

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
"Харьковский авиационный институт"

В.П. Олейник

**ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Учебное пособие

Харьков "ХАИ" 2006

УДК 577.3 (075.8)

Основы взаимодействия физических полей с биологическими объектами / В.П. Олейник. – Учеб. пособие. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2006. - 61 с.

Рассмотрены биофизические механизмы действия электромагнитного, акустического, теплового и гравитационного полей на биологические объекты, используемые для создания технических средств медицинской диагностики и терапии. Особое внимание уделено воздействию электромагнитных полей на биосреды, и в частности на человека. Даны краткие сведения о методах исследований и лечения с применением отдельных компонентов этого вида поля.

Для студентов, обучающихся по направлению «Электронные аппараты» специальности «Биотехнические и медицинские аппараты и системы».

Ил. 31. Библиогр.: 16 назв.

Р е ц е н з е н т ы: канд. техн. наук А.Н. Ситенко,
канд. техн. наук В.И. Огарь

© Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», 2006 г.

ВВЕДЕНИЕ

С естественно-научных позиций все изменения, происходящие в окружающем нас пространстве, являются результатом действия и взаимодействия физических полей. Изменения могут носить как макроскопический характер (не затрагивающие в основном строение вещества), так и микроскопический. Общей причиной для этих изменений можно считать изменение энергетического состояния рассматриваемого объекта. Поэтому будем основываться на следующем определении физического поля. *Физическое поле – это особая форма материи, посредством которой осуществляется энергетическое или силовое взаимодействие материальных объектов.*

В современной физике выделяют два вида фундаментальных физических полей – *электромагнитное и гравитационное*. Особенностью этих полей является свойство обмена энергией между объектами вне зависимости от наличия вещества между ними. Для удобства рассмотрения явлений энергообмена в веществе вводят понятия *акустического и теплового* полей. По происхождению физические поля можно разделить на естественные и антропогенные (возникающие в результате деятельности человеческого сообщества).

В данном учебном пособии объектом рассмотрения являются живые организмы, которые в процессе жизнедеятельности и эволюции как подвергаются действию внешних источников физических полей, так и сами являются их источниками. Поэтому наиболее общие вопросы взаимодействия физических полей с биологическими объектами рационально рассматривать с позиций экологии.

По использованию методов описания конкретных явлений рассматриваемые вопросы можно отнести к биофизике. Начало развития таких подходов относят к теории о цветном зрении, выдвинутой еще в восемнадцатом веке М.В. Ломоносовым. Дальнейший вклад в биофизику внесли опыты Л. Гальвани по изучению «животного электричества», исследования французского физиолога и физика, основателя первой кафедры биофизики Д'арсонваля в области воздействия переменных токов на биологические объекты (что положило начало методу дарсонвализации – лечению импульсным током высокой частоты, высокого напряжения и малой силы). Среди выдающихся достижений биофизики XX века следует выделить расшифровку пространственных структур белка и двойной спирали ДНК.

Поэтому *предметом изучения будет совокупность явлений, возникающих при воздействии физических полей на биологические объекты, а целью изучения – использование возникающих явлений в качестве методологической основы для создания диагностических медицинских приборов, конструирования терапевтических аппаратов и систем, определения допустимых доз воздействия физических полей на биологические объекты, включая человека.*

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ

Напомним, что экология – это наука о закономерностях формирования и функционирования биологических систем при их взаимодействии с окружающей средой. Поэтому рассматриваемые вопросы (будучи по сути биофизическими) являются составляющей частью экологии и детализируют ее отдельные разделы.

В пределах Земли биологические объекты сосредоточены в биосфере. Биосфера – это оболочка Земли, включающая в себя как область распространения живого вещества, так и само это вещество. Границы биосферы Земли условно изображены на рис.1.1. Общая биомасса Земли составляет около $2,4 \cdot 10^{12}$ т, однако распределена в биосфере неравномерно. До 95 % биомассы сосредоточено в приповерхностном слое, так называемой пленке жизни.

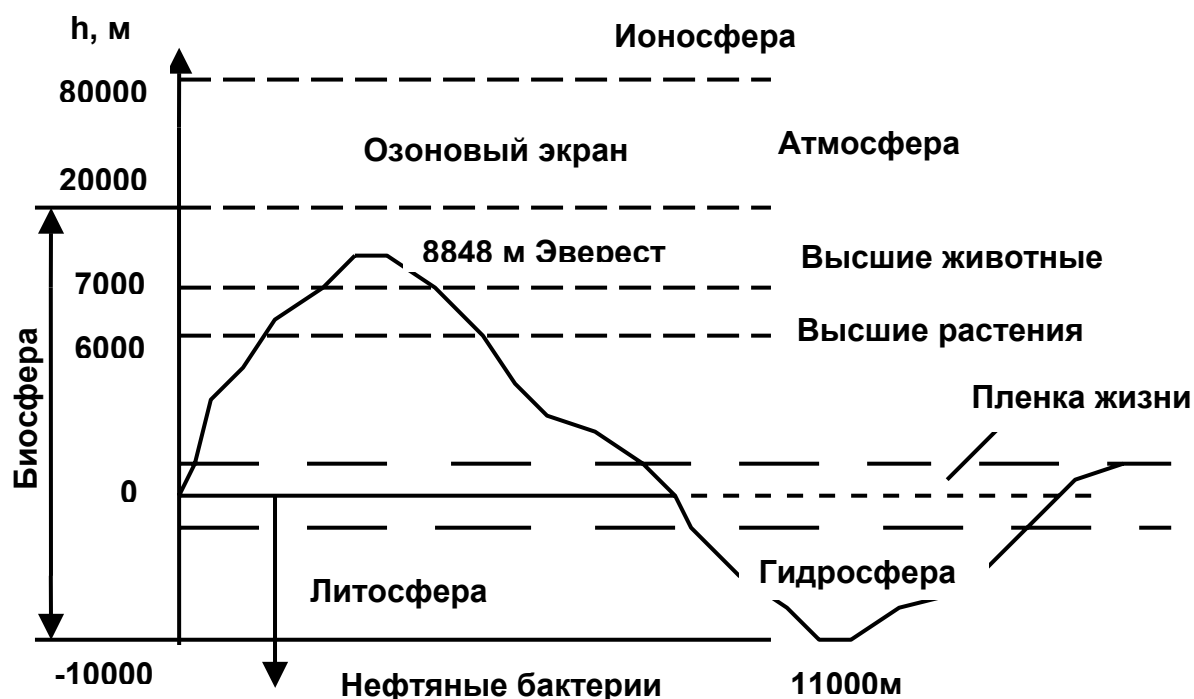


Рис. 1.1. Структура биосферы Земли

Причиной неравномерного распределения живого вещества в пределах биосферы являются экологические факторы. *Экологические факторы* – это любые условия, оказывающие прямое или косвенное влияние на биологический объект. Выделяют абиотические и биотические факторы.

Абиотические факторы обуславливают действие на биологические объекты неживой природы. К ним относят климатические (температурный режим, влажность, освещенность), эдафогенные (почвогрунт), орографические (рельеф, высота, глубина), химические (химический состав грунта, воды, воздуха).

Биотические факторы – это совокупность влияния жизнедеятельности одних биологических объектов на другие. Среди них различают фитогенные, зоогенные; микробогенные; антропогенные факторы.

Эти две группы экологических факторов в явной, а в большинстве случаев в опосредствованной форме связаны с качественными и количественными характеристиками физических полей.

Пространственные границы пребывания того или иного биологического объекта определяет *закон лимитирующего фактора*, из которого следует, что недостаток или избыток одного фактора нельзя компенсировать изменением других. Совокупность лимитирующих факторов для данного живого организма формирует экологическую нишу.

Экологическая ниша – это множество лимитирующих экологических факторов, определяющих существование биологического объекта и его функциональные характеристики. Модель экологической ниши можно представить как часть многомерного пространства, положение которого определяется совокупностью координат факторов. Модель экологической ниши для трехмерного случая в координатах атмосферного давления, температуры окружающей среды и ускорения свободного падения показана на рис. 1.2.

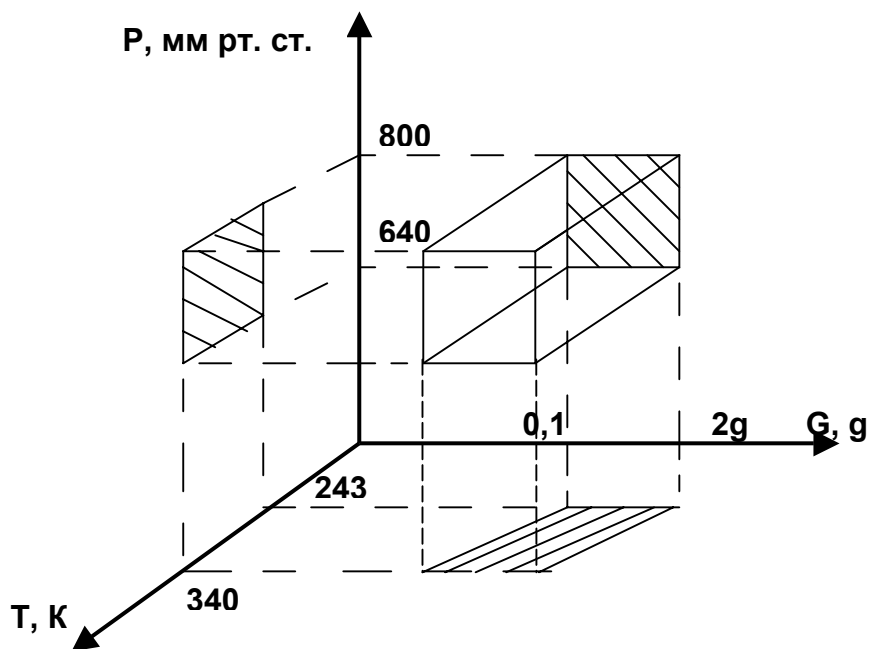


Рис. 1.2. Модель трехмерной экологической ниши

Способность биообъектов адаптироваться к изменению границ экологической ниши (изменению экологических факторов) называют экологической валентностью, или пластичностью.

Существуют следующие формы адаптации:

- морфологические – изменение строения организма;
- физиологические – приспособление к составу пищи, газовому составу воздуха или составу воды;

- поведенческие – кочевание, перелеты птиц, миграции.

В ходе эволюционного процесса живых объектов непосредственной причиной запуска адаптационных механизмов служили изменения характеристик действующих физических полей – электромагнитного (спектральный состав солнечного излучения), теплового (температурный режим), акустического и гравитационного (плотность вещества среды обитания живых объектов).

Все живые организмы в пределах биосферы существуют в виде популяций. Популяция – это совокупность особей одного вида, населяющих определенное пространство. Пусть первоначальное количество особей в популяции $N(t_0)=N_0$, а r – прирост особей популяции. Тогда изменение числа особей в популяции может быть представлен в виде уравнения

$$dN/dt = r \cdot N, \text{ или } dN/N = r dt .$$

Решение этого уравнения имеет вид $\ln N = r(t-t_0)$, $N = e^{rt_0} \cdot e^{rt}$, или, поскольку $e^{rt_0} = N(t_0) = N_0$, то $N(t) = N_0 \cdot e^{rt}$, – идеальный закон роста популяции (j-кривая). Однако в реальности прирост популяции является сложной функцией времени и числа особей ($r = r(N,t)$) и может быть как положительной, так и отрицательной величиной. Характерные графические зависимости $N(t)$ представлены на рис. 1.3.

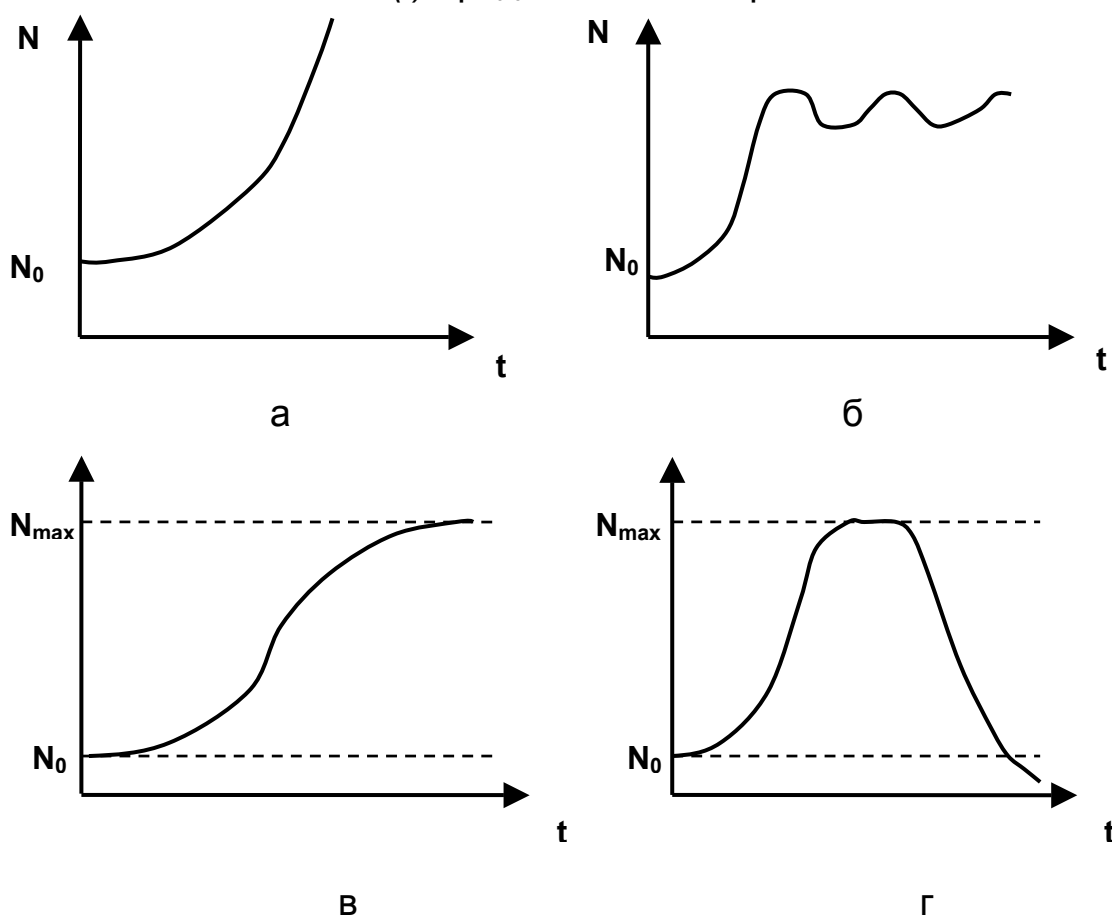


Рис. 1.3. Временные зависимости изменения численности популяций: а – идеальный закон роста популяции (j-кривая); б – цикличес-

ские колебания численности популяции; в – стабилизация численности (S-кривая); г – кривая исчезновения популяции

Специфику существования популяции во взаимодействии с другими популяциями в рассматриваемой области биосферы отражает понятие биогеоценоза (биос – жизнь, гео – Земля, ценоз – сообщество), сформулированное академиком В.Н. Сукачевым в 1972 г.

Биогеоценоз – это совокупность на известном протяжении земной поверхности однородных природных явлений живой и неживой природы, имеющая свою особую специфику взаимодействия и определенный тип обмена веществом и энергией между собой и другими явлениями природы, находящаяся в постоянном движении и развитии.

Структура биогеоценоза, по В.Н. Сукачеву, которая показана на рис. 1.4, включает в себя также такие понятия: экотоп – совокупность абиотических факторов в биогеоценозе; биоценоз – совокупность биологических факторов в биогеоценозе; сукцессия – последовательная смена одного биоценоза другим.

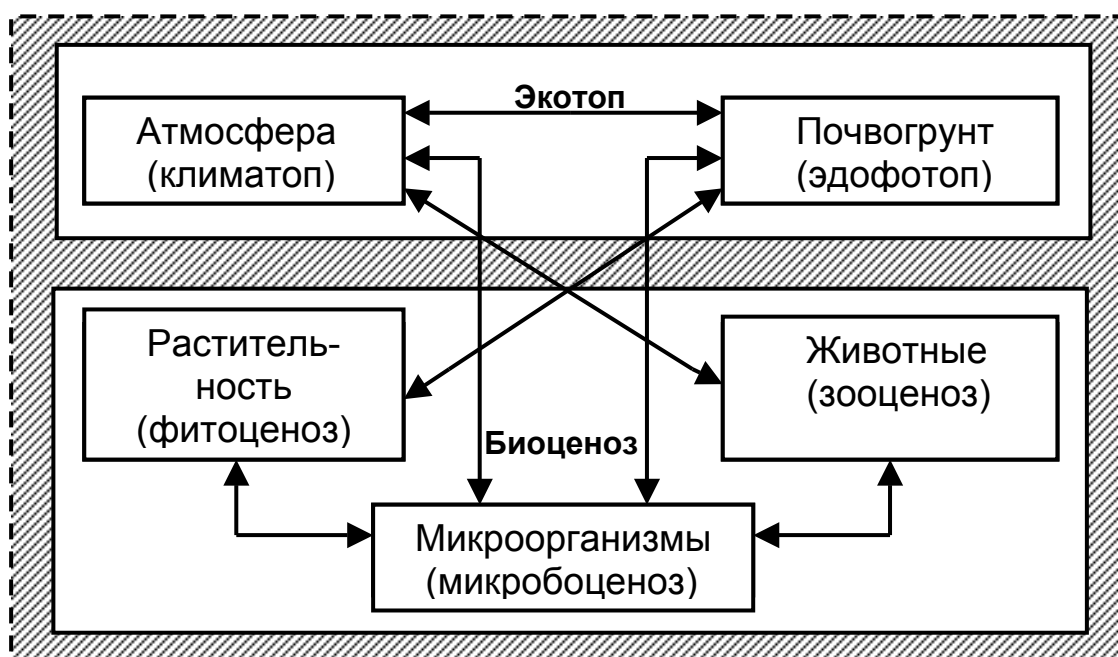


Рис. 1.4. Структура биогеоценоза

Характерным свойством биогеоценоза является его гомеостаз. Гомеостаз – это состояние подвижно-стабильного равновесия биогеоценоза или экосистемы, которое обеспечивается механизмами обратной связи. Если выделить некоторый лимитирующий фактор как фактор стресса, то поведение гомеостатической системы можно представить в виде схемы, показанной на рис. 1.5.

Приведенный здесь термин «экосистема» («экологическая система») затрагивает все возможные взаимодействия в системе «живой объект – окружающая среда». Дадим определение для этого термина.

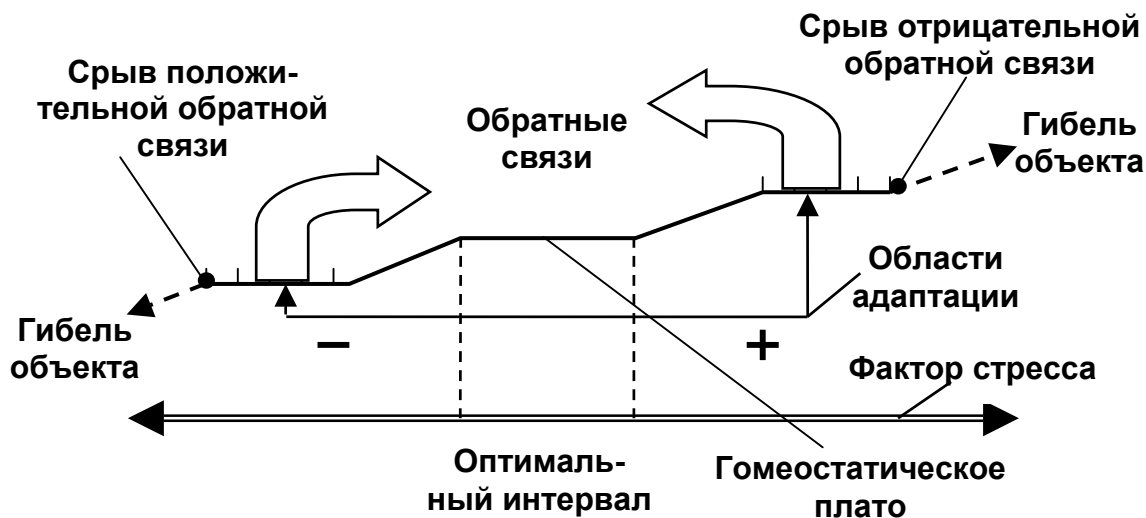


Рис. 1.5. Схема одномерной гомеостатической системы

Экосистема – это устойчивые безразмерные системы живых и неживых компонентов, в которых совершаются внешний и внутренний круговороты вещества и энергии. Очевидно, что непосредственный механизм энергообмена базируется на свойствах физических полей.

Схема глобальной гомеостатической системы, учитывающая все стадии энергообмена, представлена на рис.1.6.

