных условиях. Искусственной называют радиоактивность ядер, образованных в результате различных ядерных реакций. Принципиального различия между естественной и искусственной радиоактивностью нет, поскольку законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Под радиоактивным распадом, или просто распадом, понимают естественное или искусственное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомарное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называют материнским, возникающее ядро - дочерним.

Теория радиоактивного распада строится на предположении о том, что радиоактивный распад является спонтанным процессом, подчиняющимся законам статистики. Так как отдельные ядра распадаются независимо друг от друга, то можно считать, что число ядер dN , распавшихся в среднем за интервал времени от t до $t+dt$, пропорционально промежутку времени dt и числу N не распавшихся ядер к моменту времени t :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (1)$$

где λ - постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая постоянной радиоактивного распада; знак минус указывает на то, что общее число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается.

Разделив переменные и интегрируя:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t, \quad (2)$$

получим

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где N_0 - начальное число не распавшихся ядер (в момент времени $t=0$), N - число не распавшихся ядер в момент времени t . Формула (3) выражает закон радиоактивного распада, согласно которому число не распавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют: период полураспада $T_{1/2}$ и среднее время жизни τ радиоактивного ядра. Период полураспада $T_{1/2}$ - время, за которое исходное число радиоактивных ядер в среднем уменьшается вдвое. Тогда, согласно (3),

$$N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (4)$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0.693 / \lambda. \quad (5)$$

Периоды полураспада для естественно-радиоактивных элементов колеблются от десятиmillionных долей секунды до многих миллиардов лет.

Суммарная продолжительность жизни ядер равна $t|dN| = \lambda N t dt$. Проинтегрировав это выражение по всем возможным t (т. е. от 0 до ∞) и разделив на начальное число ядер N_0 , получим среднее время жизни τ радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}. \quad (6)$$

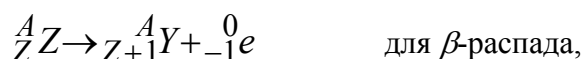
Таким образом, среднее время жизни τ радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада λ .

Активностью A нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов Z и нейтронов N) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (7)$$

Единицы активности в СИ - *беккерель* (*Бк*): 1 *Бк* - активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада. До сих пор в ядерной физике применяется и внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике - *кюри* (*Ku*): 1 *Ku* = $3.7 \cdot 10^{10}$ *Бк*.

Радиоактивный распад происходит в соответствии с так называемыми правилами смещения, позволяющими установить какое ядро возникает в результате распада данного материнского ядра. Правила смещения:



где ${}^A_Z X$ - материнское ядро, Y - символ дочернего ядра, ${}^4_2 He$ - ядро гелия (α -частица), ${}^0_{-1} e$ - символическое обозначение электрона (заряд его равен -1, а массовое число - нулю). Правила смещения являются ни чем иным, как следствием двух законов, выполняющихся при радиоактивных распадах сохранения электрического заряда и сохранения массового числа: сумма зарядов (массовых чисел) возникающих ядер и частиц равна заряду (массовому числу) исходного ядра.

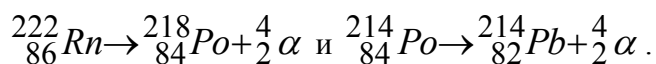
Возникающие в результате радиоактивного распада ядра могут быть, в свою очередь, радиоактивными. Это приводит к возникновению цепочки или ряда радиоактивных превращений, заканчивающихся стабильным элементом. Совокупность элементов, образующих цепочку, называется радиоактивным семейством.

Рассмотрим основные типы радиоактивного распада.

Альфа-распад состоит в самопроизвольном превращении ядра с испусканием α -частицы. Схему α -распада с учетом правила смещения записывают в виде



где X и Y - символы соответственно материнского и дочернего ядер. Примером α -распада является превращение радона в полоний, а полония в свинец:



Суммарная масса покоя дочернего ядра и α - частицы меньше массы покоя материнского ядра, то же можно сказать относительно их энергии покоя. Разность их энергий равна кинетической энергии α - частицы и дочернего ядра.

Скорости влетающих при распаде α - частиц очень велики и колеблются для разных ядер в пределах от $1.4 \cdot 10^7$ до $2 \cdot 10^7$ м/с, что соответствует энергиям от 4 до 8.8 МэВ. Согласно современным представлениям, α - частицы образуются в момент радиоактивного распада при встрече движущихся внутри ядра два протона и двух нейтронов.

α -частицы, испускаемые конкретным ядром, обладают, как правило, определенной энергией. Более точные измерения, однако, показали, что энергетический спектр α -частиц, испускаемых данным радиоактивным элементом, обнаруживает “тонкую структуру”, т. е. испускается несколько групп α - частиц, причем в пределах каждой группы их энергии практически постоянны. Дискретный спектр α - частиц свидетельствует о том, что атомные ядра обладают дискретными энергетическими уровнями.

Для α - распада характерна сильная зависимость между периодом полураспада $T_{1/2}$ и энергией E вылетающих частиц. Эта взаимосвязь определяется эмпирическим законом Гейгера-Нэттола, который обычно выражают в виде зависимости между пробегом R_α (расстоянием, проходимым частицей в веществе до ее полной остановки) α - частиц в воздухе и постоянной радиоактивного распада λ :

$$\ln \lambda = A + B \ln R_\alpha, \quad (9)$$

где A и B - эмпирические константы, $\lambda = (\ln 2) / T_{1/2}$. Согласно (9), чем меньше период полураспада радиоактивного элемента, тем больше пробег, а следовательно, и энергия испускаемых им α - частиц. Пробег α - частиц в воздухе (при нормальных условиях) составляет несколько сантиметров, в более плотных средах он гораздо меньше, составляя доли миллиметров (α - частицы можно задержать обычным листом бумаги).

Бета-распад заключается во *внутриядерном взаимном превращении нейтрона и протона*. Различают три вида β - распада.

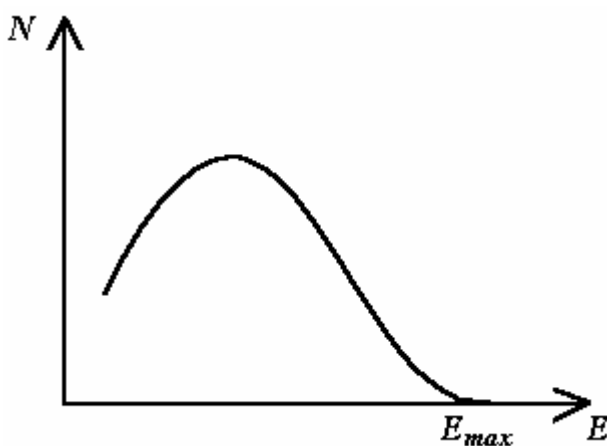


Рис. 1

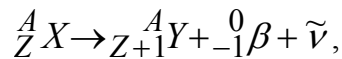
1. Электронный или β^- - распад, который проявляется в вылете из ядра β^- - частицы (электрона). Энергии β^- - частиц принимают всевозможные значения от 0 до некоторого E_{max} , спектр энергий сплошной (рис. 1). Это не соответствует дискретным ядерным энергетическим состояниям. В 1932 г. В. Паули высказал предположение о том, что одновременно с β^- - частицей из ядра вылетает еще и другая, нейтральная, с очень малой массой. По предположению Э. Ферми эта частица была названа нейтрино. Позже было установлено, что нейтрино возникает при β^+ - распаде, а при β^- - распаде -

антинейтрино.

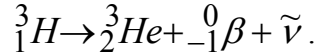
Энергия, выделяющаяся при β^- - распаде, распределяется между β^- - частицей и нейтрино или антинейтрино, причем сумма энергий обеих частиц равна E_{max} . В одних актах распада большую энергию получает антинейтрино, в других - электрон; в граничной точке кривой (рис. 1), где энергия равна E_{max} , вся энергия распада уносится

электроном, а энергия антинейтрино равна нулю. Этим как раз и обуславливается непрерывность спектра выбрасываемых электронов.

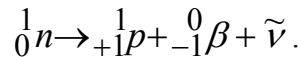
Схема β^- -распада с учетом правила смещения:



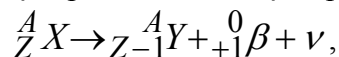
где $\tilde{\nu}$ - обозначение антинейтрино. Примером β^- -распада может быть превращение трития в гелий:



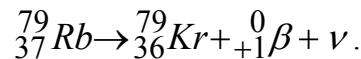
При β^- -распаде электрон образуется вследствие внутриядерного превращения нейтрона в протон:



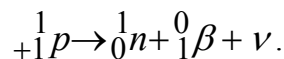
2. Позитронный, или β^+ -распад. Схема β^+ -распада:



где ν - обозначение нейтрино. Примером β^+ -распада является превращение рубидия в криптон:



При β^+ -распаде позитрон образуется вследствие внутриядерного превращения протона в нейтрон:



3. Электронный, или e -захват. Этот вид радиоактивности заключается в захвате ядром одного из внутренних электронов атома, в результате чего протон ядра превращается в нейтрон:

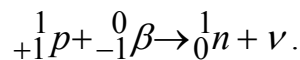
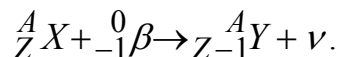
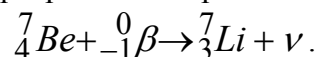


Схема электронного захвата:



Примером e -захвата может быть превращение бериллия в литий:



γ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады и также возникает при ядерных реакциях, при торможении заряженных частиц, их распаде и т. д. γ -спектр является линейчатым. γ -спектр - это распределение числа γ -квантов по энергиям. Дискретность γ -спектра имеет принципиальное значение, так как является доказательством дискретности энергетических состояний атомных ядер.

В настоящее время установлено, что γ -излучение испускается дочерним (а не материнским) ядром. Дочернее ядро в момент своего образования, оказываясь возбужденным, за время примерно 10^{-13} - 10^{-14} с, значительно меньшее времени жизни возбужденного атома (примерно 10^{-8} с), переходит в основное состояние с испусканием γ -излучения. Возвращаясь в основное состояние, возбужденное ядро может пройти через ряд промежуточных состояний, поэтому γ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп γ -квантов, отличающихся одна от другой своей энергией.

При γ -излучении A и Z ядра не изменяются, поэтому оно не описывается никакими правилами смещения. γ -излучение большинства ядер является столь коротковолновым, что его волновые свойства проявляются весьма слабо. Здесь на первый план выступают корпускулярные свойства, поэтому γ -излучение

рассматривают как поток частиц - γ - квантов. При радиоактивных распадах различных ядер γ - кванты имеют энергии от 10 кэВ до 5 МэВ.

Ядро, находящееся в возбужденном состоянии, может перейти в основное состояние не только при испускании γ - кванта, но и при непосредственной передаче энергии возбуждения (без предварительного испускания γ - кванта) одному из электронов того же атома. При этом испускается так называемый электрон конверсии. Само явление называется внутренней конверсией. Внутренняя конверсия - процесс, конкурирующий с γ - излучением.

Электронам конверсии соответствуют дискретные значения энергии, зависящей от работы выхода электрона из оболочки, из которой электрон вырывается, и от энергии E , отдаваемой ядром при переходе из возбужденного состояния в основное. Если вся энергия E выделяется в виде γ - кванта, то частота излучения ν определяется из известного соотношения $E=h\nu$. Если же испускаются электроны внутренней конверсии, то их энергии равны $E-A_K$, $E-A_L$, ..., где A_K , A_L , ... - работа выхода электрона из K - и L - оболочек. Моноэнергетичность электронов конверсии позволяет отличить их от β -электронов, спектр которых непрерывен. Возникшие в результате вылета электрона вакантное место на внутренней оболочке атома будет заполняться электронами с вышележащих оболочек. Поэтому внутренняя конверсия всегда сопровождается характеристическим рентгеновским излучением.

