

Как следует из рисунка, максимум энергии излучения приходится на $\lambda = 470$ нм, а на поверхности Земли – на длину волн около 555 нм. УФ-излучение короче 290 нм поглощается озоновым слоем около верхней границы атмосферы, а часть длинноволнового ИК-излучения – водяным паром.

Биосфера Земли, в том числе и человек, развивались в условиях относительного постоянства солнечной радиации, поэтому изменение энергии, падающей на Землю в диапазонах ИК, видимом и УФ, определяемое состоянием атмосферы и ионосферы (например, появлением озоновых дыр), может отрицательно влиять на существование жизни.

Наряду с указанными естественными объектами, излучающими ЭМ волны, существуют и другие природные источники. В частности, источником ЭМ излучения является организм человека. Понимание физических механизмов возникновения ЭМ волн открывает возможности изучать процессы рецепции, электрогенеза, распространение нервных импульсов в активных средах и целый ряд других жизненно важных функций.

Современная наука рассматривает два подхода к объяснению механизмов ЭМ излучения. Первый базируется на законах классической электродинамики в основе которой лежит теория Максвелла. Второй использует законы *квантовой механики*. Оба подхода объясняют возникновение ЭМ волн в различных диапазонах и взаимно дополняют друг друга.

§ 44. Взаимодействие электромагнитных излучений с веществом

При прохождении ЭМ волны через слой вещества толщиной x интенсивность волны I уменьшается вследствие взаимодействия ЭМ поля с атомами и молекулами вещества. Эффекты взаимодействия могут быть различными в разных веществах и для разных длин волн. Но общий закон ослабления интенсивности волны будет одинаковым:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}, \quad (11.9)$$

где I_0 – интенсивность падающего излучения.

Это выражение носит название закон Бугера, μ называется коэффициентом ослабления. В общем виде ослабление определяется поглощением и рассеянием энергии ЭМ волны веществом. Величина μ зависит от природы вещества и длины волн.

Радиоволны. К радиодиапазону относятся самые длинные ЭМ волны : $\lambda = 3 \cdot 10^3$ до 1 м (частота 10^5 до $3 \cdot 10^8$ Гц) – длинные, средние, короткие и УКВ-диапазоны, и λ от 1 до 10^{-3} м (частота $3 \cdot 10^8$ – $3 \cdot 10^{11}$ Гц) – микроволновый диапазон. Радиоволны, взаимодействуя с биологическими структурами, могут терять часть энергии переменного электрического поля, превращающейся в теплоту, за счет генерации токов проводимости в электролитах (крови, лимфе, цитоплазме клеток) и за счет поляризации диэлектриков тканей организма. Особенности распространения электромагнитных волн в живых тканях:

1. Характерной особенностью живых тканей является сильная зависимость их электрических свойств: диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ от частоты радиоволн.

2. С ростом частоты v длина волны λ электромагнитных волн становится соизмеримой с размерами тела. Как известно, длина волны λ в веществе с диэлектрической проницаемостью ϵ определяется выражением: $\lambda = c / (\sqrt{\epsilon})$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света. Например, на частоте 460 МГц, применяемой в физиотерапии, длина волны в свободном пространстве ($\epsilon \approx 1$) составляет около 0,7 м, а в мягких тканях тела человека только около 0,1 м.

3. На высоких и сверхвысоких частотах вследствие высокой проводимости тканей энергия электромагнитной волны быстро диссилирует в тепло и волны очень быстро затухают по мере прохождения по тканям тела: затухание по мощности в $e = 2,72$ раза происходит на пути в 1,525 см. Это важно знать при анализе медицинских приложений.

Радиоволны от искусственных источников могут иметь большую интенсивность и оказывать отрицательное влияние на жизненно важные процессы.

Искусственными источниками радиоволн являются радиовещательные и телевизионные станции, радиолокаторы и спутниковые системы связи. Они могут давать до $30 \cdot 10^9$ Вт в импульсе на частотах около 10^{10} Гц. Для человека, находящегося в постоянном поле, интенсивность радиоволн $0,1$ Вт/ m^2 считается безопасной. На расстояниях более 0,5 км от радиовещательных станций радиоволны длинного, среднего, короткого и УКВ-диапазонов не вызывают в биологических объектах значительных биофизических эффектов. В зонах, где интенсивность радиоволн достигает 100 Вт/ m^2 , пребывание человека запрещено нормами Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). Эффекты нагрева биологических тканей радиоволнами

используются в медицине при проведении физиотерапевтических процедур с помощью аппаратов УВЧ, СВЧ-терапии, а также индуктотермии.

ИК, видимое и УФ-излучения могут вызывать фотобиологические процессы в биоструктурах.

Видимый свет вызывает в растениях реакции фотосинтеза.

При действии дальнего УФ-излучения $\epsilon > 12$ эВ может происходить образование свободных радикалов ароматических и серосодержащих белков и пириимидиновых оснований нуклеиновых кислот.

ИК и видимые волны активируют термо- и зрительные рецепторы соответственно. Действие ИК-излучения на организм связано, прежде всего, с тепловым эффектом в поверхностных тканях. Для прогрева используют коротковолновую часть ИК-диапазона.

УФ-излучение проникает в ткани организма на глубину до 1 мм. Поглощение УФ-излучения связано с фотохимическими реакциями и может привести к появлению эритемы (покраснение и загар). Выделяют три зоны действия УФ на организм: А – антирахитная (400–315 нм) – идет синтез витамина Д; В – эритемная (315–280 нм) возникает эритема, ожоги; С – бактерицидная (280–200 нм) – может вызывать канцерогенез, мутации, бактерицидный эффект. Последний используется в операционных и перевязочных отделениях клиник для дезинфекции помещений.

Рентгеновское и гамма-излучения обладают высокими энергиями квантов, что определяет их специфическое взаимодействие с веществом, – эти излучения являются ионизирующими.

Рентгеновское излучение при взаимодействии с веществом может когерентно рассеиваться (при взаимодействии фотонов невысоких энергий с электронами внутренних оболочек). Рентгеновское и гамма-излучения могут вызывать фотоэффект, а при больших энергиях фотонов – комптон-эффект.

Образующееся вторичное излучение при комптон-эффекте лежит всегда в более длинноволновой области, чем первичное излучение. Это объясняется тем, что часть энергии исходного рентгеновского или гамма-фотонов расходуется на совершение работы выхода и сообщение электрону кинетической энергии.

Вторичное излучение также может быть ионизирующим, например, при взаимодействии гамма-фотона с веществом может возникать вторичное излучение в рентгеновском диапазоне.

При взаимодействии гамма-фотонов высокой энергии с веществом могут образовываться пары: электрон-позитрон (11.8).

Рассмотренные эффекты взаимодействия рентгеновского и гамма-излучений с веществом могут идти независимо и одновременно. Доля того или иного эффекта в общей картине взаимодействия зависит от энергии фотона (длины волны излучения) и порядкового номера вещества.

Особенно сложным является проявление этих свойств при взаимодействии рентгеновского и γ -излучения с биологическими объектами. Это связано с тем, что поглощение различных тканей организма может сильно отличаться.

Одной из важных характеристик ЭМ-излучения, определяющей характер его взаимодействия с биологическими объектами, является энергия фотона ϵ . Мы говорили ранее, что ЭМ-излучение обладает одновременно как свойствами волны, так и свойствами частицы (проявление корпускулярно-волнового дуализма). Выраженность каждого из этих свойств зависит от длины волны. Так, в радиодиапазоне и в ИК-излучении проявляются волновые свойства (дифракция волн, интерференция), в видимом диапазоне и те и другие свойства выражены примерно одинаково (дифракция – волновые, фотоэффект – корпускулярные). С уменьшением длины волны сильнее проявляются корпускулярные свойства ЭМ-излучения. Начиная с энергии кванта, примерно равной 12 эВ ($1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$), что соответствует дальнему УФ, и далее в диапазоне рентгеновского и тем более гамма-излучения, ЭМ волна ведет себя как поток частиц. С этой условной границы ЭМ-излучения могут ионизировать вещество, и поэтому, начиная с дальнего УФ, рентгеновское и гамма-излучения относят к ионизирующему.

Выше мы рассмотрели один из видов излучений, воздействию которых подвергается человек, а именно электромагнитные волны во всех диапазонах. Теперь перейдем к рассмотрению излучений, возникающих в результате внутриядерных процессов – радиоактивных излучений.

§ 45. Виды и свойства радиоактивных излучений

По современным представлениям ядро атома состоит из нуклонов: протонов ${}_1^1\text{p}$ и нейтронов ${}_6^1\text{n}$. Размер ядра приблизительно в 10^5 раз меньше размера атома, но почти вся масса атома содержится именно в ядре.

В природе наблюдается явление радиоактивного распада – самопроизвольное (без внешних воздействий) превращение ядер определенных элементов в ядра других элементов с испусканием