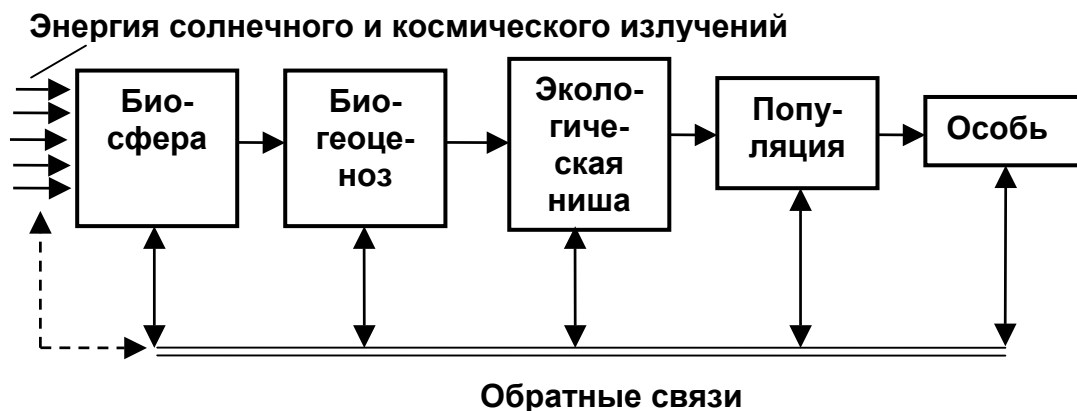


Рис. 1.6. Схема глобальной гомеостатической системы

С энергетической точки зрения в глобальной гомеостатической системе происходят передача энергии и ее регуляция по так называемой трофической (питательной) цепи, или связи. Трофическая связь – это цепь последовательной передачи вещества и эквивалентной ему энергии в биоценозе от одних организмов к другим.

Поскольку растения и некоторые виды простейших микроорганизмов способны воспринимать энергию солнечного электромагнитного излучения без посредников (путем фотосинтеза), их называют автотрофами. Таким образом, замыкается процесс передачи энергии в глобальной гомеостатической системе.

1.1. Жизнь как термодинамический процесс

В физике существует два подхода в рассмотрении явлений:

- феноменологический, основанный на изучении наиболее общих закономерностей, без рассмотрения детальной природы явлений;

- атомно-молекулярный, позволяющий в конечном счете выявить элементарные основы явлений и определить их количественные характеристики.

Термодинамика – это наука о закономерностях превращения энергии при ее переносе между телами в форме тепла и работы. Термодинамика позволяет с феноменологических позиций (первый и второй законы термодинамики) оценить энергетические процессы в биосистеме и процессы энергообмена с окружающей средой.

Согласно первому закону поглощенная системой теплота из окружающей среды идет на увеличение внутренней энергии и совершение работы данной системой: $dQ = dU + dA$, где dU – внутренняя энергия, dA – совершенная работа. Экспериментальные исследования подтвердили справедливость этого закона для биологических систем.

Из второго закона термодинамики следует, что изолированная физическая система самопроизвольно и необратимо стремится к состоянию равновесия, т.е. к максимуму энтропии (энтропия – мера неопределенности состояния системы). Аналитически этот закон представляют в таком виде: $dQ = dS \cdot T$, где dS – изменение энтропии, T – абсолютная температура системы. Поэтому изменение энтропии изолированной системы всегда будет положительной величиной:

$$dS = dQ/T \geq 0.$$

Однако биологическая эволюция (согласно учению Дарвина) шла в направлении возрастания сложности биологических систем, т.е. упорядоченности, от одноклеточных к многоклеточным организмам, вплоть до человека. Это можно объяснить, если считать живой организм открытой термодинамической системой, находящейся в состоянии динамического равновесия с окружающей средой. Тогда в интервале времени, значительно меньшем, чем продолжительность жизни отдельной особи, можно полагать энтропию биологического объекта неизменной, т.е. $S = \text{const}$, а следовательно, $dS = 0$. Представим изменение энтропии как сумму слагаемых:

$$dS = d_i S + d_e S,$$

где $d_i S$ – изменение внутренней энтропии, $d_e S$ – приток или отток внешней энтропии. Поскольку первое слагаемое всегда положитель-

ное, т. е. $d_i S > 0$, как для любого объекта, поглощающего энергию, то для поддержания энтропии неизменной второе слагаемое должно быть отрицательным: $d_e S < 0$.

Таким образом, живые организмы выполняют работу против уравнивания с окружающей средой за счет образования сложных молекулярных структур, получая отрицательную энтропию из окружающей среды. Энергию для выполнения этой работы биообъекты получают извне автотрофно (от Солнца путем фотосинтеза) или путем трофических связей, как было сказано выше.

1.2. Связь энтропии и информации для биологических систем

Если энтропию считать мерой неопределенности или недостаточности информации о системе, а информацию – наоборот, то для любой системы справедлив закон сохранения информации $S + I = \text{const}$, где S – энтропия, I – информация.

Энтропия также может быть представлена выражением $S = K \cdot \ln \Gamma$, где K – постоянная Больцмана, Γ – статический вес системы. Статический вес характеризует количество способов реализации системы (величина, обратная вероятности события).

С другой стороны, информация о системе связана со статистическим весом выражением $I = C \cdot \log \Gamma$, где C – некоторая постоянная. Допустим, что $C = 1$, а основание логарифма выберем равным двум (соответствующее минимальному статистическому весу системы с информацией в один бит ($[I] = \text{бит}$)), тогда $I = \log_2 \Gamma = (\log_2 e) \ln \Gamma$, $\ln \Gamma = I / \log_2 e$. Теперь выражение, связывающее энтропию и информацию, можно представить как $S = (KI) / \log_2 e = 2,3 \cdot 10^{24} I$, а в качестве размерности $[S]$ взять *энтропийные единицы* ($[S] = [K] = \text{кал/град}$).

Оценим упорядоченность построения многоклеточного организма на примере человека:

1. Поскольку одна клетка содержит около 10^8 биополимеров, то ее статистический вес можно оценить как $\Gamma_{\text{клетки}} = 10^8!$, а информационное содержание – как

$$I_{\text{клетки}} = \log_2(10^8!) \approx 10^8 \cdot \log_2 10^8 = 2,6 \cdot 10^9 \text{ бит.}$$

2. Организм человека насчитывает $N = 10^{13}$ клеток, поэтому информационное содержание клеточной массы составит

$$I_{\text{клеточной массы}} = I_{\text{клетки}} \cdot N = 2,6 \cdot 10^{22} \text{ бит.}$$

Энтропийный эквивалент клеточной массы определим из полученного выше выражения:

$$S_{\text{клеточной массы}} = 6 \cdot 10^{22} \text{ энтропийных единиц.}$$

3. Белковая масса организма составляет примерно 7 кг и содержит $3 \cdot 10^{25}$ аминокислотных и $3 \cdot 10^{23}$ нуклеиновых остатков, что увеличивает информационное содержание на $1,3 \cdot 10^{26}$ и $6 \cdot 10^{23}$ бит соответственно. Аналогично энтропийный эквивалент составит

$$S_{\text{белков}} = 301,4 \text{ энтропийных единиц.}$$

В итоге величина суммарной энтропии человеческого организма будет

$$S_{\text{организма человека}} \approx 301,5 \text{ энтропийных единиц.}$$

Проведенный выше анализ показывает, что с позиций термодинамики возникновение жизни требует очень малых энергетических затрат, а протекание жизненных процессов характеризуется сверхбольшим объемом специфической информации. *Как следствие, воздействие на организм любого физического поля может иметь как энергетический, так и информационный характер.*

1.3. Общий характер реакции биологического объекта на действие физического поля

Реакцию биологического объекта рассмотрим на основе учения И.Е. Веденского о физиологических ритмах нервных процессов.

Любая возбудимая ткань реагирует на раздражение потенциалом действия. Реакция имеет четыре фазы, условно изображенные на рис. 1.7:

I – абсолютная рефрактерная : биоткань не отвечает на раздражающие стимулы;

II – относительная рефрактерная: возбудимость ниже нормальной;

III – супернормальная: нормальная реакция достигается во время действия раздражения;

IV – в этой фазе сохраняется на некоторое время фаза субнормальности.

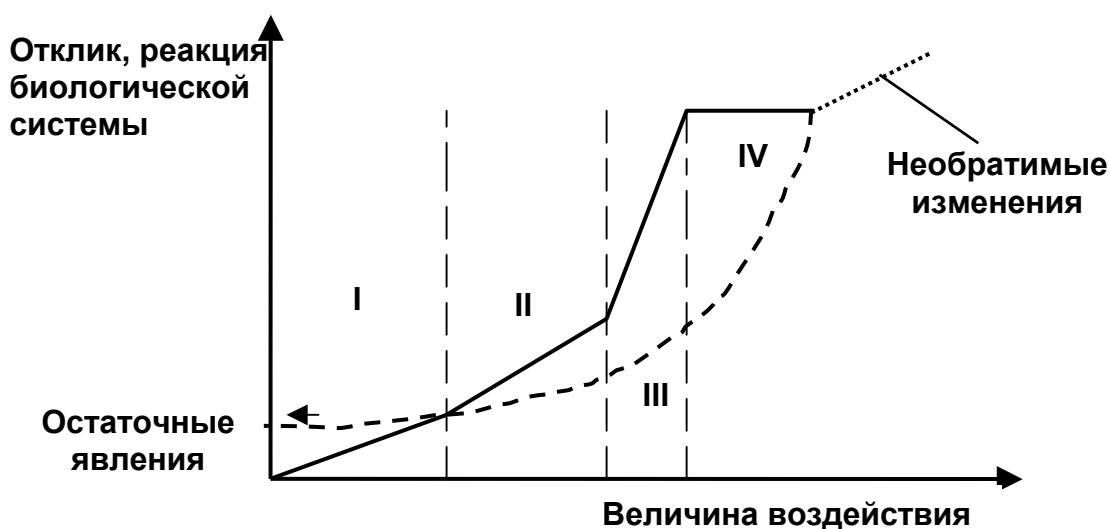


Рис. 1.7. Фазы отклика на воздействие

Предложенная модель остается правомерной, если величину воздействия принимать как реальную количественную характеристику физического поля (например, силу, напряженность, количество энергии, динамические параметры).

1.4. Понятие экологического мониторинга. Рациобиосфера

Активная деятельность человеческого сообщества привела к существенному изменению параметров окружающей среды. С учетом действия естественных факторов и наложения на них антропогенных актуальной задачей становится поддержание гомеостатического состояния биосферы. Одним из механизмов обеспечения гомеостатичности биосферы является мониторинг.

Мониторинг – это комплексное исследование окружающей среды, действующей на биообъекты (рис. 1.8).

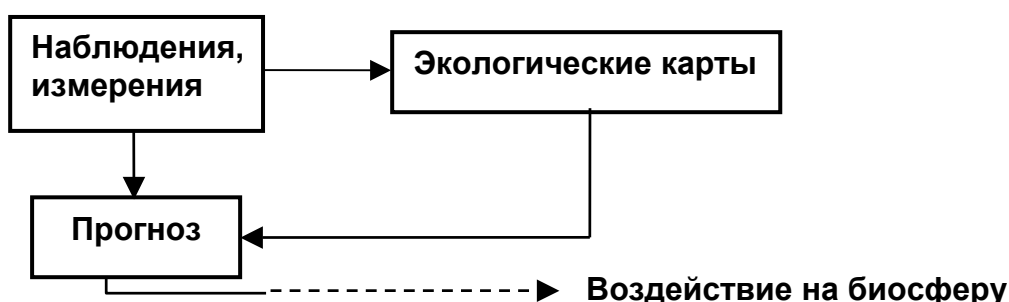


Рис. 1.8. Схема экологического мониторинга

Задачи мониторинга:

- текущий учет изменения параметров окружающей среды;
- прогноз изменений в окружающей среде и связанных с ними экологических последствий.

Исходное понятие мониторинга - качество среды – это совокупность параметров экологической среды, удовлетворяющих экологической нише человека и научно-техническому прогрессу общества.

В качестве начальной точки отсчета изменения контролируемых параметров используются фоновые значения, т.е. такие, которые не подвержены локальным антропогенным воздействиям. Очевидно, что неотъемлемой задачей мониторинга является контроль параметров, которые непосредственно являются характеристиками физических полей (температура, давление, скорости перемещения воздушных и водных масс; напряженности электрического и магнитного полей; уровень ионизирующих излучений; освещенность; виброскорость и виброускорение сейсмической активности и др.).

Стремление человека иметь комфортные условия своего существования вне зависимости от действующих природных факторов (температура, влажность, освещенность и т. п.) привело к возникно-

вению целого ряда биотехнических систем. Совокупность такого рода биотехнических систем формирует радиобиосферу.

Радиобиосфера – искусственная среда, окружающая человека, создающая оптимальные условия жизни. Частично параметры радиобиосферы совпадают с характеристиками физических полей, а частично связаны с ними опосредствованно. Схема радиобиосферы в системе жизнеобеспечения человека показана на рис. 1.9.

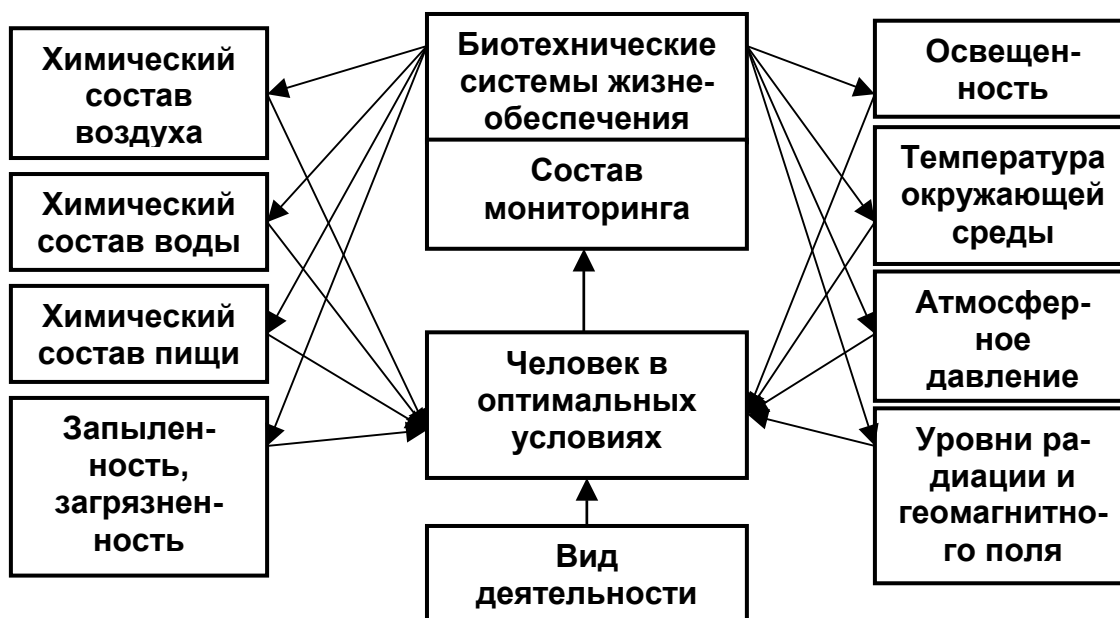


Рис. 1.9. Схема радиобиосферы

Биообъект в процессе жизнедеятельности и взаимодействия с окружающей средой создает вокруг себя интегрированное физико-химическое поле со следующими основными компонентами:

- электростатические поля и квазипостоянные потенциалы кожных покровов в интервале частот $10^{-6} \dots 1$ Гц;
- электрические, магнитные, электромагнитные, а также переменные электрические потенциалы (биопотенциалы) в диапазоне частот $1 \dots 10^5$ Гц;
- тепловое излучение в инфракрасном, миллиметровом и СВЧ-диапазонах;
- излучение в видимом диапазоне волн (сверхслабое свечение), обусловленное хемилюминесценцией;
- естественное гамма- и корпускулярное излучения, преимущественно за счет распада изотопа калия-40;
- акустические поля сердца, сердечно-сосудистой и бронхолегочной систем, пищевого тракта, суставов опорно-двигательного аппарата, голоса в диапазоне от инфра- до ультразвуковых частот;

- протуберанцы химических соединений, выделяемых с выдыхаемым воздухом (149 наименований) и с поверхности кожи (271 наименование).

Таким образом, живые организмы – это многокомпонентные генераторы физических полей. Эти поля одновременно являются как источниками информации о самом организме, так и факторами воздействия на другие объекты природы.

2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

2.1. Феноменологические механизмы воздействия электромагнитных полей

Электричество и магнетизм, существующие в природе, являются одними из важных экологических факторов эволюции природы. Солнечное излучение – основной энергетический источник для биосферы – не что иное, как электромагнитное излучение в достаточно широком спектральном диапазоне.

Электромагнитное поле – это форма взаимодействия электрических зарядов. Поскольку все биосреды живых организмов могут быть отнесены к проводникам второго рода, то объектом взаимодействия на макроскопическом уровне рассмотрения выступают ионы.

Некоторые возникающие явления действия электромагнитных полей (особенно низкочастотных) или их составляющих на биоструктуры можно объяснить, используя известное выражение для силы Лоренца $F = qE + q[VB]$, где q – заряд иона, V – скорость его движения, E – напряженность электрического поля, B – индукция магнитного поля.

Наиболее общий макроскопический подход рассмотрения взаимодействия электромагнитного поля с веществом базируется на уравнениях Максвелла:

$rotE = -dB/dt$ – обобщение закона электромагнитной индукции;

$divD = \rho$ – обобщение закона электростатической индукции;

$rotH = j + dD/dt$ – обобщение закона полного тока;

$divB = 0$ – обобщение закона о непрерывности магнитных силовых линий.

В приведенных уравнениях H – напряженность магнитного поля, D – индукция электрического поля, ρ – объемная плотность заряда, j – плотность тока проводимости.

Для решения практических задач уравнения Максвелла должны быть дополнены материальными уравнениями, учитывающими электрические свойства среды взаимодействия: $D = \epsilon\epsilon_0E$; $B = \mu\mu_0H$; $j = \sigma E$, где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость среды, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость среды, σ – удельная проводимость среды.

Приведенные выше уравнения позволяют решать все задачи, относящиеся как к постоянным, так и переменным полям, при условии, что длина волны электромагнитного поля значительно превышает расстояние между элементарными частицами вещества (линейные размеры атомов и молекул вещества), а источники полей достаточно удалены от рассматриваемой точки пространства. При решении кон-

кретных задач должны быть заданы граничные условия (т. е. значения полей на границах раздела рассматриваемых сред).

Таким образом, теория Максвелла реализует макроскопический подход анализа действия электромагнитного поля на вещество, а для ее применения к биологическим объектам необходимо знать ϵ , μ , σ живого вещества, а также характеристики собственного электромагнитного поля биосреды (во многих практических случаях ввиду их малости этот фактор не учитывают).

Живой организм в отношении электрических свойств можно считать как проводником, так и диэлектриком. Считают, что носителями электрических зарядов в белках и других элементах живого организма являются ионы, которые в совокупности с системой электронно-дырочной проводимости создают единую проводимость живого организма. Однако проводимость различных биотканей существенно отличается, например, удельная проводимость на постоянном токе колеблется от сотен $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ (кровь, жидкие биосреды) до единиц $1/\text{Ом}\cdot\text{м}$ (кожа, костная ткань). Кроме этого, наблюдается частотная дисперсия проводимости живых биотканей (рис. 2.1).

Диэлектрические свойства биотканей также неодинаковы и для них характерна частотная дисперсия (см. рис. 2.1).

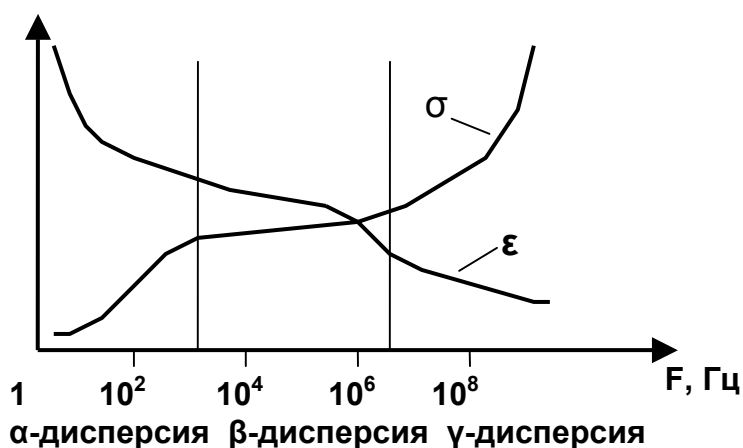


Рис. 2.1. Качественная дисперсионная зависимость величин ϵ , σ

Выделяют характерные области дисперсии: α обусловлена релаксацией зарядов у клеточных мембран, β – неоднородностью клеточной структуры биоткани и полным вовлечением внутриклеточной среды в образование ионов, γ – возбуждением дипольных молекул воды.

Для одновременного учета проводящих и диэлектрических свойств биосред удобно использовать выражение для комплексной диэлектрической проницаемости: $\epsilon^* = \epsilon_1 + i\epsilon_2$, где $\epsilon_1 = \epsilon$, а отношение $\epsilon_2/\epsilon_1 = \sigma / (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon)$ – тангенс диэлектрических потерь в среде ($\text{tg}\delta$).

Магнитные свойства биотканей в их макроскопических проявлениях слабо отличаются от вакуума и являются в основном диамагнит-

ными и парамагнитными с модулем магнитной восприимчивости $|\chi| \ll 1$ ($\mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} = \mu_0(1+\chi)\mathbf{H}$).