1.2. Рентгеновское излучение.

Рентгеновским излучением называют электромагнитные волны с длиной волны приблизительно от 10^{-12} до 10^{-8} м. Наиболее распространенным источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, в которой сильно ускоренные электрическим полем электроны бомбардируют анод (металлическая мишень из тяжелых металлов, например W или Pt), испытывая на нем резкое торможение.

Исследование спектрального состава рентгеновского излучения показывает, что его спектр имеет сложную структуру (рис. 2) и зависит как от энергии электрона, так и от материала анода. Спектр представляет собой наложение сплошного спектра,

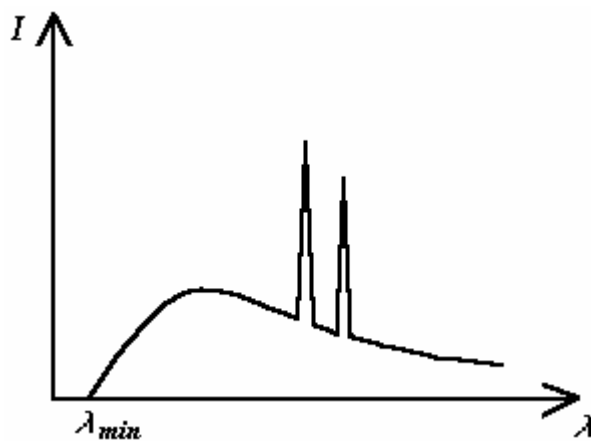


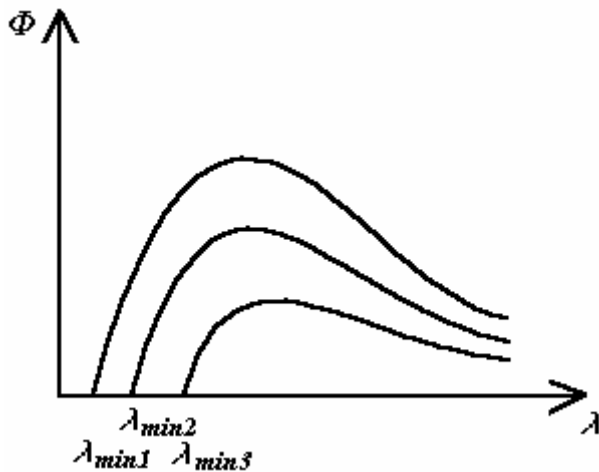
Рис. 2

ограниченного со стороны коротких длин волн некоторой границей λ_{min} , называемой границей сплошного спектра, и линейчатого спектра - совокупности отдельных линий, появляющихся на фоне сплошного спектра. Сплошная часть спектра соответствует тормозному рентгеновскому излучению, линейчатый спектр - характеристическому рентгеновскому излучению.

Тормозное рентгеновское излучение возникает в результате торможения электрона (или иной

заряженной частицы) электростатическим полем атомного ядра и атомарных электронов вещества анода.

Механизм возникновения данного вида излучения можно пояснить следующим образом. Движущийся электрический заряд создает магнитное поле, индукция которого зависит от скорости электрона. При торможении уменьшается магнитная индукция и в соответствии с теорией Максвелла появляется электромагнитная волна.



в рентгеновской трубке: $U_1 < U_2 < U_3$.

Рис. 3

λ_{\min} возникает тогда, когда энергия, приобретенная электроном в ускоряющем поле, полностью переходит в энергию фотона:

$$eU = h\nu_{\max} = \frac{hc}{\lambda_{\min}}, \quad (10)$$

откуда

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{(eU)}. \quad (11)$$

Эту формулу можно преобразовать в более удобное для практических целей выражение:

$$\lambda_{\min} = \frac{12.3}{U}, \quad (12)$$

где λ_{\min} - длина волны, 10^{-10} м; U - напряжение, кВ.

Заметим, что на основе (11) разработан один из наиболее точных способов экспериментального определения постоянной Планка.

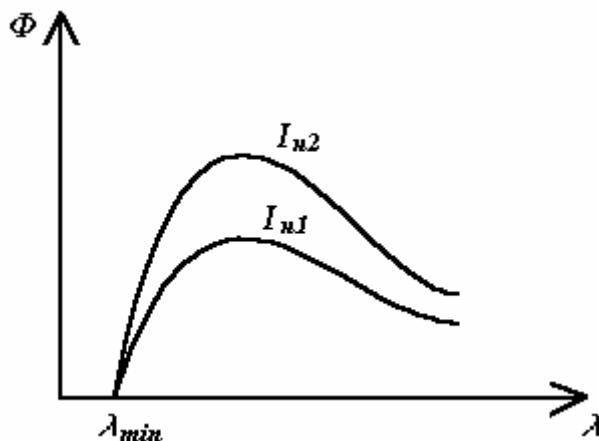


Рис. 4

излучения, испускаемых за одну секунду. Спектральный состав его при этом не изменится. На рис. 4 показаны спектры тормозного рентгеновского излучения при одном напряжении, но при разной силе тока накала катода: $I_{n1} < I_{n2}$.

Поток рентгеновского излучения вычисляется по формуле:

$$\Phi = k I U^2 Z, \quad (13)$$

При торможении электронов лишь часть энергии идет на создание фотона рентгеновского излучения, другая часть расходуется на нагревание анода. Так как соотношение между этими частями случайно, то при торможении большого количества электронов образуется непрерывный спектр рентгеновского излучения.

В связи с этим тормозное излучение называют также и сплошным. На рис. 3 представлены зависимости потока рентгеновского излучения от длины волны λ при разных напряжениях

В каждом из спектров наиболее коротковолновое тормозное излучение

Коротковолновое рентгеновское излучение обычно обладает большей проникающей способностью, чем длинноволновое, и называется жестким, а длинноволновое - мягким.

Увеличивая напряжение на рентгеновской трубке, изменяют спектральный состав излучения (рис. 3) и изменяют жесткость.

Если увеличить температуру накала катода, то возрастет эмиссия электронов и, следовательно, сила тока в трубке. Это приведет к увеличению числа фотонов рентгеновского

где U и I - напряжение и сила тока в рентгеновской трубке; Z - порядковый номер атома вещества анода; $k = 10^{-9} \text{ В}^{-1}$ - коэффициент пропорциональности. Спектры, полученные от разных анодов при одинаковых U и I_n , изображены на Рис.5.

При достаточно большой энергии бомбардирующих анод электронов на фоне сплошного спектра появляются отдельные резкие линии - линейчатый спектр, определяемый материалом анода и называемый характеристическим рентгеновским спектром (излучением). Он возникает вследствие того, что ускоренные электроны проникают в глубь атома и из внутренних слоев выбивают электроны. На свободные места переходят электроны с верхних уровней (рис. 6), в результате высвечиваются фотоны характеристического излучения.

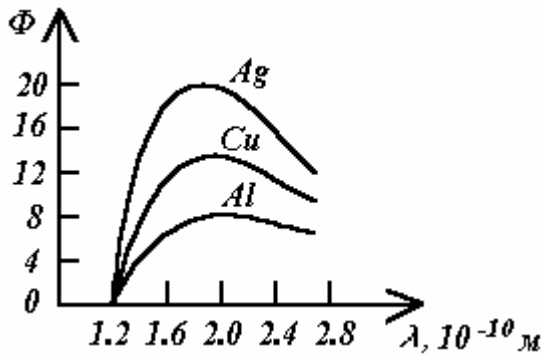


Рис. 5

Как видно из рисунка, характеристическое рентгеновское излучение состоит из серий К, L, M, N и O. Каждая серия, в свою очередь, содержит небольшой набор отдельных линий, обозначаемых в порядке убывания длины волны индексами $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ($K_\alpha, K_\beta, K_\gamma, \dots, L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, \dots$).

В отличие от оптических спектров характеристические рентгеновские спектры разных атомов однотипны. Однотипность этих спектров обусловлена тем, что внутренние слои у разных атомов одинаковы и отличаются лишь энергетически, так как силовое воздействие со стороны ядра увеличивается по мере возрастания порядкового номера элемента. Это приводит к тому, что характеристические спектры сдвигаются в сторону больших частот с увеличением заряда ядра. Такая закономерность известна как закон Мозли:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (14)$$

где ν - частота, соответствующая данной линии характеристического рентгеновского

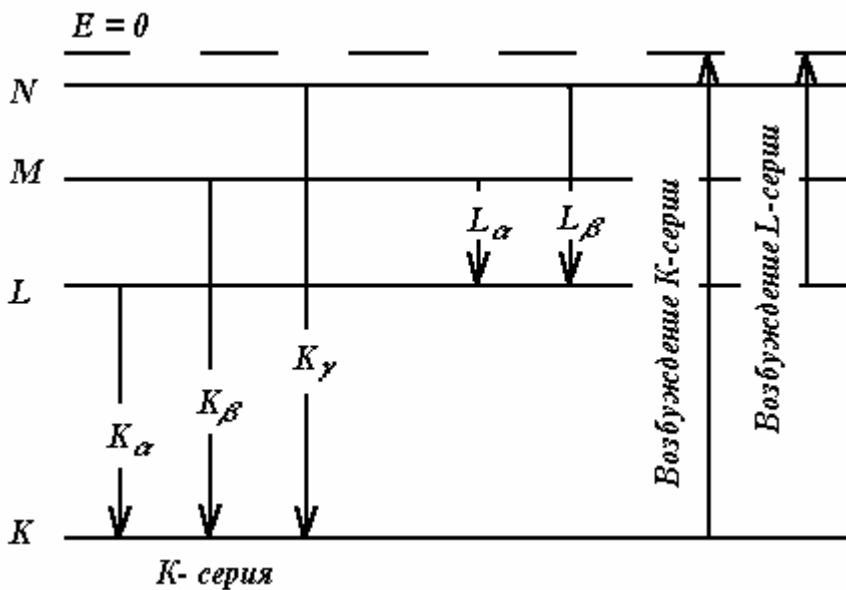


Рис. 6

излучения, R - постоянная Ридберга, σ - постоянная экранирования, $m=1, 2, 3, \dots$ (определяет рентгеновскую серию), n принимает целочисленные значения, начиная с $m+1$ (определяет отдельную линию соответствующей серии).

Смысл постоянной экранирования заключается в том, что на электрон, совершающий переход, соответствующий некоторой линии, действует не весь заряд ядра Ze , а заряд $(Z - \sigma)e$, ослабленный экранирующим действием других электронов. Например, для K_{α} -линии $\sigma = 1$, и закон Мозли запишется в виде

$$\nu = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right).$$

Есть еще одна разница между оптическими и рентгеновскими спектрами. Характеристический рентгеновский спектр атома не зависит от химического соединения, в которое этот атом входит. Так, например, рентгеновский спектр атома кислорода одинаков для O , O_2 и H_2O , в то время как оптические спектры этих соединений существенно различны. Эта особенность рентгеновского спектра атома и послужила основанием для названия “*характеристическое*”.

1.3. Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом.

Регистрация и использование рентгеновского излучения, а также воздействие его на биологические объекты определяются первичными процессами взаимодействия рентгеновского фотона с электронами атомов и молекул вещества.

