# ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАДИОАКТИВНОСТИ

## Основы радиоактивности

### Строение атома

Атом является основным структурным элементом всех веществ.

Атом – частица вещества, наименьшая частица химического элемента, являющаяся носителем его химических свойств. Химические свойства элемента определяются строением его атома. Атомы различных веществ неодинаковы по своему строению. Так, атом водорода отличается от атома железа, а атом железа от атома урана.

Химический элемент – это определенный вид атомов с одинаковым положительным зарядом ядра. Так, например, все атомы кислорода, независимо от того, входят они в состав молекул кислорода или в состав молекул воды – это химический элемент кислород. В настоящее время известно 108 элементов. Из них 90 существуют в природе, а около 70 содержатся в организме человека. Для обозначения химических элементов введены химические знаки или химические символы. Их обозначают начальной или начальной и одной из последующих букв латинского названия данного элемента (кислород, Oxygenium- О; натрий , Natrium – Na; цинк, Zincum – Zn и т. д.). Каждый элемент занимает в периодической таблице Д.И. Менделеева (ПСМ) определенное место, т.е. имеет порядковый номер.

Определенные атомы объединяются один с одним и образуют новые частицы – молекулы. Молекула – это наименьшая частица вещества, которая сохраняет его состав и химические свойства. В зависимости от того, состоят ли молекулы из атомов одного и того же элемента, или же из атомов различных элементов, все вещества делятся на простые и сложные.

Молекулы простых веществ состоят из одного атома (He – гелий, Ne – неон, Kr – криптон), двух (О2 – кислород, N2 – азот, Cl2 – хлор) и более атомов (S8 – сера). Один и тот же элемент может образовывать несколько простых веществ (так, алмаз и графит отличаются только размещением одних и тех же атомов углерода в молекуле). Возможно и различное число атомов одного и того же элемента в молекуле (О2 – кислород, О3 – азон). Вещества, молекулы которых состояли из атомов двух и более элементов, образуют сложные вещества (Н2О, СО2, Н2SO4, СН3СН2ОН). Каждому элементу соответствует определенный род атома. Размеры атома чрезвычайно малые. Его диаметр составляет 10-8 см, на отрезке в 1 см можно уложить 100 млн. атомов. Масса самого простого и легкого атома – водорода (11Н) составляет 1,67x10-27кг. Атом урана (92238U), самый тяжелый из существующих на Земле элементов , занимающий в таблице Д.И. Менделеева 92 место, тяжелее атома водорода в 238 раз. Известны сверхтяжелые элементы, получаемые искусственным путем. Так атом плутония (94244Pu) в 244 раза тяжелее атома водорода.

Все атомы химических элементов имеют одинаковую структуру. Они состоят из положительно заряженного ядра, где сконцентрирована практически вся масса атома (99,95%) и отрицательно заряженных электронов, образующих электронные оболочки вокруг ядра. В целом атом электрически нейтрален.

Модель строения атома предложил еще в 1911 г. английский физик Эрнст Резерфорд (это так называемая планетарная или ядерная модель). Атом, по Резерфорду, это своеобразная модель Солнечной системы – в центре находится тяжелое положительно заряженное ядро, вокруг которого подобно планетам вокруг Солнца, вращаются отрицательно заряженные электроны. Датский ученый Нильс Бор усовершенствовал планетарную модель атома. Он высказал суждение, что электроны движутся не по любым орбитам, а по определенным. При этом, согласно Бору, электронные орбиты могут быть сгруппированы в отдельные электронные оболочки.

По современным данным электрон в атоме не имеет траектории. Различные положения его рассматриваются как электронное облако с определенной плотностью отрицательного заряда. Максимальная плотность отвечает наибольшей вероятности нахождения электрона в данной части атомного пространства. Пространство вокруг ядра, в котором наиболее вероятно нахождение электрона, называется орбиталью (вместо существовавшего ранее термина орбита).

Орбитали атома имеют разные размеры. Электроны, которые движутся в орбиталях близкого размера, образуют электронные слои. Электронные слои называют также энергетическими уровнями. Энергетические уровни нумеруют, начиная от ядра цифрами - 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 или обозначают буквами – K, L, M, N, O, P, Q. Наибольшее число электронов на энергетическом уровне равно удвоенному квадрату номера уровня - N = 2n 2. Целое число n, обозначающее номер уровня, называется главным квантовым числом. В соответствии с этим уравнением на 1-м, ближайшим к ядру энергетическом уровне, может находиться не более 2-х электронов, на 2-м уровне - не более 8, на 3-м уровне – не более 18, на 4-м уровне – не более 32 электронов и т. д.

Энергетические уровни подразделяются на подуровни, число подуровней равно значению главного квантового числа, но не превышает 4-х подуровней. Подуровни обозначают латинскими буквами – s, p, d, f.

Между ядром и электронами существуют силы притяжения. Наиболее прочная связь электронов с ядром наблюдается у электронов на К-уровне, так углерода энергия связи электронов составляет 280 эВ, стронция – 16 кэВ, цезия – 36 кэВ, урана – 280 кэВ. Чем на более удаленном от ядра энергетическом уровне находится электрон, тем меньше энергия связи его с ядром. На внешних энергетических уровнях энергия связи электронов не превышает 1-2 эВ. Поэтому электроны внешних энергетических уровней более подвержены воздействию излучений низкой энергии.

### Строение атомного ядра

Как уже отмечалось, атом состоит из трех видов элементарных частиц: протонов, нейтронов и электронов. Атомное ядро – центральная часть атома, состоящая из протонов и нейтронов. Протоны и нейтроны имеют общее название нуклон, в ядре они могут превращаться друг в друга. Ядро простейшего атома – атома водорода – состоит из одной элементарной частицы – протона.

Диаметр ядра атома равен примерно 10-13 – 10-12 см и составляет 0,0001 диаметра атома. Однако, практически вся масса атома (99,95 – 99,98 %) сосредоточена в ядре. Если бы удалось получить 1 см3 чистого ядерного вещества, масса его составила бы 100 – 200 млн.т. Масса ядра атома в несколько тысяч раз превосходит массу всех входящих в состав атома электронов.

Протон – элементарная частица, ядро атома водорода. Масса протона равна 1,6721х10-27 кг, она в 1836 раз больше массы электрона. Электрический заряд положителен и равен 1,66х10-19 Кл. Кулон – единица электрического заряда, равная количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника за время 1с при неизменной силе тока 1А (ампер).

Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов. Это число постоянное для данного элемента и определяет его физические и химические свойства. То есть, от количества протонов зависит, с каким химическим элементом мы имеем дело. Например, если в ядре один протон – это водород, если 26 протонов – это железо. Число протонов в атомном ядре определяет заряд ядра (зарядовое число Z) и порядковый номер элемента в периодической системе элементов Д.И. Менделеева (атомный номер элемента).

Нейтрон – электрически нейтральная частица с массой 1,6749 х10-27кг, в 1839 раз больше массы электрона. Нейрон в свободном состоянии – нестабильная частица, он самостоятельно превращается в протон с испусканием электрона и антинейтрино. Период полураспада нейтронов (время, в течение которого распадается половина первоначального количества нейтронов) равен примерно 12 мин. Однако в связанном состоянии внутри стабильных атомных ядер он стабилен. Общее число нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре называют массовым числом (атомной массой – А). Число нейтронов, входящих в состав ядра, равно разности между массовым и зарядовым числами: N = A – Z.

Электрон – элементарная частица, носитель наименьшей массы – 0,91095х10-27г и наименьшего электрического заряда – 1,6021х10-19 Кл. Это отрицательно заряженная частица. Число электронов в атоме равно числу протонов в ядре, т.е. атом электрически нейтрален.