Использование уравнений Максвелла позволяет теоретически находить характеристики полей в любой момент времени как для любой точки внутри объекта (внутренняя задача электродинамики), так и для любой точки пространства вне его (внешняя задача). Однако известный математический аппарат приводит к громоздким вычислениям (зачастую неразрешимым) при существенном упрощении свойств самого объекта. Поэтому на практике для выявления наиболее существенных эффектов действия поля анализируют действие отдельных его компонентов, например, электростатического, магнитостатического, низкочастотного электрического и магнитного, высокочастотного и сверхвысокочастотного, оптического и ионизирующего излучений.

В некоторых случаях для объяснения возникающих явлений необходимо использовать микроскопические свойства веществ и законы квантовой теории.

2.2. Воздействие электростатических полей на биологические объекты

Электростатическое поле – электрическое поле, создаваемое неподвижными зарядами. Строго говоря, статических полей в природе не существует, так как элементарные заряды находятся в тепловом движении. Однако длины пробега этих зарядов малы по сравнению с линейными размерами рассматриваемых областей. Поэтому напряженность электростатического поля является величиной, не зависящей от времени. Для квазистатических полей полагают, что период их изменения во времени гораздо продолжительнее интервала времени наблюдения за объектом, подверженным действию этого поля.

Биосреда, помещенная в электростатическое поле, будет реагировать двояким образом. Во-первых, произойдет электризация среды за счет смещения разнополярных зарядов. Полной компенсации внешнего поля внутри биосреды не будет (как в проводниках), потому что ионы имеют ограниченную область смещения, вызванную структурой живых биотканей, однако произойдут изменение внутренней энергии биосреды и пространственное искажение внешнего поля. Таким образом, электростатическое поле частично проникает внутрь биосреды, вызывая поляризацию диэлектриков.

Диэлектрические свойства живой ткани определяются двумя классами диэлектриков. Диэлектрики с полярными молекулами состоят из несимметричных молекул, обладающих собственным электрическим дипольным моментом (например молекулы воды). В отсутствие внешнего поля в результате равновероятной ориентации молекулярных дипольных моментов суммарный дипольный момент $\sum \mathbf{P}_i = 0$.

При наложении внешнего поля $E \neq 0$ $\sum P_i \neq 0$, на каждый элементарный диполь действует момент сил $M_i = [P_i \cdot E]$. Диэлектрики с неполярными (симметричными) молекулами (азот, водород) в отсутствие внешнего поля не обладают дипольным моментом. Если $E \neq 0$, то возникает индуцированный дипольный момент $P_{индуцир} = \epsilon_0 \alpha E$, где α – коэффициент поляризации.

Учет квантовых явлений, а именно эффекта Штарка в водородоподобных системах позволяет рассмотреть еще один фактор действия электростатического поля на биосреду.

Эффектом Штарка называется расщепление спектральных линий под действием на вещество внешнего электрического поля. Поскольку даже очень сильное электрическое поле слабее внутриатомного, то его действие на движение атомных электронов незначительно. Однако для водорода и водородоподобных систем имеет место линейный эффект Штарка, частично снимающий вырождение между уровнями единственного атомного электрона. Энергия расщепления спектральных линий невелика и пропорциональна напряженности внешнего электрического поля: $\Delta W \sim nE$, где n – некоторая функция квантовых чисел. При значительной величине напряженности имеет место квадратичный эффект Штарка: $\Delta W \sim E^2$ ($E > 10^5$ В/см).

Учитывая, что биосреды – водо-, а следовательно, и водородосодержащие вещества, действие внешнего электростатического поля в соответствии с эффектом Штарка вызывает изменение спектров излучения и поглощения электромагнитного излучения.

Таким образом, воздействие электростатического поля на биоструктуры приводит к частичным электризации и поляризации вещества, сопровождается силовым действием поля и увеличивает внутреннюю энергию среды, а также изменяет ее спектральные характеристики.

Рассмотрим примеры электростатических полей, воздействию которых наиболее часто подвержены биологические объекты.

Среди них – электростатическое поле естественного происхождения, обусловленное перераспределением зарядов между верхними слоями атмосферы и поверхностью Земли. Как известно, внешней оболочкой атмосферы является ионосфера, в которой на удалении от поверхности Земли от 110...120 до 180...300 км сосредоточена воздушная плазма (рис. 2.2). Первичная ионизация в этом слое производится жестким ультрафиолетовым- и гамма-излучениями, потоками элементарных частиц, выбрасываемых Солнцем, а также реликтовым космическим излучением. Путем тепловой конвекции воздушных масс, осадков и грозových явлений, протекания «токов с острия» и токов проводимости часть атмосферного заряда распределяется на поверхности земли. Экспериментально установлено, что токи проводимости переносят заряд +60, токи осадков +20, грозových явления -20, «токи с острия», обусловленные кривизной земного рельефа, -100 Кл/с·км².

Отсюда результирующий переносимый заряд на землю составляет $-40 \text{ Кл/с}\cdot\text{км}^2$.

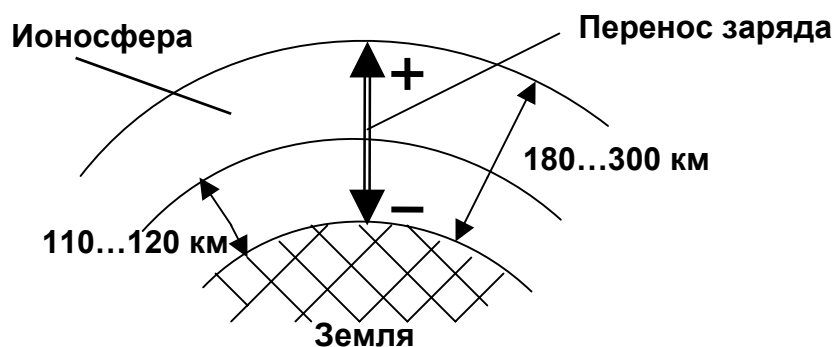


Рис. 2.2. Образование электростатического поля Земли

Таким образом, все живые объекты биосферы находятся в квазистатическом электрическом поле гигантского сферического конденсатора, внутренней обкладкой которого является поверхность Земли, а внешней – нижние слои ионосферы. Напряженность электрического поля вблизи поверхности Земли составляет около 150 В/м , суммарные поверхностный заряд – $5 \cdot 10^7 \text{ Кл}$, циркулируемый электрический ток – $\sim 1500 \text{ А}$.

Второй по значимости источник природных электрических полей – это электризация воздушных масс при их перемещениях.

К источникам электростатического поля техногенного происхождения относят мощные энергоустановки, электризацию средств передвижения, электризацию одежды из искусственного волокна, электризацию поверхности электроннолучевых трубок.

Специфика действия электростатического поля на человеческий организм нашла свое применение в медицине.

Получил распространение лечебный метод – электростатический душ, или франклизация, – при котором организм пациента подвергается воздействию постоянного электрического поля, созданного источником высокого напряжения. Различают общую (источник напряжения $50 \dots 150 \text{ кВ}$) и местную ($15 \dots 20 \text{ кВ}$) франклизации. Пациента устанавливают на заземленный электрод, а активный электрод размещают на расстоянии $6 \dots 10 \text{ см}$ от области воздействия, как показано на рис. 2.3. В биотканях, расположенных вблизи активного электрода, происходят поляризация молекул диэлектрика, электризация проводящих структур с появлением микротоков, что приводит к перераспределению ионов в области воздействия и созданию эффекта раздражения. Дополнительный эффект – вдыхание отрицательных аэроионов, образующихся вблизи электрода отрицательной полярности.

Искусственная ионизация воздуха на основе коронного разряда, вызванного постоянным электрическим полем, применяется для аэ-

роизонизаторов, а соответствующий метод лечения получил название «аэроионотерапия».

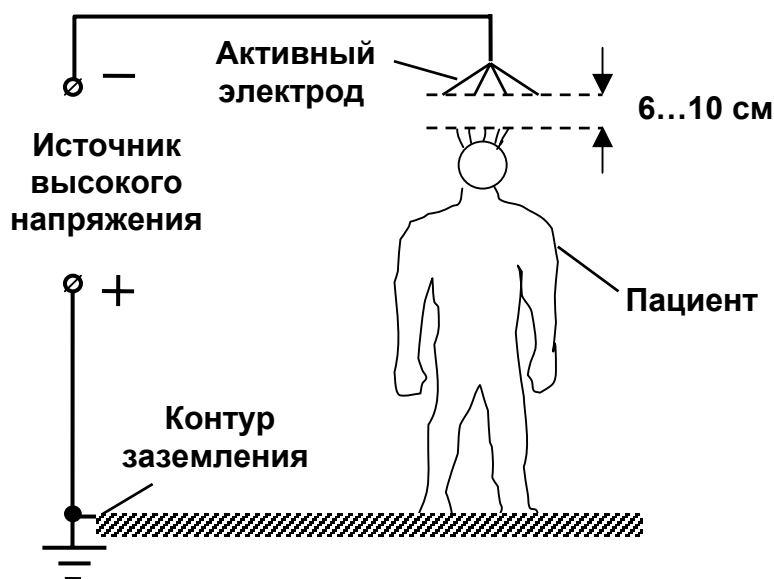


Рис. 2.3. Электростатический душ

Электростатическое поле также применяют для электростатической очистки воздуха. Известно, что мелкие частицы пыли, аэрозолей, дыма, как правило, несут электрический заряд. Очистить такой загрязненный воздух можно путем его прокачки между пластинами конденсатора, к которым подключено постоянное электрическое напряжение в несколько сотен вольт (рис. 2.4). Под действием силы электростатического поля заряженные частицы скапливаются на обкладках конденсатора, а очищенный воздух поступает к пациенту.

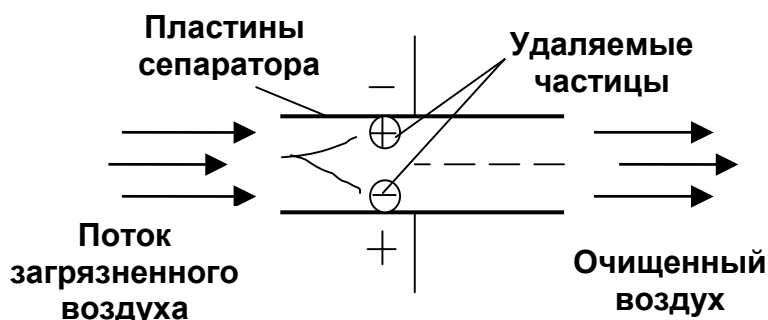


Рис. 2.4. Электростатическая очистка воздуха

2.3. Действие электрических токов

Один из способов создания электрического поля внутри биообъекта обеспечивается подключением источника напряжения к электродам, устанавливаемым на его поверхности. Величина протекающего тока определяется напряжением источника и сопротивлением биосреды.

Сопротивление человеческого организма постоянному току на отдельных участках кожного покрова составляет в среднем $10^3 \dots 10^6$ Ом и ограничено сопротивлением кожного покрова. Сопротивление внутренних органов, как правило, ниже 300...500 Ом. Преодолев сопротивление кожи, ток устремляется от электрода к электроду по тканям с наименьшим сопротивлением – кровеносным сосудам, мышцам и другим тканям с большим содержанием жидких сред, значительно отклоняясь от кратчайшего расстояния между электродами.

Специфика прохождения переменного тока связана с распределенной емкостью величиной около 0,01...0,02 мкФ/см², образованной металлическим электродом, находящимся на поверхности кожи, и подкожными тканями. При площади электрода 100 см² образуемая емкость составляет 1...2 мкФ, что определяет емкостный импеданс около 3200 и 32 Ом на частотах 50 Гц и 5 кГц соответственно. Поэтому на прохождение переменного тока изолирующие свойства кожи влияют в меньшей степени.

Следует также учитывать, что сопротивление биоткани нелинейно зависит от величины протекающего тока и физиологического состояния организма.

Рассмотрим более детально действие на биоструктуры токов с различными динамическими характеристиками.

Первичное действие постоянного тока на организм связано с движением ионов, их пространственным разделением и изменением концентраций в тканях. Поэтому прохождение электрического тока через биоткани как проводник второго рода (электролит) сопровождается явлением электролиза. Масса вещества, которая выделяется на электродах при прохождении тока через электролит, пропорциональна величине перенесенного заряда и может быть описана первым законом электролиза Фарадея

$$M = K \cdot q = K \cdot I \cdot t, \quad K = A / (F \cdot Z),$$

где q – заряд, t – время протекания тока, K – коэффициент пропорциональности, F – число Фарадея, A – атомный вес, Z – валентность вещества ионов.

Для живых тканей закон электролиза выполняется условно, поэтому более справедливо выражение $M \sim K \cdot I \cdot t$.

Рассмотрим некоторые примеры использования постоянных токов в медицине для диагностических и терапевтических целей.

Гальванизация – воздействие на пациента с лечебной целью постоянного электрического тока величиной до 50 мА, плотностью тока не более 0,1 мА/см² и напряжением до 80 В. Проводится с помощью электродов, подключенных к источнику постоянного тока и накладываемых на кожу пациента. Основные биофизические эффекты, которые достигаются при гальванизации:

- внутритканевый электрофорез перемещения ионов, молекул под действием внешнего электрического поля;
- изменение мембранного потенциала клеток, возбудимости тканей, образование свободных радикалов;
- усиление микроциркуляции крови и лимфы.

Лекарственный электрофорез – одновременное воздействие на организм постоянного электрического тока и лекарственного вещества, поступающего в организм с током через кожные покровы или слизистые оболочки. При электрофорезе между электродом и кожей помещают прокладку или гель, содержащие раствор лекарственного вещества. Обязательным требованием является диссоциация вещества на ионы в растворе. Лекарственные вещества, введенные с помощью постоянного тока, образуют кожно-ионное «депо», из которого посредством кровотока и лимфотока распределяются по всему организму.

Электропунктурная диагностика – метод исследования физиологического состояния пациента на основе измерения электрического сопротивления постоянному току в биологически активных точках. Для измерений используются микроамперные режимы, не вызывающие существенного энергетического воздействия на организм.

Воздействие на биологические объекты импульсными токами на низких, звуковых и ультразвуковых частотах вызывает смещение ионов, их разделение, изменение концентрации внутри клетки и в межклеточном пространстве. Биологический эффект – раздражение, стимуляция физиологических процессов. Величина реакции биологического объекта зависит от формы, длительности, амплитуды импульсов, а также от частоты их следования. Зависимость амплитуды порогового тока раздражения импульсов прямоугольной формы от их длительности показана на рис. 2.5.

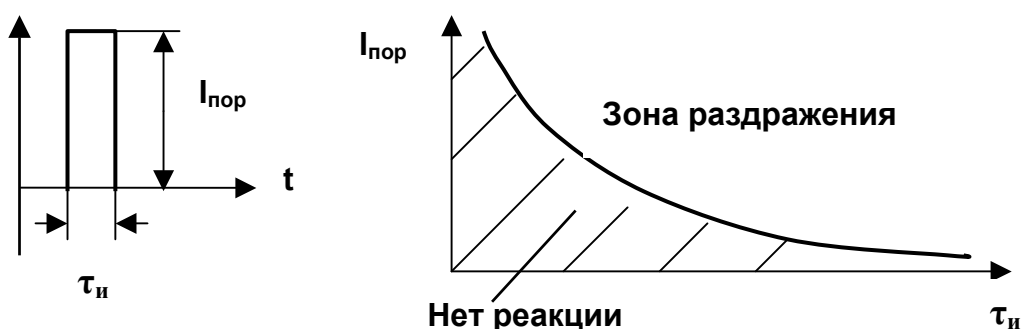


Рис. 2.5. Раздражение прямоугольными импульсами

Импульсные токи, используемые в лечебных целях, имеют такие характеристики:

- прямоугольной формы, частота повторения $F = 1...2$ Гц, длительность $\tau_{и} = 0,8...3$ мс, применяются для электрокардиостимуляции;
- прямоугольной формы, $F = 1...130$ Гц, $\tau_{и} = 0,2...2$ мс (токи Ледюка), используются для получения состояния, аналогичного физиологическому сну (электросон);
- треугольной формы, $F = 100$ Гц, $\tau_{и} = 1...1,5$ мс, вызывают сокращение мышц;
- экспоненциальной формы, $F = 8...100$ Гц, $\tau_{и} = 2...60$ мс (токи Лапика), применяются для стимуляции мышц или электрогимнастики.

Экспериментально установлено, что интервалы частот от 1 до 10 Гц оптимальны для возбуждения симпатических нервов; от 20 до 100 Гц – для парасимпатических; от 80 до 150 Гц – для угнетения болевой чувствительности. На основе этих данных было разработано несколько методов электролечения импульсными токами. Назовем некоторые из них.

Диадинамотерапия – воздействие на организм двумя однополярными низкочастотными импульсными токами (50 и 100 Гц). Чередование частот импульсных токов специальной формы позволяет оптимизировать режимы стимуляции и болеутоления.

Амплипульстерапия – воздействие высокочастотными токами (2...5 кГц), модулированными по амплитуде сигналами частотой от 1 до 200 Гц. Этот метод позволяет стимулировать глубоко расположенные в организме ткани за счет снижения импеданса кожного покрова.

Интерференцтерапия – одновременное воздействие двумя высокочастотными токами (3...8 кГц), разность частот которых составляет ± 200 Гц (частоты биений). Отличием этого метода является локализация внутритканевой области стимуляции на частоте биений.

Действие переменных токов, в том числе и гармонических, на организм человека при низких, звуковых и ультразвуковых частотах характеризуется двумя пороговыми значениями:

- *порог осязаемого тока* – наименьшая сила тока, от которого человек ощущает раздражение;
- *порог неотпускающего тока* – минимальное значение силы тока, при котором наступает судорожное состояние (т. е. состояние, при котором человек не в состоянии самостоятельно освободиться от поражающего фактора).

На рис. 2.6 представлены графики частотной зависимости этих токов. Следует обратить внимание на то, что максимальная восприимчивость организма человека к действию переменных токов находится в области промышленных частот 50 – 60 Гц.

При небольших частотах для медицинских применений наиболее существенно раздражающее действие тока, а не тепловой эффект.

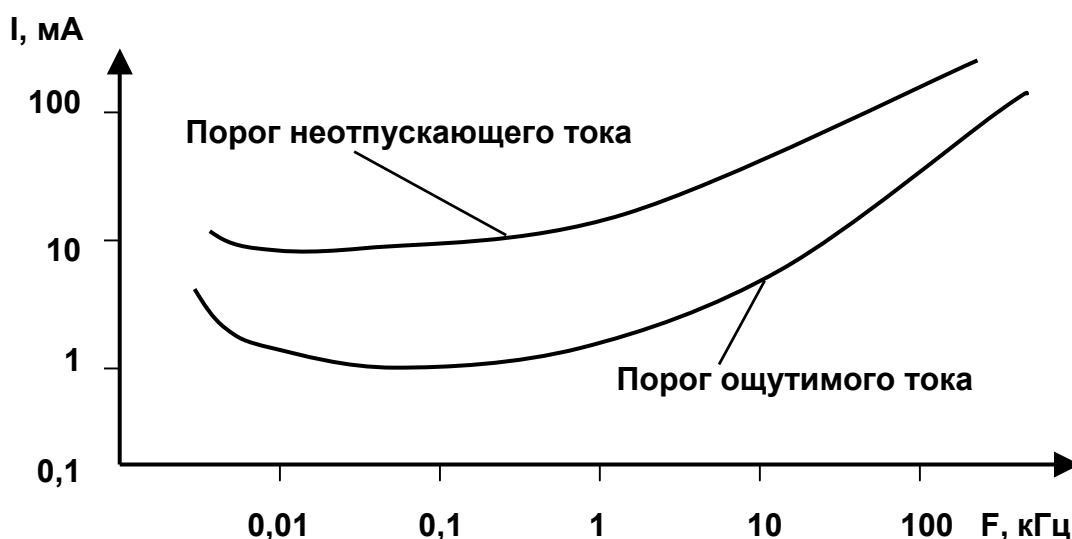


Рис. 2.6. Действие гармонических токов

Нагревание биотканей токами высоких частот. При увеличении силы тока от постоянного до ультразвуковых частот возникает явление электролиза, приводящее к разрушению тканей. Поэтому для прогревания тканей используют исключительно токи высокой частоты в диапазоне 0,1...10 МГц. Оценим количество энергии, выделяющейся в единичном объеме. Допустим, что между электродами площадью S заключена однородная биосреда протяженностью l с удельным сопротивлением r , через которую протекает переменный ток с эффективным значением I . Тогда выделяющаяся мощность в межэлектродной среде такова:

$$P = I^2 R = (j^2 S^2 r l) / S = j^2 r V,$$

где $j = I / S$ – плотность протекающего тока, $V = S l$ – объем энерговыделения. Энергия электрического тока преобразуется в тепловую и для единичного объема составит $q = j^2 r$.

Таким образом, больше всего нагреваются участки биотканей с большим удельным сопротивлением (кожа, жир, кости, мышцы), меньше – печень, легкие, кровеносные и лимфатические сосуды. Тепловое действие высокочастотных токов нашло свое применение в медицине.

Диатермия – тепловое лечебное воздействие затухающими импульсными токами частотой около 1 МГц, амплитудным начальным напряжением 100...150 В и максимальным током в несколько ампер.