В зависимости от соотношения энергии $h\nu$ фотона и энергии ионизации A_u имеют место три главных процесса.

Когерентное (классическое) рассеяние. Рассеяние длинноволнового рентгеновского излучения происходит в основном без изменения длины волны, и его называют *когерентным*. Оно возникает, если энергия фотона меньше энергии ионизации: $h\nu < A_u$.

Так как в этом случае энергия фотона рентгеновского излучения и атома не изменяется, то когерентное рассеяние само по себе не вызывает биологического действия. Однако при создании защиты от рентгеновского излучения следует учитывать возможность изменения направления первичного пучка. Этот вид взаимодействия имеет значение для рентгеноструктурного анализа.

Некогерентное рассеяние (эффект Комптона). В 1922 г. А.Х. Комптон, наблюдая рассеяние жестких рентгеновских лучей, обнаружил уменьшение проникающей способности рассеянного пучка по сравнению с падающим. Это означало, что длина волны рассеянного рентгеновского излучения больше, чем падающего. Рассеяние рентгеновского излучения с изменением длины волны называют *некогерентным*, а само явление — *эффектом Комптона*.

Он возникает, если энергия фотона рентгеновского излучения больше энергии ионизации: $h\nu > A_u$.

Это явление обусловлено тем, что при взаимодействии с атомом энергия $h\nu$ фотона расходуется на образование нового рассеянного фотона рентгеновского излучения с энергией $h\nu'$, на отрыв электрона от атома (энергия ионизации A_u) и сообщение электрону кинетической энергии E_k :

$$h\nu = h\nu' + A_u + E_k. \quad (15)$$

Так как во многих случаях $h\nu > A_u$ и эффект Комптона происходит на свободных электронах, то можно записать приближенно

$$h\nu = h\nu' + E_k.$$

Существенно, что в этом явлении (рис. 7) наряду с вторичным рентгеновским излучением (энергия $h\nu'$ фотона) появляются электроны отдачи (кинетическая энергия E_k электрона). Атомы или молекулы при этом становятся ионами.

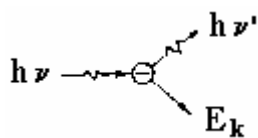


Рис. 7

Фотоэффект. При фотоэффекте рентгеновское излучение поглощается атомом, в результате чего вылетает электрон, а атом ионизируется (фотоионизация). Если энергия фотона недостаточна для ионизации, то фотоэффект может проявляться в возбуждении атомов без вылета электронов. Три основных процесса взаимодействия, рассмотренные выше, являются

первичными, они приводят к последующим вторичным, третичным и т.д. явлениям. Так, например, ионизированные атомы могут излучать характеристический спектр, возбужденные атомы могут стать источниками видимого света (рентгенолюминесценция) и т.п.

На рис. 8 приводится схема возможных процессов, возникающих при попадании рентгеновского излучения в вещество. Может происходить несколько десятков процессов, подобных изображенному, прежде чем энергия рентгеновского фотона перейдет в энергию молекулярно-теплового движения. В итоге произойдут изменения молекулярного состава вещества.

Процессы, представленные схемой рис. 8, лежат в основе явлений, наблюдаемых

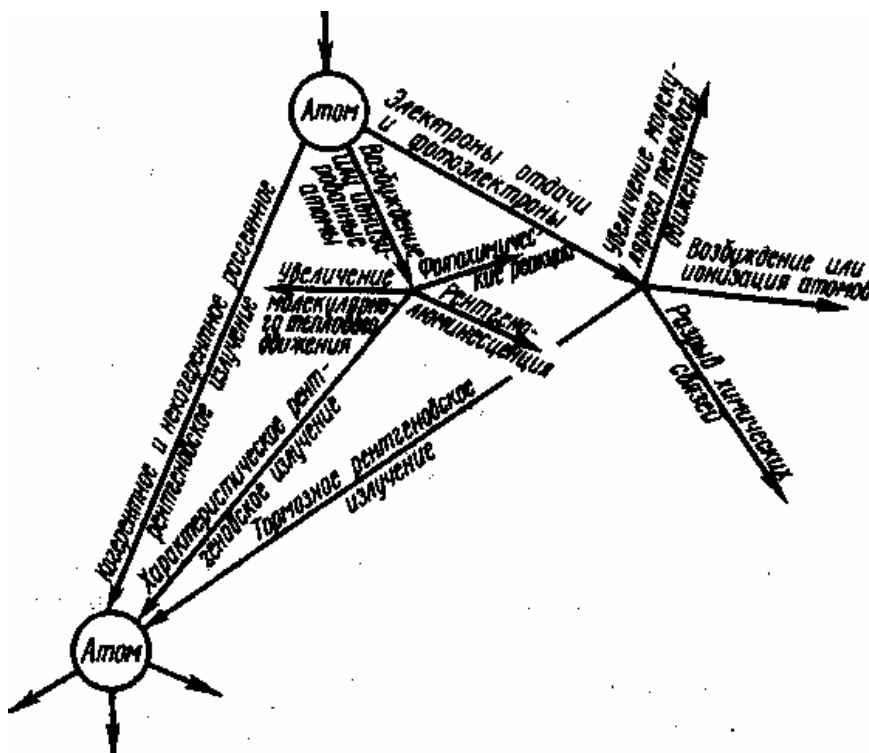


Рис. 8

при действии рентгеновского излучения на вещество. Перечислим некоторые из них.

Рентгенолюминесценция — свечение ряда веществ при рентгеновском облучении. Такое свечение позволило Рентгену открыть его лучи. Это явление используют для создания светящихся экранов с целью визуального наблюдения рентгеновского излучения.

Известно химическое действие рентгеновского излучения, например образование перекиси водорода в воде. Практически важный пример — воздействие на фотопластинку, что позволяет фиксировать такие лучи.

Ионизирующее действие проявляется в увеличении электропроводимости под воздействием рентгеновских лучей. Это свойство используют в дозиметрии для количественной оценки действия радиоактивного излучения.

В результате многих процессов первичный пучок рентгеновского излучения ослабляется в соответствии с законом поглощения Бугера. Запишем его в виде:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-\mu x} \quad (16)$$

где μ — коэффициент ослабления. Он состоит из трех слагаемых, соответствующих когерентному рассеянию μ_k , некогерентному $\mu_{нк}$ и фотоэффекту $\mu_{ф}$.

$$\mu = \mu_k + \mu_{нк} + \mu_{ф} \quad (17)$$

Поток рентгеновского излучения ослабляется пропорционально числу атомов вещества, через которое этот поток проходит. Если сжать вещество вдоль оси X , например, в b раз, увеличив в b раз его плотность, то ослабление пучка не изменится, так как число атомов остается прежним. Следовательно, показатель степени в формуле (16) не изменится:

$$\mu_1 x_1 = \mu_2 x_2 = \mu_2 x_1 / b \quad (18)$$

$x_2 = x_1 / b$, так как при сжатии толщина поглощающего слоя уменьшилась в b раз. Из (18) имеем $\mu_1 = \mu_2 / b$.

Это означает, что линейный коэффициент ослабления зависит от плотности вещества.

Поэтому предпочитают пользоваться массовым коэффициентом ослабления, который равен отношению линейного коэффициента ослабления к плотности поглотителя и не зависит от плотности вещества:

$$\mu_m = \mu / \rho. \quad (19)$$

1.4. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом.

Заряженные частицы и γ -фотоны, распространяясь в веществе, взаимодействуют с электронами и ядрами, в результате чего изменяется состояние как вещества, так и частиц.

Основным механизмом потерь энергии заряженной частицы (α и β) при прохождении через вещество является ионизационное торможение. При этом ее кинетическая энергия расходуется на возбуждение и ионизацию атомов среды.

Взаимодействие частицы с веществом количественно оценивается линейной плотностью ионизации, линейной тормозной способностью вещества и средним линейным пробегом частицы.

Под **линейной плотностью ионизации** i понимают отношение числа dn ионов одного знака, образованных заряженной ионизирующей частицей на элементарном пути dl , к этому пути: $i = dn/dl$.

Линейной тормозной способностью вещества S называют отношение энергии dE , теряемой заряженной ионизирующей частицей при прохождении элементарного пути dl в веществе, к длине этого пути: $S = dE/dl$.

Средним линейным пробегом заряженной ионизирующей частицы R является среднее значение расстояния между началом и концом пробега заряженной ионизирующей частицы в данном веществе.

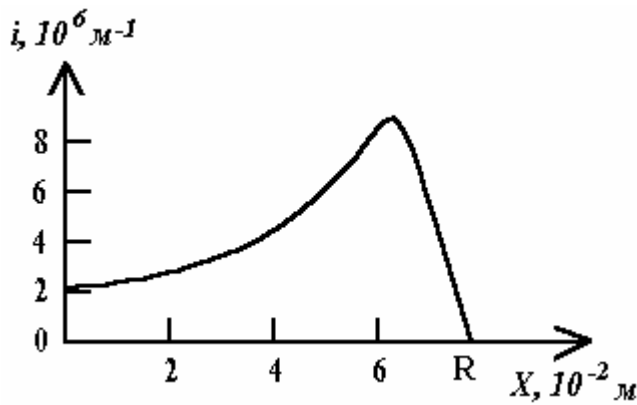


Рис. 9

График зависимости линейной плотности ионизации от пути x , проходимого α -частицей в среде (воздух), показан на рис. 9. По мере продвижения частицы в среде уменьшаются ее энергия и скорость. Линейная плотность ионизации при этом возрастает и только при завершении пробега частицы резко убывает.

Возрастание i обусловлено тем, что при меньшей скорости α -

частица больше времени проводит вблизи атома и, таким образом, возрастает вероятность ионизации атома. Как видно из рисунка, линейная плотность ионизации α -частиц естественно-радиоактивных изотопов в воздухе при нормальном давлении составляет $i = (2 \div 8) \cdot 10^6$ пар ионов/м.

Так как для ионизации одной молекулы требуется энергия около 34 эВ, то значения линейной тормозной способности вещества (воздуха) S лежат в интервале 70-270 МэВ/м.

Средний линейный пробег α -частицы зависит от ее энергии. В воздухе он равен нескольким сантиметрам, в жидкостях и в живом организме — 10—100 мкм. После того как скорость α -частицы замедляется до скорости молекулярно-теплового движения, она, захватив два электрона в веществе, превращается в атом гелия.

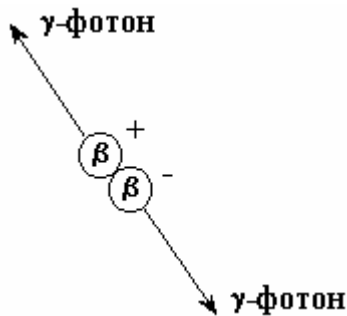


Рис. 10

Ионизация и возбуждение являются первичными процессами. Вторичными процессами могут быть увеличение скорости молекулярно-теплового движения, характеристическое рентгеновское излучение, радиолуминесценция, химические процессы.

Взаимодействие α -частиц с ядрами — значительно более редкий процесс, чем ионизация. При этом возможны ядерные реакции, а также рассеяние α -частиц.

Бета-излучение, так же как и α -излучение, вызывает ионизацию вещества. В воздухе линейная

плотность ионизации β -частиц может быть вычислена по формуле

$$i = k (c/u)^2$$

где $k \approx 4600$ пар ионов/м.