Позитрон – элементарная частица с положительным электрическим зарядом, античастица по отношению к электрону. Масса электрона и позитрона равны, а электрические заряды равны по абсолютной величине, но противоположны по знаку.

Различные типы ядер называют нуклидами. Нуклид – вид атомов с данными числами протонов и нейтронов. В природе существуют атомы одного и того же элемента с разной атомной массой (массовым числом): 17 35Cl, 1737Cl и т.д. Ядра этих атомов содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов. Разновидности атомов одного и того же элемента, имеющие одинаковый заряд ядер, но различное массовое число, называются изотопами. Обладая одинаковым количеством протонов, но различаясь числом нейтронов, изотопы имеют одинаковое строение электронных оболочек, т.е. очень близкие химические свойства и занимают одно и то же место в периодической системе химических элементов.

Изотопы обозначают символом соответствующего химического элемента с расположенным сверху слева индексом А – массовым числом, иногда слева внизу приводится также число протонов (Z). Например, радиоактивные изотопы фосфора обозначают 32Р, 33Р или 1532Р и 1533Р соответственно. При обозначении изотопа без указания символа элемента массовое число приводится после обозначения элемента, например, фосфор – 32, фосфор – 33.

Большинство химических элементов имеет по несколько изотопов. Кроме изотопа водорода 1Н-протия, известен тяжелый водород 2Н-дейтерий и сверхтяжелый водород 3Н-тритий. У урана 11 изотопов, в природных соединениях их три (уран 238, уран 235, уран 233). У них по 92 протона и соответственно 146,143 и 141 нейтрон.

В настоящее время известно более 1900 изотопов 108 химических элементов. Из них к естественным относятся все стабильные (их примерно 280) и естественные изотопы, входящие в состав радиоактивных семейств (их 46). Остальные относятся к искусственным, они получены искусственным путем в результате различных ядерных реакций.

Термин «изотопы» следует применять только в тех случаях, когда речь идет об атомах одного и того же элемента, например, изотопы углерода 12С и 14С. Если подразумеваются атомы разных химических элементов, рекомендуется использовать термин «нуклиды», например, радионуклиды 90Sr,  131J, 137Cs.

### Стабильные и радиоактивные изотопы

Если ядра атомов состоят из протонов, то как объяснить устойчивость этих ядер? Ведь одноименно заряженные протоны согласно закону Кулона, отталкиваясь, друг от друга, должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов очень прочные образования. Следовательно, кроме Кулоновских сил отталкивания в ядре действуют и силы притяжения. Эти силы назвали ядерными силами. Они действуют между нуклонами, т.е. между протоном и протоном, протоном и нейтроном, нейтроном и нейтроном. Они значительны только на малых расстояниях, сравнимых с поперечником самих ядерных частиц (10-13см). С увеличением расстояния между ядерными частицами ядерные силы быстро уменьшаются и становятся практически равными нулю. Так, если на расстоянии 10-15м ядерные силы приблизительно в 100 раз превышают Кулоновские силы отталкивания, то уже на расстоянии 10 –14м они оказываются мизерными.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, т.е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное количество протонов и нейтронов. Так как с увеличением атомного номера увеличение числа нейтронов преобладает, говорят о «разрыхляющем» действии нейтронов.

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, надо совершить работу, т.е. затратить энергию. Эта энергия называется энергией связи ядра. Энергия связи частиц в ядрах составляет несколько миллионов электрон-вольт (эВ). Например, энергия связи ядра гелия составляет 28 МэВ, дейтерия – 2,2 МэВ, азота – 104,5 МэВ, урана – 1800 МэВ. Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется удельной энергией связи, она равна 7 – 8,5 МэВ. Чтобы “взорвать” ядро, нужно приложить такую же энергию “извне”.

В зависимости от того, какие силы в ядре превалируют, ядро является или стабильным или нестабильным. Наибольшую энергию связи, а следовательно и максимальную стабильность имеют ядра, располагающиеся в середине таблицы Д.И.Менделеева (в районе железа). Устойчивость ядра зависит от соотношения количества протонов и нейтронов в ядре. Количество протонов в ядре всегда равно или меньше количества нейтронов. Отношения массы атома к числу протонов должно быть равно или больше 2 (А/Z >,=2). Для легких элементов это отношение равно 2, для тяжелых – 2,6. Чем меньше в ядре нейтронов, тем ядро устойчивее. Если в ядре слишком много протонов или нейтронов, то такие ядра неустойчивы и претерпевают самопроизвольные радиоактивные превращения, в результате которых ядро атома одного элемента превращается в ядро атома другого элемента.

Ядра с четным количеством протонов имеют большую стабильность изотонов и более распространены в природе, чем ядра с нечетным количеством протонов. Наиболее устойчивыми являются ядра с четным количеством протонов и четным количеством нейтронов (“четно-четные” ядра). Самыми устойчивыми являются ядра, содержащие по 2, 8, 20, 50, 82 протона и нейтрона (“дважды магические ядра”): 24Не – гелий, 816О – кислород, 2040Са – кальций.

Наименее устойчивыми являются ядра с нечетным количеством протонов и нечетным количеством нейтронов («нечетно-нечетные» ядра).

В начале и середине таблицы Д.И.Менделеева количество протонов и нейтронов в ядрах в основном равно: 2 4He, 612С, 816О, 1632S и поэтому ядра чаще стабильны. С увеличением атомного номера Z и увеличением количества нейтронов по сравнению с протонами все в большей степени проявляется их «разрыхляющее» действие и ядра становятся менее устойчивыми. У элементов с атомным номером от 84 до 92 ядерные силы уже не способны обеспечивать полную устойчивость ядер. Эти элементы оказываются нестабильными: Rn-222, Ra-226, U-238 и т.д.

Стабильность понижается не только в сторону более тяжелых, но и в сторону более легких элементов: кислород 16, 17, 18 – стабильный, а кислород – 13, 14, 15, 19, 20 – не стабильный; кальций – 40, 42, 43, 44, 46, 48 – стабильный, а кальций – 37, 38, 39, 41, 45, 47, 49, 51 – не стабильный.

Таким образом, низкой стабильностью отличаются ядра с недостаточным и излишним содержанием нейтронов.

### Понятие о радиоактивности

В 1895г В. Рентген обнаружил лучи, которые возникали при пропускании тока высокого напряжения через стеклянный баллон с разреженным воздухом. Эти лучи обладали способностью вызывать почернение фотопластинки в светонепроницаемой упаковке. В 1896г А. Беккерель обнаружил, что соединения урана и некоторые его природные руды (соли урана) самопроизвольно излучают невидимые лучи, обладающие большой проникающей способностью и вызывающие почернение фотопластинки. В 1898г Мария Склодовская-Кюри и Пьер Кюри установили, что излучать лучи могут не только уран и его соединения, но и некоторые другие элементы: радий, торий, полоний. Явление самопроизвольного излучения было названо радиоактивностью, а вещества, излучающие лучи, радиоактивными. В дальнейшем было установлено, что эти излучения связаны с процессом самопроизвольного распада ядер атомов этих веществ. Оказалось, что радиоактивное излучение состоит из трех компонентов разной природы. В магнитном поле эти излучения делятся на три пучка:

• лучи, заряженные отрицательно, β-лучи – отклоняются в сторону севера;

• лучи, заряженные положительно, α-лучи – отклоняются в сторону юга;

• лучи, не имеющие электрического заряда (нейтральные), γ-лучи – не отклоняются.

Радиоактивность (по современным взглядам) – это свойство ядер определенных элементов самопроизвольно (т.е. без каких-либо внешних воздействий) превращаться в ядра других элементов с испусканием особого рода излучений, которые называют радиоактивными излучениями. Само явление называется радиоактивным распадом.

Радиоактивные превращения, в отличие от химических реакций, происходят самопроизвольно и непрерывно, всегда сопровождаются выделением энергии. На их скорость не оказывает никакого влияния ни изменение температуры и давления, ни самый лучший химический катализатор, ни электрическое и магнитное поля, ни агрегатное состояние вещества. Их нельзя ни ускорить, ни замедлить.

Радиоактивность, наблюдающаяся в ядрах, существующих в природных условиях, называют естественной радиоактивностью. Аналогичные процессы, происходящие в искусственно полученных веществах, называют искусственной радиоактивностью. Между – искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Процесс радиоактивного превращения в обоих случаях подчиняется одним и тем же законам (закон сохранения энергии, электрических зарядов и др.). По закону сохранения количества нуклонов, число нуклонов при любом радиоактивном распаде сохраняется, причем нуклоны одного вида могут превращаться в нуклоны другого вида (нейтроны в протоны и наоборот).

Изотопы, обладающие радиоактивностью, называют радиоактивными изотопами. Как уже отмечалось, ядра всех изотопов химических элементов называют нуклидами (т.е. радионуклиды – это радиоактивные атомы с данным массовым числом и атомным номером). Вещества, содержащие в своем составе радионуклиды, называются радиоактивными веществами. Элементы, состоящие только из радиоактивных изотопов, называются радиоактивными элементами (это элементы с Z – 43,61,84 – 108).

### Типы ядерных превращений

В соответствии с видами радиоактивных излучений существуют несколько видов радиоактивного распада (типов радиоактивных превращений). Радиоактивному превращению подвергаются элементы, в ядрах которых слишком много протонов или нейтронов. Рассмотрим виды радиоактивного распада.

1. Альфа-распад характерен для естественных радиоактивных элементов с большим порядковым номером (т.е. с малыми энергиями связи). Известно около 160 альфа-активных видов ядер, в основном порядковый номер их более 82 (Z > 82). Альфа-распад сопровождается испусканием из ядра неустойчивого элемента альфа-частицы, которая представляет собой ядро атома гелия Не (в его составе 2 протона и 2 нейтрона). Заряд ядра уменьшается на 2, массовое число – на 4.

ZАХ → Z-2 А-4У + 2 4Не; 92 238U →24 Не + 90 234Th;

88 226Ra→2 4He + 86 222Rn + γ изл.

Альфа – распад подвергается более 10% радиоактивных изотопов.

2. Бета-распад. Ряд естественных и искусственных радиоактивных изотопов претерпевают распад с испусканием электронов или позитронов.

а) Электронный бета-распад. характерен как для естественных, так и для искусственных радионуклидов, которые имеют излишек нейтронов (т.е. в основном для тяжелых радиоактивных изотопов). Электронному бета-распаду подвергается около 46% всех радиоактивных изотопов. При этом один из нейтронов превращается в протон, а ядро испускает электрон и антинейтрино. Заряд ядра и соответственно атомный номер элемента при этом увеличивается на единицу, а массовое число остается без изменения.

АZ Х → АZ+1У + е- + v-; 24194Pu→24195Am+e-+v-; 6429Cu→6430Zn+e-+v-; 4019K→4020Ca+e-+v-

При испускании β-частиц ядра атомов могут находиться в возбужденном состоянии, когда в дочернем ядре обнаруживается избыток энергии, которая не захвачена корпускулярными частицами. Этот излишек энергии высвечивается в виде гамма-квантов.

13755Cs →13756 Ва+е-+v-+γ изл.

б) Позитронный бета-распад. Наблюдается у некоторых искусственных радиоактивных изотопов, у которых в ядре имеется излишек протонов. Он характерен для 11% радиоактивных изотопов, находящихся в первой половине таблицы Д.И. Менделеева (Z<45). При позитронном бета-распаде один из протонов превращается в нейтрон, заряд ядра и соответственно атомный номер уменьшается на единицу, а массовое число остается без изменений. Ядро испускает позитрон и нейтрино.

AZX→AZ-1У+е++v+; 3015P→3014Si+e++v+; 6429Cu→ 6428Ni+e++v+

Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон – электрон», которая мгновенно превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц (е и е). Процесс превращения пары «позитрон – электрон» в два гамма-кванта получил название аннигиляции (уничтожения), а возникающее электромагнитное излучение – аннигиляционного. В данном случае происходит превращение одной формы материи (частиц вещества) в другую – гамма-фотоны.

в) Электронный захват. Это такой вид радиоактивного превращения, когда ядро атома захватывает электрон из ближайшего к ядру энергетического К-уровня (электронный К-захват) или реже в 100 раз – из L уровня. В результате один из протонов ядра нейтрализуется электроном, превращаясь в нейтрон. Порядковый номер нового ядра становится на единицу меньше, а массовое число не изменяется. Ядро испускает антинейтрино. Освободившееся место, которое занимал в К или L – уровне захваченный электрон, заполняется электроном из более удаленных от ядра энергетических уровней. Избыток энергии, освободившийся при таком переходе, испускается атомом в виде характеристического рентгеновского излучения.

AZХ + е- → AZ-1У + v- + рентгеновское излучение

4019К + е- → 40 18Аr + v-+ рентгеновское излучение

6429Сu + е- → 6428Ni+v- + рентгеновское излучение

Электронный К-захват характерен для 25% всех радиоактивных ядер, но в основном для искусственных радиоактивных изотопов, расположенных в другой половине таблицы Д.И.Менделеева и имеющих излишек протонов (Z = 45 – 105). Только три естественных элемента претерпевают К-захват: калий-40, лантан-139, лютеций-176 (4019K, 13957La, 17671Lu)

Некоторые ядра могут распадаться двумя или тремя способами : путем альфа- и бета-распада и К-захвата.

Калий–40 подвергается, как уже отмечалось, электронному распаду – 88%, и К-захвату – 12%. Медь–64 превращается в никель (позитронный распад – 19%, К-захват – 42%; электронный распад – 39%).

3. Испускание γ-излучения не является видом радиоактивного распада (при этом не происходит превращение элементов), а представляет собой поток электромагнитных волн, возникающих при альфа- и бета –распаде ядер атомов (как естественных, так и искусственных радиоактивных изотопов), когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением (альфа- и бета- частицей). Этот избыток мгновенно высвечивается в виде гамма-квантов.

13153I→13154Xe + e- +v- +2γ кванта; 22688Ra→42He + 22286Rn + γ квант.

4. Протонная радиоактивность – испускание протона из ядра в основном состоянии. Этот процесс может наблюдаться у искусственно полученных ядер с большим дефицитом нейтронов

лютеций-151– в нем на 24 нейтрона меньше, чем в стабильном изотопе Lu.

### Ядерные и термоядерные реакции

Ядерные реакции – это превращение ядер атомов, вызванные воздействием на них элементарных частиц или других ядер. Так под действием нейтронов происходит самопроизвольное (спонтанное) деление ядер радиоактивных элементов с большими атомными массами (урана-235, тория-232, протактиния-231, плутония-239). Ядра урана-235 и плутония-239 делятся нейтронами любых энергий, но особенно хорошо медленными нейтронами. Ядра урана-238 делятся только быстрыми нейтронами (с энергиями, не меньшими 1 МэВ). Деление тяжелых ядер может быть вызвано и другими частицами – протонами, дейдронами, альфа-частицами. При делении ядер урана-235 образуются осколки деления, которые представляют собой ядра элементов со средними массовыми числами в соотношении 2:3, а также свободные нейтроны (2-3) и γ-излучение. При этом выделяется значительная энергия (= 200 МэВ). Всего образуется около 80 различных осколков, которые разлетаются со скоростью, равной скорости света.

23592U + 10n→14055Cs + 9437Rb + 2 10n; 23592U + 10n→14054Xe + 9438Sr + 210n

23592U + 10n→14456Ba + 8936Kr + 3 10n

Полученные осколки претерпевают ядерные превращения, в основном бета-распад

14054Xe → 14055Sr →14056Ba→14057La→14058Ce (стабильный)

9437Rb→9438Sr→9439Y→9440Zn (стабильный)

Каждый из 2-3 образовавшихся при делении ядер урана нейтронов способен вызвать новый акт деления и т.д. Количество нейтронов нарастает в геометрической прогрессии - возникает ценная реакция деления, приобретающая взрывной характер.

Цепная реакция деления может начаться и происходить, если масса урана-235 достигает определенной величины. Наименьшее количество вещества, в котором возможна цепная ядерная реакция деления называется критической массой. Для урана-235 – это десятки кг, для урана-233 – 5-6 кг, для калифорния – около 1г. На этом основано устройство атомной бомбы. Ядерный заряд такой бомбы представляет 2 куска урана-235 или плутония-239 с докритической массой. При взрыве обычного взрывчатого вещества обе части соединяются, давая сверхкритическую массу. В земной атмосфере всегда имеется некоторое количество нейтронов за счет космических лучей. Их достаточно для начала реакции деления и запуска цепной реакции взрывного характера. Всего смесь продуктов деления содержит более 200 изотопов 36 элементов (большинство из них с небольшими периодами полураспада).

При использовании цепной реакции деления в ядерных реакторах создаются такие условия, что только один из нейтронов, образующихся при делении урана, будет вызывать акт деления. Количество делящихся в каждый момент ядер будет примерно одинаковым и количество выделяющейся энергии будет поддерживаться на каком-то определенном уровне, и выделяющееся тепло может быть использовано для получения электроэнергии (1г урана дает такое же количество энергии, как 2,5т угля). На этом основана работа атомных электростанций.

Термоядерные реакции. Кроме процесса деления тяжелых ядер, существует и другой способ получения энергии – синтез тяжелых ядер из более легких. Такие реакции протекают при очень высоких температурах (многие миллионы градусов) поэтому их называют термоядерными. При такой температуре кинетическая энергия ядер достаточна для преодоления их кулоновских сил отталкивания. В этих условиях ядра легких элементов, двигаясь с высокой кинетической энергией, будут сближаться на очень малые расстояния – порядка 10-15 м и объединяться в ядра более тяжелых элементов. Примером таких реакций является синтез ядер гелия из ядер дейтерия и трития.

21Н+21Н→32Не+10n;

31H+21Н→42He+10n;

21Н+21Н→31H+11р;

32Не+32Не→42He+211р

В приведенных реакциях выделение энергии, рассчитанное на один нуклон, превышает выделение энергии при реакциях деления тяжёлых ядер.

На основе реакции синтеза ядер гелия из ядер дейтерия и трития основано действие водородной бомбы. Необходимая для начала этой реакции температура обеспечивается взрывом атомной бомбы, которая выполняет роль своеобразного запала. В водородной бомбе термоядерная реакция носит неконтролируемый характер. Осуществить управляемую термоядерную реакцию пока не удается.

### Период полураспада радионуклидов. Закон радиоактивного распада

Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов использую особую величину – период полураспада. Для каждого радиоактивного изотопа существует определенный интервал времени, в течение которого активность снижается в два раза. Этот интервал времени и носит название период полураспада.

Период полураспада (Т½) – это время, в течении которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер. Период полураспада – величина строго индивидуальная для каждого радиоизотопа. У одного и того же элемента могут быть изотопы с разными периодами полураспада. Имеются изотопы с периодом полураспада от долей секунды до миллиардов лет (от 3х10-7 с до 5х1015 лет). Так для полония-214 Т½ равен 1,6•10-4 с, для кадмия-113 - 9,3х1015 лет. Радиоактивные элементы подразделяются на короткоживущие (период полураспада исчисляется часами и днями) – родон-220 – 54,5с, висмут-214 – 19,7мин, иттрий-90 – 64 часа, стронций - 89 - 50,5 дня и долгоживущие (период полураспада исчисляется годами) – радий-226 – 1600 лет, плутоний-239 – 24390 лет, рений-187 – 5х1010 лет, калий-40 – 1,32х109 лет.

Из элементов, выброшенных при аварии на ЧАЭС, отметим периоды полураспада следующих элементов: йод-131 - 8,05 дня, цезий-137 - 30 лет, стронций-90 - 29,12 лет, плутоний-241 - 14,4 года, америций-241 - 432 года.

Для каждого радиоактивного изотопа средняя скорость распада его ядер постоянная, неизменная и характерная только для данного изотопа. Количество радиоактивных атомов какого-либо элемента, распадающихся за промежуток времени пропорционально общему количеству имеющихся радиоактивных атомов.

dN = - λNdt

где dN- количество распадающихся ядер,

dt - промежуток времени,

N - количество имеющихся ядер,

- λ- коэффициент пропорциональности (постоянная радиоактивного распада).

Постоянная радиоактивного распада показывает вероятность распада атомов радиоактивного вещества в единицу времени, характеризует долю атомов данного радионуклида, распадающихся в единицу времени, т.е. попостоянная радиоактивного распада характеризует относительную скорость распада ядер данного радионуклида. Знак минус (-λ) показывает, что количество радиоактивных ядер убывает со временем. Постоянную распада выражают в обратных единицах времени: с-1, мин-1 и т.д. Величину, обратную постоянной распада (r=1/ λ), называют средней продолжительностью жизни ядра.

Таким образом, закон радиоактивного распада устанавливает, что за единицу времени распадается всегда одна и та же доля нераспавшихся ядер данного радионуклида. Математический закон радиоактивного распада можно показать в виде формулы: λt

Nt = No х е-λt

где Nt- количество радиоактивных ядер, остающихся по окончании времени t,

No-исходное количество радиоактивных ядер в момент времени t,

е – основание натуральных логорифмов (=2,72) ,

-λ- постоянная радиоактивного распада.

t-промежуток времени (равен t-to).

Т.е. число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте. По этой формуле можно рассчитать число нераспавшихся атомов в данный момент времени. Для характеристики скорости распада радиоактивных элементов на практике вместо постоянной распада пользуются периодом полураспада.

Особенность радиоактивного распада в том, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно, в различное время. Момент распада каждого ядра не может быть предсказан заранее. Поэтому распад любого радиоактивного элемента подчиняется статистическим закономерностям, носит вероятностный характер и может быть математически определен для большого количества радиоактивных атомов. Иными словами, распад ядер происходит неравномерно – то большими, то меньшими порциями. Из этого следует практический вывод, что при одном и том же времени измерения числа импульсов от радиоактивного препарата мы можем получить разные значения. Следовательно, для получения верных данных необходимо измерения одной и той же пробы проводить не один, а несколько раз, и чем больше, тем точнее будут результаты.

## Свойства ионизирующих излучений

### Понятие об ионизирующих излучениях

*Радиация* – излучение (от radiare – испускать лучи) – распространение энергии в форме волн или частиц. Свет, ультрафиолетовые лучи, инфракрасное тепловое излучение, микроволны, радиоволны представляют собой разновидность радиации. Часть излучений получили название ионизирующих благодаря своей способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе.

*Ионизирующее излучение* – излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию ионов разных знаков. Это поток частиц или квантов,способных прямо или косвенно вызывать ионизацию окружающей среды. Ионизирующее излучение объединяет разные по своей физической природе виды излучений. Среди них выделяются *элементарные частицы* (электроны, позитроны, протоны, нейтроны, мезоны и др.), более тяжелые *многозарядные ионы* (α-частицы, ядра бериллия, лития и других более тяжелых элементов); излучения, имеющие *электромагнитную природу* (γ-лучи, рентгеновские лучи).

Различают два типа ионизирующих излучений: корпускулярное и электромагнитное.