Диатермокоагуляция – прижигание или «сваривание» биотканей токами высокой частоты. Необходимое нагревание достигается при плотности тока 6...10 мА/мм².

Диатермотомия – метод рассечения биотканей токами высокой частоты с плотностью $j \geq 10$ мА/мм².

Дарсонвализация – нетепловое воздействие высокочастотным (100...400 кГц) импульсным током высокого напряжения (10...100 кВ)

и малой силой тока (10...15 мА). Смещение ионов в тканях под действием высокочастотных токов крайне мало, поэтому отсутствует явление, присущее электролизу, хотя колебание частиц в высокочастотном поле происходит с преодолением сил трения и выделением тепла. Однако при воздействии кратковременными импульсами (длительность импульса составляет несколько периодов высокочастотного тока, а частота повторения – несколько десятков герц) выделение тепла будет минимальным. Поэтому основное действие таких токов – раздражение рефлекторным путем, а лечебный эффект – болеутоление. На рис. 2.7 показана упрощенная схема процедуры дарсонвализации.

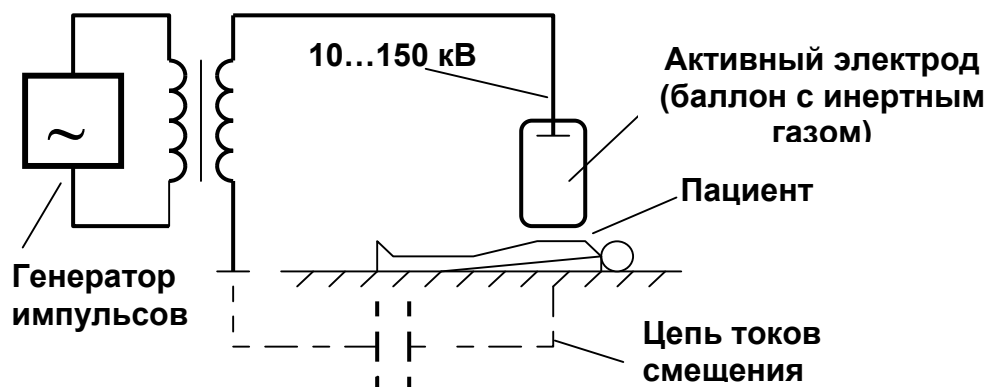


Рис. 2.7. Структурная схема дарсонвализации

2.4. Воздействие магнитных полей на биологические объекты

Магнитным называется поле, оказывающее действие на движущиеся тела, обладающие электрическим зарядом, а также на тела, обладающие магнитным моментом независимо от их состояния движения. Магнитное поле характеризуется направленностью и напряженностью. Магнитное поле в веществе описывается индукцией

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H} = \mu_0 (1 + \kappa) \mathbf{H},$$

где κ – магнитная восприимчивость вещества. Поскольку магнитные свойства биотканей (диамагнетики и парамагнетики) выражены достаточно слабо, т. е. $|\kappa| \leq 1$, то первичное влияние внешнего магнитного поля на биообъект определяется в основном силовым действием на заряды ионов. Многие возникающие биофизические явления действия статических и низкочастотных магнитных полей могут быть рассмотрены с учетом силы Лоренца $\mathbf{F}_л = q_i [\mathbf{V}_i \mathbf{B}]$, где q_i – заряд, а \mathbf{V}_i – скорость перемещения иона.

Внутриканевый *магнитофорез* – явление интенсификации обменных процессов в области наложения магнитного поля, которое объясняется изменением траекторий теплового движения ионов биосреды к дуго- и спиралеобразному виду (сила Лоренца перпендику-

лярна скорости движения иона). Таким образом, энергия магнитного поля трансформируется в фактор стимуляции биохимических процессов.

Лекарственный магнитофорез – введение лекарственных форм через кожный покров под действием магнитного поля (рис. 2.8). Необходимым условием проведения лекарственного магнитофореза является диссоциация на ионы лекарственной формы в растворе. Наложение внешнего магнитного поля приводит к усилению диффузии через потовые и сальные каналы, межклеточное пространство за счет силового действия магнитного поля на ионы лекарственного препарата.

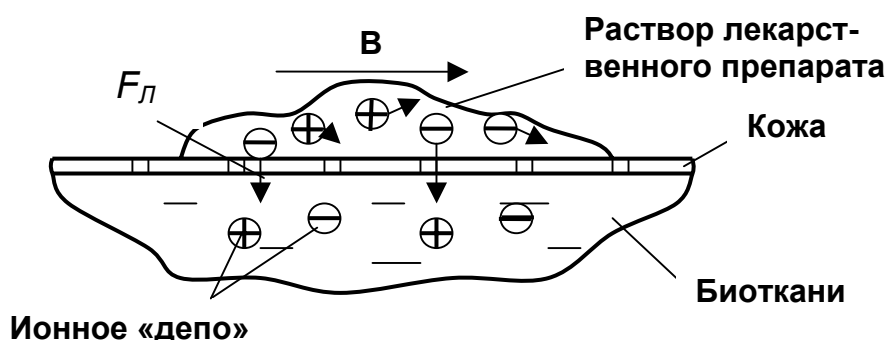


Рис. 2.8. Принцип проведения лекарственного магнитофореза

Эффект Холла наблюдается в сосудах с физиологически направленным движением крови и лимфы. Поскольку лимфа и особенно кровь являются биологическими электролитами, то сосудистое русло можно трактовать как проводник с током, помещенный во внешнее магнитное поле. Величина протекающего тока I будет пропорциональна концентрации и заряду ионов в электролите и скорости их перемещения (например скорости кровотока). Тогда на стенках сосуда возникает поперечная ЭДС (ЭДС Холла) $U_x = (R_x [IB])/d$, где R_x – постоянная Холла, d – диаметр сосуда. Таким образом, на собственные биоэлектрические потенциалы, вызванные физиологическими процессами в организме, накладываются потенциалы, индуцированные внешним магнитным полем. Степень такого влияния будет определяться устойчивостью гомеостатических механизмов организма по отношению к данному воздействию.

Магнитогидродинамический эффект для биосред живых объектов также связывают с циркуляцией крови и других электропроводящих жидкостей в магнитном поле. Если проводящую движущуюся жидкость поместить в магнитное поле, то в ней возникнут пондеромоторные силы. Объемная плотность пондеромоторных сил $F_{об} \approx [j B]$, где j – плотность полного тока. Очевидно, что возникающие силы перпендикулярно направлены к движению проводящей среды. Поэтому суммарное проявление магнитогидродинамического эффекта описы-

вают как увеличение вязкости жидких движущихся проводящих сред во внешнем магнитном поле. Вязкость среды с учетом сказанного можно представить в виде $\eta = \eta_0 + \Delta\eta(B)$, где η_0 - вязкость в отсутствие магнитного поля, $\Delta\eta(B)$ – увеличение вязкости, вызванное действием магнитного поля. Проведенные исследования влияния магнитного поля величиной 0,1 и 0,2 Тл на скорость кровотока показали относительное уменьшение скорости на 0,03 и 0,1% соответственно. Гипотетически практически полная остановка кровотока может произойти в магнитном поле с индукцией ~ 200 Тл.

Рассмотренные выше биофизические явления нашли свое применение в медицине в виде метода магнитотерапии. Для проведения магнитофореза используют комплекты аппликаторов на основе постоянных магнитов. Магнитные браслеты применяют для нормализации периферического кровоснабжения.

Действие переменных магнитных полей на биосреды прежде всего связывают с глубиной проникновения и энерговыделением.

Глубина проникновения переменного магнитного поля в проводящую среду зависит от ее магнитных и электрических свойств, частоты поля и определяется выражением

$$d_{\text{прон}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \mu_0 \sigma}}.$$

Значение $d_{\text{прон}}$ характеризует глубину проникновения переменного магнитного поля, на которой его амплитуда уменьшается в e раз. Для водосодержащих биотканей (биожидкостей, мышечных тканей, вещества мозга $\sigma = 0,6 \dots 1$ (Ом·м) $^{-1}$, $\mu \approx 1$) применима расчетная формула $d_{\text{прон}} = 390 \cdot (f)^{-1/2}$. Тогда для частот 10 Гц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц глубина проникновения составит около 120; 3,9; 1,2; 0,39 м соответственно. Поэтому для частот до десятков и сотен килогерц справедливы рассмотренные выше явления для статических и низкочастотных магнитных полей. Для высокочастотных магнитных полей более значимо колебательное движение ионов с рассеиванием энергии в окружающих тканях.

Нагревание биотканей переменным магнитным полем (энергетическое воздействие). Пусть на некоторую глубину в биосреде проникает переменное магнитное поле $B(t) = B_0 \cos \omega t$. Как было показано ранее, удельная мощность, выделяющаяся в проводящей среде, определяется выражением

$$q = j^2 \rho = j^2 / \sigma.$$

Найдем индуцируемую плотность тока из уравнений

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{E} &= - d\mathbf{B}/dt, \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E}. \end{aligned}$$

Отсюда получим $\text{rot} \mathbf{j} = - \sigma(d\mathbf{B}/dt)$. Для простоты положим, что существует некоторый контур с пространственной координатой ℓ , для которого справедливо $\text{rot} \mathbf{j} = \partial \mathbf{j} / \partial \ell$. Учитывая циклический характер изменения магнитного поля, получим дифференциальное уравнение

$$\partial j = (\sigma \omega B_0 \sin \omega t) \partial l.$$

Продифференцировав его, имеем

$$j = \sigma \omega L B_0 \sin \omega t,$$

где L – линейный размер области, в которой происходит действие магнитного поля. Тогда удельная мощность, выделяющаяся в проводящей среде под действием магнитного поля,

$$q = \sigma \omega^2 L^2 B_0 \sin^2 \omega t.$$

Таким образом, под действием переменного магнитного поля в большей степени будут нагреваться биологические ткани с хорошей проводимостью и кровенаполнением (кровеносные сосуды, мышечная ткань, вещество мозга), в меньшей – жировые и костные ткани, кожа. Медицинское применение переменных магнитных полей нашло свое воплощение в методах индуктотермии и низкочастотной магнитотерапии.

Индуктотермия – метод электролечения при воздействии на определенные участки тела высокочастотным (15...50 МГц) магнитным полем. Лечебные уровни магнитного поля формируют индукторы (высокочастотные соленоиды), подключенные к генератору тока. Механизм лечебного действия основан на выделении тепла, оказывающего влияние на протекание биопроцессов. Тепло, образующееся на глубине 7-8 см, является сильным раздражителем, вызывающим реакции многих систем организма.

Низкочастотная магнитотерапия – применение с лечебной целью переменных, постоянно прерывистых и импульсных магнитных полей низкой частоты (50...1000 Гц). Механизм лечебного воздействия обусловлен не величиной выделившегося тепла (оно мало вследствие низкой частоты поля), а его раздражающим действием.

Микроскопический (квантовый) механизм действия магнитных полей на вещество вызван наличием собственных магнитных моментов квантовых систем. Для элементарных частиц свойственно наличие орбитального и спинового моментов импульса, которые порождают орбитальный и спиновый магнитные моменты соответственно. Последние образуют результирующий магнитный момент квантовой системы. Если квантовую систему (ядро, атом, молекулу) поместить во внешнее магнитное поле, то в результате взаимодействия собственного магнитного момента с внешним полем произойдет расщепление разрешенных энергетических уровней на подуровни. Такое явление получило название эффекта Зеемана. Для практических применений оказалось важным (как следствие эффекта Зеемана) изменение спектральных характеристик вещества, помещенного в магнитное поле.

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) – избирательное поглощение электромагнитного излучения парамагнетиками, связанное с переходами его атомных электронов между зеемановскими уровнями, которые возникают при наложении на вещество постоянно-

го магнитного поля. Минимальная разность энергий между зеемановскими уровнями расщепления составляет $\Delta W_{\text{ез}} = g \cdot \mu_B \cdot B$, где μ_B – магнетон Бора, g – константа, зависящая от типа квантовой системы (фактор Ланде). Следовательно, минимальная частота резонансного поглощения электромагнитного излучения составит $\nu_{\text{эпр}} = g \cdot \mu_B \cdot B / h$, где h – постоянная Планка. Особенностью живых организмов является то, что парамагнитными свойствами в них обладают свободные радикалы – атомы или группы химически связанных атомов, имеющие неспаренные электроны на внешних оболочках. Концентрация свободных радикалов в тканях является объективным диагностическим признаком различных патологий. Для ЭПР используют магнитные поля с индукцией $\sim 0,3$ Тл, для которой $\nu_{\text{эпр}} \sim 10$ ГГц, поэтому данный метод диагностики относят к СВЧ-спектроскопии.

Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) – избирательное поглощение веществом электромагнитного излучения, обусловленное переходом его ядер между зеемановскими подуровнями энергии при наложении внешнего магнитного поля. Для минимальной частоты ЯМР справедливо соотношение $\nu_{\text{ямр}} = g_{\text{я}} \cdot \mu_{\text{я}} \cdot B / h$, где $\mu_{\text{я}}$ – магнетон ядер вещества, $g_{\text{я}}$ – фактор Ланде. Для индукции магнитного поля $\sim 0,3$ Тл частота резонанса $\nu_{\text{ямр}} \sim 10$ МГц, поэтому ЯМР относят к методам радиочастотной спектроскопии. По частотам резонанса и соответствующим интенсивностям поглощения определяют не только химический состав вещества, но и пространственную структуру соединений, в том числе и живых тканей. ЯМР нашел свое применение в медицине для томографических исследований. ЯМР томография – метод визуализации внутренних структур живого организма по распределению концентрации ядер вещества в исследуемом слое на основе пространственной зависимости интенсивности поглощения и частоты ЯМР, заданной известным распределением индукции магнитного поля. Наиболее часто для визуализации используют ядра водорода (протоны), поэтому этот метод также называют ЯМР-протонная томография.

К основному источнику магнитных полей в пределах биосферы относят магнитное поле Земли. Его величина и направление зависят от географических координат. Для территории Украины величина земного магнитного поля составляет около $4 \cdot 10^{-5}$ Тл. Биологическое действие магнитного поля Земли определяется не только его статическими характеристиками, но и динамическими изменениями, получившими название магнитных бурь. Причиной флуктуаций магнитного поля Земли в основном является динамика солнечной активности (в особенности его компонента ионизирующих излучений). Это приводит к изменению концентрации заряженных частиц в ионосфере и, как следствие, к возникновению атмосферных токов к поверхности Земли. Эти токи создают относительно продолжительные флуктуации магнитного поля, приводящие к биосенсорной реакции живых объектов.

Собственные магнитные поля живых существ, порождаемые биотоками, незначительны и, например, для мозговой и сердечной деятельности организма человека составляют $10^{-12} \dots 10^{-10}$ Тл.

Более существенны магнитные поля, порождаемые техногенной деятельностью человека. Это прежде всего энергогенерирующие станции, сети электропередач, электротранспорт, а также бытовые электро- и радиоприборы.

2.5. Воздействие переменным электрическим полем

На небольших расстояниях r от источника электромагнитного излучения с длиной волны λ и при выполнении условия $r \ll \lambda$ на биообъект можно воздействовать преимущественно одной компонентой поля. Рассмотрим энергетическое действие переменного электрического поля напряженностью $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i\omega t}$ на некоторый объем биосреды с изотропными диэлектрическими и проводящими свойствами. Как и в случае магнитного поля, определим ток проводимости, индуцируемый в среде переменным электрическим полем, из системы уравнений

$$\mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t; \quad \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E},$$

где первое уравнение характеризует полный ток в среде (токи проводимости и смещения), второе и третье – позволяют выразить ток проводимости через индукцию электрического поля. Тогда для полного тока получим выражение

$$\mathbf{J} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \varepsilon_0 \cdot \partial \mathbf{E} / \partial t = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon i \omega \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega \mathbf{E} \cdot (\sigma / (\varepsilon_0 \varepsilon \omega) + i).$$

Поскольку тангенс диэлектрических потерь в среде обозначают, как $\operatorname{tg} \delta = \sigma / (\varepsilon \varepsilon_0 \omega)$, где δ – угол между векторами полного тока и тока смещения, то последнее выражение приобретает вид

$$\mathbf{J} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega \mathbf{E} \cdot (\operatorname{tg} \delta + i).$$

Учитывая, что за активные потери в веществе отвечает ток проводимости $\mathbf{j} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega \mathbf{E} \cdot \operatorname{tg} \delta$, а $\sigma = \mathbf{j} / \mathbf{E}$, для удельного энерговыделения можно записать $q = \mathbf{j}^2 / \sigma = \mathbf{j}^2 \mathbf{E} / \mathbf{j} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega \mathbf{E}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta$. Таким образом, степень нагрева биотканей переменным электрическим полем зависит от соотношения их диэлектрических и проводящих свойств, а также от частоты поля.

Использование переменных электрических полей в медицине. УВЧ-терапия – применение с лечебной целью воздействия на живой организм непрерывного или импульсного поля ультравысокой частоты (30...300 МГц). Реализуют метод, располагая область тела пациента между емкостными электродами, подключенными к выходному контуру генератора УВЧ-колебаний. Выделяют тепловой и осцилляторный (нетепловой) механизмы воздействия. Благодаря тому, что биоткани имеют достаточно большую емкостную проводимость, УВЧ-поле свободно проникает через кожу и жировой слой во внутренние элементы организма. Колебания зарядов в высокочастотном электрическом поле с диссипацией энергии приводит к нагреванию биотканей, что, в

свою очередь, стимулирует физиологические процессы. К нетепловым проявлениям действия УВЧ-поля относят бактерицидное свойство, влияние на нервную систему (эффекты болеутоления), улучшение сосудистой проницаемости и периферического кровоснабжения.

Емкостная плетизмография – диагностический метод, основанный на зависимости емкости конденсаторного датчика от кровенаполнения тканей, расположенных между электродами конденсатора. Измерение импеданса в цепи датчика проводится на частотах диапазона 0,3...1 МГц.

2.6. Биообъекты в электромагнитном поле

Выше были рассмотрены случаи воздействия отдельных компонентов электромагнитного поля на биообъекты. Задача настоящего раздела – учесть особенности действия электромагнитного поля как излучения. В этом случае исходным моментом является понятие волновой зоны.

Волновая зона – это пространство, в котором электромагнитное поле обладает волновыми свойствами, т. е. характеризуется частотой изменения, длиной волны и направлением распространения. Волновая зона – это также часть пространства, в котором источник электромагнитного излучения можно считать точечным.

По особенностям воздействия на биологические объекты спектр электромагнитного излучения радиочастотного диапазона подразделяют на пять интервалов:

1. Единицы герц ... 10 кГц – волновая зона находится на расстояниях, где интенсивность электромагнитного поля утрачивает свою биологическую значимость. Применительно к этому участку практическое значение имеют отдельные составляющие электрического и магнитного полей, действие которых рассмотрено в предыдущих разделах.

2. 10 кГц ... 30 МГц – характерно неравномерное поглощение электромагнитной энергии различными биоструктурами организма. Поглощение энергии растет пропорционально ω^2 .

3. 30 МГц ... 10 ГГц – характерно возникновение выраженных интерференционных явлений, сопровождающееся сложным распределением поглощенной организмом энергии. Максимальное поглощение имеет место в случае возникновения резонансных явлений при определенном соотношении длины волны и размеров объекта. Возникают области так называемых «горячих пятен».

4. 10 ... 200 ГГц – характерно быстрое затухание волны при прохождении через ткани. Эффективная глубина проникновения – около 0,01... 0,1λ. Характерен эффект локального воздействия для человека. 49...60 ГГц – диапазон биорезонансных частот.

5. 200 ... 3000 ГГц – характерно поглощение энергии самыми поверхностными слоями. При незначительных уровнях энергии излучения действие связывают с раздражением рецепторов кожи или действием на биологически активные точки.

Рассмотрим некоторые характеристики проникновения, распространения и поглощения электромагнитного излучения биоструктурами, моделируя их сплошными средами с пространственным распределением параметров ε , σ , μ .

Глубина проникновения электромагнитного излучения в биоткани – это расстояние, на котором амплитуда электрического поля уменьшается в e раз, а плотность потока энергии – в e^2 раз. Эта величина определяется по формуле

$$d = \lambda_0 [2\pi^2 \varepsilon \cdot ((1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{1/2} - 1)]^{1/2},$$

где λ_0 – длина волны в вакууме. Учитывая, что $\operatorname{tg} \delta = \sigma / \omega \varepsilon \varepsilon_0$, при значительном увеличении частоты $\operatorname{tg} \delta \approx 0$, следовательно, параметр d – бесконечно малая величина. Однако экспериментальная проверка показала, что теоретическая формула дает несколько заниженный результат, особенно для диапазона КВЧ. Это расхождение поясняют неадекватностью модели биосреды как сплошной среды.