Кроме ионизации и возбуждения β - частицы могут вызывать и другие процессы. Так, например, при торможении электронов возникает тормозное рентгеновское излучение. Бета- частицы рассеиваются на электронах вещества, и их пути сильно искривляются в нем. Если электрон движется в среде со скоростью, превышающей скорость распространения света в этой среде, то возникает **характерное черенковское излучение (излучение Черенкова—Вавилова)**.

При попадании β^+ - частицы в вещество с большой вероятностью происходит такое взаимодействие ее с электроном, в результате которого вместо пары электрон — позитрон образуются два γ -фотона. Этот процесс, схема которого показана на рис. 10, называют аннигиляцией. Энергия каждого γ -фотона, возникающего при

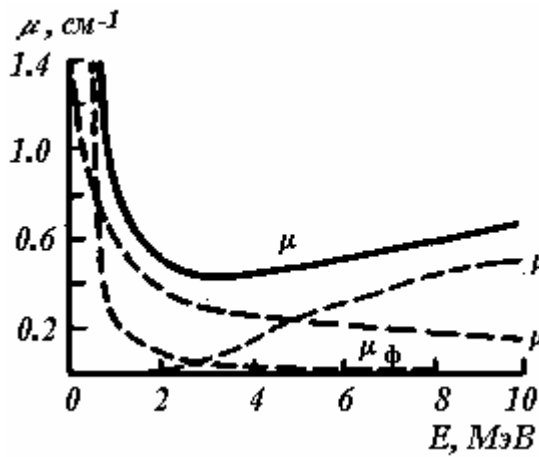


Рис. 11

интенсивность излучения уменьшается вдвое.

Можно считать, что в ткани организма β -частицы проникают на глубину 10—15 мм. Защитой от β -излучения служат тонкие алюминиевые, плексигласовые и другие экраны. Так, например, слой алюминия толщиной 0,4 мм или воды толщиной 1,1 мм уменьшает вдвое β -излучение от фосфора $^{32}_{15}P$.

При попадании γ -излучения в вещество наряду с процессами, характерными для рентгеновского излучения (когерентное рассеяние, эффект Комптона, фотоэффект), возникают и такие, которые неспецифичны для взаимодействия рентгеновского излучения с веществом. К этим процессам следует отнести образование пары электрон — позитрон, происходящее при энергии γ -фотона, не меньшей суммарной энергии покоя электрона и позитрона (1,02 МэВ), и фотоядерные реакции, которые возникают при взаимодействии γ -фотонов больших энергий с атомными ядрами. Для возникновения фотоядерной реакции необходимо, чтобы энергия γ -фотона была не меньше энергии связи, приходящейся на нуклон.

В результате различных процессов под действием γ -излучения образуются заряженные частицы; следовательно, γ -излучение также является ионизирующим.

Ослабление пучка γ -излучения в веществе обычно описывают экспоненциальным законом (16). Линейный (или массовый) коэффициент поглощения можно представить как сумму соответствующих коэффициентов поглощения, учитывающих три основных процесса взаимодействия — фотоэффект, Комpton-эффект и образование электрон-позитронных пар:

$$\mu = \mu_n + \mu_{нк} + \mu_{\phi} \quad (20)$$

Эти основные процессы взаимодействия происходят с разной вероятностью, которая зависит от энергии γ -фотона (рис. 11; кривая получена для свинца). Как видно из рисунка, при малых энергиях основную роль играет фотоэффект, при средних — Комpton-эффект и при энергиях, больших 10 МэВ, — процесс образования пары электрон — позитрон.

Экспоненциальный закон ослабления пучка γ -фотона выполняется приближенно, особенно при больших энергиях. Это обусловлено вторичными процессами, возникающими при взаимодействии γ -излучения с веществом. Так, например, электроны и позитроны обладают энергией, достаточной для образования новых γ -фотонов в результате торможения и аннигиляции.

Поток нейтронов тоже является ионизирующим излучением, так как в результате взаимодействия нейтронов с ядрами атомов образуются заряженные частицы и γ -излучение. Проиллюстрируем это несколькими примерами:

аннигиляции, должна быть не меньше энергии покоя электрона или позитрона, т.е. не менее 0,51 МэВ.

Несмотря на разнообразие процессов, приводящих к ослаблению β -излучения, можно приближенно считать, что интенсивность его изменяется по экспоненциальному закону, подобному (16). В качестве одной из характеристик поглощения β -излучения веществом используют слой половинного поглощения, при прохождении через который

— деление ядер при захвате ими нейтронов, образуются радиоактивные осколки, γ -излучение и заряженные частицы;

— образование α -частиц, например ${}_{13}^{27}\text{Al} + {}_0^1n = {}_{11}^{24}\text{Na} + {}_2^4\alpha$;

— образование протонов, например ${}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^1n = {}_6^{14}\text{C} + {}_1^1p$.

2. Элементы дозиметрии.

Дозиметрией называют раздел ядерной физики и измерительной техники, в котором изучают величины, характеризующие действие ионизирующего излучения на вещества, а также методы и приборы для их измерения. Первоначально развитие дозиметрии было обусловлено необходимостью учета действия рентгеновского излучения на человека.

Уже отмечалось, что ионизирующее излучение только тогда оказывает действие на вещество, когда оно взаимодействует с частицами, входящими в состав этого вещества.

Независимо от природы ионизирующего излучения его взаимодействие количественно может быть оценено отношением энергии, переданной элементу облученного вещества, к массе этого элемента. Эту характеристику называют *дозой излучения (поглощенной дозой излучения) D*. Действие ионизирующего излучения прежде всего определяется поглощенной дозой. Доза зависит от вида ионизирующего излучения, энергии его частиц, состава облучаемого вещества и пропорциональна времени облучения. Дозу, отнесенную ко времени, называют *мощностью дозы*.

Единицей поглощенной дозы излучения является *грей (Гр)*, который соответствует дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж; *мощность дозы излучения* выражается в *греях в секунду (Гр/с)*. Внесистемная единица дозы излучения — *рад¹* (1 рад = 10^{-2} Гр = 100 эрг/г), ее мощности — *рад в секунду (рад/с)*.

Казалось бы, для нахождения поглощенной дозы излучения следует измерить энергию ионизирующего излучения, падающего на тело, энергию, прошедшую сквозь тело, и их разность разделить на массу тела. Однако практически это сделать трудно, так как тело неоднородно, энергия рассеивается телом по всевозможным направлениям и т.п. Таким образом, вполне конкретное и ясное понятие “дозы излучения” оказывается малоприменимым. Но можно оценить поглощенную телом дозу по ионизирующему действию излучения в воздухе, окружающем тело.

В связи с этим вводят еще одно понятие дозы для рентгеновского и γ -излучения — *экспозиционную дозу излучения X*, которая является мерой ионизации воздуха рентгеновскими и γ -лучами.

За единицу экспозиционной дозы принят *кулон на килограмм (Кл/кг)*. На практике используют единицу, называемую *рентгеном (Р)*, — экспозиционная доза рентгеновского или гамма-излучения, при которой в результате полной ионизации в 1 см³ сухого воздуха (при 0°C и 760 мм рт. ст.) образуются ионы, несущие заряд, равный 1 ед. СГС каждого знака. Нетрудно подсчитать, что экспозиционная доза 1 Р соответствует образованию $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов в 0,001293 г сухого воздуха; 1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг.

Единицей мощности экспозиционной дозы является 1 А/кг, а внесистемной единицей — 1 Р/с.

Так как доза излучения пропорциональна падающему ионизирующему излучению, то между излученной и экспозиционной дозами должна быть пропорциональная зависимость:

$$D = fX, \quad (21)$$

где f — некоторый переходный коэффициент, зависящий от ряда причин, и прежде всего от облучаемого вещества и энергии фотонов.

Для воды и мягких тканей тела человека $f = 1$; следовательно, доза излучения в радах численно равна соответствующей экспозиционной дозе в рентгенах. Это и обуславливает удобство использования внесистемных единиц — рада и рентгена.

Для данного вида излучения биологическое действие обычно тем больше, чем больше доза излучения. Однако различные излучения даже при одной и той же поглощенной дозе оказывают разные воздействия.

В дозиметрии принято сравнивать биологические эффекты различных излучений с соответствующими эффектами, вызванными рентгеновским и γ -излучениями.

Коэффициент K , показывающий, во сколько раз эффективность биологического действия данного вида излучения больше, чем рентгеновского или γ -излучения, при одинаковой дозе излучения в тканях, является относительная биологическая эффективность (ОБЭ).

ОБЭ устанавливают на основе опытных данных. Она зависит не только от вида частицы, но и от ее энергии. В табл. 1 приведены значения K для некоторых излучений.

Вид излучения	ОБЭ
Рентгеновское, γ - и β - излучения	1
Тепловые нейтроны	3-5
Нейтроны	7
Протоны	10
α - излучение	20

Поглощенная доза совместно с ОБЭ дает представление о биологическом действии ионизирующего излучения, поэтому произведение DK используют как единую меру этого действия и называют *эквивалентной дозой* излучения H :

$$H = DK.$$

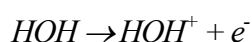
Так как K - безразмерный коэффициент, то эквивалентная доза излучения имеет ту же размерность, что и поглощенная доза излучения, но называется *зивертом* ($Zв$). Внесистемная единица эквивалентной дозы - *бэр*²; $1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$. Эквивалентная доза в бэрах равна дозе излучения в радах, умноженная на ОБЭ.

Естественные источники (космические лучи, радиоактивность недр, воды и пр.) создают фон, соответствующий приблизительно эквивалентной дозе 125 мбэр . Предельно допустимой эквивалентной дозой при профессиональном облучении считается 5 бэр в течение года. Минимальная летальная доза от γ - излучения около 600 бэр . Эти данные соответствуют облучению всего организма.

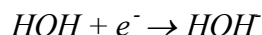
3. Особенности воздействия ионизирующих излучений на живые системы.

3.1. Радиолиз воды.

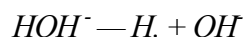
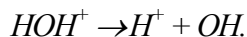
Главной составной частью всех живых организмов, в которых интенсивно идут процессы обмена веществ, является вода. Человеческий организм содержит примерно 65 %, а некоторые органы его тела до 80% воды, а при рождении человек на 90 % состоит из воды. Чтобы понять, что происходит в воде и водных растворах под влиянием ионизирующего излучения, рассмотрим, что теоретически может произойти при облучении чистой воды. Молекулы воды будут ионизироваться. Нейтральная молекула воды потеряет электрон и превратится в положительный ион. Записать эту реакцию можно так:



Отлетающий электрон, внедряясь в другую нейтральную молекулу воды, превращает ее в отрицательный нон:

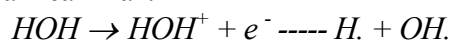


Ионы такого рода крайне неустойчивы. Этим ионы HOH^- и HOH^+ отличаются от ионов H^+ и OH^- , образующихся при диссоциации молекул воды. Продукты расщепления ионов HOH^+ и HOH^- представляют собой свободные радикалы. При расщеплении ионов воды образуются радикалы



(точка у химического символа означает, что данный атом или группа атомов является свободным радикалом).