*Корпускулярное излучение* – представляет собой поток частиц (корпускул), которые характеризуются определенной массой, зарядом и скоростью. Это электроны, позитроны, протоны, нейтроны, ядра атомов гелия, дейтерия и др.

*Электромагнитное излучение -* поток квантов или фотонов (γ-лучи, рентгеновские лучи). Оно не имеет ни массы, ни заряда.

Различают также непосредственно и косвенно ионизирующие излучения.

*Непосредственно ионизирующее излучение* – ионизирующее излучение, состоящее из заряженных частиц, имеющих кинетическую энергию, достаточную для ионизации при столкновении (электрон, протон, частица и др.).

*Косвенно ионизирующее излучение* - ионизирующее излучение, состоящее из незаряженных частиц, и фотонов которые могут создавать непосредственно ионизирующее излучение и (или) вызвать ядерные превращения (нейтроны, рентгеновские и γ-излучения).

Основными *свойствами* ионизирующих излучений является способность при прохождении через любое вещество вызывать образования большого количества *свободных электронов* и положительно заряженных *ионов* (т.е. ионизирующая способность).

Частицы или квант высокой энергии выбивают обычно один из электронов атома, который уносит с собой единичный отрицательный заряд. При этом оставшаяся часть атома или молекулы, приобретя положительный заряд (из-за дефицита отрицательно заряженной частицы), становится положительно заряженным ионом. Это так называемая *первичная ионизация.*

Выбитые при первичном взаимодействии электроны обладая определенной энергией сами взаимодействуют со встречными атомами, превращают их в отрицательно заряженный ион (происходит *вторичная ионизация*). Электроны, которые потеряли в результате столкновений свою энергию, остаются свободными. Первый вариант (образование положительных ионов) происходит лучше всего с атомами, у которых на внешней оболочке имеется 1-3 электрона, а второй (образование отрицательных ионов) – с атомами, у которых на внешней оболочке имеется 5-7 электронов.

Таким образом, ионизирующий эффект – главное проявление действия радиации высоких энергий на вещество. Именно поэтому радиация и называется ионизирующей (ионизирующими излучениями).

Ионизация возникает как в молекулах неорганического вещества, так и в биологических системах. Для ионизации большинства элементов, которые входят в состав биосубстратов (это значит для образования одной пары ионов) необходимо поглощение энергии в 10-12 эВ (электрон-вольт). Это так называемый *потенциал ионизации*. Потенциал ионизации воздуха равен в среднем 34 эВ.

Таким образом, ионизирующие излучения характеризуются определенной энергией излучения, измеряемой в эВ. Электрон-вольт (эВ) – это внесистемная единица энергии, которую приобретает частица с элементарным электрическим зарядом при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов в 1 вольт

1эВ=1,6 х 10-19 Дж = 1,6 х 10-12 эрг.

1кэВ (килоэлектрон-вольт) = 103 эВ.

1МэВ (мегаэлектрон-вольт) = 106 эВ.

Зная энергию частиц, можно подсчитать, сколько пар ионов они способны образовать на пути пробега. Длина пути – полная длина траектории частицы (какой бы сложной она не была бы). Так, если частица обладает энергией в 600 кэВ, то она может образовать в воздухе около 20000 пар ионов.

В тех случаях, когда энергии частицы (фотона) недостаточно для того, чтобы электрон преодолел притяжение атомного ядра и вылетел за пределы атома, (энергия излучений меньше потенциала ионизации) ионизация не происходит. Электрон, приобретя излишек энергии (так называемый *возбужденный*), на доли секунды переходит на более высокий энергетический уровень, а затем скачком возвращается на прежнее место и отдает излишнюю энергию в виде кванта свечения (ультрафиолетового или видимого). Переход электронов с внешних орбит на внутренние сопровождается рентгеновским излучением.

Однако, роль *возбуждения* в воздействии радиации второстепенная в сравнении с *ионизацией* атомов, поэтому общепринято название радиации высоких энергий: «*ионизирующая*», что подчеркивает ее главное свойство.

Второе название радиации – «*проникающая*» – характеризует способность излучений высокой энергии, прежде всего, рентгеновских и γ-лучей, проникать в глубину вещества, в частности, в тело человека. Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит, с одной стороны, от природы излучения, заряда составляющих его частиц и энергии, а с другой – состава и плотности облучаемого вещества.

Ионизирующие излучения обладают определенной скоростью и энергией. Так, β-излучение и γ-излучение распространяются со скоростью, близкой к скорости света. Энергия, например, α-частиц колеблется в пределах 4-9 МэВ.

Одной из важных особенностей биологического воздействия ионизирующей радиации является невидимость, неощутимость. В этом и заключается их опасность, человек ни визуально, ни органолептически не может обнаружить воздействие излучений. В отличие от лучей оптического диапазона и даже радиоволн, которые вызывают в определенных дозах нагревание тканей и ощущение тепла, ионизирующие излучения даже в смертельных дозах нашими органами чувств не фиксируется. Правда, у космонавтов наблюдались косвенные проявления действия ионизирующей радиации – ощущение вспышек при закрытых глазах – за счет массивной ионизации в сетчатке глаза. Таким образом, ионизация и возбуждение – основные процессы, в которых тратится энергия излучений, поглощаемая в облучаемом объекте.

Возникшие ионы исчезают в процессе рекомбинации, это значит воссоединения положительных и отрицательных ионов, в котором образуются нейтральные атомы. Как правило, процесс сопровождается образованием возбуждаемых атомов.

Реакции с участием ионов и возбужденных атомов имеют чрезвычайно важное значение. Они лежат в основе многих химических процессов, в том числе и биологически важных. С ходом этих реакций связываются отрицательные результаты воздействия радиации на организм человека.

### Характеристика отдельных видов излучений

*Корпускулярные излучения* - ионизирующие излучения, состоящие из частиц с массой, отличной от нуля.

*Альфа-излучение* – поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия - 24Не), которые движется со скоростью около 20000км/с. Альфа-лучи образуются при радиоактивном распаде ядер элементов с большими порядковыми номерами и при ядерных реакциях, превращениях. Энергия их колеблется в пределах 4-9 (2-11) МэВ. Пробег α-частиц в веществе зависит от их энергии и от природы вещества, в котором они движутся. В среднем в воздухе пробег составляет 2-10см, в биологической ткани – несколько микрон. Так как α-частицы массивны и обладают относительно большой энергией, путь их в веществе *прямолинейный*, они вызывают сильно выраженный эффект ионизации. Удельная ионизация составляет примерно 40000 пар ионов на 1 см пробега в воздухе (на всей длине пробега может создаваться до 250 тысяч пар ионов). В биологической ткани на пути в 1-2 микрона также создается до 40000 пар ионов. Вся энергия передается клеткам организма, нанося ему огромный вред.

Альфа-частицы задерживаются листом бумаги и практически не могут проникать через внешний (наружный) слой кожи, они поглощаются роговым слоем кожи. Поэтому α-излучение не представляет опасности до той поры, пока радиоактивные вещества, излучающие α-частицы, не попадут внутрь организма через открытую рану, с пищей или вдыхаемым воздухом – тогда они становятся *чрезвычайно опасными*.

*Бета-излучение* - поток β-частиц, состоящий из электронов (отрицательно заряженных частиц) и позитронов (положительно заряженных частиц), испускаемых атомными ядрами при их β-распаде. Масса β-частиц в абсолютном выражении равна 9,1х10-28 г. Бета-частицы несут один элементарный электрический заряд и распространяются в среде со скоростью от 100 тыс. км/с до 300 тыс. км/с (т.е. до скорости света) в зависимости от энергии излучения. Энергия β-частиц колеблется в значительных пределах. Это объясняется тем, что при каждом β-распаде радиоактивных ядер образующаяся энергия распределяется между дочерним ядром, β-частицами и нейтрино в разных соотношениях, причем энергия β -частиц может колебаться от нуля до какого-то максимального значения. Максимальная энергия лежит в пределах от 0,015 – 0,05 МэВ (мягкое излучение) до 3 – 13,5 МэВ (жесткое излучение).

Так как β-частицы имеют заряд, то под действием электрического и магнитного полей они отклоняются от прямолинейного направления. Обладая очень малой массой, β-частицы при столкновении с атомами и молекулами также легко отклоняются от своего первоначального направления (т.е. происходит сильное рассеяние их). Поэтому определить длину пути бета-частиц очень трудно – этот путь слишком извилистый. Пробег β-частиц в связи с тем, что они обладают различным запасом энергии также подвергается колебаниям. Длина пробега в воздухе может достигать 25 см, а иногда и нескольких метров. В биологических тканях пробег частиц составляет до 1 см. На путь пробега влияет также плотность среды.

Ионизирующая способность бета-частиц значительно ниже, чем альфа-частиц. Степень ионизации зависит от скорости: меньше скорость – больше ионизация. На 1 см пути пробега в воздухе β-частица образует 50-100 пар ионов (1000-25 тыс. пар ионов на всем пути в воздухе ). Бета-частицы больших энергий, пролетая мимо ядра слишком быстро, не успевают вызвать такой же сильный ионизирующий эффект, как медленные бета-частицы. При потере энергии электрон захватывается либо положительным ионом с образованием нейтрального атома, либо атомом с образованием отрицательного иона.

*Нейтронное излучение* - излучение, состоящее из нейтронов, т.е. нейтральных частиц. Нейтроны образуются при ядерных реакциях (цепной реакции деления ядер тяжелых радиоактивных элементов, при реакциях синтеза более тяжелых элементов из ядер водорода). Нейтронное излучение является косвенно ионизируемым; образование ионов происходит не под действием самих нейтронов, а под действием вторичных тяжелых заряженных частиц и гамма-квантов, которым нейтроны передают свою энергию. Нейтронное излучение чрезвычайно опасно вследствие своей высокой проникающей способности (пробег в воздухе может достигать несколько тысяч метров). Кроме того нейтроны могут вызвать наведенную радиоактивность (в том числе и в живых организмах), превращая атомы стабильных элементов в их радиоактивные изотопы. От нейтронного облучения хорошо защищают водородсодержащие материалы (графит, парафин, вода и т.д.)

В зависимости от энергии различают следующие нейтроны:

1. Сверхбыстрые нейтроны с энергией в 10-50 МэВ. Они образуются при ядерных взрывах и работе ядерных реакторов.
2. Быстрые нейтроны, энергия их превышает 100 кэВ.
3. Промежуточные нейтроны – энергия их от 100 кэВ до 1 кэВ.
4. Медленные и тепловые нейтроны. Энергия медленных нейтронов не превышает 1 кэВ. Энергия тепловых нейтронов достигает 0,025 эВ.

Нейтронное излучение используют для нейтронной терапии в медицине, определения содержания отдельных элементов и их изотопов в биологических средах и т.д. В медицинской радиологии используются главным образом быстрые и тепловые нейтроны, в основном используют калифорний-252, распадающийся с выбросом нейтронов со средней энергией в 2,3 МэВ.

*Электромагнитные излучения* различаются по своему происхождению, энергии, а также по длине волны. К электромагнитным излучениям относятся рентгеновское излучение, гамма-излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение, возникающее при прохождении через вещество сильно ускоренных заряженных частиц. Видимый свет и радиоволны – тоже электромагнитные излучения, но они не ионизируют вещество, ибо характеризуются большой длинной волны (меньшей жесткостью). Энергия электромагнитного поля излучается не непрерывно, а отдельными порциями – квантами (фотонами). Поэтому электромагнитные излучения – это поток квантов или фотонов.

*Рентгеновские излучения.* Рентгеновские лучи были открыты Вильгельмом Конрадом Рентгеном в 1895г. Рентгеновское излучение – это квантовое электромагнитное излучение с длинной волны 0,001-10нм. Излучение с длинной волны, превышающей 0,2 нм условно называют «мягким» рентгеновским излучением, а до 0,2 нм – «жестким». Длина волны – расстояние, на которое излучение распространяется за один период колебания. Рентгеновское излучение, как и всякое электромагнитное излучение, распространяется со скоростью света – 300000 км/с. Энергия рентгеновского излучения обычно не превышает 500 кэВ.

Различают тормозное и характеристическое рентгеновское излучение. Тормозное излучение возникает при торможении быстрых электронов в электростатическом поле ядра атомов (т.е. при взаимодействие электронов с ядрами атомов). При прохождении электрона больших энергий вблизи ядра наблюдается рассеяние (торможение) электрона. Скорость электрона снижается и часть его энергии испускается в виде фотона тормозного рентгеновского излучения.

Характеристические рентгеновские излучения возникают когда быстрые электроны проникают вглубь атома и выбивают электрон из внутренних уровней (К, L и даже М). Атом возбуждается, а затем возвращается в основное состояние. При этом электроны из внешних уровней заполняют освободившиеся места во внутренних уровнях и при этом излучаются фотоны характеристического излучения с энергией, равной разности энергии атома в возбужденном и основном состоянии (не превышающем 250 кэВ). Т.е. характеристическое излучение возникает при перестроении электронных оболочек атомов. При различных переходах атомов из возбужденного состояния в невозбужденное, избыток энергии может также испускаться в виде видимого света, инфракрасных и ультрафиолетовых лучей. Так как рентгеновские лучи обладают малой длиной волн и меньше поглощаются в веществе, то они обладают большей проникающей способностью.

*Гамма-излучение* - это излучение ядерного происхождения. Оно испускается ядрами атомов при альфа и бета распаде природных искусственных радионуклидов в тех случаях, когда в дочернем ядре оказывается избыток энергии, не захваченный корпускулярным излучением (альфа- и бета-частицей). Этот избыток энергии мгновенно высвечивается в виде гамма-квантов. Т.е. гамма-излучения – это поток электромагнитных волн (квантов), который излучается в процессе радиоактивного распада при изменении энергетического состояния ядер. Кроме того, гамма-кванты образуются при антигиляции позитрона и электрона. По свойствам гамма-излучение близко к рентгеновскому излучению, но обладает большей скоростью и энергией. Скорость распространения в вакууме равняется скорости света – 300000км/с. Так как гамма-лучи не имеют заряда, то в электрическом и магнитном полях не отклоняются, распространяясь прямолинейно и равномерно во все стороны от источника. Энергия гамма-излучения колеблется от десятков тысяч до миллионов электрон-вольт (2-3 МэВ), редко достигает 5-6 МэВ (так средняя энергия гамма-лучей, образующихся при распаде кобальта-60 равна 1,25 МэВ). В состав потока гамма-излучений входят кванты различных энергий. При распаде 131İ высвечивается пять групп квантов с различными энергиями, 82Вr излучает 11 групп гамма-квантов. Примером моноэнергетического гамма-излучения служит 137Сs, при его распаде высвечивается один квант с энергией в 0,661 МэВ. Путь пробега гамма-лучей в воздухе превышает 100 м, т.е. они обладают большой проникающей способностью и свободно проходят через тело человека. Чтобы снизить в 2 раза гамма-излучение радиоактивного кобальта – 2760Со (наиболее часто используемого в медицине для лучевой терапии) нужно взять слой свинца в 1,6 см или слой бетона в 10 см.

### Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом

Все виды ядерных излучений могут быть обнаружены только по их взаимодействию с веществом. При прохождении через вещество радиоактивные излучения взаимодействуют с атомами среды, т.е. с электронами и ядрами. Обнаружение и регистрация излучений, выбор материала для защиты, оценка биологического действия излучений основаны на эффектах, которые возникают при взаимодействии излучений с веществом. Механизм прохождения через вещество каждого вида излучений разный.

*Взаимодействие рентгеновских* *и γ-излучений* осуществляется тремя основными механизмами (способами) : при помощи фотоэлектрического поглощения (фотоэффекта), комптоновского рассеяния (комптон-эффекта), образования электронно-позитронных пар.

*Фотоэффект*. При фотоэлектрическом эффекте энергия падающего кванта полностью поглощается веществом, в результате чего появляется свободный электрон, обладающий определенной кинетической энергией, величина которой равна энергии кванта излучения за вычетом работы выхода данного электрона из атома (электрон покидает границы атома). Вероятность фотоэффекта увеличивается с ростом энергии связи электронов в атоме. Обычно выбивается электрон из К-слоя (в 80% случаев). Свободный электрон, ассоциируясь с одним из нейтральных атомов, порождает отрицательный ион. Атом, потерявший электрон, становится возбужденным. «Вакантное» место К-электрона (выбитого из атома) заполняется электроном из L-слоя, на L-слой переходит электрон из М-слоя и т.д. При этом высвечивается один или несколько квантов характеристического *рентгеновского излучения*. Характеристическое излучение – фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома. Энергия рентгеновских квантов, образовавшихся при фотоэффекте достигает 0,1 МэВ (т.к. достаточно большая энергия). Однако энергия, излучаемая легкими атомами вторичных фотонов малая и такие фотоны сразу же поглощаются веществом.

Фотоэффект характерен только для длинноволнового рентгеновского излучения. Фотоэлектрическое поглощение преобладает тогда, когда энергия гамма-кванта не превышает 0,05 МэВ. Фотоэффект идет интенсивней в более тяжелых ядрах (железо, медь, свинец и т.д.). Фотоэффект невозможен на слабосвязанных и свободных электронах (не связанных с атомами), так как они не могут поглощать гамма-кванты. В воздухе, воде и биологических тканях фотоэлектрическое поглощение составляет 50% при энергии гамма-квантов порядка 60 кэВ. Таким образом, фотоэффект является главным процессом поглощения при относительно малых энергиях ионизирующих излучений, когда часть энергии первичных фотонов превращается в кинетическую энергию электронов, часть в энергию характеристического излучения.

*Эффект Комптона*. Для излучений с энергией, значительно превышающей внутриатомные энергии связи (> 1 МэВ) главную роль в ионизации приобретает эффект Комптона (обычно от 200 кэВ до 2 МэВ). При комптон-эффекте происходит упругое рассеяние падающих фотонов излучения на электронах внешних слоев атомов облучаемого вещества, которые можно считать не связанными (свободными), так как чем дальше удален электронный слой от ядра, тем меньше энергия связи ее электронов с ядром. Гамма-квант, сталкиваясь с электронами, передает им не всю свою энергию, а только часть ее и после соударения изменяет свое направление, т.е. рассеивается. Вследствие соударения с гамма-квантами электроны (электроны отдачи) приобретают значительную кинетическую энергию и расходуют ее на ионизацию вещества (вторичную ионизацию). Оставшуюся часть энергии выносит новый фотон (вторичный, который образовался в результате взаимодействия первичного фотона с веществом). Вторичные фотоны имеют меньшую энергию, большую длину волны и другое направление. В дальнейшем вторичный фотон может вновь претерпевать комптон-эффект и т.д. Комптоновское рассеяние возможно на свободных электронах.

Энергия электронов отдачи, образующихся при эффекте Комптона, изменяется в широких пределах (от нуля до некоторого максимального значения). Средняя их энергия возрастает с увеличением энергии падающего излучения.

*Образование электронно-позитронных пар*. Третий вид взаимодействия излучений с веществом - превращение гамма-кванта больших энергий (свыше 1 МэВ) в пару заряженных частиц – эффект образования пары элекрон-позитрон. Гамма-кванты, проходя через вещество, превращаются под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома в пару частица-античастица: «электрон-позитрон». При этом одна форма материи – гамма излучение преобразуется в другую – в частицы вещества. Вероятность образования пары «электрон-позитрон» для тяжелых элементов больше, чем для легких.

Образовавшаяся электронно-позитронная пара в дальнейшем исчезает (аннигилирует), превращаясь в два вторичных гамма-кванта с энергией, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц позитрона и электрона (0,511 МэВ). Вторичные гамма-кванты способны вызвать лишь комптон-эффект и в конечном счете фотоэффект, т.е. терять энергию только при соударении с электронами. Процесс образования пар увеличивается с возрастанием энергии гамма-квантов и плотности поглотителя.

Таким образом, в зависимости от энергии падающего электромагнитного излучения преобладает тот или иной вид его взаимодействия с веществом. В большинстве случаев при облучении биологических объектов энергия используемого электромагнитного излучения находится в диапазоне 0,2 - 2 МэВ, поэтому наиболее вероятен эффект Комптона.

В результате каждого из трех процессов взаимодействия излучения с веществом в облученной среде возникает большое количество быстро движущихся электронов. Значительная часть их обладает энергией, достаточной для ионизации вещества.

Электромагнитные излучения ионизацию непосредственно не вызывают, но при взаимодействии с веществом образуют фотон и комптоновские электроны, которые в свою очередь ионизируют среду – поэтому их называют косвенно ионизирующим излучением.

*Взаимодействие заряженных частиц с веществом.* Механизм передачи энергии заряженными частицами облучаемому веществу один и тот же. При прохождении через вещество заряженная частица теряет свою энергию, вызывая ионизацию и возбуждение атомов до тех пор, пока общий запас энергии уменьшается настолько, что частица утратит ионизирующую способность.

В зависимости от знака заряда при пробеге частицы в веществе она, испытывая *электростатическое взаимодействие*, притягивается или отталкивается от положительно заряженных ядер. Чем больше масса летящей частицы, тем меньше она отклоняется от первоначального направления. Поэтому траектория протонов и более тяжелых ядерных частиц практически прямолинейна, а траектория электронов сильно изломана вследствие рассеяния (отклонения) на орбитальных электронах и ядрах атомов. Этот вид взаимодействия легких частиц (электронов), при котором практически меняется лишь направление их движения, а не энергия, называют *упругим рассеянием*. При этом взаимодействии электрон передает лишь небольшую часть своей энергии ядру и меняется первоначальное направление движения. При прохождении электрона очень высокой энергии вблизи ядра наблюдается *неупругое рассеяние* (торможение). При этом скорость летящего электрона снижается и часть его энергии испускается в виде *фотона тормозного излучения*. Тормозное излучение – это фотонное излучение, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженной частицы. При неупругом рассеянии наблюдается также взаимодействие частиц с электронами облучаемого вещества, вызывающее ионизацию или возбуждение атомов.

Траектория электрона в веществе имеет сложный вид, связанный с характером взаимодействия. На начальном участке траектория электрона рассеивается на небольшие углы и траектория его мало отличается от прямой линии. С уменьшением энергии электрона (а она колеблется от 20 кэВ до 13,5 МэВ) угол рассеяния увеличивается и электрон начинает двигаться по извилистой кривой.

Таким образом, основными результатами взаимодействия электронов высокой энергии с веществом являются следующие:

1. При неупругих столкновениях энергия затрачивается на ионизацию и возбуждение атомов среды, частично на преобразование в тормозное излучение.
2. При упругих столкновениях энергия преобразуется непосредственно в тепловое движение.
3. В легких веществах (Z≤ 13) тормозное излучение становится заметным при энергиях электрона больших чем 10 МэВ. При меньших энергиях преобладают потери энергии на ионизацию.
4. Первичные электроны создают положительные ионы и вторичные электроны, последние могут обладать энергией, достаточной для ионизации. На долю вторичных ионизаций приходится до 70% общей ионизации. При замедлении вторичные электроны могут создавать отрицательные ионы.
5. Траектория электронов при больших энергиях близкая к линейной. При уменьшении энергии электрон из-за рассеяния начинает двигаться по извилистой кривой.
6. Глубина проникновения электронов в веществе прямо пропорциональна их энергии и обратно пропорциональна плотности вещества.

*Тяжелые заряженные частицы* - протоны, дейтроны, альфа-частицы, осколки деления, аналогично электронам, затрачивают большую часть своей энергии на ионизацию, возбуждение атомов, а также на взаимодействие с кулоновским полем ядра и электронов (тормозное излучение). В значительной степени эти процессы вызваны электронами, которые образовались в процессе первичной ионизации.

Отличительной чертой тяжелых частиц, в сравнении с быстрыми электронами той же энергии, является их более медленное движение из-за большой массы. При энергии в несколько МэВ ионизационные потери для альфа-частиц в 1000 раз большие, чем для электронов. В результате этого путь электронов в веществе (глубина проникновения) значительно больше, чем путь альфа-частиц.

Как известно, величина энергии, которая излучается какой-либо частицей, прямо пропорциональна квадрату ее ускорения и обратно пропорциональна массе частицы. Из этого вытекает, что радиационные потери тяжелых заряженных частиц (т.е. потери на тормозное излучение) небольшие.

Столкновение тяжелой частицы с легким электроном не может вызвать значительного отклонения ее от первоначального направления движения, поэтому их путь в веществе прямолинейный.

Тяжелые частицы, как и электроны, передают энергию порциями. Максимальная энергия вторичных электронов определяется энергией падающих частиц. Так, при столкновении альфа-частицы энергией в 5 МэВ с электроном, последний приобретает энергию около 2700 эВ. Этой энергии достаточно для осуществления вторичной ионизации (ведь потенциал ионизации в воздухе равен 34 эВ).

Основными результатами взаимодействия тяжелых заряженных частиц с веществом являются следующие:

1. Прохождение тяжелых заряженных частиц через вещество сопровождается образованием ионов, возбуждением атомов.
2. Ионизационные потери намного большие, чем при облучении электронами, соответственно пробег тяжелых частиц в веществе намного меньше пробега электронов.
3. Траектория движения из-за большой массы частицы мало отличается от линейной. Скорость тяжелых заряженных частиц существенно меньше скорости движения электронов.
4. Потери энергии частиц на тормозное излучение незначительно.
5. Максимальная энергия передается веществу вблизи конца пробега частицы.

Взаимодействие атомов деления с веществом. Осколки деления представляют собой многозарядные (заряд достигает 20) ионы с массовым числом 72-166, которые возникают при делении ядер тяжелых изотопов: 235U, 238U, 239Рu.

В процессе деления возникает около 80 первичных продуктов деления, из них только шесть стабильные. Массовые числа осколков легких изотопов находятся в области А=72-116, (Br, Kr, Zn, Y, Mo, Ru), тяжелых изотопов – в области А=117-166 (Te, J, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sb).

Энергия осколков составляет от 40 до 120 МэВ. Эта энергия в основном затрагивается на ионизацию и возбуждение атомов и молекул. Важную роль играют также столкновения осколков с ядрами.

Отличительной чертой процесса замедления осколков в веществе – постепенное уменьшение заряда по всей длине пробега. В противоположность ионизационному эффекту, вызываемому альфа-частицами, плотность ионизации понижается к концу трека. С уменьшением заряда уменьшаются потери на ионизацию и возбуждение и увеличиваются потери на упругое столкновение с ядрами.

*Взаимодействие нейтронов с веществом.* Характер взаимодействия нейтронов с веществом зависит от их энергии. В отличие от заряженных частиц нейтроны не несут электрического заряда, что позволяет им беспрепятственно проникать в глубь атомов. Сверхбыстрые нейтроны с энергией в 10-50 МэВ при взаимодействии с тяжелыми элементами вызывают деление их ядер (ядро делится на 2-3 осколка). При этом высвобождается колоссальная энергия (около 200 МэВ) и вылетают 2-3 свободных нейтрона, которые способны вызвать деление других ядер. Так возникает цепной процесс деления ядер. Наибольшее значение имеют быстрые нейтроны. Достигая ядер, они либо поглощаются ими, либо рассеиваются на них. Т.е. основным видом взаимодействия нейтронов с веществом является взаимодействие с атомными ядрами. В этих взаимодействиях нейтроны могут претерпевать упругое и неупругое рассеивание, порождать заряженные частицы и гамма-кванты, вызывать деление некоторых ядер и т.д. Достигая ядер вещества, быстрые нейтроны тратят энергию крупными порциями, расходуя ее на возбуждение ядер или их расщепление. В результате одного или нескольких столкновений с ядрами энергия нейтрона становится меньше минимальной энергии возбуждения (от десятков кэВ до нескольких МэВ). После этого рассеяние нейтрона ядром становится *упругим*. При упругом рассеивании нейтрон передает часть своей энергии ядру, с которым он столкнулся. При этом он замедляется и изменяет направление движения. После ряда столкновений замедленный нейтрон захватывается ядром. При упругом рассеянии на ядрах углерода, азота, кислорода и других элементов, нейтрон теряет лишь 10-15% энергии, а при столкновении с почти равными с ним по массе ядрами водорода – протонами, энергия нейтронов уменьшается в среднем вдвое, передаваясь протону отдачи (при этом образуется нейтрон с меньшей энергией). Поэтому вещества, содержащие большое количество атомов водорода (вода, бериллий, графит, парафин) используются для защиты от нейтронного излучения: в них нейтроны быстро растрачивают свою энергию и замедляются. В результате упругого рассеяния нейтронов образуются сильноионизирующие протоны.

Ядро, захватившее нейтрон, становится возбужденным. Переход из возбужденного в основное состояние возможно разными путями: ядро может излучить нейтрон меньшей энергии и один или несколько гамма-квантов, заряд ядра не меняется; в процессе распада могут образовываться ядра меньшего или большего заряда и излучаться заряженные частицы – электрон, позитрон, альфа-частица, протон и др.; захват нейтрона может сопровождаться делением некоторых ядер. Образовавшиеся гамма-кванты и частицы также способны производить ионизацию. При таких ядерных реакциях могут образовываться радиоактивные изотопы элементов и возникать наведенная радиоактивность, в свою очередь тоже вызывающая ионизацию. Ионизируют вещество, наконец, и сами ядра отдачи, возникающие при ядерных превращениях.

*Медленные нейтроны* сразу захватываются ядрами атомов, в результате чего образуются новые стабильные или радиоактивные изотопы. В водородосодержащих веществах ядра водорода захватывают медленные нейтроны и превращаются в ядра тяжелого водорода – дейтерия. Захват нейтронов сопровождается испусканием гамма-квантов с энергией в 2,18 МэВ

11Н + 01n →12He+ γ-изл.

Таким образом, и при нейтронном облучении конечный биологический эффект связан с ионизацией, проиводимой опосредованно вторичными частицами или фотонами.

## Список литературы

1. Галицкий Э.А., Забелин Н.Н., Переверзева Н.А. Основы радиационной безопасности. Учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2001
2. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. Мн.: Энергоатомиздат, 1991.
3. Наумов И.А. Защита населения и объектов от чрезвычайных ситуаций. Радиационная базопасность [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Наумов И.А., Зиматкина Т.И., Сивакова С.П.— Электрон. текстовые данные.— Минск: Вышэйшая школа, 2015.— 288 c.
4. Безопасность в строительстве и архитектуре. Ядерная и радиационная безопасность при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений [Электронный ресурс]: сборник нормативных актов и документов/ — Электрон. текстовые данные.— Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2015.— 342 c.