Длину волны электромагнитного излучения в биотканях характеризует формула

$$\lambda_{\text{тк}} = \lambda_0 \cdot [(\varepsilon \mu / 2) \cdot ((1 + \operatorname{tg}^2 \delta)^{1/2} + 1)]^{1/2}.$$

Если учесть, что биосреды – это водосодержащие ткани, для которых в УКВ- и СВЧ-диапазонах $\operatorname{tg} \delta \ll 1$, а $\varepsilon \approx 81$, $\mu \approx 1$, для оценочных расчетов применима формула $\lambda_{\text{тк}} \approx \lambda_0 (\varepsilon)^{-1/2} \approx \lambda_0 / 9 \dots \lambda_0 / 6$. Таким образом, для электромагнитного излучения, проникшего в биосреду, присуще явление укорочения длины волны. Графики частотной зависимости $\lambda_{\text{тк}}$ и d показаны на рис. 2.9. Для тканей с низким содержанием воды укорочение длины волны составляет 2...2,5 раза.

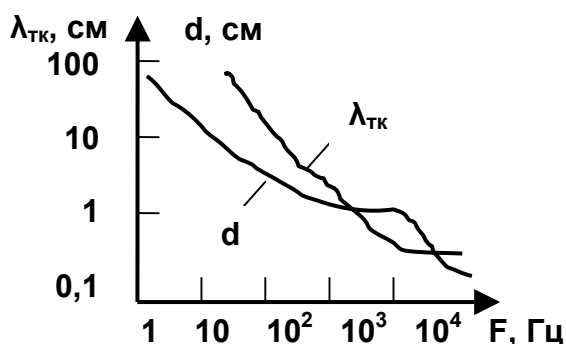


Рис. 2.9. Частотная зависимость $\lambda_{\text{тк}}$ и d для биотканей

Интерференционные явления обусловлены слоистой структурой биотканей. В тех случаях, когда толщина нескольких слоев вещества

меньше глубины проникновения излучения, часть энергии отражается от границ их раздела и в тканях возникают максимумы поглощения («горячие пятна», рис. 2.10).

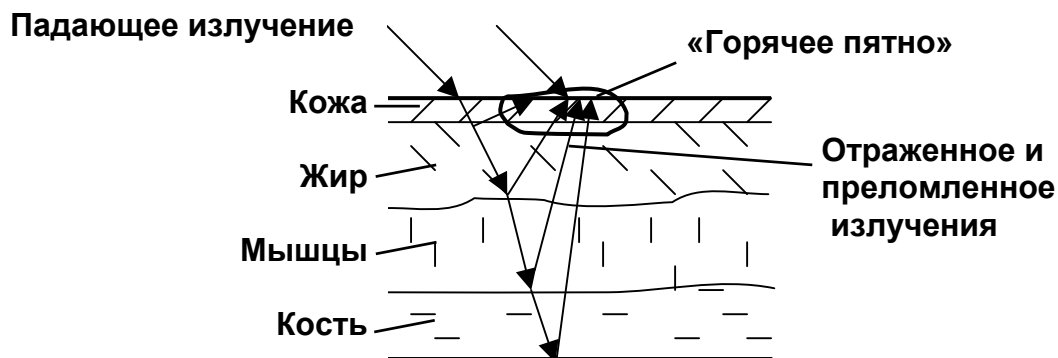


Рис. 2.10. Моделирование образования «горячих пятен»

Общее количество поглощенной энергии электромагнитного излучения и ее распределение внутри биологического объекта являются сложной функцией электрических свойств тканей и их общих геометрических размеров и условий облучения. Объективной характеристикой энергетического воздействия является *specific absorbed rate (SAR)*, или *удельная поглощённая мощность (УПМ)* – часть энергии электромагнитного излучения, поглощаемая единицей массы в единицу времени, $[W]=\text{Вт/кг}$. На рис. 2.11 показаны зависимости УПМ для объекта, различным образом ориентированного относительно плоскополяризованного электромагнитного излучения (векторы \mathbf{E} , \mathbf{H} , $\mathbf{K}=[\mathbf{E}\mathbf{H}]$) в свободном пространстве. В качестве ориентационного признака выбран отрезок L , соединяющий максимально удаленные точки объекта, а аргументом взято отношение L/λ . Для получения зависимостей использовались экспериментальные фантомы (физические модели биообъектов).

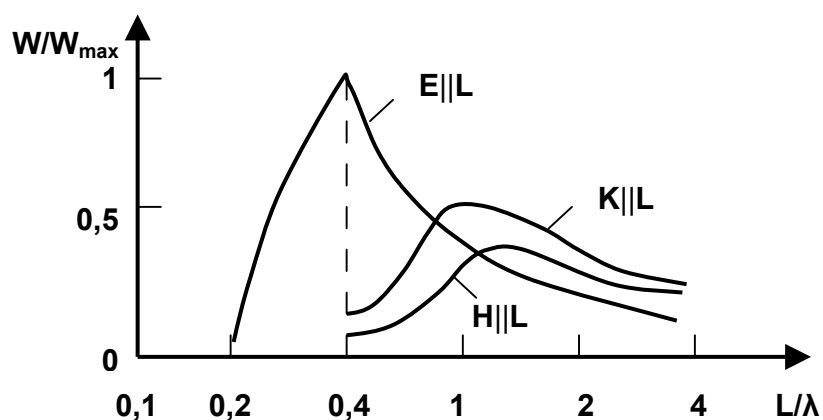


Рис. 2.11. Зависимости УПМ от параметров облучения объекта

Исследования, проведенные на животных, подтвердили наличие максимума УПМ, когда максимальный размер объекта L несколько меньше половины длины волны излучения и ориентирован параллельно плоскости поляризации.

При облучении в свободном пространстве на частотах до 1 МГц размеры тела животных и человека малы по сравнению с длиной волны, диэлектрические процессы в тканях выражены слабо. Поэтому тело человека или животного можно считать однородным проводящим эллипсоидом. Учитывая, что энерговыделение пропорционально квадрату плотности тока и сопротивлению тканей человеческого тела, для сфероидной модели были получены следующие формулы для E и H составляющих поля: $Q_E = 2 \cdot 10^{-21} \rho f^2 E^2$, $Q_H = 2 \cdot 10^{-17} \rho f^2 H^2$, где $[Q] = \text{кал/мин}$.

При облучении в свободном пространстве в диапазоне частот 1...400 МГц наблюдается пропорциональная зависимость УПМ от площади поверхности биообъектов: $W \sim S \cdot \ln(f)$.

На рис. 2.12 представлены частотные зависимости усредненных УПМ для различных частей тела человека, полученные численными методами. Полагается, что объект находится в свободном пространстве, а интенсивность падающего излучения – 1 мВт/см². Наблюдается ряд характерных резонансов поглощения, а УПМ головы человека имеет несколько максимумов в интервале частот 300...400 МГц.

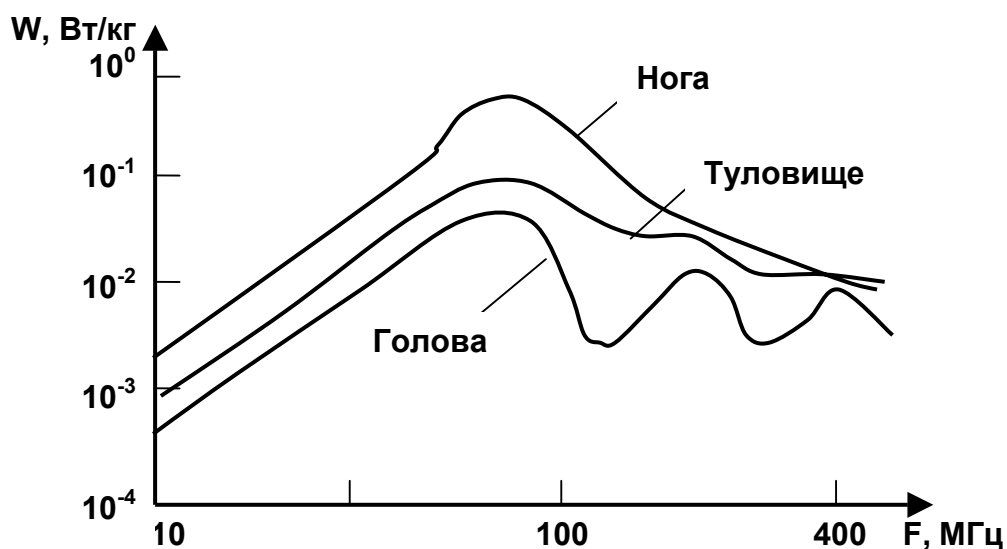


Рис. 2.12. Частотные зависимости УПМ частей тела человека

Отличительной особенностью действия электромагнитного излучения в интервале частот 300...300000 МГц (1 м...1 мм) на биосреду является выполнение условий волновой зоны, поэтому применение электромагнитного излучения СВЧ- и КВЧ-диапазонов в медицине основывается, прежде всего, на локализации их воздействия, эффек-

тивном теплообразовании (пропорциональном частоте поля) и ряде специфических нетепловых эффектов.

Микроволновая терапия – метод лечения, основанный на использовании электромагнитного излучения дециметрового и сантиметрового диапазонов. Первичное действие этого излучения проявляется в зоне локального воздействия и состоит из теплового и осцилляторного (экстермического) эффектов. Тепловой эффект в биотканях обусловлен рассеиванием энергии колебаний свободных ионов электролитов и дипольных молекул диэлектриков вокруг своей оси в процессе их ориентирования относительно силовых линий электромагнитного поля. Наибольшее образование тепла происходит в водосодержащих тканях (кровь, мышцы, лимфа). К осцилляторному эффекту относят изменения коэффициентов поверхностного натяжения биожидкостей, проницаемости клеточных мембран, резонансное поглощение излучения белковыми макромолекулами и аминокислотами. Этот эффект проявляется при малых мощностях воздействия.

Выраженным биологическим действием обладает электромагнитное излучение диапазона 49...60 ГГц слабой и сверхслабой интенсивностей. Различают *микроволновую резонансную терапию и информационно-волновую терапию*. В первом случае лечебный эффект достигается воздействием узкополосного излучения интенсивностью около $10^{-6} \dots 10^{-9}$ Вт/см², в другом – широкополосным излучением с обязательной составляющей миллиметрового диапазона и интенсивностью $\sim 10^{-15}$ Вт/см². Оба метода способствуют нормализации физиологических процессов в организме, стимулируют иммунные функции, обладают болеутоляющим действием.

Воздействие электромагнитных излучений на живые организмы имеет и *негативные проявления*. Поглощенная биотканями энергия вызывает повышение температуры во всем организме или в некоторых локальных областях. Величина повышения температуры зависит от диффузных механизмов нагревания и охлаждения тканей. Если способность системы к терморегулированию окажется недостаточной и теплоотвод затруднен, происходит перегревание тканей, что может привести к их разрушению и даже смерти всего организма.

Тепловой стресс – явление повышения температуры тела, увеличения частоты пульса и дыхания высших животных и человека при интенсивном и длительном их облучении электромагнитным СВЧ-полем. Поражение глаз (микроволновая катаракта) – помутнение хрусталика при интенсивном облучении СВЧ-полем.

Естественные источники мощных ВЧ- и СВЧ-излучений в пределах биосферы отсутствуют. Однако техногенная деятельность человека в последние десятилетия привела к существенному росту интенсивностей электромагнитных излучений и расширению их спектра в область сверхвысоких частот. Поэтому допустимый уровень интенсивности излучения 2,5 мкВт/см для человека трудновыполним.

2.7. Действие электромагнитных излучений оптического диапазона

Оптическое излучение (свет) – излучение квантов (фотонов) электромагнитного поля, энергетическое воздействие которого на вещество в основном определяется механизмами поглощения и рассеяния. В зависимости от длины волны выделяют три диапазона оптического излучения: инфракрасное (ИК) излучение (1000...0,76 мкм), видимый свет (0,76...0,4 мкм), ультрафиолетовое излучение (УФИ) (0,4...0,01 мкм). Отличительной особенностью оптического излучения от радиочастотного является его дискретность, т. е. излучение электромагнитных волн происходит не непрерывно, а отдельными порциями – квантами. Это связано со свойством квантовых систем (атомов, молекул) изменять свое энергетическое состояние скачкообразно, поглощая или излучая квант электромагнитного излучения

$$h\nu = W_i - W_k,$$

где ν – частота излучения, W_i и W_k – энергетические уровни системы, подчиняющиеся правилам отбора. Кванты оптического диапазона излучения называют также фотонами.

Ряд важных явлений взаимодействия оптического излучения с биосредами удобно рассматривать с *феноменологических позиций*, не затрагивая базовые квантовые механизмы.

Поглощение света – ослабление интенсивности света при прохождении через вещество вследствие превращения световой энергии в другие виды. В случае однородной среды и монохроматического излучения поглощение описывает закон Ламберта – Бугера – Бера

$$I_\ell = I_0 e^{-k\ell},$$

где ℓ – протяженность среды, I_0 и I_ℓ – интенсивности излучения на входе в среду и выходе из нее, k – натуральный показатель поглощения. Поскольку в биосредах квантовыми системами, поглощающими энергию, являются молекулы с концентрацией n , а пространственной характеристикой области взаимодействия – эффективное сечение молекул $S_{эф}$, то натуральный показатель поглощения можно представить в виде $k = n S_{эф}$. Если рассматривать всю совокупность молекул, входящих в вещество, очевидно, что параметры n , $S_{эф}$ являются функциями частоты или длины волны падающего излучения, поэтому $k = k(\lambda)$.

Важное значение закон поглощения имеет для исследований биожидкостей и растворов биосред. Предположим, что молекулы, поглощающие фотоны, находятся в растворителе, который прозрачен для выбранного монохроматического излучения. Тогда концентрация вещества поглотителя $n = CN_A$, где N_A – число Авогадро, C – молярная концентрация, при этом показатель $k = nS_{эф} = CN_A S_{эф} = \varepsilon' C$. Величина $N_A S_{эф} = \varepsilon'$ – натуральный молярный показатель поглощения, характеризующий эффективное сечение поглощения всех молекул

одного моля растворенного вещества. Используя введенную величину, закон поглощения для растворов принимает вид

$$I_{\ell} = I_0 e^{-\varepsilon' C \ell}, \text{ или } I_{\ell} = I_0 10^{-\varepsilon C \ell},$$

где $\varepsilon = 0,43 \varepsilon'$.

На основе закона поглощения оптического излучения разработано несколько методов исследований.

Концентрационная колориметрия – метод определения концентрации вещества в окрашенном растворе. Основывается на определении концентрации вещества из выражения $C = (\lg(I_0 / I_{\ell}) / \varepsilon \ell)$ при условии наличия табличных сведений о ε для $\lambda = \text{const}$.

Спектроскопические исследования химического состава биосред основаны на зависимостях $k = k(\lambda)$ и $\varepsilon = \varepsilon(\lambda)$.

Оптическая плетизмография – метод исследования кровенаполнения органов и тканей на основе зависимости $\lg(I_0 / I_{\ell}) = \Phi(\ell)$.

Следующее важное явление взаимодействия оптического излучения с веществом – это *рассеяние света*, т. е. процесс преобразования света веществом, сопровождающийся изменением направления распространения и интенсивности и проявляющийся как несобственное свечение вещества. Причинами рассеяния света являются оптические неоднородности, которые разделяют на два вида.

Неоднородности первого вида – мелкие частицы в однородном прозрачном веществе. Среды с такой неоднородностью получили название мутных сред, а сам процесс – явления Тиндаля. Если размеры неоднородностей отвечают условию $d \leq (0,1 \dots 0,2)\lambda$, то интенсивность рассеяния $I_{pac} \sim 1/\lambda^4$, для частиц большего размера $d > 0,2\lambda$ – $I_{pac} \sim 1/\lambda^2$. Многие биологические жидкости, взвеси биосред, аэрозоли (пар, туман, дым) относят к мутным средам.

Неоднородности второго вида возникают в чистом веществе из-за статистического отклонения молекул от равномерного распределения (например, флуктуации плотности при неравномерном нагревании). В общем случае интенсивность рассеянного излучения может быть описана функцией $I_{pac} = \Phi(\alpha, \lambda)$, где α – угол между направлением падающего излучения и рассеянного. Метод качественного исследования размеров неоднородностей, их концентрации по характеру рассеивания биопробами оптического излучения заданного спектра получил название «нефелометрия».

Явление вращения плоскости поляризации плоскополяризованного оптического излучения при прохождении через биосреду также может быть рассмотрено с феноменологических позиций. Сущность этого явления состоит в том, что некоторые оптически прозрачные вещества обладают свойством изменять (вращать) положение плоскости поляризации монохроматического излучения, как схематически показано на рис. 2.13. Такие вещества получили название оптически активных сред. Угол поворота плоскости поляризации находят из выражения $\alpha = \alpha_0 C \ell$, где α_0 – удельное вращение плоскости поляриза-

ции веществом при заданной длине волны излучения λ , ℓ – оптический путь излучения, C – концентрация оптически активной среды.

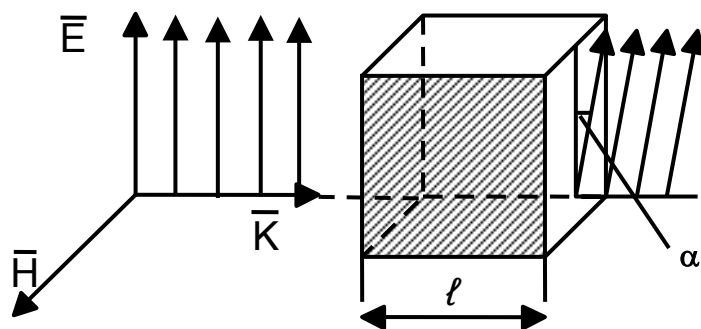


Рис. 2.13. Поворот плоскости поляризации излучения

Большинство биосред и их растворов являются оптически активными средами, поэтому рассмотренное явление нашло свое применение в медицинских лабораторных исследованиях для определения концентраций веществ по углу поворота плоскости поляризации (метод *поляриметрии*). Частотная дисперсия угла поворота плоскости поляризации используется в методе *спектрополяриметрии*. Этот метод по полученной зависимости $\alpha = \alpha(\lambda)$ позволяет определить концентрации нескольких оптически активных веществ в растворе.

Квантовый механизм взаимодействия оптического излучения с веществом позволяет дополнить рассмотренные выше явления. Основными элементами этого механизма являются атомные или молекулярные спектры излучения и поглощения.

Атомными спектрами называются спектры как излучения, так и поглощения, которые возникают при квантовых переходах между энергетическими уровнями свободных или слабо взаимодействующих атомов. К атомным относятся оптические спектры, которые обусловлены квантовыми переходами между энергетическими уровнями внешних электронов (с энергиями фотонов порядка нескольких электронвольт), что соответствует энергиям квантов ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областей спектра. Примером атомных спектров могут служить спектры водорода как неотъемлемого вещества в составе биосред: спектральная серия Лаймана (УФИ), серия Бальмера (ближнее УФИ и видимое излучение), серия Пашена (ИК-излучение). Как метод исследования состава вещества получил распространение атомный спектральный анализ с использованием спектров как излучения (эмиссионный спектральный анализ), так и поглощения (абсорбционный спектральный анализ). В биологических исследованиях атомный спектральный анализ применяют для определения микроэлементов в тканях организма, атомов металлов в

продуктах, атомов некоторых химических элементов в целях судебной медицины.

Молекулярные спектры – это спектры испускания и поглощения, возникающие при квантовых переходах с одного энергетического уровня на другой. Сложность молекулярных спектров по сравнению с атомными обусловлена большим числом квантовых состояний, реализуемых в молекуле. Это энергетические уровни, определяемые состоянием электронных оболочек ($W_{эл}$), колебательным ($W_{кол}$) и вращательным ($W_{вр}$) движениями молекул. Поэтому частота излучения или поглощения молекулы при переходах между энергетическими уровнями W' и W'' имеет многокомпонентную структуру:

$$\nu = 1/h \cdot (W' - W'') = 1/h \cdot [(W'_{эл} - W''_{эл}) + (W'_{кол} - W''_{кол}) + (W'_{вр} - W''_{вр})] = \\ = 1/h \cdot (\Delta W_{эл} + \Delta W_{кол} + \Delta W_{вр}),$$

причем справедливо неравенство $\Delta W_{эл} \gg \Delta W_{кол} \gg \Delta W_{вр}$, которое характеризует три вида молекулярных спектров.

Если выполняется условие $\Delta W_{эл} = 0$; $\Delta W_{ком} = 0$; $\Delta W_{вр} \neq 0$, то спектр называется вращательным и лежит в области СВЧ- и дальнего ИК-диапазонов ($\lambda = 0.1 \dots 1 \text{ мм}$). Если $\Delta W_{эл} = 0$; $\Delta W_{кол} \neq 0$; $\Delta W_{вр} \neq 0$, то имеет место колебательно-вращательный спектр в ближнем ИК-диапазоне. Если $\Delta W_{эл} \neq 0$; $\Delta W_{ком} \neq 0$; $\Delta W_{вр} \neq 0$, то образуется электронно-колебательно-вращательный спектр, наблюдаемый в видимой и ультрафиолетовой областях излучения.

Специфичность и индивидуальность спектров отдельных молекул лежит в основе качественного и количественного спектрального анализа. Молекулярные спектры позволяют исследовать не только строение молекул, но и характер межмолекулярного взаимодействия.

Молекулярные спектры поглощения (рис. 2.14) дают информацию о биологически функциональных молекулах и используются в биохимических и биофизических исследованиях.