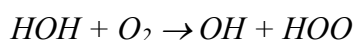
Если же электрон вновь присоединится к той молекуле, откуда первоначально вылетел, молекула вновь станет электронейтральной, но перейдет в сильно возбужденное состояние. Избыточная энергия будет затрачена на расщепление молекулы с образованием свободных радикалов. Весь процесс можно записать так:



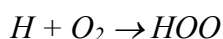
Разница между обоими механизмами расщепления молекул воды состоит не в конечных продуктах — свободных радикалах, а в их топографии, в расстояниях, отделяющих их друг от друга, а это определяет ход последующих реакций. Остается еще не выясненным, какой из предполагаемых механизмов на самом деле действует или какова относительная роль обоих этих процессов в расщеплении воды. На внешней оболочке атома кислорода, входящего в молекулу, всего восемь электронов, два из которых происходят от двух атомов водорода, соединенных с атомом кислорода. В таком виде молекула воды устойчива. Ионизирующее излучение выбивает один электрон. При этом освобождается ион водорода и возникает свободный радикал — электронейтральный, так как число электронов в нем равно числу протонов в ядре атома кислорода и водорода.

Радикал OH^- может возникать в воде без участия ионизирующего излучения по ходу химической реакции (например, окисление перекисью водорода двухвалентного железа в трехвалентное). Свободный радикал химически весьма активен. В молекуле воды один атом кислорода соединен с двумя атомами водорода. При ионизации отщепляется от молекулы один электрон и ион H_2O^+ разлагается на протон и радикал OH^- .

Итак, при воздействии ионизирующего излучения на чистую воду возникают свободные радикалы H^- и OH^- , H^- — это атомарный водород. В таком состоянии атом водорода может существовать только очень короткое время. В этот срок либо два атома водорода соединятся вместе, образуя молекулу водорода, либо образовавшиеся при расщеплении молекулы воды свободные радикалы H^- и OH^- соединятся, создав вновь молекулу воды, либо H^- потеряет электрон, отдав его другому атому, и превратится в ион H^+ , или же, наконец, если в воде растворено какое-нибудь вещество (а именно такая ситуация складывается при облучении живого организма), H^- может присоединиться к нему. Столь же неустойчив и свободный радикал OH^- . В этой совокупности атомов одна валентность кислорода связана с водородом, а другая остается незанятой. Для превращения в устойчивое соединение необходимо замещение свободной валентности в радикале OH^- . Нужно, чтобы непарный электрон стал парным и в образовавшейся молекуле было бы четное число электронов. При наличии в воде растворенного кислорода наиболее вероятны следующие реакции:

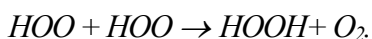


или

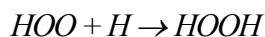


Таким образом, разложение воды, в которой растворен кислород, идет с образованием радикала HOO . В жидкостях организма, как правило, растворен кислород, поэтому образование радикала HOO является, очевидно, первой ступенью

преобразования энергии ионизирующего излучения в энергию химических реакций. Полагают, что радикал $HO\cdot$ соединяясь с другим таким же радикалом, превращается в перекись водорода и кислород:

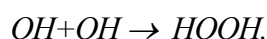


При наличии в воде растворенного соединения радикал $HO\cdot$, или, как его называют, гидропероксид, в силу своих окисляющих свойств отнимает электрон от другого соединения, превращаясь в ион HO_2^- , а последний во всех растворах, за исключением сильнощелочных, переходит в перекись водорода:



Отсюда следует, что при облучении воды, в которой растворен кислород, должна образовываться перекись водорода. Это действительно происходит при действии на воду рентгеновского и гамма-излучения. Образовавшуюся перекись водорода можно количественно определить химическими методами.

Перекись водорода образуется и в чистой воде, в которой не растворен кислород, но в измеримых количествах только при облучении ее альфа-частицами или протонами, т. е. излучением с большой плотностью ионизации. В этом случае радикалы $OH\cdot$ образуются в непосредственной близости друг от друга, поэтому наиболее вероятной становится реакция их соединения:



3.2. Ионизация на клеточном уровне. Свободно радикальные реакции.

Прямое действие ионизирующего излучения может вызвать расщепление молекул белка и молекул нуклеиновых кислот, разрыв наименее прочных связей, отрыв радикалов и другие денатурационные изменения.

Необходимо заметить, что прямая ионизация и непосредственная передача энергии тканям тела не объясняют повреждающего действия излучения. Так при абсолютной смертельной дозе, равной для человека 6 Гр на все тело, в 1 кубическом сантиметре ткани образуется одна ионизированная молекула на 10 миллионов молекул.

В дальнейшем, под действием первичных процессов в клетках возникают функциональные изменения, подчиняющиеся уже биологическим законам жизни и гибели клеток. Изменения на клеточном уровне, гибель клеток приводят к таким нарушениям в тканях, в функциях отдельных органов и в межорганных взаимосвязанных процессах организма, которые вызывают различные последствия для организма или гибель организма.

Наиболее важными изменениями в клетках являются:

- a) повреждение механизма митоза (деления) и хромосомного аппарата облученной клетки;
- b) блокирование процессов обновления и дифференцировки клеток;
- c) блокирование процессов пролиферации и последующей физиологической регенерации тканей.

Самые ранние эффекты в клетках вызываются не митотической гибелью, а обычно связаны с повреждением мембран. Составной частью биологических мембран являются липиды. Запасные жиры в тканях также представляют собой липидную фазу. Неудивительно, что внимание исследователей, изучающих влияние ионизирующего излучения на живой организм, оказалось направленным на поиск продуктов радиационно-химического окисления жиров в липидных фазах тканей. Процесс радиационно-химического окисления жиров в тканях мог оказаться точкой приложения действия радиации на организм с образованием высокотоксичных соединений, способных оказать губительное действие. Дело в том, что аутоокисление липидов в жидкой фазе представляет собой цепной свободно-радикальный процесс, где цепь окисления ведет свободный радикал.

Несмотря на отсутствие достоверных данных о накоплении перекисей в липидах облученных организмов несомненным является тот факт, что липиды из печени облученных животных обладают иными свойствами, чем липиды необлученных.

Липиды, извлеченные из печени облученных животных, обладают сниженной антиокислительной активностью. Свободно-радикальные цепные реакции, инициированные действием ионизирующего излучения, могут приводить к вторичному повреждению клеточных и тканевых структур. Продукты клеточной и тканевой деградации подлежат утилизации наряду с физиологическими потерями и обуславливают дополнительную нагрузку на клетки моноцитарно-макрофагальной системы.

Фагоцитоз и переработка продуктов деградации сопровождаются резкой активацией энергетического обмена макрофагов и генерацией ряда высокоактивных свободнорадикальных форм кислорода (АФК), которые нейтрализуются физиологическими антиоксидантными системами организма. Недостаточность антиоксидантной защиты в условиях избыточной продукции АФК может привести к нарушению физиологического равновесия и появлению токсического действия кислородных радикалов, усиливающих повреждающий эффект радиации. Вновь образующиеся продукты распада служат новым стимулом фагоцитарной активности макрофагов.

Соответственно может возникнуть и поддерживаться порочный круг: образование продуктов клеточной деградации - стимуляция макрофагов - фагоцитоз и секреция АФК - истощение физиологических антиоксидантных систем - усиление процессов перекисного окисления липидов - повреждение новых органов и тканей.

Длительная стимуляция может приводить к развитию функциональной недостаточности моноцитарно-макрофагальной системы и, как следствие, к срыву выполняемой ею функций, а именно: ослабление противоопухолевого и противомикробного иммунитета, нарушения различных метаболических процессов, в том числе обмена железа, холестерина и углеводов, нарушение процессов деградации собственных клеток и тканей.

При исследовании биохимических показателей сыворотки крови нарушения обнаружили у 13% московских и 27% белорусских ликвидаторов аварии ЧАЭС, в основном в виде гипер- и диспротеинурией, изредка небольшой гипербилирубинемии.

Нарушения в метаболизме железа имели место у 48-51% ликвидаторов и наиболее часто выражалось в значительном повышении уровня сывороточного ферритина на фоне нормального или немного повышенного уровня железа.

При изучении лучевого поражения следует обратить внимание на "тепловую" сторону этого процесса: для высших животных и человека смертельная доза при облучении всего тела рентгеновскими или гамма-лучами равна 800—1000 рад, что означает поглощение в 1 г ткани $8 \cdot 10^7$ эрг. Это такое количество энергии, которое, превратившись полностью в тепло, могло бы поднять температуру тела всего на 0,002 °С. Такое незначительное повышение температуры никак не должно было бы повлиять на течение жизненных процессов. Это означает, что при поглощении, казалось бы, незначительной по абсолютной величине энергии ионизирующего излучения в организме начинается последовательный ряд физико-химических, биохимических и физиологических процессов, усиливающих первоначальный эффект, а это в конечном счете приводит к гибели организма.

Можно было бы предположить, что ионизация затрагивает значительную часть молекул, из которых состоит животная или растительная клетка. Однако, это не так. При облучении ткани в дозе 1 рад образуются округленно на 1 мк^3 две ионизированные молекулы. Объем клетки составляет приблизительно 500 мк^3 . Следовательно, при такой дозе облучения в клетке образуется до 1 000 ионизированных молекул, а при смертельной дозе для животного (примерно 1 000 рад) в клетке возникает 1 млн. ионизированных молекул. На первый взгляд такое число кажется большим, но если учесть, что клетка состоит приблизительно из 10^{12} молекул, то получится, что при смертельной дозе первоначальные изменения происходят только в одной молекуле из миллиона. *Нельзя при этом упускать из виду, что не все*

молекулы в клетке имеют одинаковые значения для ее жизнедеятельности и нормальный ход биологических процессов в клетке может быть обусловлен небольшим числом молекул некоторых веществ, а также целостностью внутриклеточных структур.

Из этого также следует, что после облучения вступают в действие механизмы, усиливающие первоначальные изменения. Говоря приближенно и схематично, первые физико-химические реакции в организме служат как бы толчком и для запуска последующих процессов, ведущих в конечном счете к лучевому поражению организма. Стадию воздействия излучения на биологические объекты, которая приводит к образованию ионов и возбужденных молекул, можно назвать физической. Длительность ее весьма коротка — всего 10^{-16} сек. За ней следует физико-химическая стадия, период которой тоже очень короткий. На этой стадии образовавшиеся при взаимодействии излучения с веществом ионы и возбужденные молекулы подвергаются физико-химическим изменениям.

3.3. Биосфера и ионизирующие излучения. Радиочувствительность животных и растений

Если рассмотреть всю биосферу в общем, то можно заметить, что удивительно широк диапазон чувствительности к облучению, встречающийся в живой природе! Рост одного из видов грибка может быть заторможен дозой лишь 0,01 р, в то же время мухи, облученные в дозе 80 000 р, летают, кормятся и ведут себя как обычно. Инфузорию убивает доза значительно выше 300 000 р. Но и это не предел. Одноклеточная водоросль хлорелла хотя и “заболевает”, но не погибает от доз в миллионы рентген. Сотрудники лаборатории в Лос-Аламосе (США) заметили, что вода, окружающая погруженный в нее ядерный реактор, помутнела. Под микроскопом в капле воды было обнаружено огромное число бактерий вида *Pseudo-monas*. И это в условиях, когда доза в воде за 8 ч составляла 10 млн. р. Бактерии размножились, питаясь ионообменной смолой водяных фильтров. Остается загадочным, как при таких огромных дозах бактерии в состоянии жить и размножаться. По всем данным, в клетках даже при значительно меньших дозах должен был бы свернуться белок и разорваться молекулы ДНК. В Австралии бактерии обнаружили даже не в обычной, а в тяжелой воде реактора (D20), хотя тяжелая вода сама по себе токсична для бактерий.

Не менее поразительно также, в каких широких пределах и как быстро может меняться радиочувствительность клеток. Например, облучение корешка растения на расстоянии 1 см от его верхушки в дозе 200 000 р вызывает незначительную временную задержку роста, а сутками раньше эти клетки располагались на самой верхушке корня и доза всего 30 р была достаточной для заметной задержки их роста. За сутки устойчивость клеток к облучению увеличилась в тысячи раз.

Различаются между собой по чувствительности разные породы животных одного вида и отдельные штаммы бактерий. Выделены, например, штаммы кишечной палочки, относительно резистентные и, наоборот, мало устойчивые к облучению. В одном из штаммов кишечной палочки — K12 изменения обнаруживаются при дозе всего в 1 рад. В этих бактериальных клетках облучение провоцирует размножение частиц фага (бактериального вируса), разрушающего клетку.

Известен факт, что при определенной дозе половина экспериментальных животных гибнет, а другая остается в живых (так называемая 50% летальная доза). Это свидетельствует о разной чувствительности к облучению даже животных одного вида, одной породы, иначе говоря, об индивидуальных колебаниях радиочувствительности. Еще более интересные результаты приносит изучение радиоадаптации у живых организмов. Судите сами: бельгийский ученый Мейзен проделал следующие опыты. Он выделил из культуры дрожжей одну клетку, дождался, когда из нее возникли две дочерние, разделил их. Колония из одной клетки была контрольной, колония из другой клетки облучалась повторно 5—10 раз рентгеновскими лучами в дозах порядка 10 000—

50 000 р. Затем контрольные и повторно облучавшиеся клетки получали дозу рентгеновских лучей, равную 200000 р. Выживаемость контрольных клеток при этой дозе была равна 0%, экспериментальных — 31,9%. Отсюда можно было признать наличие радиоадаптации, исключив при этом то возражение, что при каждом повторном облучении гибнут индивидуально чувствительные клетки и остаются устойчивые, т. е. наблюдается радиоселекция. Чтобы снять это возражение, Мейзен хронически облучал дрожжи гамма-лучами кобальта-60 в дозе всего 50 мр/сутки и через разные сроки производил острое облучение дрожжей в дозе 75 000 р. Контролем служили совсем не облучавшиеся дрожжи. По мере удлинения срока хронического облучения сопротивляемость дрожжей к острому облучению возрастала и достигала максимума через 150 дней.

Выживаемость дрожжей, хронически облучавшихся в течение этого периода после острого облучения в дозе 75 000 р, составляла 50%, а контрольных — 0,9%. В такой постановке опыта не могло быть радиоселекции, и автор считает доказанным эффект радиоадаптации.

В отношении животных и человека нет убедительных доказательств возможности радиоадаптации. Напротив, все говорит за то, что, несмотря на наличие процессов восстановления, в облученном организме остается след поражения неблагоприятно сказывающийся при повторном воздействии.

3.4. Иммуитет и радиация

Важным фактором действия ионизирующего излучения на животных и человека является снижение естественной, созданной природой, и искусственно вырабатываемой способности противостоят заражению микробами, обезвреживать токсины. У здорового животного кровь и органы свободны от микробов. Если они и попадают туда, то быстро исчезают. После облучения микробы беспрепятственно засевают кровь, и развивается то, что называется сепсисом, заражением крови. Откуда микробы берутся? Конечно, они могут попасть в организм извне, но могут иметь и внутреннее происхождение. В последнем случае это чаще всего те виды микробов, которые в нормальных условиях заселяют пищеварительный тракт, но в кровь не проникают из-за преграды в виде стенки кишечника. Когда же после облучения стенка кишечника повреждается, преграда исчезает, и тогда в крови появляется кишечная палочка и другие микробы. К тому же на пути микробов из кишечника в кровь устраняется еще одно препятствие: ткань лимфатических узлов, повреждаемая облучением. Сама кровь также утрачивает свое свойство подавлять рост и убивать микробы. В ней уменьшено число лейкоцитов — этих стражей организма, всегда готовых наброситься на микробы и поглотить их, угнетается, следовательно, открытый И. И. Мечниковым процесс, названный им фагоцитозом. Все это: повреждение кишечной стенки, разрушение лимфатической ткани, гибель белых кровяных телец — способствует проникновению микробов в кровь. Возникают, если их не предупредить, инфекционные осложнения лучевой болезни.

В 1954 г. в крови был открыт особый белок, препятствующий размножению микробов — пропердин. В многочисленных опытах на разных животных, в том числе и на обезьянах, обнаружили, что в сыворотке крови облученных животных содержание этого белка резко снижается, и тем больше, чем тяжелее поражение. Открытие пропердина возбудило много надежд на возможность применения его для лечения лучевой болезни. Но пока введение пропердина или веществ, повышающих его содержание в крови, не оправдало этих надежд.

Часто животные являются носителями заразных микробов, например дизентерии, но остаются при этом практически здоровыми. Облучение провоцирует у обезьян дремлющее до того заболевание. У обезьян, носителей дизентерийных микробов, даже небольшая доза рентгеновских лучей вызывала явное заболевание. Известно, что человек, переболевший какой-либо заразной болезнью, повторно, как правило, ею не заболевает. Человек, перенесший в детстве корь, на протяжении последующей жизни не опасается вновь заболеть ею. У него вырабатывается и сохраняется приобретенный иммунитет к этой болезни. Носителем

иммунных свойств в таком случае служат синтезированные в организме специфические белки — антитела. Раз образовавшись, антитела способны нейтрализовать тот чужеродный для организма белок антиген, который вызвал первоначально заболевание и побудил организм к выработке антител. Реакция антитела с антигеном может происходить по-разному. Антитела могут обезвредить токсины бактерий, растворить клетки бактерий, облегчить их захват лейкоцитами.

Иммунитет приобретается не только в результате перенесения какого-либо заболевания. Вся практика прививок основана на том, что в организм вводят убитые или ослабленные микробы возбудителя болезни или небольшие количества токсина, как такового или подвергнутого тепловой и химической обработке. В привитом организме вырабатываются антитела к введенному антигену. Эти антитела в дальнейшем предупреждают заболевание той болезнью, против которой они направлены. Антитела циркулируют в крови во фракции гамма-глобулинов. В многочисленных исследованиях выявлены некоторые закономерности влияния ионизирующего излучения на развитие приобретенного иммунитета. Излучение подавляет образование антител, и тем сильнее, чем больше доза. Однако если антиген попал или введен в организм за сутки и более до облучения, то к нему вырабатываются антитела почти так же, как и в необлученном организме. Выходит, что облучение только тогда препятствует образованию антител, когда оно предшествует заражению. По мере восстановления кроветворной ткани облученный организм вновь приобретает способность к выработке антител.

3.5. Пути поступления радиоактивных веществ в организм

В атомную эру человек может подвергаться не только дополнительному внешнему облучению, но и воздействию инкорпорированных радиоактивных веществ. Радиоактивные вещества могут поступать в организм тремя путями: с пищей и водой через кишечник, через легкие и через кожу.

Питательные вещества наряду с фоновыми концентрациями естественных радиоактивных веществ могут быть загрязнены искусственными радионуклидами, которые из внешней среды по биологическим пищевым цепочкам попадают в сельхоз. растения, организмы животных и в конце концов в продукты питания человека. Во время нахождения радиоактивных веществ в ЖКТ происходит облучение кишечника. Судьба поступивших в организм радионуклидов зависит от их свойств и химической природы. Существует три основных типа распределения радионуклидов в организме: скелетный, ретикуло-эндотелиальный и диффузный.

- Скелетный - нуклиды щелочно-земельной группы элементов (Ca, Sr, Ba, Ra).
- Ретикулоэндотелиальное распределение присуще нуклидам редкоземельных элементов (Ge, Pr, Pm, Zn, Th, Am) и трансурановым элементам.
- Диффузный - щелочные металлы (K, Na, Cs, Rb). Известны случаи высокой избирательности распределения - органоспецифический.

По способности накапливать радионуклиды основные органы располагаться следующим образом: щитовидная железа, печень, желудочно-кишечный тракт (ЖКТ), почки, скелет, мышцы.

3.6. Нарушения обмена веществ вследствие облучения

Биохимические нарушения - один из тестов наличия остаточных повреждений в организме в отдаленные сроки. Одной из причин их присутствия является радиационное повреждение печени гепатотропными радионуклидами, которые составляют значительную часть активности РПВ.

По накоплению радионуклидов печень занимает второе место, уступая лишь щитовидной железе. Печень является "центральной биохимической лабораторией" и ее повреждение не может не сказаться на состоянии процессов обмена. В ней происходит синтез белков плазмы крови, трансаминирование, дезаминирование, расщепление ненужных

организму веществ, образование мочевины. Обсуждая биохимические процессы в подвергнутом облучению организме, следует всегда иметь в виду их деление на две категории: биохимический этап в механизме первичного действия ионизирующих излучений и биохимические изменения, происходящие в организме при развитии лучевой болезни и ее отдаленных последствий.

Следствием процессов биохимического этапа первичного действия ионизирующего излучения следует признать такие важные цитологические события, как мутации, в частности разрывы хромосом, а также повреждения, приводящие к интерфазной гибели клеток. О том, что разрыв хромосомы - значительно более сложное событие, чем механическое следствие прохождения ионизирующей частицы, свидетельствует хотя бы существование химического мутагенеза, биохимическая природа которого едва ли подлежит сомнению.

Тем не менее существует несколько гипотез, предположительно объясняющих это явление. Основные из них следующие:

1. выведение из строя радиочувствительного гипотетического запрограммированного механизма отмирания;
2. неизвестное (стимулирующее) действие облучения в малых дозах;
3. подавление функции размножения.

Независимо от этих точек зрения весьма интересно соображение о том, что "гипотезы об исключительно вредном эффекте ионизирующего излучения, вероятно потеряли свое значение и, может быть, оно, подобно световой и тепловой энергии имеет свой физиологический и патологический уровень" основу отдаленной лучевой патологии на клеточном уровне составляют три типа нарушений, возникающих в результате непосредственного действия радиации:

1. эффекты, вызывающие клеточную гибель; имеют значение для патогенеза последствий, заключающих в себе невосполнимую утрату камбиального резерва, например изменения в гонадах при лучевой кастрации;
2. консервирующиеся наследственные нарушения; наибольшее значение имеют для тканей с низким уровнем физиологической регенерации, проявляясь в отдаленные сроки;
3. не летальные наследственные изменения; нарушения, стойко репродуцирующиеся при размножении соматических клеток.

Кроме ядерных и эпигеномных нарушений в облученных клетках на развитие отдаленных последствий опосредованное влияние могут оказывать нарушения нейроэндокринной регуляции, определяющие снижение ряда адаптивных возможностей организма.

Наиболее важная информация об отдаленных последствиях радиации для человека получена на лицах, переживших взрыв атомной бомбы в Хиросиме и Нагасаки. Среди жертв взрыва был повышен риск развития рака толстой кишки, гортани, придаточных пазух носа, матки, яичников, яичек, цирроза печени, гипертонии, болезней крови, сахарного диабета и многократно возрастает риск возникновения лейкоза. *Лейкемия* (белокровие) — заболевание крови — проявляется в резком увеличении числа белых кровяных телец в крови, вырабатываемых в здоровом организме в костном мозге и лимфатических узлах. Злокачественно перерождаются те клетки, из которых образуются белые кровяные тельца, что приводит к их безграничному размножению. Лейкемия может протекать остро или хронически. Различают, кроме того, несколько форм лейкомии: если поражается костный мозг — это миелоидная лейкомия, если лимфатические ткани — лимфатическая лейкомия. При этом в периферической крови преобладают разные формы белых кровяных телец.

4. Применение ионизирующих излучений в медицине.

4.1. Рентгеноскопия (рентгеновское просвечивание).

Рентгеноскопия – метод рентгенологического исследования, при котором изображение объекта получают на светящемся (флуоресцентном) экране. Экран представляет собой картон, покрытый особым химическим составом. Этот состав под влиянием рентгеновского излучения начинает светиться. Интенсивность свечения в каждой точке экрана пропорциональна количеству попавших на него рентгеновских квантов. Со стороны, обращенной к врачу, экран покрыт свинцовым стеклом, предохраняющим врача от прямого воздействия рентгеновских лучей.

Флуоресцентный экран светится слабо. Поэтому рентгеноскопию выполняют в затемненном помещении. Врач должен в течении 10 – 15 минут привыкать (адаптироваться) к темноте, что бы различить малоинтенсивное изображение. Сетчатка человеческого глаза содержит два типа зрительных клеток – колбочки и палочки. Колбочки обеспечивают восприятие цветных изображений, тогда как палочки – механизм сумеречного зрения. Можно формально сказать, что рентгенолог при обычном просвечивании работает “палочками”.

У рентгеноскопии много достоинств. Она легко выполнима, общедоступна, экономична. Ее можно произвести в рентгеновском кабинете, в перевязочной, в палате (при помощи передвижного рентгеновского аппарата). Рентгеноскопия позволяет изучать перемещение органов при изменении положения тела, сокращение и расслабления сердца и пульсацию сосудов, дыхательные движения диафрагмы, перистальтику желудка и кишок. Каждый орган нетрудно исследовать в разных проекциях, со всех сторон. Подобный способ исследования рентгенологии называют многоосевым, или методом вращения больного за экраном. Рентгеноскопию используют для выбора наилучшей проекции для рентгенографии с целью выполнения так называемых прицельных снимков.

Однако у обычной рентгеноскопии есть слабые стороны. Она связана с более высокой лучевой нагрузкой, чем рентгенография. Она требует затемнения кабинета и тщательной темновой адаптации врача. После нее не остается документа (снимка), который мог бы храниться и был бы пригоден для повторного рассмотрения. Но самое главное в другом: на экране для просвечивания мелкие детали изображения не удастся различить. Это неудивительно: примите во внимание, что яркость свечения хорошего нгатоскопа в 30 000 раз больше, чем флуоресцентного экрана при рентгеноскопии. В силу высокой лучевой нагрузки и низкой разрешающей способности рентгеноскопию не разрешается применять для проверочных исследований здоровых людей.

Все отмеченные недостатки обычной рентгеноскопии в известной степени устраняются в том случае, если в рентгенодиагностическую систему введен усилитель рентгеновского изображения (УРИ). Плоский УРИ типа “Круиз” повышает яркость свечения экрана в 100 раз. А УРИ, включающий в себя телевизионную систему, обеспечивает усиление в несколько тысяч раз и позволяет заменить обычную рентгеноскопию рентгено-телевизионным просвечиванием.

4.2. Флюорография.

Рентгенография – метод рентгенологического исследования, заключающийся в фотографировании изображения с рентгеновского флуоресцентного экрана или экрана электронно-оптического преобразователя на фотопленку небольшого формата.

При наиболее распространенном способе флюорографии уменьшенные рентгеновские снимки – флюорограммы получают на специальном рентгеновском аппарате – флюорографе. В этом аппарате имеется флуоресцентный экран и механизм

автоматического перемещения рулонной пленки. Фотографирование изображения осуществляется посредством фотокамеры на эту рулонную пленку с размером кадра 70 x 70 мм или 100 x 100 мм.

При другом способе флюорографии, фотосъемку производят на пленки того же формата прямо с экрана электронно-оптического преобразователя. Этот способ исследования называют УРИ- флюорографией. Методика особенно выгодна при исследовании пищевода, желудка и кишечника, т.к. обеспечивает быстрый переход от просвечивания к съемке.

В поликлиниках и стационарах у ряда лиц с заболеваниями легких флюорограммы могут заменять более дорогую рентгенографию, особенно при повторных контрольных исследованиях. Такое рентгенологическое исследование называют диагностической флюорографией.

Основным назначением флюорографии является проведение массовых проверочных рентгенологических исследований, главным образом для выявления скрыто протекающих поражений легких. Такую флюорографию называют проверочной или профилактической. Она является способом отбора из популяции лиц с подозрением на заболевание, а так же способом диспансерного наблюдения за людьми с неактивными и остаточными туберкулезными изменениями в легких, пневмосклерозами и т.д.

Важные достоинства флюорографии – это возможность обследования большого числа лиц в течении короткого времени (высокая пропускная способность), экономичность, удобство хранения флюорограмм. Сопоставление флюорограмм предыдущих лет позволяет рано выявлять минимальные патологические изменения в органах. Этот прием получил название ретроспективного анализа флюорограмм.

Наиболее эффективным оказалось применение флюорографии для выявления скрыто протекающих заболеваний легких, в первую очередь туберкулеза и рака. Периодичность проверочных обследований определяют с учетом возраста людей, характера их трудовой деятельности, местных эпидемиологических условий.

4.3. Томография – послойное рентгеновское исследование.

Томография – это метод рентгенографии отдельных слоев человеческого тела. На обычной рентгенограмме получается суммационное изображение всей толщи исследуемой части тела. Изображение одних анатомических структур частично или полностью накладываются на изображения других. В силу этого теряется тень многих важных структурных элементов органов. Томография служит для получения изолированного изображения структур, расположенных в какой либо одной плоскости, т.е. как бы для расчленения суммационного изображения на составляющие его изображения отдельных слоев объекта. Отсюда название метода – томография.

Эффект томографии достигается посредством непрерывного движения во время съемки двух или трех компонентов рентгеновской системы – излучателя, пациента, пленки. Чаще всего перемещают излучатель (трубки) и пленку, в то время как пациент остается неподвижным. При этом излучатель и пленка движутся по дуге, менее или более сложной траектории, но обязательно во взаимно противоположных направлениях. При таком перемещении изображение большинства деталей на рентгенограмме оказывается нечетким, размазанным. А резкое изображение дают только те образования, которые находятся на уровне центра вращения системы трубка-пленка.

Конструктивно томографы выполняют в виде отдельных рентгеновских аппаратов или специальных приспособлений (приставок) к обычным рентгеновским

установкам. Приставка представляет собой механизм для перемещения излучателя и кассеты во время съемки.

Если на томографе или на томографической приставке изменить уровень центра вращения системы трубка-пленка, то изменится уровень выделяемого слоя.

На томографе всегда надписана цифра, обозначающая глубину исследуемого слоя (чаще всего в сантиметрах от поверхности тела больного). Врач перед томографией выбирает не только глубину залегания выделяемого слоя, но и толщину слоя, изображение которого он желает получить на снимке. Толщина зависит от угла перемещения излучателя и пленки. Чем больше этот угол, тем тоньше выделяемый слой. Обычная величина угла – от 20° до 50°. Если же выбирают очень малый угол перемещения, порядка 3 – 5°, то получают изображение толстого слоя, по существу целой зоны. Этот вариант томографии получил название зонографии.

Показания к томографии достаточно широки, особенно в учреждениях, где не имеется компьютерного томографа. С помощью томографии получают изображения трахеи и крупных бронхов, не прибегая к их искусственному контрастированию.

Томография легких очень ценна для выявления полостей распада в участках инфильтрации или в опухолях, а также для обнаружения гиперплазии внутригрудных лимфатических узлов. Томограммы дают возможность исследовать структуру придаточных пазух носа, гортани, получить изображение отдельных деталей такого сложного объекта, как позвоночник или череп и т.д.

4.4. Ионная медицинская радиография.

Клиническая радиометрия предназначена для однократного или нескольких повторных измерений радиоактивности организма или его части. С ее помощью невозможно получить представление о быстро протекающих процессах, например о кровотоке в различных органах, о вентиляции легких, о функции почек и т.д. Для реконструкции подобных функциональных параметров необходимо получить сведения о динамике транспорта радионуклида. Это осуществляют посредством радиографа.

Радиография – метод непрерывной или дискретной регистрации процессов накопления, перераспределения и выделения РПФ из организма или отдельных органов. Для этих целей применяют радиографы – радиометры, в которых измеритель скорости счета соединен с самописцем, вычерчивающим кривую. В составе радиографа может быть один или несколько декретов, причем каждый из них ведет измерения излучения независимо от другого.

Типичным примером радиографии является исследование накопления и выведения РПФ из легких – так называемая радиопульмография. Под разными отделами обоих легких устанавливают коллимированные сцинтилляционные детекторы. К вдыхаемой пациентом смеси добавляют радиоактивный ксенон (^{133}Xe). Это инертный газ, который быстро выводится из организма и не создает в нем сколько-нибудь значительную дозу радиации. Динамику радиоактивности под каждым отделом легких радиограф регистрирует в виде кривой. Полученные кривые позволяют судить о поступлении и выведении газа, т.е. о вентиляции всех отделов легких.

Радиографический метод отличается простотой выполнения. Но он уступает по точности исследованию на гамма-камере. Главный его недостаток – неконтролируемая “геометрия счета”, т.е. отсутствие возможности точно установить детектор над исследуемым органом, строго охватив его границы. Не дает радиограф и изображение органа. Трактовка результатов затруднена, если в состав радиографа не введен компьютер.

4.5. Лучевая терапия.

Лучевая терапия в настоящее время наряду с хирургическим вмешательством и химиотерапевтическими препаратами является одним из основных методов лечения больных злокачественными опухолями.

До $\frac{2}{3}$ общего числа онкологических больных подвержены лучевому лечению. При этом в неоперабельных случаях лучевая терапия по эффективности занимает первое место. В последние годы лучевой лечебный фактор довольно широко используется при лечении резко воспалительных, дегенеративно-дистрофических, нервных, кожных и других заболеваний неопухолевого генезиса.

4.6. Лучевая терапия злокачественных опухолей.

Успешное проведение курса лучевой терапии во многом зависит от стадии заболевания и общего состояния больного. При выборе методики облучения и проведения лучевого лечения у онкологических больных врач-радиолог должен руководствоваться следующими общими принципами: максимальное лучевое воздействие на опухоль или метастазу с целью их разрушения. Обязательно поведение сопутствующих лечебных мероприятий, направленных на:

1. Усиление общего терапевтического эффекта, повышение биологического действия проникающих излучений (подбор оптимальных доз и ритмов облучения и др.);
2. Повышение защитных сил организма, его сопротивляемости (полноценное питание с достаточным количеством жидкости, прогулки на свежем воздухе, лечебная физкультура, комплекс витаминов);
3. Предупреждение развития лучевых и других осложнений (комплекс средств стимулирующих кроветворение, в частности лейкопоз; средства антитоксического ряда, антигистаминные и противовоспалительные препараты; при необходимости – переливание 100 – 150 мл одногруппной крови).

Общие показания к лучевой терапии злокачественных новообразований основывается на развернутом диагнозе заболевания, подтвержденным результатами биохимическими или цитологическими исследованиями. Этот вид лечения, по существу, проводится по жизненным показателям.