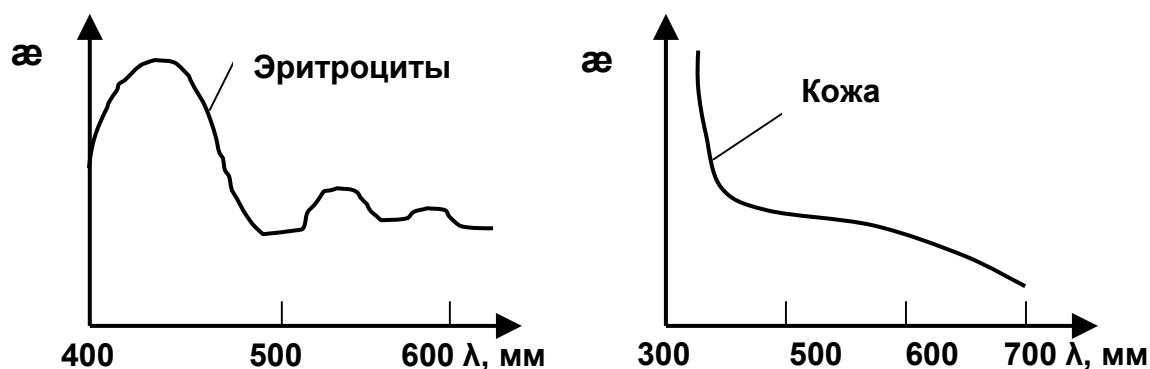


Рис. 2.14. Молекулярные спектры поглощения

Фотолюминесценция – это избыточное над тепловым излучение тела при данной температуре, имеющее длительность, значительно превышающую период (10^{-15} с) излучаемых световых волн, и возникающее при воздействии на вещество излучения оптического

диапазона. Фотолюминесценция подразделяется на *флуоресценцию* (кратковременное послесвечение) и *фосфоренцию* (сравнительно длительное послесвечение). Начальным этапом любой люминесценции является возбуждение атома или молекулы фотоном с энергией. В наиболее простом случае квантовая система возвращается в исходное энергетическое состояние с излучением фотона света той же частоты. Это явление называют резонансной флуоресценцией, которое наблюдается в парах и газах и возникает через 10^{-8} с после действия первичного излучения.

Для биологически функциональных молекул характерна фотолюминесценция, соответствующая закону Стокса: спектр люминесценции сдвинут в область длинных волн относительно спектра, вызвавшего эту фотолюминесценцию. Схема энергетических переходов для флуоресценции со смещением спектра излучения показана на рис. 2.15, а. Отличительной особенностью фосфоренции является большая длительность свечения (от долей секунд до нескольких часов), сохраняющегося после прекращения облучения. Это объясняется наличием метастабильных энергетических состояний, в которых может находиться квантовая система (рис. 2.15, б).

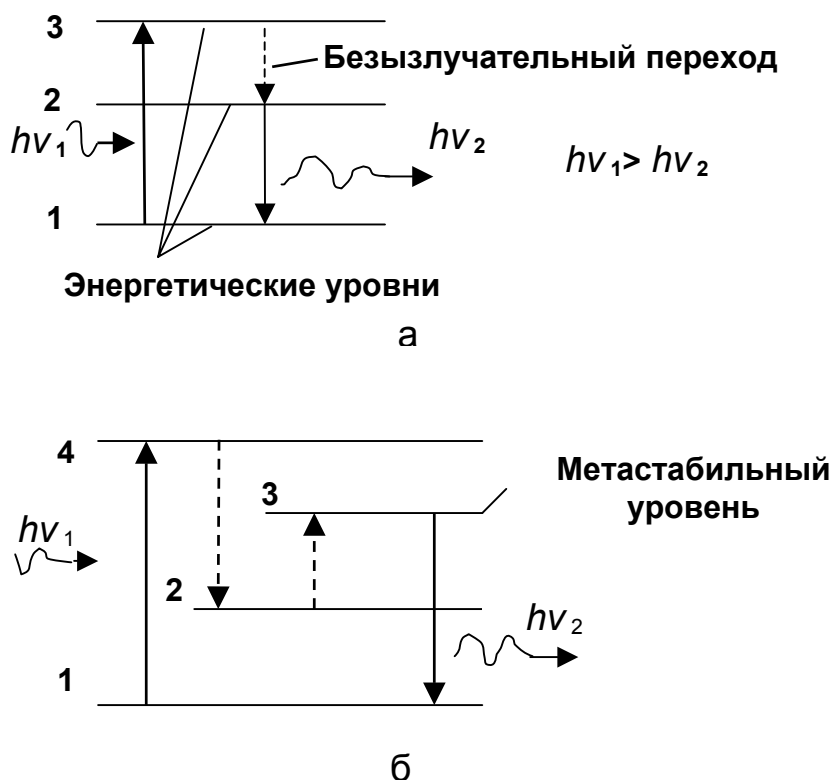


Рис. 2.15. Схемы энергетических переходов для фотолюминесценции

Фотолюминесценция в медицине используется для исследований межмолекулярного взаимодействия в биотканях, проницаемости

биотканей с помощью люминесцентных зондов, обнаружения микроорганизмов и бактерий, выявления малых количеств вещества.

Приведенные выше явления рассматривают живое вещество как пассивный объект взаимодействия, а реакцию биообъектов на действие оптического излучения учитывают фотобиологические процессы.

Фотобиологическими называются процессы с проявлениями на физиологическом уровне, происходящие в биологических системах при воздействии излучения оптического диапазона. Выделяют следующие их стадии: фотофизическая – поглощение кванта света и перенос энергии возбужденного состояния; фотохимическая – химические превращения молекул и физиологическая – ответ организма на излучение. Поглощение кванта излучения оптического диапазона приводит к возбуждению молекулы, а следовательно, к повышению ее реакционной способности, в результате чего могут происходить химические реакции, которые были бы невозможны в темноте. Такие реакции называются фотохимическими, а образующиеся в них продукты – фотопродуктами. Непосредственное воздействие света на химическое вещество чаще всего приводит к образованию нестабильных продуктов, которые в цепи последующих реакций превращаются в стабильные. Эти реакции, как правило, уже не требуют действия света и поэтому называются темновыми.

Для количественной оценки фотобиологических процессов применим феноменологический подход. Пусть n_0 и n_t – начальная и конечная концентрации фотобиологически активных молекул, I и t – интенсивность и время облучения, ϕ_x – квантовый выход фотохимической реакции, $S_{эф}$ – эффективное сечение поглощения молекулы. Тогда справедливо выражение $\ln(n_0 / n_t) = D S_x$, где $S_x = S_{эф} \phi_x$ – площадь сечения молекулы для фотохимического превращения, $D = I \cdot t$ – доза облучения. Величина биологической реакции однозначно связана с дозой облучения, а ее избирательность определяется спектром действия $S_x = \Phi(\lambda)$ (который напрямую связан с функцией $\alpha = \alpha(\lambda)$ – спектром поглощения).

Фотосинтез – преобразование световой энергии в энергию химических связей органических веществ – является важнейшим фотобиологическим процессом. Вследствие фотосинтеза осуществляется приток отрицательной энтропии в живые организмы. Фотосинтез осуществляется высшими зелеными растениями, зелеными и бурыми водорослями, зелеными и пурпурными бактериями.

К другим фотобиологическим процессам относят *регуляторные и информационные реакции*. Примерами таких физиологических проявлений могут служить: ощущение тепла (вызывает действие инфракрасного излучения на организм); зрительные реакции (излучение видимого диапазона), фототаксис (движение микроорганизмов к свету или от него); фототропизм (поворот листьев и стеблей растений к свету или от него); синтез витамина D (под действием ультрафиоле-

тового излучения), эритемообразование (покраснение кожи, вызванное расширением кровеносных сосудов кожи), загар (образование в коже пигмента меланина), канцерогенез (образование опухолей), бактерицидный эффект. Из всего диапазона электромагнитного излучения человек имеет рецепторы только к инфракрасному (терморецепторы) и видимому (зрительные рецепторы) излучениям.

Использование оптического излучения для лечения и диагностики заболеваний. Для прогревания поверхностных тканей тела пациента (на глубине около 2 см) используют тепловой эффект инфракрасного излучения ближней области ($\lambda = 0,76 \dots 2,5$ мкм). В качестве источника излучения применяются специальные лампы ИК-диапазона. В медицинской диагностике нашло свое применение ИК-зондирование, использующее явление диффузионного рассеяния. Применение ИК-излучения в судмедэкспертизе основано на визуализации скрытых биологических структур и инородных веществ. ИК-спектроскопия – количественный и качественный анализы колебательно-вращательных спектров аминокислот, углеводов, гормонов, липидов, белков. К негативным проявлениям действия ИК-излучения на человека относят тепловой удар – перегревание организма при преобладании процесса поглощения энергии над процессами теплоотдачи.

Медицинское применение ультрафиолетового излучения тесно связано с физиологическими проявлениями его действия на биообъекты. В диапазоне УФИ выделяют три зоны: А-зона ($\lambda = 400 \dots 315$ нм), или антирахитная, вызывает синтез витамина D; В-зона ($\lambda = 315 \dots 280$ нм) способствует образованию эритемы и синтезу пигмента меланина, который обладает защитным действием при ультрафиолетовом облучении, так как поглощает кванты света и одновременно является антиоксидантом; С-зона ($\lambda = 280 \dots 200$ нм), или бактерицидная, вызывает мутации, канцерогенез, оказывает бактерицидный эффект. УФИ в диапазоне $\lambda = 200 \dots 10$ нм приводит к диссоциации и ионизации молекул. Небольшие дозы ультрафиолетового облучения оказывают благоприятное действие на сердечно-сосудистую, эндокринную, нейрогуморальную, дыхательную системы. Однако молекулярный механизм такого воздействия ультрафиолета в большинстве случаев точно не известен. Комбинированное действие лекарственных препаратов и ультрафиолетового облучения А-зоны широко используется при лечении ряда кожных заболеваний, например, псориаза, витилиго. Однако такая терапия имеет ряд побочных эффектов, например, приводит к образованию эритемы, отема. Фотосенсибилизатор гематопорфирин и его производные используют при лечении злокачественных опухолей, так как обнаружено, что эти соединения накапливаются исключительно в опухолевых клетках и отсутствуют в здоровых. Сенсибилизаторы повышают чувствительность опухоли к действию видимого света, облучение которым приводит к ее гибели. Данный метод фотохимиотерапии используют при лечении опухолей как кожи, так и

внутренних органов. В последнем случае облучение проводится с помощью специальных световодов. Избирательное накапливание в опухолях гематопорфиринов используют и при диагностике онкологических заболеваний, так как люминесценция этих молекул позволяет определить размеры опухоли. УФИ большой мощности оказывает бактерицидный эффект, поэтому используется при стерилизации медицинских инструментов и помещений. В качестве источника излучения применяются специальные бактерицидные лампы.

Источники оптического излучения также можно разделить на объекты естественного и искусственного происхождения. К естественным источникам внеземного происхождения относят Солнце и другие звёзды, к источникам биосферного нахождения – естественное возгорание, разряды в атмосфере, люминесценцию. Основным естественным источником оптического излучения для биосферы является Солнце. Интенсивность его излучения в верхних слоях атмосферы составляет 1350 Вт/м^2 , а на широтах Украины на поверхности земли – $\sim 1000 \text{ Вт/м}^2$. Спектральные плотности энергетической светимости Солнца (рис. 2.16) за пределами земной атмосферы и на земной поверхности существенно различаются.

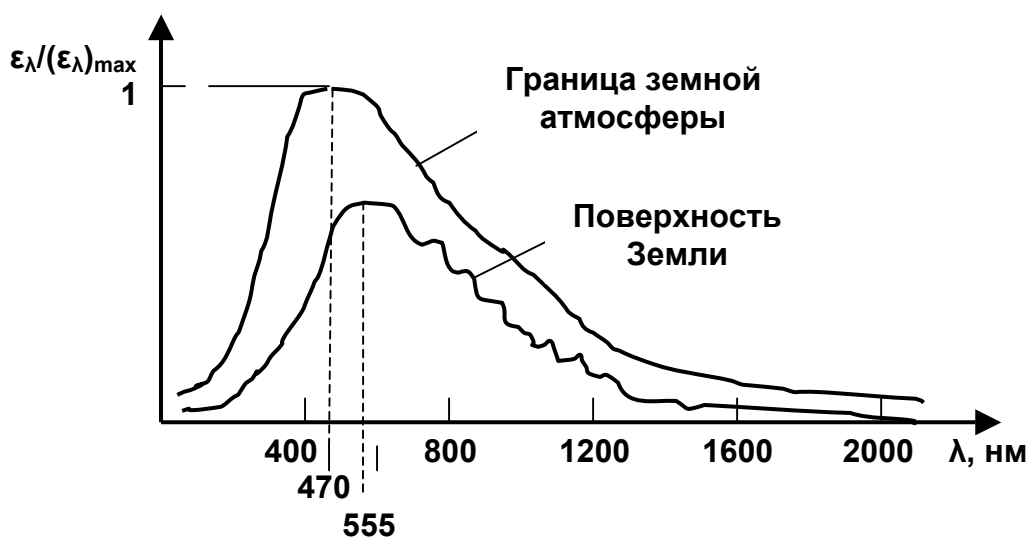


Рис. 2.16. Спектральные характеристики солнечного излучения

Около 48% энергии солнечного излучения приходится на видимый диапазон, 45% – на ИК-диапазон, 6% – на УФИ, $\sim 1\%$ – на прочие частотные интервалы, в том числе и СВЧ. Дозированную солнечную радиацию применяют как солнцелечение (гелиотерапию), а также как средство закаливания организма.

К искусственным источникам оптического излучения относят: тепловые, в т.ч. лампы накаливания (видимое и ИК-излучения); газоразрядные (видимое и ближнее УФИ); люминесцентные (от ИК- до УФИ-диапазона), лазерные (оптические квантовые генераторы). Отличи-

тельной особенностью лазерного излучения являются большая спектральная яркость, монохроматичность, малая расходимость, когерентность. Естественные источники излучения с характеристиками, близкими к лазерному, отсутствуют. Применение лазерного излучения в медицине: лазерная терапия (раздражение рефлекторным путем, ускорение заживления ран), получение голографических изображений биоструктур, лазерная хирургия. В хирургии используются лазерные скальпели, способные вызвать высокотемпературное разрушение ткани с одновременной коагуляцией белка. Такие операции протекают бескровно и широко практикуются при лечении отслоения сетчатки, глаукомы (лазером прокалываются микроскопические отверстия диаметром 50 – 100 мкм, что вызывает отток внутриглазной жидкости и, следовательно, понижение внутриглазного давления).

2.8. Воздействие ионизирующих излучений на биообъекты

Увеличение частоты электромагнитного излучения, а следовательно, и энергии кванта приводит к возникновению такого явления, как ионизация. *Ионизация* – это явление образования заряженных частиц в электрически нейтральном веществе в результате взаимодействия вещества с высокоэнергетическим излучением. Критерием, на основании которого электромагнитное излучение может быть отнесено к ионизирующему, является выполнение условия $h \cdot \nu \geq A_u$, где A_u – работа, затрачиваемая на ионизацию. Приведенное условие выполняется для коротковолнового УФ, рентгеновского- и гамма-излучений (γ) (рис. 2.17).

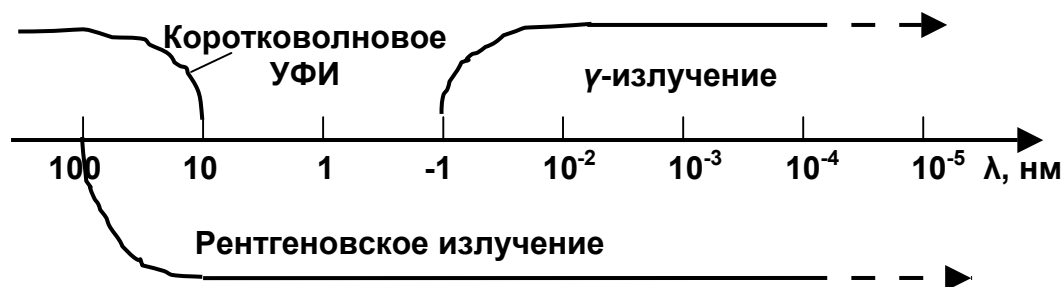


Рис. 2.17. Шкала ионизирующих излучений

Первичные физические процессы ионизации вещества квантами электромагнитного излучения приводят к отрыву с электронных оболочек как минимум одного электрона и превращению атома или молекулы в положительно заряженный ион. Энергетический баланс взаимодействия отражает уравнение $h\nu_{пер} = h\nu_{втор} + A_u + W_k$, где $\nu_{втор}$ – частота кванта вторичного излучения, W_k – кинетическая энергия образовавшихся зарядов (в основном электрона). Возможны различные варианты перераспределения энергии первичного кванта. Если отсутствует вторичное излучение, $h\nu_{пер} = A_u + W_k$ – внутренний фотоэффект.

При $h\nu_{пер} = h\nu_{втор}$ имеет место когерентное рассеяние, а ионизация отсутствует. Если выполняется неравенство $\nu_{пер} > \nu_{втор}$, наблюдают некогерентное рассеяние, в этом случае ионизация вероятна.

Возможны случаи, когда квант излучения взаимодействует со свободными электронами или образовавшимися в результате ионизации (фотоэлектронами). Если условно считать электрон неподвижным в момент взаимодействия с квантом излучения, то энергетический баланс можно записать как $h\nu_{пер} + m_0c^2 = h\nu_{втор} + mc^2$, где m_0 - масса покоя электрона, c - скорость света, $m = m_0 / (1 - V^2/c^2)^{1/2}$ - динамическая масса, V - скорость электрона после взаимодействия, причем $\nu_{втор} < \nu_{пер}$.

Для квантов γ -излучения вероятны фотоядерные реакции, или ядерный фотоэффект - испускание ядром протона, нейтрона, а также деление ядер. Для ядерного фотоэффекта энергия γ -кванта должна быть не меньше энергии связи нуклонов в ядре. При энергии γ -кванта, не меньшей суммарной энергии покоя электрона и позитрона, возможно образование пары «электрон - позитрон» ($h\nu_{\gamma} \geq 1,02 \text{ МэВ}$).

Рассмотренным механизмам ионизации в веществе свойственны многофакторность и миграция проявлений, которые условно на примере атома показаны на рис. 2.18.

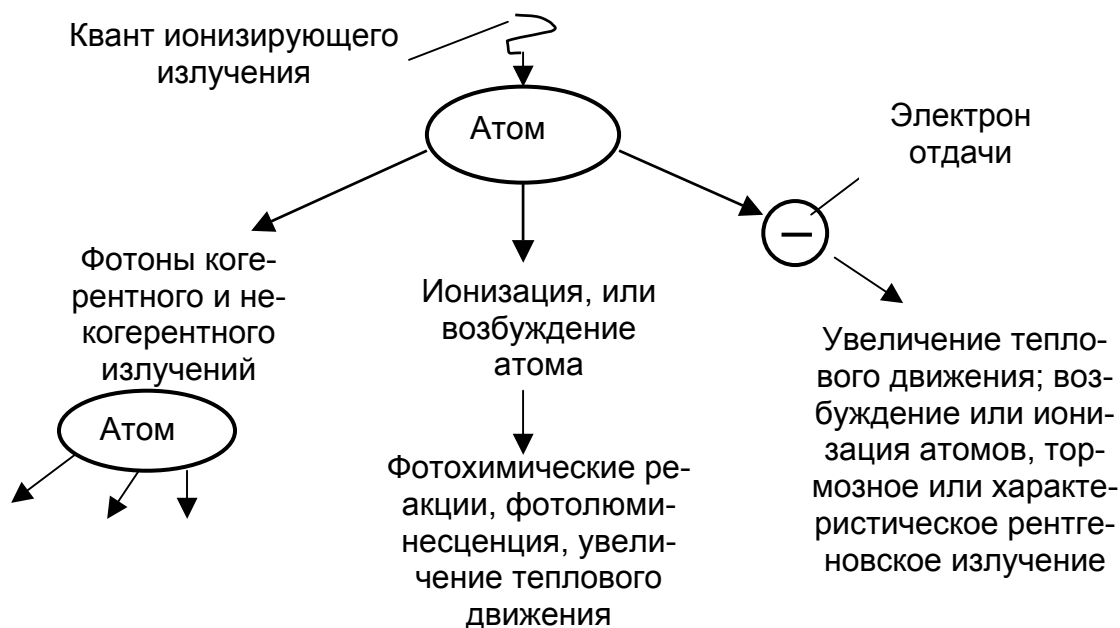


Рис. 2.18. Схема многофакторного воздействия ионизирующего излучения

Поглощение ионизирующего излучения веществом принято описывать аналогично закону для оптического диапазона феноменологическим способом: $I = I_0 \cdot e^{-\mu l}$, где μ - линейный коэффициент ослабления, который интегрально отражает потери энергии, вызванные всеми

рассмотренными выше процессами. Биоткани частично прозрачны для рентгеновского- и γ -излучений, а степень поглощения зависит от частоты излучения и плотности биотканей. Это позволило использовать эти излучения для визуализации внутреннего строения биообъектов.