Частные показания весьма многочисленны. Самостоятельно или в комбинации с хирургическим вмешательством лучевой метод лечения применяется при раке кожи, нижней губы, языка, пищевода, легкого, молочной железы, шейки и тела матки, мочевого пузыря, прямой кишки, предстательной железы, щитовидной и слюнных желез, челюстей, при опухолях миндалин и гортаноглотки, опухолях нервной системы (в том числе гипофиза), саркомах костей и мягких тканей и др. Лучевую терапию используют в комплексе лечения опухолей эмбрионального происхождения – симипол, тимом, истинных эмбриональных опухолей почек, яичников и др., при опухолях ренткулоэндотелиального ряда, злокачественных лимфомах саркомы Юинта и др.

Применяют этот метод при рецидивах рака после хирургического или комбинированного лечения (рецидивы рака кожи нижней губы, молочной железы, шейки матки и др.), а также при локальных метастазах в лимфатические узлы, кости, а иногда и в легкие.

Лучевая терапия злокачественных опухолей может применяться как самостоятельный метод лечения или является одним из этапов комбинированного или комплексного воздействия. В последних случаях возможна комбинация облучения с операцией, приемам гормональных препаратов, химиотерапией.

Лучевую терапию в комбинации с хирургическим вмешательством используют в трех различных вариантах: 1. Лучевая терапия, осуществляемые до операции

(предоперационное облучение); 2. Лучевая терапия, проводимая в ходе и после операции (интраоперационное и послеоперационное облучение); 3. лучевая терапия, выполненная как в пред-, так и в послеоперационном периоде.

Задачи *предоперационного облучения* кратко можно сформулировать следующим образом:

- разрушение наиболее радиочувствительных клеток и понижение жизнеспособности оставшихся опухолевых элементов;
- устранение воспалительных явлений в опухоли и вокруг нее;
- стимуляция развития соединительной ткани и инкопсуляция отдельных комплексных раковых клеток;
- облитерация мелких сосудов, ведущая к понижению васкуляризации стромы опухоли и тем самым к уменьшению опасности метастазирования;
- перевод опухолей, находящихся на грани операбельности, в операбельное состояние.

Операция, проведенная вслед за облучением в период сниженной потенции роста злокачественного новообразования (в период так называемой лучевой области), делает прогноз более благоприятным. В основном это облучение используется при раке молочной железы, матки, пищевода, при меланоме, саркомах костей, некоторых опухолях почек.

Послеоперационное облучение имеет целью увеличить эффективность операции с помощью лучевого воздействия на оставленные или имплантированные во время хирургического вмешательства опухолевые элементы. Это облучение направлено на предупреждение рецидивов и уменьшение метастазирования злокачественной опухоли. Его проводят при подавляющем большинстве новообразований (рак молочной железы, саркома мягких тканей и т.д.). Нередко у одного больного используют как пред так и послеоперационную лучевую терапию.

Большое значение в онкологии имеет также паллиативное облучение, которое приносит значительное облегчение многим больным в поздних стадиях заболевания (избавление больных от явлений компрессии жизненно важных органов, дисфагии, резких болей и других тяжелых симптомов заболевания).

Однако для конкретных форм злокачественных новообразований имеются и свои специфические особенности, влияющие на выбор тактики и программы лучевого лечения.

4.7. Лучевая терапия неопухолевых заболеваний.

Лучевая терапия применяется и при лечении следующих неопухолевых заболеваний.

Воспалительные (в том числе гнойные) патологические процессы хирургического профиля: фурункул лица или области кожных складок и суставов; карбункул, абсцесс, флегмона, гидраденит, рожистое воспаление, парапроктит и др.

Некоторые после операционные осложнения: анастомозит, воспалительный инфильтрат в области раны или по соседству с ней, каузалгия, постампутационный болевой синдром, свищи (слюнные, панкреатические, молочные, мочевые и др.).

Некоторые виды раневых осложнений: вяло гранулирующие и инфицированные раны, околораневые дерматозы, остеомиелит и свищи огнестрельного происхождения.

Дегенеративно-дистрофические заболевания костно-суставного аппарата: деформирующий артроз, плечелопаточный периартрит, сондилоартрит, остеохондроз, пяточные и локтевые бурситы, эпикондилиты пермартикулярные обызвествления.

Воспалительные и некоторые гиперпластические заболевания нервной системы: неврит, невралгия, плексит, радикулит, арахноидит, синингомелия и др.

Хронические дерматозы и некоторые другие заболевания кожи: ограниченная (пеликкрабная) экзема, нейродермит, зудящие дерматозы, ограниченные формы грибковых поражений волосистой части головы и лица.

Лучевая терапия также показана при *некоторых эндокринных заболеваниях:* (тиреотоксикоз, климактерический невроз и др.), аллергических процессах (бронхиальная астма и др.), диэнцефальном синдроме, отежном экзофтальме и др.

При очередном обострении хронического воспалительного заболевания лучевую терапию можно иногда проводить повторно, еще 1 – 2 раза, но не реже, чем через 6 – 8 месяцев после последнего облучения, при условии, если оно ранее было достаточно эффективным.

4.8. Радоновая терапия.

Для радонотерапии характерно большое разнообразие форм и методов ее применения. В частности, различны зоны первичного восприятия энергии главных действующих фактов – радона и его дочерних продуктов (кожа, дыхательные пути, слизистые оболочки экзофаго-, гастродуоденальной системы, толстой кишки, гениталий), пути и скорости наступления радона во внутреннюю среду и выведение его из организма, распределение поглощенной энергии излучений в органах и тканях, уровень получаемой ими дозовой нагрузки.

Одним из методов наружного применения лечебных сред, содержащих радон, являются общие ванны – водно-радоновые (индивидуальные и групповые), воздушно-радоновые, паро-радоновые, местные ванны для конечностей (четырёх- камерные, контрастные – для ног), подводный радоновый душ-массаж, сочетание водных радоновых ванн с тракцией позвоночника, радоновые души головы и лица.

Водно-радоновые ванны общие и индивидуальные.

Это наиболее распространенный метод лечения как в курортных, так и во в некурортных условиях. Естественные радоновые воды используют для ванн в их природной концентрации либо разводят пресной водой.

При лечении водными радоновыми ваннами учитывается действие других факторов – гидростатического, температурного, в незначительной мере – минерального. Однако общий терапевтический эффект в основном обусловлен собственно излучениями радона и его дочерних продуктов.

Водно-радоновые ванны индивидуальные в сочетании с концентрацией кислорода. Идея сочетанного применения бальнеологической и кислородной процедур исходит из представлений о том, что теплая ванна, снимая плазмы кровеносных сосудов и скелетной мускулатуры, усиливает и ускоряет проникновение вдыхаемого кислорода в ткани пораженных органов при их гипоксии (облитерирующее заболевание сосудов нижних конечностей, ишемическая болезнь сердца и головного мозга). Увлажненный и охлажденный кислород смешивают с воздухом до концентрации 40 – 50% и под давлением 1,2 – 1,5 атм. подают в палатку, устанавливаемую над ванной, или с помощью специального аппарата – в маску, приближаемую к носу и рту пациента, находящегося в радоновой ванне.

Водно-радоновые ванны общие, групповые. Отпускаются в специальных бассейнах- piscинах одновременно для 8 – 20 пациентов. На каждого из них при приеме процедуры приходится до 1000 л. воды – в 4 – 5 раз больше, чем в индивидуальной ванне. Кроме того, преимуществом бассейна является проточность воды – постоянное поступление новых порций. В итоге существенно возрастают и общее количество радона в лечебной среде, и интенсивность образования на коже активного налета дочерних продуктов (особенно в связи с постоянным движением воды). В большей мере чем в ванной кабине насыщается радоном и воздух процедурного помещения. С учетом увеличения общей дозовой нагрузки при приеме водных радоновых ванн в бассейне применение этого метода показано преимущество

лицам молодого и среднего возраста при отсутствии различных признаков со стороны основного и сопутствующего заболевания.

Водно-радоновые ванны местные для конечностей. Отпускаются в специальных установках состоящих из четырех резервуаров-камер. К каждому резервуару подведена радоновая вода, отрегулированная на проток. Это обеспечивает постоянство концентрации радона и температуры лечебной среды 37°C. Во время процедуры пациент погружает руки и ноги в резервуары с радоновой водой. Продолжительность сеанса до 15 – 20 минут. На курс 10 – 12 ванн. Этот метод применяется при относительно изолированных поражениях дистальных отделов конечностей – полиартрит, остеохондроз.

Радоновый душ головы. Применяется при головных болях разного происхождения, в том числе при гипотоническом синдроме и других проявлениях вегетососудистой дистонии, а так же при заболеваниях кожи головы. Температура радоновой вода 36 – 38°C, продолжительность сеанса 3 – 5 минут, на курсе до 10 процедур.

Заболевание сердечно-сосудистой системы. Лечение на бальнеологических, в том числе радоновых, курортах кардиологического профиля в основном показано больным ишемической болезнью сердца, атеросклерозом венечных сосудов и атеросклеротическим кардиосклерозом с редкими не тяжелыми приступами стенокардии без нарушений сердечного ритма и патологических отклонениях ЭКГ недостаточности кровообращения не выше I степени; лицам, страдающим гипертонической болезнью I и II А стадий.

Заболевание женской половой системы. В гинекологии применению физических факторов отведено значительное место в общей системе мероприятий, проводимых с целью оздоровления женщин, их эффективной медицинской и социальной реабилитации. Лечение на бальнеологических, в том числе радоновых, курортах в основном показано при следующих позологических формах: воспалительных заболеваниях матки и ее придатков в хронической стадии при отсутствии инфильтратов в малом тазу и признаков активности процесса; состоянии после операции по поводу внематочной беременности, воспалительных заболеваний труб и яичников, миомы матки.

При некоторых гинекологических заболеваниях после операции по поводу миомы матки, при воспалительных процессах рекомендуется только курорты с радоновыми водами.

В целом разработка методов радоно-терапии в гинекологии, уточнение и расширение официальных показаний к ней (эндометриоз гениталий, миомы матки) достаточно сложна, ответственна, но перспективна.

Заболевания кожи. Из многочисленных заболеваний кожи лечение на радоновых, как на других бальнеологических курортах показано в основном при следующих распространенных дерматозах: псориазе в хронической стадии без явлений эритродермии и тяжелых поражений суставов, ограниченном и диффузном нейродермите, за исключением экссудативной формы; хронической истинной экземе, в том числе при профессиональных аллергических дерматозах и т.д.

Литература

1. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2000. 542 с.
2. *Ремизов А.Н.* Медицинская и биологическая физика. М: Высш. шк., 1996. 608 с.
3. *Линденбратен Л.Д.* Медицинская радиология и рентгенология. 1993
4. *Дударев А. П.* Лучевая терапия. 1988
5. Архив патологии. № 1, 1971.
6. *Гольдберг Д.И., Гольдберг Е.Д.* Справочник по гематологии. Томск: Изд. ТМИ, 1980.
7. *Сейц И.С., Князев П.Г.* Молекулярная онкология. М: Медицина, 1986.
8. *Гродзенский Д.Э.* Радиобиология – биологическое действие ионизирующих излучений. М: Атомиздат, 1966.
9. *Киселев П.Н.* Биологическое действие ионизирующих излучений и применение с лечебной целью. М: Атомиздат, 1956.

**ПРИМЕНЕНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ
В МЕДИЦИНЕ**

А.В. Соловьев

Пособие для самостоятельной подготовки

Корректор И.А.Зеленская

Отпечатано в лаборатории оперативной типографии СГМУ

Заказ № _____ Тираж _____ экз.