Потоки элементарных частиц также могут выступать как *корпускулярная форма ионизирующего излучения*. Подобно тому, как фотоны высоких энергий обладают свойствами частиц, так и частицы малой массы обладают волновыми свойствами. Одним из механизмов взаимодействия их с веществом является ионизация. Поэтому потоки элементарных частиц трактуют как корпускулярное ионизирующее излучение. Пользуясь известным энергетическим эквивалентом массы $mc^2 = h\nu_{\text{част}} = h \cdot c / \lambda_{\text{част}}$, $m = m_0 / (1 - V^2/c^2)^{1/2}$, длина волны элементарной частицы может быть представлена как $\lambda_{\text{част}} = h/mc = h \cdot (1 - V^2/c^2)^{1/2} / m_0 c$. Если $c \gg V$, то $\lambda_{\text{част}} \approx h/m_0 c$ – комптоновская длина волны. Для электрона такая длина волны составляет $\lambda_e = h/m_e \cdot c \approx 2,4 \cdot 10^{-3}$ нм, для протона – $\lambda_p \approx 1,32 \cdot 10^{-6}$ нм, для нейтрона – $\lambda_n \approx 1,31 \cdot 10^{-6}$ нм. Все элементарные частицы в зависимости от массы, выраженной в электронвольтах, подразделяют на три класса: лептоны (0...100 МэВ, электроны, позитроны), мезоны (100...1000 МэВ, частицы со временем жизни $10^{-8} \dots 10^{-16}$ с), барионы (с энергией более 1000 МэВ, протоны, нейтроны, α -частицы).

Одной из важных характеристик взаимодействия корпускулярного ионизирующего излучения с веществом является длина свободного пробега в веществе. Для потоков α -частиц длина свободного пробега в воздухе составляет единицы сантиметров, для биоструктур – доли миллиметров. β -излучения (потоки электронов) проникают в биоткани на глубину 10...15 мм.

Дозы ионизирующего излучения. Независимо от конкретной природы ионизирующего излучения веществу в результате облучения передаётся определённое количество энергии. Для измерения физического или биологического эффекта введены единицы – дозы ионизирующего излучения.

Поглощённая доза излучения – отношение энергии ионизирующего излучения, поглощаемой веществом, к массе этого вещества. Единица поглощенной дозы грей ($[D] = \text{Гр}$) соответствует дозе излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия 1 Дж, $1 \text{ Гр} = \text{Дж/кг}$. Мощность поглощенной дозы $N = D/t$, $[N] = \text{Гр/с}$. внесистемная единица поглощённой дозы излучения – рад (Radiation Absorb ved Dos), $1 \text{ рад} = 10^{-2} \text{ Гр} = 100 \text{ эрг/г}$.

Поскольку результат действия ионизирующего излучения зависит не только от величины поглощённой дозы, но и от свойств вещества, параметр D неоднозначно характеризует результат действия ионизирующего излучения на вещество. Ионизирующее излучение характеризуется прежде всего своей способностью ионизировать среду. Количественно эту характеристику отражает экспозиционная

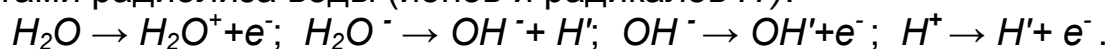
доза $D_{\text{экс}}$. **Экспозиционная доза излучения** представляет собой характеристику рентгеновского или γ -излучения, оцениваемую по эффекту ионизации сухого атмосферного воздуха $D_{\text{экс}} = q/m$. Единицей экспозиционной дозы служит кулон на килограмм (Кл/кг) – экспозиционная доза рентгеновского или γ -излучения, при которой сумма электрических зарядов q одного знака, образованных в массе 1 кг воздуха, равна 1 Кл. Чаще всего экспозиционная доза измеряется во внесистемных единицах – рентгенах ($1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$). Мощность экспозиционной дозы излучения $N_{\text{экс}} = D_{\text{экс}}/t$, $[N_{\text{экс}}] = \text{А/кг}$. Используются также и внесистемные единицы мощности экспозиционной дозы: рентген в секунду (Р/с), $1 \text{ Р/с} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$; рентген в минуту (Р/мин), $1 \text{ Р/мин} = 4,30 \cdot 10^{-6} \text{ А/кг}$; рентген в час (Р/ч), $1 \text{ Р/ч} = 7,17 \cdot 10^{-8} \text{ А/кг}$.

Экспериментальному измерению поддается экспозиционная, а не поглощенная доза, однако между ними существует зависимость $D = f \cdot D_{\text{экс}}$, где f – коэффициент, зависящий от свойств облучаемого вещества и вида ионизирующего излучения. Если в качестве меры поглощенной дозы взять рад, экспозиционной – рентген, а ионизирующими излучениями являются рентгеновское, γ или β , то существует важное для практики выражение $1 \text{ рад} = f \cdot 1 \text{ Р}$, причем для воды и мягких биологических тканей $f = 1$, для костных структур $f = 1 \dots 4,5$, для воздуха $f = 0,88$.

Различные виды ионизирующих излучений даже при одинаковой поглощённой дозе оказывают различные биологические действия. Для учёта этого явления был введён коэффициент качества K . Этот коэффициент показывает, во сколько раз эффективность биологического действия ионизирующего излучения данного вида больше рентгеновского или γ -излучения при одинаковой поглощённой дозе. Коэффициент качества устанавливают на основе опытных данных. Для рентгеновского, γ - и β -излучений $K=1$, для тепловых нейтронов ($\sim 0,01 \text{ эВ}$) $K=3$, нейтронов (5 эВ) $K=7$, нейтронов (0,5 эВ), протонов $K=10$, α -излучения $K=20$. Поглощённая доза совместно с коэффициентом качества даёт более точное представление о биологическом действии ионизирующего излучения, поэтому произведение $D \cdot K$ используют как единую меру этого действия и называют эквивалентной дозой излучения ($D_{\text{эке}} = D \cdot K$). Поскольку K – безразмерный коэффициент, эквивалентная доза излучения имеет ту же размерность, что и поглощенная доза излучения, но называется зивертом ($[D_{\text{эке}}] = \text{Зв}$). Внесистемная единица эквивалентной дозы – биологический эквивалент рентгена ($1 \text{ бэр} = 10^{-2} \text{ Зв}$). Эквивалентная доза в бэрах равна дозе излучения в радах, умноженной на коэффициент качества. Таким образом, при воздействии рентгеновского, γ - и β -излучений на мягкие (водосодержащие) ткани можно принять $1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад} = 1 \text{ Р}$.

Биологическое действие ионизирующих излучений напрямую связано с образованием веществ с высокой химической активностью. Поэтому к основным процессам относят химические превраще-

ния вещества, получившие название радиолиза. Для водосодержащих биотканей действие ионизирующего излучения связывают с продуктами радиолиза воды (ионов и радикалов H'):



Взаимодействие молекул органических соединений с ионизирующими излучениями может образовать возбужденные молекулы, ионы, радикалы, перекиси: $RH \rightarrow RH^* \rightarrow R' + H'$; $RH \rightarrow RH^+ \rightarrow e^-$. Из приведенных реакций видно, что эти высокоактивные в химическом отношении соединения будут взаимодействовать с остальными молекулами биологической системы, что приведет к нарушению мембран, клеток и функций всего организма.

Для биологического действия ионизирующего излучения также присущ эффект миграции – несовпадение области воздействия излучения и места биологического проявления, а также скрытый (латентный) период развития патологии. Чувствительность биотканей к ионизирующему излучению зависит от их физиологического состояния и структуры. В порядке убывания радиочувствительности биоткани расположены следующим образом: гемопоэтическая ткань (кроветворные ткани), кишечный эпителий, гонады (железы), эпителий кожи, ткани хрусталика, фиброзные (соединительные) ткани, хрящевые ткани, костные ткани, мышечные ткани, нервные ткани. Таким образом, наиболее уязвимы ткани с интенсивным обменом веществ.

Уровень биологического действия ионизирующего излучения зависит от дозы ионизирующего излучения, тормозной способности биовещества, условий облучения и распределения поглощенной дозы в организме, времени облучения, избирательного поражения критических органов, функционального состояния организма перед облучением. Действие различных поглощенных доз ионизирующего излучения на человека отражает такая последовательность:

- <100 рад (малые дозы) – наблюдается временное изменение механизма кроветворения, возможно самовосстановление организма;
- 150...400 рад – развивается лучевая болезнь лёгкой и средней тяжести;
- 400...600 рад – тяжёлая форма лучевой болезни;
- >600 рад – абсолютно смертельная доза;
- >5000 рад – молниеносная форма лучевой болезни;
- >20000 рад – гибель организма под лучом.

При дозах 100...1000 рад доминирует костно-мозговой механизм развития лучевой болезни, а при дозах 1000...5000 рад – кишечный механизм поражения.

Выделяют временные стадии действия ионизирующего излучения на биообъекты:

- физическая – поглощение энергии, ионизация или возбуждение молекул ($10^{-15} \dots 10^{-13}$ с);

- физико-химическая – перераспределение избыточной энергии, образование ионов и радикалов ($10^{-13} \dots 10^{-11}$ с);
- химическая – протекание биохимической реакции ($10^{-11} \dots 10^{-6}$ с);
- общебиологическая – изменение клеточных структур, функциональных характеристик биоткани (от единиц секунд до нескольких лет).

Естественные источники ионизирующих излучений: космические лучи (включая ионизирующую компоненту солнечного излучения), радиоактивность недр земли и воды, радиоактивность ядер веществ, входящих в состав биотканей. Эти источники создают естественный фон, соответствующий эквивалентной дозе около 125 мбэр.

Искусственные источники ионизирующих излучений: фоновое характера (технологические процессы обработки и обогащения полезных ископаемых), структуры ядерной энергетики, технические средства целевого назначения (научные и медицинские исследования, неразрушающий контроль, рентгеновская аппаратура), бытовая техника (элементы, включающие в себя радиоактивные вещества, мониторы на основе электронно-лучевых трубок). Предельно допустимой эквивалентной дозой при профессиональном облучении считается доза 5 бэр в течение года.

Медицинская радиобиология (наука об использовании ионизирующих излучений в медицине) включает в себя следующие направления применения ионизирующих излучений: рентген- и γ -диагностика, радиоизотопная диагностика, лучевая терапия (воздействие ионизирующих излучений на организм с лечебной целью).

Радиационная гигиена изучает влияние ионизирующих излучений на здоровье человека с целью разработки методов противорадиационной защиты.

Дозиметрия – получение количественных характеристик взаимодействия ионизирующих излучений с объектами, определение допустимых доз. *Защита от ионизирующих излучений* предусматривает три вида: временем, расстоянием, материалом. Если источник ионизирующего излучения представить как точечный, то для поглощенной дозы справедливо выражение $D = (I \cdot t) / r^2$, где I – интенсивность излучения, r – расстояние до источника. Отсюда следует, что доза облучения будет тем меньше, чем дальше от источника находится биообъект и чем меньше он подвержен облучению по времени. Защита материалом зависит от вида излучения. Так, для защиты от α -излучения достаточно нескольких сантиметров воздуха или листа бумаги, от β -излучения – слоя алюминия, органического стекла в несколько сантиметров, от рентгеновского и γ -излучения требуется защита из металла с возможно большим атомным номером (свинец). Для защиты от быстрых нейтронов сначала гасят их скорость в водосодержащих веществах, а затем используют кадмий как поглотитель медленных нейтронов.

3. ДЕЙСТВИЕ АКУСТИЧЕСКИХ, ТЕПЛОВЫХ И ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

Учитывая, что в предыдущем разделе на примере электромагнитных полей были достаточно подробно рассмотрены подходы анализа взаимодействия физического поля и биообъекта, в данном разделе остановимся только на основных положениях взаимодействия, относящихся к акустическим, тепловым и гравитационным полям.

3.1. Акустические поля и биологические объекты

Понятие биологического объекта и его жизнедеятельность неразрывно связаны со средой обитания. По этому признаку все организмы можно разделить на живущие в воздушной, водной и смешанной (почва, ил) средах. Макроскопический механизм энергетического взаимодействия биообъекта и вещества внешней среды характеризуется полем сил механического происхождения. Поэтому *акустическим полем* (в широком смысле) называют силовое поле, характеризующее механическое взаимодействие физических тел внешней среды и биообъектов. В результате действия акустического поля на биообъект последний испытывает *деформацию* – изменение взаимного расположения точек тела, которое приводит к изменению его формы и размеров. Деформация называется упругой, если после прекращения действия сил акустического поля объект возвращается к исходной форме. *Упругая деформация* обусловлена возникновением упругих сил, которые уравнивают внешние силы, приложенные к телу. Величину, численно равную упругой силе, приходящейся на единицу площади тела, называют механическим напряжением ($\sigma = dF_{упр}/dS$). Степень изменения формы тела в каком-либо направлении x характеризует относительная деформация $\varepsilon = \Delta x/x$. В общем случае $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ является нелинейной зависимостью. Упругие деформации, присущие биотканям, называют каучукоподобной эластичностью. Это связано с тем, что в достаточно большом интервале относительных деформаций для биотканей выполняется закон Гука $\sigma = E \cdot \varepsilon$, где E – модуль Юнга. Для биотканей также характерна *ползучесть* – деформация, вызванная длительностью действия постоянной нагрузки. Механизм ползучести в биополимерах объясняют распрямлением макромолекул под действием внешней нагрузки. Происходящие при этом процессы аналогичны течению вязкой жидкости, поэтому ползучесть называют вязкой деформацией $\sigma = \eta \cdot d\varepsilon/dt$, где η – коэффициент вязкости среды.

Величина деформируемости живого объекта определяется механическими свойствами отдельных видов биотканей. Под механическими свойствами биотканей понимают две их разновидности. К первой относят процессы биологической подвижности (сокращение мышц, деление клеток, рост биомассы). Эти процессы имеют биохимическую природу.

мический механизм энергетического обеспечения. Условно эту группу называют активными механическими свойствами. Ко второй группе относят *пассивные механические свойства*, характеризующие деформируемость биотканей под действием сил акустических полей. Поэтому приведенные выше закономерности в основном связаны с пассивными механическими свойствами биотканей.

Биологическая ткань – это композиционный материал, образованный объемным сочетанием химически разнородных компонентов. Например, костная ткань наполовину (0,5 объема) состоит из неорганического вещества гидроксилатапата, а в остальном – из органического материала, главным образом коллагена (высокомолекулярного соединения, волокнистого белка, обладающего высокой эластичностью). Композиционное строение кости придает ей нужные механические свойства: твердость, упругость, прочность. Модуль Юнга для кости ~ 10 ГПа, а предел прочности $\sigma_{\max} = 100$ МПа.

Кожа состоит из волокон коллагена (75%), эластина (4%, как и коллаген, волокнистый белок) и основной ткани – матрицы (21%). Для коллагена $E=10\dots 100$ МПа, $\sigma_{\max} = 100$ МПа, $\epsilon_{\max} = 10\%$; для эластина $E=0,1\dots 0,6$ МПа, $\sigma_{\max} = 5$ МПа, $\epsilon_{\max} = 200\dots 300\%$. Эти характеристики подтверждают, что кожа обладает высокоэластическими свойствами, хорошо растягивается и удлиняется.

Примеры применения пассивных механических свойств биотканей в медицине: замена естественных тканей искусственными (протезирование), выравнивание и удлинение костей (травматология и ортопедия). В судебной медицине определяют устойчивость биоструктур к деформациям и ударам, в спортивной и авиационной медицине – предельные допустимые напряжения, перегрузки.

Как было сказано выше, механическое действие окружающей среды на биообъекты характеризует силовое поле. Величину и направление сил этого поля определяют силы тяжести и теплового движения частиц среды (молекул воздуха, жидкости). Для макроскопического описания сил воздействия отдельных частиц окружающей среды на объект используют такую физическую величину, как давление $P=F_n/S$, где F_n – сила, нормально приложенная к поверхности площадью S . Для воздушной среды обитания $P_e = P_{\text{атм}} + P_{\text{терм}}$, причем $P_{\text{атм}} = \rho gh$, где h – высота над поверхностью земли, $\rho_e = \rho_e(h)$ – плотность воздуха (зависит от высоты); $P_{\text{терм}} = \sum P_{i \text{ терм}}$, $P_{i \text{ терм}} = \rho_i RT/\mu$, где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура; μ – молярный вес i -й газовой компоненты воздуха. Описание квазистатического акустического поля воздушной среды необходимо также дополнить силой Архимеда $F_a = \rho V_T g$, где V_T – объем тела объекта. В большей степени результирующее давление воздушной среды определяется атмосферным давлением, существенно зависящим от высоты над поверхностью земли (рис. 3.1).

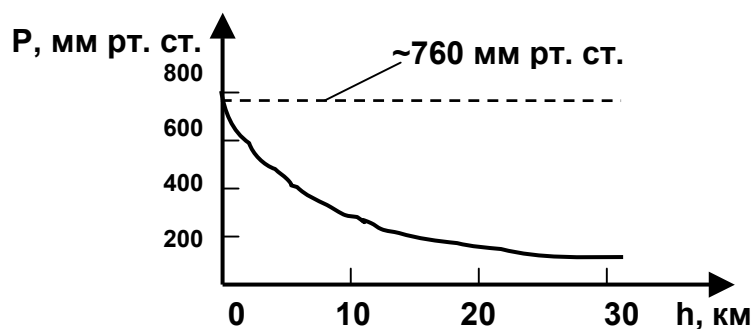


Рис. 3.1. Зависимость атмосферного давления от высоты

Аналогичные рассуждения можно привести и для объектов с водной или смешанной средой обитания.

Влияние на организм повышенного или пониженного давления окружающей среды рассмотрим на примере человека. Действие повышенного давления связывают с компрессионным и проникающим эффектами. *Проникающий эффект* обусловлен токсическим действием кислорода и других газов воздушной смеси, содержание которых в крови увеличивается при повышении внешнего давления. При увеличении давления до 4...8 атм у человека наблюдается наркотическая реакция. *Компрессионный эффект* — общее объемное сжатие, обусловленное равномерным повышением сил механического давления на органы и ткани. В результате компрессии изменяются объемы воздуходержающих полостей, возникают градиенты давления внутри организма, как следствие нарушаются функции дыхания, слуха, кровообращения. *Влияние пониженного давления* обусловлено расширением газов, содержащихся в полостях и биотканях организма, следствием чего являются «высотная» болезнь и декомпрессионные расстройства. Особую опасность для организма человека представляет быстрое понижение давления окружающей среды. Это явление получило название взрывной декомпрессии. При взрывной декомпрессии страдают прежде всего легкие, слуховые пути, желудочно-кишечный тракт, придаточные пазухи носа. Баротравма — повреждение, вызванное резким перепадом давления окружающей среды. Баротерапия — применение с лечебной целью повышенного или пониженного по сравнению с атмосферным внешнего давления.

Перечисленные выше явления описывают в основном действие статических и квазистатических акустических полей. Вопросами динамических деформаций занимается *акустика* — область физики, изучающая упругие колебания в средах. Выделяют два ее направления: *физическая акустика*, изучающая особенности распространения упругих волн в средах, в том числе и биологических; *физиологическая акустика*, изучающая устройство и работу звуковоспринимающих и звукообразующих органов у человека и животных.

Рассмотрим наиболее общие положения физической акустики применительно к биологическим объектам. *Акустическая волна* – это процесс распространения механической деформации в веществе. Основным условием распространения акустической волны является наличие упругих свойств среды. Существуют две разновидности возникающих волн: продольные (направление деформации совпадает с направлением распространения волны), поперечные (направление деформации перпендикулярно направлению распространения волны). Оба вида акустических волн могут возникать в биологических средах. Важным параметром волнового процесса является его скорость. Скорость продольных волн в жидких (водосодержащих биотканях) и газообразных средах определяется выражением $c = (K/\rho)^{1/2}$, где ρ – плотность среды, $K = K(E, \mu)$ – модуль объемной упругости, E и μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Скорость поперечных волн в твердых средах $c = (G/\rho)^{1/2}$, где G – модуль сдвига. Давление, создаваемое волной, зависит от скорости V колебаний частиц среды относительно недеформированного положения и определяется как $P = \rho c V$. Для взаимодействия упругих волн (особенно звукового и ультразвукового диапазонов) с биосредами справедливы законы геометрической оптики. Условия проникновения волны из одной среды в другую, отражения, преломления на границе раздела сред определяются *удельным акустическим импедансом (волновым сопротивлением среды)* – ρc . Если $\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$, отражение на границе раздела двух сред отсутствует, если $\rho_1 c_1 \gg \rho_2 c_2$, происходит почти полное отражение волны. Если интенсивность падающей волны – I_1 , а прошедшей – I_2 , то величина $\beta = I_1 / I_2$ называется коэффициентом проникновения акустической волны. Рэлей показал, что коэффициент β можно выразить через акустический импеданс сред, и для случая нормального падения акустической волны

$$\beta = 4 \frac{\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2}{\left(\rho_1 c_1 / \rho_2 c_2 + 1 \right)^2}.$$

Коэффициент проникновения акустических волн из воздуха ($\rho_{\text{возд}} \cdot c_{\text{возд}} = 400 \text{ кг/м}^2\text{с}$) в мягкие ткани ($\rho_{\text{тк}} \cdot c_{\text{тк}} = 1440 \text{ кг/м}^2\text{с}$) составляет $\beta = 0,122\%$, что свидетельствует об относительной защищенности тканей живых организмов от волновых акустических полей.

Энергия прошедшей в биосреду акустической волны, как и в случае оптического излучения, частично поглощается и рассеивается, а частично отражается на границах раздела биотканей с различными акустическими импедансами. Перечисленные выше явления нашли свое широкое применение в медицине в ультразвуковом диапазоне акустических волн. Это вызвано прежде всего тем, что при средней скорости акустических колебаний в биотканях 1530 м/с длина упругой волны на частотах 1...100 Мгц составляет 1,5...0,015 мм. Поэтому на

основе процесса отражения упругих колебаний от внутренних акустически неоднородных биоструктур построены системы ультразвуковой диагностики с пространственным разрешением, соизмеримым с длиной волны. Если же отражающая поверхность подвижна, то в соответствии с эффектом Доплера происходит изменение частоты отраженного сигнала пропорционально скорости и направлению перемещения отражающей поверхности. Поглощение акустических волн обусловлено внутренним трением частиц и теплопроводностью биосред и подчиняется экспоненциальной зависимости $I(x) = I_0 e^{-\gamma x}$, где γ – коэффициент поглощения, x – глубина проникновения, причем $\gamma \sim \omega^2$. Таким образом, чем выше частота колебаний, тем больше энергии выделяется в среде, что также объясняет использование ультразвука для энергетического и теплового воздействий на биосреды.

Рассеяние акустических волн обусловлено акустической неоднородностью биосред.

Вибрация. В биологии и медицине вибрацией называют механические колебательные движения тела, отдельных органов и тканей под действием внешних акустических полей. Вибрация – это сложное периодическое (квазипериодическое) механическое колебание, характеризующееся широким амплитудным и частотным спектрами. Частотный спектр вибрации охватывает диапазон от инфранизких до ультравысоких частот. Основным биологическим эффектом – это интенсификация биофизических и биохимических процессов.

Вибрационная чувствительность – свойство организма воспринимать действие динамических акустических полей. Виброчувствительность обеспечивают преимущественно механорецепторы, расположенные в поверхностных и более глубоких слоях кожи. Негативное действие вибрации на человека характеризуется вибрационной болезнью, возникновением очагов застойного раздражения, спазматических явлений в сосудах, нарушений в опорно-двигательном аппарате. Вибротерапия – воздействие с лечебной целью на человека механических колебаний низкой частоты и амплитуды.

Инфразвук – это низкочастотные акустические колебания, неслышимые человеком (обычно до 20 Гц). Источниками инфразвука могут быть как естественные объекты (море, землетрясение, грозовые разряды и др.), так и искусственные (взрывы, автомашины, станки и др.). Инфразвук часто сопровождается слышимым шумом, например в автомашине, поэтому возникают трудности при измерении и исследовании собственно инфразвуковых колебаний. Для инфразвука характерно слабое поглощение разными средами, поэтому он распространяется на значительное расстояние. Поскольку длина волны инфразвука больше, чем у слышимых звуков, то инфразвуковые волны лучше дифрагируют и проникают в помещения, обходя преграды. Инфразвук оказывает неблагоприятное влияние на функциональное состояние ряда систем организма: появляются усталость, головная

боль, сонливость, раздражение и др. Предполагается, что первичный механизм действия инфразвука на организм имеет резонансную природу. Резонанс наступает при близких значениях частоты вынуждающей силы и частоты собственных колебаний биоструктур. Частота собственных колебаний тела человека в положении «лежа» составляет 3...4 Гц, положении «стоя» – 5...12 Гц, частота собственных колебаний грудной клетки – 5...8 Гц, брюшной полости – 3... 4 Гц и т. д., что соответствует частоте инфразвуков. Возникающие резонансные напряжения в биотканях могут превысить предел прочности или значительно нарушить функционирование отдельных органов. При низкоинтенсивном и продолжительном действии инфразвука у человека возникает комплекс неприятных ощущений: головокружение, боли в области живота, чувство психологического угнетения и страха, тошнота, затрудненное дыхание. Полной защиты от вредного действия инфразвуковых колебаний нет, и борьба с ними состоит только в устранении причин возникновения этих колебаний.

Звук, или звуковые колебания, – это акустические волны в газах, жидкостях и твердых телах, воспринимаемые человеческим ухом в диапазоне 20...20000 Гц. Все звуки принято подразделять на тоны, шумы и звуковые удары. Энергетической характеристикой звука как акустической волны является интенсивность $[I] = \text{Вт/м}^2$ или звуковое давление $[P] = \text{Па} = \text{Н/м}^2$. Порог слышимости – наименьшее звуковое воздействие, при котором звук воспринимается органами слуха: $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па или $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м². Порог болевого ощущения – наибольшая интенсивность или эффективное давление звука, воспринимаемое без болевых ощущений: $I_{max} = 10$ Вт/м², $P_{max} = 2 \cdot 10^{-5}$ Па. Оба порога определяются на частоте 1000 Гц и являются базовыми для аудиометрических исследований. Восприятие уровня звука человеком характеризует *громкость*. Это субъективная оценка энергетического воздействия звуковой волны на органы слуха. В медицинской диагностике существует ряд методов, основанных на звуковых явлениях. *Аускультация* – диагностика заболеваний, основанная на прослушивании звуков, сопровождающих функционирование организма (например, дыхание, сердцебиение). *Перкуссия* – выслушивание звучания отдельных частей тела при их простукивании. Аудиометрия – метод измерения остроты звука у человека.

3.2. Действие тепловых полей на биологические объекты

Рассмотренные ранее физические поля – электромагнитное и акустическое – создают некоторое энергетическое воздействие на биообъект. Выделяющаяся при этом энергия в конечном счете в основном переходит в тепловую. Возникающий в биосреде градиент температур приводит в действие как чисто физические, так и физиологические механизмы перераспределения тепла. Поэтому *тепловое*

поле – это физическое явление, характеризующееся распределением температуры в веществе, действие которого на физические объекты определяется механизмами теплопередачи. *Температура* – это физическая величина, характеризующая степень нагретости вещества. На микроскопическом уровне абсолютную температуру вещества определяет энергия хаотического движения молекул и атомов в жидкости и газе, в твердом веществе – энергия колебаний кристаллической решетки, а в полимерах – энергия подвижности макромолекул. Поскольку в первом разделе уже были затронуты вопросы термодинамики живых объектов, остановимся на физических механизмах теплообмена с окружающей средой. По сравнительному критерию «температура тела – температура окружающей среды» все живые существа делятся на два вида. *Пойкилотермные* (холоднокровные) животные – это организмы с непостоянной температурой тела, которая близка к температуре окружающей среды (все виды простейших, беспозвоночные, рыбы, земноводные, пресмыкающиеся). *Гомойотермные* (теплокровные) животные – это организмы с относительно постоянной температурой тела (птицы, животные, млекопитающие, человек). В гомойотермном организме условно различают две температурные зоны – оболочку и ядро. Оболочку составляют поверхностные структуры (кожа, соединительная ткань), ядро – кровь, внутренние органы и системы.

Температура ядра выше, чем оболочки, и относительно стабильна, температура оболочки ниже температуры ядра и отличается в различных участках оболочки.

Тепловое поле живого организма определяется процессами теплопродукции и теплообмена со средой обитания (рис. 3.2).

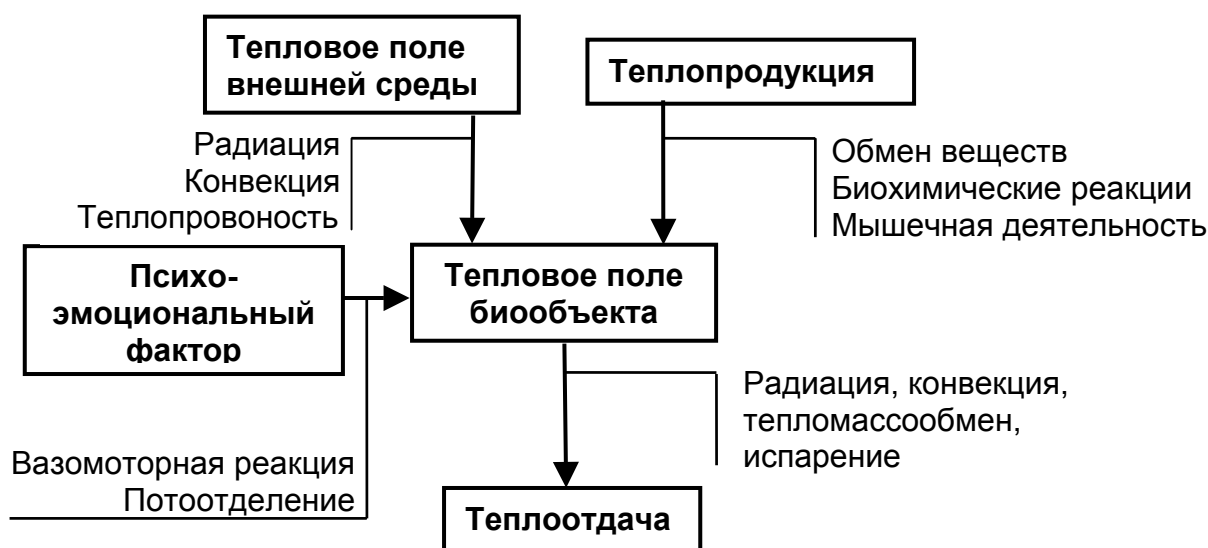


Рис. 3.2. Схема формирования теплового поля биообъекта

При преобладании процессов теплопродукции над процессами теплоотдачи происходит перегревание организма (*гипертермия*), в противном случае – охлаждение организма (*гипотермия*). Если в процессе охлаждения температура биоструктур становится ниже предельной гипотермической, то такое их состояние относят к *криотермии*. В гомойотермных организмах особенно сильно выражен механизм гомеостаза теплового поля ядра (рис. 3.3).

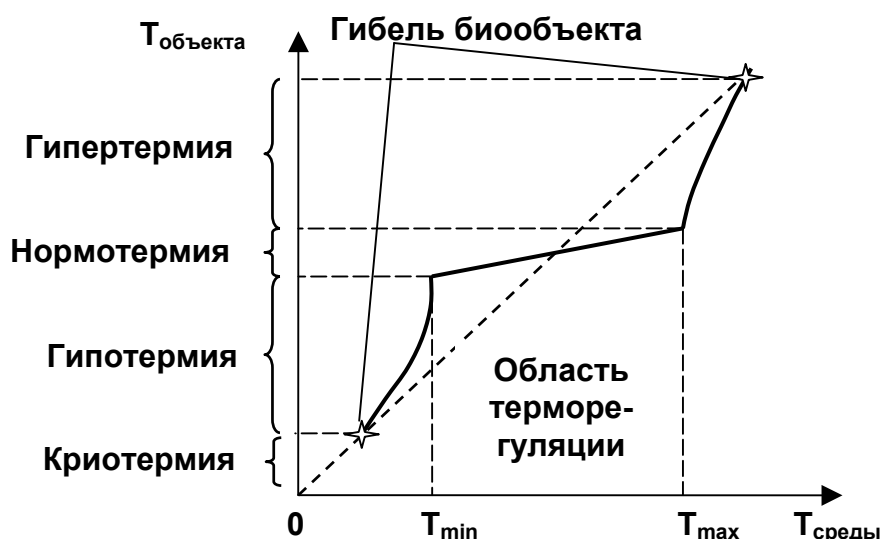


Рис. 3.3. Терморегуляция для гомойотермных организмов

Температурные границы жизни организмов определяются в основном жизнеспособностью белковых и клеточных структур. К действию высоких температур особенно чувствительны белковые структуры. Для подавляющего большинства земных организмов верхняя температурная граница жизни составляет 60...70 °С. При этих температурах белки свертываются и организм гибнет. Есть исключения: водоросли в горячих озерах обитают при 90 °С, а некоторые микроорганизмы при повышенном атмосферном давлении способны жить при температурах ~150 °С. Предельно возможной температурой белковой жизни считается значение не более 200 °С.

Действие низких температур приводит к кристаллизации воды и разрушению клеточных мембран при ее расширении. Однако приспособляемость некоторых форм жизни к низким температурам исключительна. Известно, что микроорганизмы в виде спор, цист, а некоторые и в активном состоянии переносят температуры ~3...4 К.

В качестве лечебных методов используется воздействие тепловых полей на человека. *Пиротерпия* – метод лечения с помощью создания искусственной гипертермии. Пусковым механизмом реакции организма на гипертермию является раздражение кожных и сосудистых терморецепторов с последующей ответной реакцией системы

терморегуляции. *Гипотермия искусственная* – охлаждение тела пациента в целях снижения метаболических процессов и повышения устойчивости организма к гипоксии (кислородному голоданию) и травмам. *Криохирургия* – отторжение патологических тканей после криотермической обработки.

Естественные тепловые поля в биосфере в основном образуются вследствие поглощения глобальными структурами Земли электромагнитного излучения Солнца. Искусственные тепловые поля являются результатом технической деятельности человека. Формирование радиобиосферы приводит к локальным изменениям природных тепловых полей.

3.3. Биологические объекты в гравитационном поле

Гравитационное поле (поле сил тяготения) – это форма взаимодействия тел, обладающих массой. Векторной характеристикой гравитационного поля в пределах биосферы Земли является его напряженность $\mathbf{g} = \mathbf{P}/m$, где m – масса объекта, $\mathbf{P} = \mathbf{F} + \mathbf{F}_u$ – сила тяжести, действующая на объект, которая является суммой векторов силы тяготения и центробежной силы (рис. 3.4). $F = f \cdot (m \cdot M/R^2)$ – сила тяготения, где f – гравитационная постоянная, M – масса Земли, R – радиус Земли (точнее, расстояние от объекта биосферы до центра Земли). Центробежная сила $F_u = m \cdot \omega^2 \cdot R \cos \varphi$, где ω – угловая скорость вращения Земли.

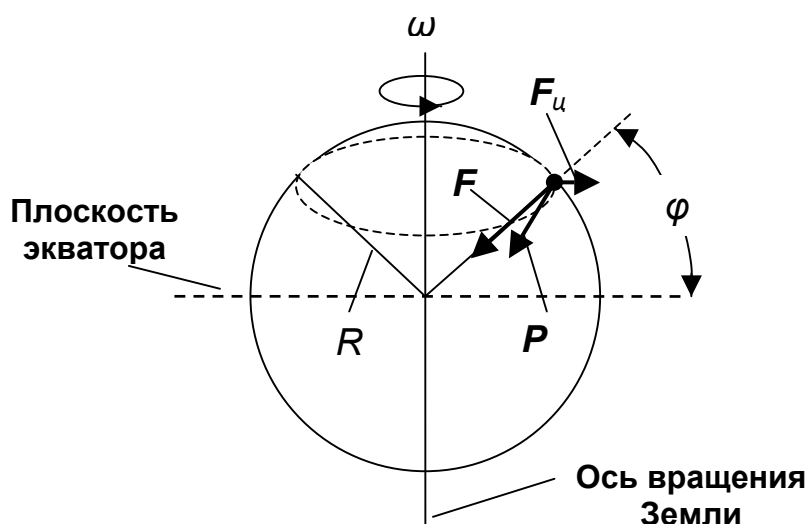


Рис. 3.4. Структура сил тяжести в биосфере

В большинстве исследований оперируют не термином напряженности гравитационного поля, а понятием ускорения свободного падения. Строго говоря, $g = g(\varphi, h)$, где h – высота расположения объекта над поверхностью Земли. Однако если $h \ll R$, то в расчетах используют округленное значение $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Эволюция биологических объектов происходила непосредственно в поле сил тяжести. Это определило строение, механизмы передвижения, способы ориентации живых организмов. У человека и других высших животных возник такой орган, как *вестибулярный аппарат* – элемент нейродинамической системы человека, осуществляющий восприятие и анализ информации о положении и движении тела в гравитационном поле Земли. Он расположен во внутреннем ухе и состоит из трех взаимно перпендикулярных полукружных каналов. На внутренней поверхности полукружных каналов находятся группы клеток, образующие рецепторы гравитации. Полости этих каналов заполнены студенистой жидкостью – эндолимфой, которая выполняет функцию упругой среды. *Укачивание* – патологическое воздействие на вестибулярный аппарат человека активных и пассивных перемещений тела в поле гравитационных сил.

В обычных условиях на биообъект действуют сила тяжести и сила реакции опоры N . При отсутствии ускорения эти силы равны и противоположно направлены. Такое состояние, как правило, естественно для малоподвижных объектов. При ускоренном движении системы «объект – опора» могут возникнуть особые состояния, называемые перегрузками и невесомостью.

Перегрузка показывает, во сколько раз сила, вызывающая ускорение или торможение движения тела, а следовательно, и сила реакции опоры больше силы тяжести. Перегрузка оценивается коэффициентом $\eta = N/(mg)$. По продолжительности действия на организм перегрузки подразделяют на продолжительные ($t_n > 1\text{с}$) и кратковременные ($t_n < 1\text{с}$). При длительных перегрузках основным негативным моментом является кислородное голодание (гипоксия), которая возникает вследствие местного или системного нарушения кровообращения. Изменяется также взаимное давление внутренних органов, возникает их деформация. Поэтому человек способен выдерживать лишь ограниченные перегрузки ($\eta \approx 4$ сидя и до $\eta \approx 14$ лежа под некоторым углом на спине).

Невесомость – состояние, при котором отсутствует сила реакции опоры ($N = 0$), а следовательно, и деформации биоструктур. Для биологических объектов невесомость – необычное состояние, хотя довольно часто встречаются кратковременные периоды частичной невесомости: прыжки, качели, начало движения лифта и т. п. При длительной невесомости (космические полеты) возникает общая детренированность, уменьшается мышечная масса, происходит деминерализация костной ткани. Поэтому космонавтам в условиях невесомости приходится проводить специальные тренировочные физические упражнения, носить особые костюмы, которые, затрудняя движение, позволяют догружать работу мышц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Большая медицинская энциклопедия (БМЭ) : В 36 т. – М.: Сов. энциклопедия, 1975 – 1978.

Волькенштейн М.В. Физика и биология. – М.: Наука, 1980.

Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Думанский Ю.Д., Сердюк А.М., Лось И.П. Влияние электромагнитных полей радиочастот на человека. – К.: Здоров'я, 1975.

Зигель Ф.Ю. Жизнь в космосе. – Минск: Наука и техника, 1966.

Лавников А.А. Основы авиационной и космической медицины. – М.: ДОСААФ, 1975.

Манойлов В.Е. Электричество и человек. – Л.: Энергоиздат, 1988.

Олейник В.П. Терапевтические аппараты и системы: Учеб. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2002.

Олейник В.П., Кулиш С.Н. Аппаратные методы исследований в биологии и медицине: Учеб. пособие. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т "Харьк. авиац. ин-т", 2004.

Ремизов А.Н. Медицинская и биологическая физика.- М.: Высш. шк., 1987.

Сапин М.Р., Билич Г.Л. Анатомия человека. – М.: Высш. шк., 1989.

Стадницкий Г.В., Родионов А.И. Экология. – М.: Высш. шк., 1988.

Тиманюк В.А., Животова Е.Н. Биофизика: Учебник. – 2-е изд. – К.: ИД «Профессионал», 2004.

Физика визуализации изображений в медицине : В 2 т. / Пер. с англ. под ред. С. Уэбба. - М.: Мир, 1991.

Физиология человека: В 3 т. /Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996.

Чайченко Г.М., Дибенко В.О., Сокур В.Д. Фізіологія людини і тварин: Підручник. – К.: Вища шк., 2003.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Физические поля как экологические факторы.....	4
1.1. Жизнь как термодинамический процесс.....	9
1.2. Связь энтропии и информации для биологических систем.....	10
1.3. Общий характер реакции биологического объекта на действие физического поля.....	11
1.4. Понятие экологического мониторинга. Рациобиосфера.....	12
2. Воздействие электромагнитных полей.....	14
2.1. Феноменологические механизмы воздействия электромагнитных полей.....	14
2.2. Воздействие электростатических полей на биологические объекты.....	16
2.3. Действие электрических токов	20
2.4. Воздействие магнитных полей на биологические объекты.....	24
2.5. Воздействие переменным электрическим полем.....	29
2.6. Биообъекты в электромагнитном поле.....	30
2.7. Действие электромагнитных излучений оптического диапазона	35
2.8. Воздействие ионизирующих излучений на биообъекты.....	43
3. Действие акустических, тепловых и гравитационных полей...49	
3.1. Акустические поля и биологические объекты.....	49
3.2. Действие тепловых полей на биологические объекты.....	54
3.3. Биологические объекты в гравитационном поле.....	57
Библиографический список.....	59

Олейник Владимир Петрович

**ОСНОВЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Редактор А.Н. Емленинова

Св. план, 2006

Подписано в печать 31. 07. 2006

Формат 60x84 1/16. Бум. офс. № 2. Офс. печ.

Усл. печ. л. 3,4. Уч.-изд. л. 3,81. Т. 75 экз. Заказ 408.

Цена свободная

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского

«Х а р ь к о в с к и й а в и а ц и о н н ы й и н с т и т у т»

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Издательский центр «ХАИ»

61070, Харьков-70, ул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu