

А.Ф.Борискин

**ФОРМИРОВАНИЕ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ
УЧАЩИХСЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ**

ИНТЕГРАТИВНЫЙ КУРС

Учебно-методическое пособие



Издательство
Нижевартовского государственного
гуманитарного университета
2009

ББК 20.1+22.3

Б 82

Печатается по постановлению Редакционно-издательского совета
Нижевартовского государственного гуманитарного университета

Рецензенты:

учитель физики и астрономии муниципальной
общеобразовательной средней школы № 19 г.Нижевартовска
Н.Н.Афтахова;

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой общей физики и естествознания
Уральского государственного педагогического университета
П.С.Попель

Борискин А.Ф.

**Б 82 Формирование экологической компетентности учащихся
при изучении школьного курса физики (Интегративный курс):
Учебно-методическое пособие. — Нижевартовск: Изд-во Ниж-
неварт. гуманит. ун-та, 2009. — 318 с.**

ISBN 978–5–89988–696–X

Данное пособие представляет собой введение в экологическое образование школьников при изучении курса физики. В него включены основные сведения по тем разделам физики, где наиболее полно проявляется связь экологических проблем с изучаемыми физическими явлениями.

В содержание пособия включен региональный компонент: экологические проблемы Ханты-Мансийского автономного округа, — что позволит учителям использовать его в своей педагогической работе.

Для учителей физики и экологии, учеников старших классов общеобразовательных школ, гимназий с углубленным изучением естественных дисциплин, а также для студентов педагогических колледжей естественных факультетов.

ББК 20.1+22.3

ISBN 978–5–89988–696–X

© Борискин А.Ф., 2009
© Издательство НГГУ, 2009

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дорогой друг! Что ты знаешь о науке экологии, экологических проблемах нашей планеты, причинах их возникновения? Каковы пути решения стоящих перед человеком проблем? Написанная книга сможет частично ответить на эти вопросы не только с позиций науки экологии, но, главным образом, через изучение физических явлений и процессов.

Живые организмы, возникнув, сами создали и поддерживают условия своей жизни. Возникновение современной атмосферы, гидросферы, верхнего слоя литосферы связано с функционированием живой материи.

Человек с момента появления на планете Земля использует ее природные ресурсы и изменяет окружающую среду. В наше время эта деятельность достигла глобальных размеров и привела к экологическому кризису. Биосфера больна, она не справляется со своими функциями поддержания условий жизни. Это проявляется в сокращении биоразнообразия, загрязнении воды, воздуха, почвы, истощении природных ресурсов. Возникла угроза существования жизни на нашей планете, в том числе и человека.

Большинство ученых считает, что единственной возможностью для выживания человека является переход на путь устойчивого развития планеты, коэволюции с природой. Это означает, что люди берут на себя ответственность за развитие биосферы. Эта ответственность должна базироваться на знании природных и социально-экономических законов. «Природа знает лучше», — этот постулат американского эколога Б.Коммонера мы должны использовать в своей деятельности. Не изменять бездумно биосферу, которая за миллиарды лет создала и отработала механизмы своего существования, а понять свое место в ней и жить по законам экологического партнерства с природой.

Переход на новый путь развития предусматривает воспитание нового человека, владеющего экологическими знаниями и экологическим мировоззрением, т.е. экологической культурой.

Только общество, состоящее из людей, владеющих принципами гуманизма ко всему живому, умеющее соизмерять свои потребности с реальными возможностями планеты Земля, сумеющее принять

определенные запреты во взаимоотношениях с природной средой, сможет остановить надвигающуюся экологическую катастрофу.

Эта проблема глобальная и затрагивает всех людей нашей планеты. Вот почему экологическое образование и воспитание признается мировым сообществом, в том числе и в нашей стране, приоритетным.

В этой книге мы познакомимся с некоторыми экологическими законами, понятиями и принципами через изучение курса физики, поскольку предметные поля физики и экологии пересекаются. Заштрихованная часть на рисунке — область пересечения, она включает общие подструктуры нашей сложной системы: открытые и закрытые системы, компоненты (элементы) системы; взаимодействие (физическое и экологическое); периодичность динамики; единство фундаментальных законов природы (закон сохранения и превращения энергии, второе и третье начала термодинамики и т.д.); общность методов исследования: индукция, дедукция, методы моделирования — математическое моделирование, компьютерное моделирование, физические методы и приборы, используемые в экологическом мониторинге.

Для решения экологических проблем, кроме новых норм поведения человека, нужны новые знания и технологии, которые может дать именно физика. Проникновение идей и принципов экологии в физику изменит направленность научных изысканий в ней, использование научных открытий. Они будут способствовать решению экологических проблем, гармонизации отношений природы и общества.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ БАЗОВЫХ ЗНАНИЙ КУРСА

Глава 1 ОСНОВЫ МЕХАНИКИ

§ 1.1. Взаимодействие тел. Силы в природе, законы динамики

1. Движение является неотъемлемым свойством материи. В механике изучается наиболее простая форма движения — механическое движение. *Механическим движением* называется изменение положения тела (или его частей) относительно других тел. Некоторые механические движения разглядеть практически невозможно. Так, атомы и молекулы газов движутся относительно стенок сосуда, в реальности таких невидимых механических движений нас убеждают те физические явления, которые связаны с этими движениями (давление, броуновское движение, диффузия и др.).

О движении тела судят по его перемещению относительно других тел, это означает, что движение и покой тел относительны. Тело, принимаемое за неподвижное, связанная с ним система координат и способ отсчета времени образуют *систему отсчета*. Предпочтительной является *инерциальная система отсчета*. Простейшей системой координат при этом является прямоугольная декартова система — x, y, z .

При изучении движения тел часто бывает целесообразно абстрагироваться от их размеров и других механических свойств и пользоваться идеализированными понятиями материальной точки и абсолютно твердого тела. *Материальной точкой* называется тело, формой и размерами которого в данной ситуации или задаче можно пренебречь. Так, при рассмотрении годичного движения Земли вокруг Солнца земной шар может быть принят за материальную точку.

Тело, форма и размеры которого при наличии всевозможных внешних воздействий могут считаться неизменными, называется

абсолютно твердым телом. Абсолютно твердое тело можно рассматривать как систему жестко связанных материальных точек, находящихся на неизменном расстоянии друг от друга.

2. Простейшими видами механического движения являются *поступательное, вращательное и колебательное.*

Материальная точка совершает только поступательное движение. Других видов движения она не имеет. В трехмерном пространстве материальная точка может двигаться вдоль направленных x , y , z . Говорят: материальная точка имеет три степени свободы поступательного движения в трехмерном пространстве.

При вращательном движении абсолютно твердого тела его точки описывают окружности, расположенные в параллельных плоскостях. Центры всех окружностей лежат при этом на одной прямой, перпендикулярной к плоскостям окружностей и называемой *осью вращения.*

Колебаниями или колебательными движениями являются движения или изменения состояния, обладающие той или иной степенью повторяемости во времени. Механические колебания — это, например, колебания тела, прикрепленного к пружине (пружинный маятник), колебания шарика, подвешенного на нерастяжимой нити (математический маятник) и т.д.

Любое сложное движение тела можно свести к совокупности указанных трех простых видов движения. Молекулы газов совершают, в общем случае, все три вида движений — поступательное, вращательное и колебательное.

3. Движущиеся части тех или иных механизмов обычно соединены с другими подвижными или неподвижными частями. Подвижное соединение нескольких звеньев образует так называемую *кинематическую связь.*

Тело человека — наглядный пример объединения отдельных членов различными суставами в кинематическую связь: с одноосными, двухосными и трехосными сочленениями. При этом одноосные соединения допускают только возможность сгибания и разгибания с одной степенью свободы. Двухосное соединение допускает вращение звеньев по двум взаимно перпендикулярным осям, оно имеет две степени свободы вращения. Трехосное соединение осуществляет вращение вокруг трех взаимно перпендикулярных осей.

Таким образом, опорно-двигательная система человека, состоящая из сочлененных между собой костей скелета и мышц, представляет с точки зрения физики совокупность рычагов, удерживаемых человеком в равновесии.

4. При движении точки в пространстве ее положение описывается радиус-вектором. При этом разность радиус-векторов

$$\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad (1.1.1)$$

где \vec{r}_2 — радиус-вектор конечного, а \vec{r}_1 — начального положений материальной точки. Векторы перемещения складываются геометрически, по правилу параллелограмма или многоугольника.

Траектория движения материальной точки — это линия, описываемая этой точкой в пространстве. В зависимости от формы траектории движение может быть *прямолинейным* или *криволинейным*.

Путь s является скалярной величиной, равной длине участка траектории, пройденного движущейся точкой за данный промежуток времени. В общем случае модуль Δr не равен пути Δs .

Вектор мгновенной скорости направлен по касательной к траектории в любой точке.

Модуль мгновенной скорости определяется формулой:

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{ds}{dt}, \quad (1.1.2)$$

где $dr/dt = r'$, аналогично $ds/dt = s'$ означают производные от r и s по времени t .

5. *Мгновенным ускорением* материальной точки в момент времени t называется предел, к которому стремится среднее ускорение за промежуток времени от t до $t + \Delta t$ при неограниченном уменьшении Δt :

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \vec{a}_{cp} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}. \quad (1.1.3)$$

Но вектор $\Delta \vec{v}$, а следовательно и \vec{a} , можно разложить на две составляющие: $\Delta \vec{v}_\tau$ — вдоль касательной к траектории и $\Delta \vec{v}_n$ — вдоль нормали к траектории в данной точке. Поэтому полное ускорение \vec{a} имеет также две взаимно перпендикулярные составляющие: \vec{a}_τ и \vec{a}_n . *Тангенциальное ускорение* \vec{a}_τ , направленное по

касательной, определяет быстроту изменения модуля скорости; *нормальное (центростремительное) ускорение* \vec{a}_n характеризует изменение скорости по направлению, модуль нормального ускорения определяется формулой:

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \quad (1.1.4)$$

где R — радиус кривизны траектории в данной точке. Ускорение измеряется в м/с^2 .

Для *равноускоренного* движения ускорение остается величиной постоянной $a = a_{cp} = \text{const}$, определяемой формулой:

$$a = \frac{v - v_0}{t}, \quad (1.1.5)$$

где v_0 — скорость в начальный момент времени $t_0 = 0$; v — скорость в момент времени t . Зависимость скорости от времени из (1.1.3) выражается формулой:

$$v_{(t)} = v_0 + at, \quad (1.1.6)$$

а пути от времени:

$$s = v_0 t + at^2 / 2. \quad (1.1.7)$$

6. При равномерном движении точки по окружности нормальное ускорение $a_n = \frac{v^2}{R} = \text{const}$, а тангенциальное $a_\tau = 0$. При вращении твердого тела вокруг неподвижной оси линейные скорости и ускорения для разных его точек, находящихся на разных расстояниях от оси, будут различны. Поэтому вращательное движение принято характеризовать угловыми величинами, одинаковыми в данный момент времени для всех точек вращающегося тела.

Если за время Δt тело поворачивается на угол $\Delta\varphi$, то быстрота его вращения в данный момент характеризуется значением *угловой скорости*:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (1.1.8)$$

Модуль угловой скорости выражается в радианах в секунду (рад/с). Угловая скорость ω связана с периодом вращения T и частотой вращения ν следующим образом:

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T.$$

Быстрота изменения угловой скорости характеризуется *угловым ускорением*, модуль которого равен:

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}. \quad (1.1.9)$$

Связь между линейной и угловой скоростями дается формулой:

$$\vec{v} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}], \quad (1.1.10)$$

модуль линейной скорости: $v = \omega r$.

Модуль углового ускорения ε выражается в радианах в секунду в квадрате (рад/с²).

7. Основу классической механики составляют три закона, сформулированные Ньютоном в 1687 г. в результате обобщения многочисленных опытных данных.

Первый закон Ньютона (закон инерции): *всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока воздействие со стороны других тел не заставит его изменить это состояние.*

Системы отсчета, в которых выполняется первый закон Ньютона, называются *инерциальными системами отсчета* (ИСО). Любая система, движущаяся прямолинейно и равномерно относительно некоторой инерциальной системы, также является инерциальной.

Второй закон Ньютона. Свойство тела, характеризующее его способность сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, называется инертностью. Количественной мерой инертности тела является его масса m .

Количественной мерой взаимодействия тел является сила F . Иными словами, сила — это причина, вызывающая изменения состояния движения. *Второй закон Ньютона*, связывающий причину и следствие, утверждает: *если на тело массы m действуют внешние силы, то они приведут к ускорению этого тела;*

результатирующая действующих на тело сил равна произведению массы тела на его ускорение:

$$m\vec{a} = \vec{F}. \quad (1.1.11)$$

Понятие массы в физике является одним из центральных, отражающих фундаментальные свойства материи. Оно относится как к веществу, так и к полю — *масса является мерой инертности материи в любом ее виде*. Кроме того, как показал А.Эйнштейн, **любой вид материи, обладая массой, является также источником гравитационного поля, любой вид материи создает гравитационное поле.**

Можно записать второй закон не через ускорение, а через другую физическую величину — *импульс тела*. Импульсом тела (частицы) называется произведение массы тела m на его скорость \vec{v} :

$$\vec{P} = m\vec{v}. \quad (1.1.12)$$

Поскольку масса тела в механике есть величина постоянная, а ускорение тела характеризует быстроту изменения скорости ($a = \Delta v / \Delta t$), то формулу (1.1.12) можно представить в виде:

$$\frac{\Delta \vec{P}}{\Delta t} = \vec{F}, \text{ либо } \frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}. \quad (1.1.13)$$

Второй закон Ньютона в форме (1.1.13) утверждает: *если на тело действует внешняя сила, то она приводит к изменению его импульса, быстрота изменения импульса тела определяется действующей на него внешней силой.*

Третий закон Ньютона. Согласно третьему закону Ньютона, *все силы в природе, с которыми действуют друг на друга тела, равны по модулю и противоположны по направлению:*

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \quad (1.1.14)$$

Эти силы приложены к разным телам. Иными словами, все силы в природе имеют характер взаимодействия, а не одностороннего действия.

8. Рассмотрим единицы измерения физических величин. В физике различают *основные* и *производные* единицы.

В Международной системе единиц (СИ) основными выбраны следующие: единица измерения длины — метр (м), массы — килограмм (кг), времени — секунда (с), силы тока — ампер (А),

термодинамической температуры — кельвин (К), силы света — кандела (кд) и количества вещества — моль (моль). Дополнительными являются единицы плоского угла — радиан (рад) и телесного угла — стерадиан (ср).

Поскольку единицы измерения физических величин связаны между собой теми же соотношениями, что и сами величины, производные единицы установить нетрудно на основании физических законов либо определений, связывающих величины.

Так, единицей измерения силы в СИ является ньютон (Н), она устанавливается на основе второго закона Ньютона: $1\text{Н}=1\text{кг}\cdot\text{м}/\text{с}^2$.

9. В рамках классической механики рассматриваются в основном силы гравитационной и электромагнитной природы. Перечислим наиболее характерные из них.

Силы тяготения. Согласно закону всемирного тяготения Ньютона, для точечных масс (либо шаров):

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1.1.15)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{М}^2 \cdot \text{Н}}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная; m_1 и m_2 — массы тяготеющих тел; r — расстояние между их центрами.

Силы тяготения являются центральными, они направлены вдоль прямой, соединяющей центры тел, при этом, в соответствии с третьим законом Ньютона, $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$.

На всякое тело, находящееся в поле тяжести Земли, действует сила тяжести

$$\vec{F} = m \vec{g}, \quad (1.1.16)$$

где \vec{g} — ускорение свободного падения, численно оно изменяется с широтой (у поверхности Земли) в пределах от $9,780 \text{ м}/\text{с}^2$ (на экваторе) до $9,832 \text{ м}/\text{с}^2$ (на полюсах). Усредненное значение ускорения свободного падения принимается равным $9,81 \text{ м}/\text{с}^2$, часто его округляют до $10 \text{ м}/\text{с}^2$. Вектор \vec{g} направлен к силовому центру поля, т.е. к центру Земли.

Силы упругости возникают в результате непосредственного взаимодействия тел, сопровождающегося их деформацией. Сила упругости имеет направление, противоположное смещению

частиц и внешней силе. На примере сжатой пружины можно записать:

$$F_{\text{упр}} = -kx. \quad (1.1.17)$$

где x — величина сжатия (либо удлинения) пружины, k — коэффициент жесткости пружины.

Формула (1.1.17) выражает закон Гука. Сила упругости тел обусловлена электромагнитным взаимодействием составляющих их частиц.

Силы трения.

Для сухого трения выполняется приближенный закон Амонтона:

$$F_{\text{тр}} = \mu N. \quad (1.1.18)$$

Здесь N — сила нормального давления, прижимающая трущиеся поверхности друг к другу; μ — безразмерный коэффициент трения скольжения, зависящий от рода и состояния соприкасающихся поверхностей.

Силы трения обусловлены взаимодействием частиц соприкасающихся тел и имеют электромагнитную природу.

Сила Архимеда. На всякое тело, погруженное в жидкость или газ, действует выталкивающая сила, равная весу того количества жидкости или газа, которое вытеснено погруженной частью тела:

$$F_{\text{Ар}} = \rho_{\text{жс}} g V_{\text{в.жс}}, \quad (1.1.19)$$

где $\rho_{\text{жс}}$ — плотность жидкости (или газа); $V_{\text{в.жс}}$ — объем вытесненной жидкости (газа), равный объему погруженной части тела.

Силы сопротивления среды. На тело, движущееся в среде (жидкость, газ), действует сила сопротивления. Модуль этой силы зависит от многих факторов, и общей формулы для его вычисления не существует. Впервые эту силу попытался установить Ньютон. Согласно формуле Ньютона, сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости:

$$F = -K\rho S v^2, \quad (1.1.20)$$

где ρ — плотность среды; S — площадь сечения тела; v — скорость тела.

В дальнейшем выяснилось, что формула Ньютона справедлива не всегда. В том случае, когда скорость движения тела мала по сравнению со скоростями теплового движения молекул, сила сопротивления пропорциональна его скорости. Таким образом, мы

приходим к известной формуле Стокса (сила, действующая на шарик, движущийся в среде со скоростью v):

$$F_C = -6\pi\eta r v, \quad (1.1.21)$$

где r — радиус шарика; η — коэффициент вязкости данной среды. Знак минус указывает на то, что эта сила направлена в сторону, противоположную направлению движения (навстречу относительной скорости).

Однако в современной технике с ее стремительными скоростями справедлив именно закон Ньютона (при очень больших скоростях зависимость силы сопротивления от скорости становится даже кубической).

Сила Кулона — это электростатическая сила взаимодействия (отталкивания либо притяжения) двух точечных зарядов:

$$F = \frac{kq_1 q_2}{r^2}, \quad (1.1.22)$$

где q_1 и q_2 — численные значения зарядов; r — расстояние между ними. Два одноименно заряженных тела отталкиваются, разноименно заряженных — притягиваются.

Сила Ампера — это магнитная сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле. Модуль этой силы определяется формулой:

$$F = I \cdot B \cdot \Delta l \cdot \sin \alpha, \quad (1.1.23)$$

где I — сила тока, текущего по проводнику; B — индукция внешнего магнитного поля; Δl — длина провода, находящегося в поле; α — угол между направлением тока и направлением вектора \vec{B} .

Сила Лоренца — это также магнитная сила, действующая со стороны магнитного поля на заряженную частицу, влетающую в магнитное поле с произвольной скоростью v :

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (1.1.24)$$

где q — заряд частицы; v — скорость частицы; B — индукция внешнего магнитного поля; α — угол между направлением вектора скорости \vec{v} и вектора \vec{B} .

§ 1.2. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Космические полеты

1. Силы, действующие в системе тел, подразделяют на *внутренние* — силы взаимодействия тел системы между собой и *внешние* — силы, действующие на тела системы со стороны тел, не входящих в нее. *Замкнутой* называется система тел, если на нее не действуют *внешние силы*, в этом случае имеет место закон сохранения импульса

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \dots + \vec{P}_N = \vec{P}_{\text{сум}} = \text{const}, \quad (1.2.1)$$

суммарный импульс замкнутой системы остается постоянным по модулю и направлению, хотя импульс каждого из тел системы может измениться.

На основе закона сохранения импульса можно объяснить отдачу оружия при стрельбе, движение ракет и т.д.

2. Существенной особенностью реактивного движения является то, что масса движущегося тела изменяется. Вопросами движения таких систем занимается специальный раздел механики — динамика точки переменной массы. На основе закона сохранения импульса можно получить динамическое уравнение движения ракеты:

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = -\vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t} + \vec{F}, \quad (1.2.2)$$

где \vec{u} — скорость истечения газов, она направлена в сторону, противоположную скорости ракеты: \vec{F} — результирующая всех внешних сил, величина $\mu = \Delta m / \Delta t$ называется ежесекундным расходом топлива.

Если $\vec{F} = 0$, то уравнение (1.2.2) принимает вид:

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = -\vec{u} \frac{\Delta m}{\Delta t}. \quad (1.2.3)$$

Величина $R = -u \frac{\Delta m}{\Delta t}$ носит название *реактивной силы*.

Основоположник учения о космических полетах К.Э.Циолковский, великий ученый-самоучка, получил формулу, по которой

можно оценить запасы топлива, чтобы сообщить ракете заданную скорость:

$$\frac{v}{u} = 2,3 \lg \frac{M_0}{M}, \quad (1.2.4)$$

где v — конечная скорость ракеты (начальная скорость $v_0 = 0$); u — скорость истечения газов; M — масса ракеты на орбите; $M_0 = M + M_m$ — начальная масса ракеты с топливом.

Полагая $v = 8$ км/с, $u = 4$ км/с, $M = 10^3$ кг = 1 т, получим:

$$\lg M_0 = \frac{8}{4 \cdot 2,3} = 0,87,$$

откуда $M_0 = 7,42$ т, а масса топлива $M_m = 6,42$ т. Еще больший запас топлива потребуется для достижения второй космической скорости. Циолковский предложил использовать для космических полетов так называемые многоступенчатые ракеты. Для запуска искусственных спутников Земли и космических кораблей в настоящее время используют трехступенчатые ракеты.

Для межзвездных полетов необходимы более высокие скорости истечения топлива в ракете. Например, ближайшая к нам звезда (Альфа Центавра) находится на расстоянии 4,4 световых года: свет от нее до нас доходит за 4,4 года. Поэтому для осуществления межзвездных полетов рассматриваются фантастические проекты кораблей с ионными или фотонными ракетными двигателями.

Принцип реактивного движения используют и некоторые животные. Кальмары, спруты, медузы передвигаются, выбрасывая воду из специальных полостей, при этом скорость кальмаров, например, может достигать 50—70 км/ч.

● Антропогенное воздействие на ближний Космос.

Околоземное космическое пространство (ОКП) представляет собой внешнюю газовую оболочку, которая окружает планету. Оно играет роль в сложнейших солнечно-земных взаимосвязях, определяющих условия жизни на Земле. ОКП уязвимее, нежели другие среды, поскольку количество вещества в ней неизмеримо меньше, а энергетика процессов гораздо слабее по сравнению с тропосферой, а тем более гидро- и литосферой.

Выделяют следующие виды воздействия человека на эту среду:

- 1) выброс химических веществ вследствие работы двигателей ракет;
- 2) создание энергетических и динамических возмущений в результате полетов ракет;
- 3) загрязнение твердыми фрагментами (космическим мусором);
- 4) электромагнитное излучение радиопередающих систем;
- 5) радиоактивное загрязнение и жесткое излучение от ядерных энергетических установок, используемых на космических аппаратах.

Практически бесконтрольное использование ОКП привело к его загрязнению огромным количеством мусора. Фрагменты последнего сосредотачиваются на высотах более 400 км; они внесены в каталог, за ними ведется постоянное слежение. Наиболее опасно большое количество мелких (менее 10 см) осколков; их поток существенно превышает поток метеоритов.

Наиболее опасным с позиции изменения свойств ОКП в негативную сторону, признается выброс химических веществ. Указанные химические вещества активно реагируют с ионами кислорода ионосферы. В результате, резко возрастает скорость рекомбинации ионосферной плазмы и падает концентрация заряженных частиц, т.е. образуются так называемые «**ионосферные дыры**».

Как считают специалисты, сохранение ОКП как внешней защитной оболочки Земли возможно только при условии ограничения пусков ракет и принципиального изменения технических средств и методов выведения космических кораблей на орбиту.

§ 1.3. Закон сохранения и превращения энергии.

Перспективы развития возобновляемых источников энергии

1. Формы движения материи весьма разнообразны — механическое перемещение тел, химические реакции, тепловые движения частиц вещества, ядерные и биологические процессы. Движение в любой его форме — неотъемлемое свойство материи. Универсальной количественной мерой различных форм движения материи является энергия. При этом надо иметь в виду, что в самом общем случае сообщенная телу энергия может распределиться по

следующим «каналам»: 1) пойти на увеличение кинетической энергии тела; 2) на увеличение потенциальной энергии тела; 3) на работу, которую данное тело совершает над другими телами; 4) на теплоту, которая выделяется в результате трения.

Работа — это мера изменения энергии, она определяется как произведение силы на перемещение:

$$A = (\vec{F} \cdot \Delta\vec{l}) = F \cdot \Delta l \cdot \cos \alpha, \quad (1.3.1)$$

где круглыми скобками обозначается скалярное произведение векторов, угол α — это угол между направлением вектора силы и вектора перемещения (рис. 1.1).

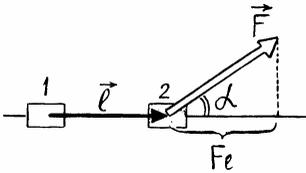


Рис. 1.1. Работу совершает только составляющая силы в направлении перемещения: $F_1 = F \cdot \cos \alpha$

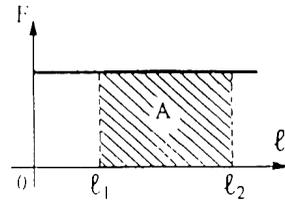


Рис. 1.2. Работа постоянной силы

Единицей работы в системе СИ является джоуль (Дж): $1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Работа постоянной силы на прямолинейном участке (график этой силы показан на рис. 1.2) будет представляться площадью заштрихованного прямоугольника:

$$A = F \cdot \Delta l = F(l_2 - l_1)$$

Элементарная работа (работа на бесконечно малом перемещении $d\vec{l}$) равна: $\delta A = (\vec{F} \cdot d\vec{l})$.

Работа переменной силы на конечном участке пути будет складываться из бесконечно большого числа элементарных работ δA , т.е. представлять собой интегральную сумму:

$$A = \int_0^l (\vec{F} \cdot d\vec{l}). \quad (1.3.2)$$

На графике работа переменной силы изображается площадью криволинейной трапеции.

Положительная работа (работа приложенных сил) *увеличивает кинетическую энергию*, отрицательная работа (работа против приложенных сил) *уменьшает кинетическую энергию тела*.

Другими словами, положительная работа совершается, когда направления движения тела и приложенной силы совпадают, и, наоборот, отрицательная работа совершается, если направления движения и приложенной силы противоположны:

$$A = \Delta W_K, \quad (1.3.3)$$

где $\Delta W_K = W_{K2} - W_{K1} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}$. Знак ΔW_K связан со знаком работы.

Потенциальная энергия зависит от относительного расположения взаимодействующих материальных точек, тел (или их частей) и относится ко всей совокупности (системе) взаимодействующих объектов. Потенциальная энергия может быть *положительной, отрицательной или равной нулю*: $W_p \leq 0$; $W_p \geq 0$.

Мерой изменения потенциальной энергии системы при ее переходе из одного состояния в другое является работа потенциальных сил, осуществляющих взаимодействие между элементами системы. При этом работа равна изменению потенциальной энергии, взятому с обратным знаком:

$$A = -\Delta W_p = -(W_p^{(2)} - W_p^{(1)}), \quad (1.3.4)$$

где $W_p^{(2)}$ — потенциальная энергия системы в конечном состоянии, $W_p^{(1)}$ — потенциальная энергия системы в начальном состоянии. Иными словами, *понятие потенциальной энергии вводится таким образом, чтобы за счет ее убыли совершалась положительная работа*.

Приведем примеры потенциальных энергий.

Потенциальная энергия гравитационного взаимодействия системы двух материальных точек, например Земли массой M и тела массой m , поднятого над Землей на высоту h , равна:

$$W_p = mgh. \quad (1.3.5)$$

Потенциальная энергия упругих взаимодействий: $W_p = kx^2/2$.
При $x = 0$ (пружина не деформирована) $W_p = 0$.

2. Полной механической энергией называется сумма кинетической и потенциальной энергий: $W_{полн} = W_K + W_P$. Полная механическая энергия консервативной системы сохраняется в процессе движения:

$$W_{полн} = W_K + W_P = const ; \Delta W_{полн} = 0; \Delta W_K = -\Delta W_P . \quad (1.3.6)$$

Этот закон справедлив как для замкнутых, так и для незамкнутых консервативных систем. Значения величин W_K и W_P в отдельности могут изменяться, но их сумма остается постоянной.

В реальных условиях в любой системе, наряду с консервативными, действуют также неконсервативные силы (например, силы трения), и полная механическая энергия системы уменьшается, постепенно переходя в другие виды. Изменение механической энергии измеряется работой неконсервативных сил, например, сил трения $\Delta W_{полн} = A_{тр}$.

Кроме механической, известны и другие виды энергии — ядерная, электромагнитная, химическая и др., способные превращаться друг в друга. Опыт показывает, что **в замкнутой системе общее количество энергии всех видов остается строго постоянным, независимо от того, какие процессы происходят в этой системе.** Так формулируется закон сохранения и превращения энергии, полученный на основе обобщения большого количества опытных данных. Он одинаково хорошо выполняется для макро- и микросистем во всех областях естествознания без каких-либо нарушений и исключений.

Отметим, что в становление закона сохранения и превращения энергии большой вклад внесли ученые Р.Майер, Дж.Джоуль, Х.Ленц, Г.Гельмгольц. Гельмгольц рассмотрел множество механических, тепловых, электрических явлений для того, чтобы доказать применимость этого принципа в тех случаях, где законы явлений достаточно изучены, частью же — чтобы с помощью этого принципа сделать дальнейшие заключения о еще не вполне изученных явлениях и дать в руки эксперимента путеводную нить.

«Путеводная нить» — сохранение энергии во всех без исключения процессах природы — и сегодня остается главной в физике.

3. Уровень материальной, а в конечном счете и духовной культуры людей находится в прямой зависимости от количества энергии, имеющейся в их распоряжении.

Быстрый рост энергопотребления во второй половине XX века поставил перед человечеством ряд острых вопросов: что ждет человечество — энергетический голод или энергетическое изобилие?

Развитие энергетики до недавнего времени не встречало принципиальных трудностей. Увеличение производства энергии происходило в основном за счет роста добычи нефти и газа, наиболее удобных в потреблении. Однако энергетика оказалась первой крупной отраслью мировой экономики, которая столкнулась с ситуацией истощения своей традиционной сырьевой базы. В начале 70-х годов XX века энергетический кризис разразился во многих странах. Одной из причин этого явилась ограниченность ископаемых энергетических ресурсов — нефти, газа и угля, которые расходуются в больших количествах. Поэтому сейчас все труднее сохранить высокий темп развития энергетики путем использования лишь традиционных ископаемых источников энергии.

Атомная энергетика в последнее время также столкнулась со значительными трудностями, связанными, в первую очередь, с необходимостью резкого увеличения затрат на обеспечение безопасности работы атомных электростанций.

Загрязнение окружающей среды продуктами сгорания ископаемого горячего, в первую очередь угля, и отходами ядерного топлива стало причиной ухудшения экологической обстановки на земле. Существенный вклад в ухудшение экологии вносит и «тепловое загрязнение» планеты, происходящее при сжигании любого вида топлива. Допустимый верхний предел выработки энергии на Земле, по оценкам ряда ученых — всего на два порядка выше нынешнего среднего мирового уровня. Рост энергопотребления может привести к повышению температуры на поверхности Земли примерно на один градус. Нарушение энергобаланса планеты в таких масштабах может вызвать необратимые опасные изменения климата. Все эти обстоятельства определяют возрастающую роль возобновляемых источников энергии.

● Гелиоэнергетика.

Солнечная энергетика во всем мире развивается быстрыми темпами и в самых разных направлениях. Гелиоцентрические программы разрабатываются более чем в 70 странах — от северной Скандинавии до выжженных пустынь Африки. Солнечные устройства служат для отопления и вентиляции зданий, опреснения воды, производства электроэнергии. Появились транспортные средства с «солнечным приводом»: гелиовелосипеды, гелиомопеды, моторные лодки, яхты, солнцелеты, дирижабли с солнечными панелями и т.д.

Самая крупная гелиоэлектростанция мира начала работать в Швейцарии. Площадь ее солнечных батарей — 4500 м², при полном освещении мощность электростанции достигает 500 кВт. Этого хватает на поселок из двухсот однокомнатных коттеджей.

Швейцарские ученые запатентовали прозрачные солнечные батареи, которые можно вставлять в оконные рамы вместо стекла. Между двумя слоями стекла, покрытого тончайшей пленкой двуокиси титана со столь же тонким слоем светочувствительного пигмента, находится слой электролита с содержанием йода. Свет, падая на пигмент, выбивает из него электроны, которые через электролит попадают на слой двуокиси титана. Все слои такой солнечной батареи настолько тонки, что прозрачность стекла практически не уменьшается. Такие стекла дешевле, чем кремниевые солнечные панели.

Гелиоустановки, располагаясь на крышах и стенах зданий, на шумозащитных ограждениях автодорог, на транспортных и промышленных сооружениях, не требуют для размещения дорогостоящей сельскохозяйственной или городской территории.

Например, солнечные панели мощностью 320 кВт, установленные на крыше производственного корпуса, почти полностью покрывают технологические потребности данного предприятия в тепле и электроэнергии.

Ученые надеются, что эксперименты, которые они проведут на опытных установках и станциях, помогут решить не только технические, но и экономические проблемы, связанные с широким внедрением гелиоэнергии.

• Энергия ветра.

Ветер служит человеку с древних времен. Преобладающие западные ветры несли испанскую армаду к открытиям и победам. Древние персы заставили ветер размалывать зерно.

Наиболее широкое распространение ветряные мельницы получили в Голландии. Некоторым из них уже более 500 лет, но они в рабочем состоянии.

В 50-х годах прошлого столетия в США был изобретен многолопастный ветряк, который затем распространился во многих районах. Такой ветряк в основном поднимал воду из колодцев и служил для заполнения водой паровых котлов. Гораздо позднее ветряки стали использовать для получения электроэнергии. Многолопастный ветряк с ветроколесом диаметром до 9 м может вырабатывать до 3 кВт электроэнергии при скорости ветра около 25 км/ч.

Энергия движущихся воздушных масс огромна. Запасы энергии ветра более чем в сто раз превышают запасы гидроэнергии всех рек планеты. Ветры, дующие на просторах нашей страны, могли бы легко удовлетворить все ее потребности в электроэнергии! Климатические условия позволяют развивать ветроэнергетику на огромной территории от наших западных границ до берегов Енисея. Богаты энергией ветра северные районы страны вдоль побережья Северного Ледовитого океана.

В настоящее время созданы высокопроизводительные установки, способные вырабатывать электроэнергию даже при очень слабом ветре. Предлагается множество проектов ветроагрегатов, несравненно более совершенных, чем старые ветряные мельницы. В новых проектах используются самые последние достижения многих отраслей знаний. К созданию конструкций ветроколеса — сердца любой ветроэнергетической установки — привлекаются специалисты — самолетостроители, умеющие выбрать наиболее целесообразный профиль лопасти, исследовать его в аэродинамической трубе. Усилиями многих ученых и инженеров созданы разнообразные конструкции современных ветровых установок.

• Геотермальные источники энергии.

Маленькая европейская страна Исландия (в переводе — «страна льда») полностью обеспечивает себя помидорами, яблоками и даже бананами! Многочисленные исландские теплицы получают

энергию от Земли, — других местных источников энергии в Исландии практически нет. Зато эта страна очень богата горячими источниками и знаменитыми гейзерами — фонтанами горячей воды, вырывающейся из-под земли.

Парогидротермальные месторождения известны также в, Гренландии, Новой Зеландии, Индонезии, Японии, США, Чили, Сальвадоре и других странах. Тепло подземных вод широко используется в Италии, где уже с начала века работают геотермические станции.

В нашей стране горячими источниками особенно богаты Камчатка и Курильские острова — районы современного вулканизма. В районе реки Паратунки была сооружена первая в нашей стране геотермальная электростанция, а с 1967 г. на Паужетских термальных источниках в 200 км от Петропавловска-Камчатского действует геотермальная электростанция мощностью 15 тыс. кВт.

Главное достоинство тепла, получаемого из недр, — экологическая чистота и возобновимость.

Разумеется, неконтролируемый забор теплой воды может рано или поздно привести к истощению источников. Чтобы этого не случилось, разработана методика замкнутой системы, по которой остывшая или обычная холодная вода возвращается в высокотемпературный пласт. По одной скважине закачивают холодную, по другой — получают уже горячую воду.

● Энергия Мирового океана.

Известно, что запасы энергии в Мировом океане колоссальны. Так тепловая (внутренняя) энергия, соответствующая перегреву поверхностных вод океана по сравнению с донными, скажем на 20°, имеет величину порядка 10^{26} Дж. Кинетическая энергия океанских течений оценивается величиной порядка 10^{18} Дж.

Поисковые работы по извлечению энергии из морей и океанов приобрели в последние годы в ряде стран довольно большие масштабы и их перспективы становятся все более обещающими.

Наиболее очевидным способом использования океанской энергии представляется постройка приливных электростанций (ПЭС). С 1967 г. в устье реки Ране во Франции на приливах высотой до 13 м работает ПЭС мощностью 240 тыс. кВт.

Неожиданной возможностью океанской энергетики оказалось выраживание с плотов в океане быстрорастущих гигантских

водорослей, легко перерабатываемых в метан для энергетической замены природного газа. По имеющимся оценкам, для полного обеспечения энергией каждого человека-потребителя достаточно одного гектара плантаций таких водорослей.

§ 1.4. Вращательное движение. Закон сохранения момента импульса

1. Движение твердого тела всегда можно свести к двум: поступательное и вращательное.

Поскольку мы рассматриваем твердое тело как систему жестко связанных материальных точек, находящихся на неизменных расстояниях друг от друга, то его поступательное движение может быть исчерпывающим образом охарактеризовано движением лишь одной точки. В качестве таковой оказалось очень удобным взять особую точку, которую называют *центром инерции* или *центром масс*.

Положение центра масс не зависит от выбора той или иной системы координат и всецело определяется взаимным расположением масс данной системы.

Центр масс однородных симметричных тел совпадает с центром симметрии. Так, центр масс шара находится в его центре, центр масс куба — также в его геометрическом центре и т.д.

Если система тел рассматривается в поле сил тяготения, то центр масс будет совпадать с ее центром тяжести, если только по величине и направлению для всех тел системы ускорение свободного падения одинаково. Практически это условие всегда выполняется, поскольку размеры систем не слишком велики. Мы будем исходить из того, что *центр масс* и *центр тяжести совпадают*, хотя понятие центра масс является более общим, чем понятие центра тяжести.

Если на тело (систему) действуют несколько сил, то векторная сумма всех внешних сил даст равнодействующую, определяющую ускорение центра масс системы:

$$\vec{a}_c = \frac{\sum \vec{F}_i}{\sum m_i}. \quad (1.4.1)$$

Формула (1.4.1) и есть обобщение второго закона Ньютона на случай системы материальных точек (системы тел): ускорение центра масс равно векторной сумме внешних сил, действующих на тела системы, деленной на массу системы.

Импульсом системы тел называется произведение ее массы на скорость центра масс

$$\vec{P} = \sum m_i \vec{v}_i = m \vec{v}_c, \quad (1.4.2)$$

Если сумма внешних сил равна нулю, то в этом случае ускорение центра масс равно нулю, а скорость центра масс остается постоянной по величине и направлению ($\vec{a}_c = 0$, $v_c = const$).

2. Важно подчеркнуть, что законы вращательного движения — это не новые законы механики, а лишь результат приспособления «обычных» законов ньютоновской механики к вращательному движению. Действие силы на тело приводит к появлению ускорения тела. Но чтобы заставить тело вращаться, нужно приложить к телу не просто силу, а момент силы. Модулем момента силы при этом называется величина M , равная произведению модуля силы F на плечо d этой силы: $M = F \cdot d$.

Плечом силы относительно оси называется кратчайшее расстояние d от оси вращения до линии действия сил.

К законам вращательного движения можно подойти, опираясь на тесную аналогию кинематических и динамических величин, характеризующих поступательное и вращательное движения. Запишем в сопоставлении законы динамики поступательного и вращательного движений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m\vec{a} = \vec{F}; \quad (1.4.3) \\ \frac{d\vec{P}}{dt} = \vec{F}; \quad (1.4.4) \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} I\vec{\varepsilon} = \vec{M}; \dots (1.4.3 \text{ а}) \\ \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M} \dots (1.4.4 \text{ а}) \end{array} \right.$$

Основной закон динамики вращательного движения в форме (1.4.3 а) утверждает: если на твердое тело действует момент внешних сил, то тело будет ускоренно вращаться относительно неподвижной оси, при этом произведение момента инерции на вектор углового ускорения всегда равно суммарному вектору момента внешних сил.

Основной закон динамики вращательного движения в форме (1.4.4 а) утверждает: если на тело действует момент силы, то он приводит к изменению момента импульса, быстрота изменения момента импульса определяется величиной M . Моментом импульса тела называется произведение момента инерции этого тела на угловую скорость:

$$L = J\omega. \quad (1.4.5)$$

3. Моментом инерции материальной точки относительно данной оси называется скалярная величина J , равная произведению массы m материальной точки на квадрат ее расстояния от оси:

$$J = m \cdot r^2. \quad (1.4.6)$$

Момент инерции твердых тел определяется на основе формулы (1.4.6) путем разбивания тела на элементарные материальные точки.

В таблице 1.1 приведены моменты инерции однородных тел простейших форм.

Таблица 1.1

**Моменты инерции некоторых тел
правильной геометрической формы**

Тело	Ось, относительно которой определяется момент инерции	Формула момента инерции
Круглый однородный диск (цилиндр) радиусом R и массой m	Проходит через центр диска перпендикулярно плоскости основания	$\frac{1}{2} mR^2$
Тонкое кольцо, обруч (труба) радиусом R и массой m , распределенной по ободу	Проходит через центр диска перпендикулярно плоскости основания	mR^2
Однородный шар массой m и радиусом R	Проходит через центр шара	$\frac{2}{5} mR^2$
Тонкий стержень длиной l	Проходит через середину стержня перпендикулярно оси стержня	$\frac{1}{12} ml^2$

4. Если суммарный момент внешних сил, действующих на тело или систему тел, равен нулю, то имеет место закон сохранения момента импульса:

$$\vec{L} = I\vec{\omega} = \text{const.} \quad (1.4.7)$$

Таким образом, *если сумма моментов внешних сил равна нулю, то момент импульса системы не изменяется со временем.*

Из формулы (1.4.7) вытекает, что если момент инерции вращающегося тела изменяется, то должна измениться и угловая скорость. Это можно показать с помощью скамьи, свободно вращающейся вокруг вертикальной оси (*скамья Жуковского*). Человек с гирями в разведенных руках находится на скамье, вращающейся со скоростью ω_1 (рис. 1.3). Пусть момент инерции человека и скамьи равен I_1 . Когда человек приблизит гантели к оси вращения, момент инерции уменьшается до I_2 . Это приведет к увеличению угловой скорости до ω_2 в соответствии с законом (1.4.7):

$$I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2. \quad (1.4.8)$$

Аналогично фигурист на льду может изменять скорость своего вращения, меняя положение рук и ног. Этим же приемом пользуются спортсмены при прыжках в воду и акробатических упражнениях, связанных с вращением в воздухе. Сила тяжести в этих примерах вращающегося момента не создает, ибо приложена к центру масс, через который проходит свободная ось вращения.

Замечательной особенностью вращательного движения является свойство вращающихся тел при отсутствии взаимодействий с другими телами сохранять неизменными не только численное значение момента импульса, но и направление оси вращения

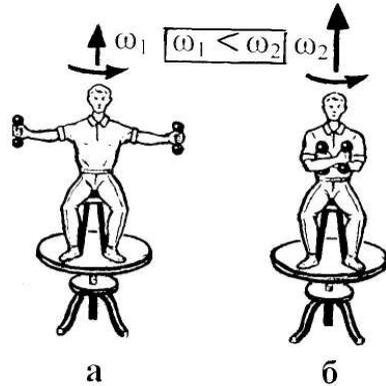


Рис. 1.3. Скамья Жуковского для демонстрации закона сохранения момента импульса системы

в пространстве. Неизменным ориентиром для путешественников на поверхности Земли служит Полярная звезда. Примерно на эту звезду направлена ось вращения Земли, и кажущаяся неподвижность Полярной звезды на протяжении столетий наглядно доказывает, что в течение этого времени направление оси вращения Земли в пространстве не изменилось.

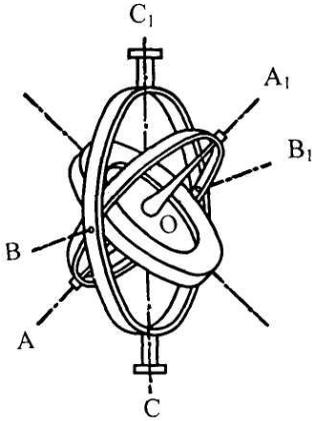


Рис. 1.4. Гироскоп на кардановом подвесе

Эффект сохранения направления оси вращения в пространстве используется в приборах, называемых *гироскопами*. Гироскоп — это укрепленное в специальном кардановом подвесе быстро вращающееся симметричное тело, ось вращения которого (ось симметрии) может изменять свое положение в пространстве. Карданов подвес устроен следующим образом: на стойке закреплено внешнее кольцо, которое может вращаться около оси AA_1 (рис. 1.4). Внутри его расположено второе кольцо, оно имеет ось вращения BB_1 , перпендикулярную AA_1 .

Внутри последнего кольца вокруг оси CC_1 , перпендикулярной BB_1 , вращается гироскоп O . Благодаря такому устройству ось гироскопа может свободно поворачиваться и занимать любое положение в пространстве.

Момент внешних сил, действующих на гироскоп, равен нулю. Поэтому к гироскопу можно применить закон сохранения момента импульса: *момент импульса гироскопа остается постоянным, не изменяется и направление оси его вращения в пространстве.*

Гироскопические приборы применяются для автоматического управления движением самолетов и кораблей (для поддержания заданного курса корабля служит авторулевой, а самолета — автопилот).

Частным случаем закона сохранения момента импульса является второй закон Кеплера, открытый в 1609 г. Солнце и обращающиеся вокруг него по эллиптическим орбитам планеты образуют замкнутую систему, центр масс которой находится практически в центре Солнца. Для каждой планеты при ее движении

вокруг Солнца будет выполняться закон сохранения момента импульса (закон площадей, рис. 1.5).

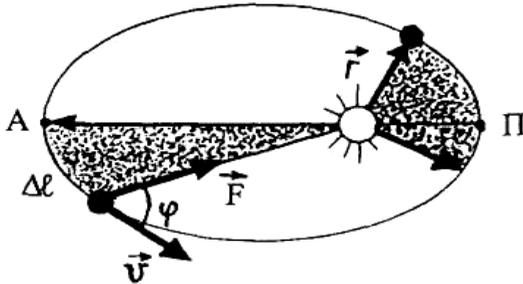


Рис. 1.5. Второй закон Кеплера (закон площадей) — следствие закона сохранения момента импульса

§ 1.5. Движение жидкости. Уравнение Бернулли

1. Гидроаэромеханика — это раздел механики, изучающий движение и равновесие жидкостей и газов, их взаимодействие между собой и обтекаемыми ими твердыми телами. Хотя свойства жидкостей и газов во многом отличаются, при изучении целого ряда механических явлений их поведение описывается одинаковыми параметрами и уравнениями. Поэтому в разделе гидроаэромеханики используется единый подход к изучению жидкостей и газов. При этом конкретное строение жидкости (или газа) в гидродинамике не учитывается, и они рассматриваются как сплошные среды, непрерывно распределенные в пространстве.

Изменению объема сплошной среды препятствуют силы упругости. Поскольку взаимодействия между слоями жидкости или газа, а также взаимодействия жидкостей и газов с твердыми телами осуществляются не в отдельных точках, а по всей площади, причем силы упругости всегда перпендикулярны рассматриваемым площадкам, эти взаимодействия в гидроаэромеханике характеризуются давлением. Физическая величина, равная отношению нормальной силы, действующей со стороны жидкости на некоторую площадь к величине этой площади, называется *давлением* $p = \Delta F / \Delta S$.

Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Кроме этого используются внесистемные единицы

давления: миллиметр ртутного столба — 1 мм рт. ст. = 133,32 Па; физическая атмосфера — 1 атм = 760 мм рт. ст. = $1,01 \cdot 10^5$ Па; техническая атмосфера — 1 ат = $0,981 \cdot 10^5$ Па; бар — 1 бар = 10^5 Па.

При равновесии любого по форме малого элемента объема, выделенного внутри жидкости, равнодействующая всех сил, действующих на него со стороны соседних частиц, равна нулю. Это приводит к закону Паскаля: в данной точке жидкости давление одинаково по всем направлениям.

Давление, вызванное силой тяжести и зависящее от глубины под поверхностью жидкости, называется *гидростатическим давлением*. Если на уровне поверхности жидкости давление P_0 известно (например, оно равно атмосферному давлению окружающего воздуха), то давление P на произвольной глубине h будет равно

$$p = p_0 + \rho gh. \quad (1.5.1)$$

и в данной точке на произвольной глубине будет одним и тем же по всем направлениям в соответствии с законом Паскаля.

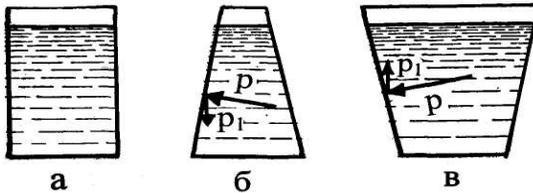


Рис. 1.6 Иллюстрация закона Паскаля.

Сила давления на дно сосуда: а) равна весу жидкости; б) больше веса жидкости; в) меньше веса жидкости

Отсюда вытекает, что если имеются, например, три сосуда, наполненных жидкостью, форма которых изображена на рисунках 1.6 а, б, в, то согласно закону Паскаля сила давления жидкости на дно указанных сосудов будет одинакова, поскольку площадь дна у них одинакова. При этом только для первого сосуда сила давления на дно равна весу жидкости, содержащейся в нем; во втором сосуде вес жидкости меньше силы давления, а в третьем — больше. Это так называемый *гидростатический парадокс*. Его объяснение принадлежит Паскалю. Дело в том, что гидростатическое давление p всегда нормально к стенкам сосуда, отсюда следует, что сила

давления на наклонные стенки имеет вертикальную составляющую p_1 , которая во втором сосуде направлена вниз и компенсирует вес недостающего объема жидкости, а в третьем сосуде она направлена вверх и компенсирует вес излишнего объема жидкости в нем.

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая (архимедова) сила \vec{F}_a , равная весу вытесненной телом жидкости:

$$F_{ap} = \rho_{ж} g V. \quad (1.5.2)$$

При этом если тело погружено целиком в жидкость, то V — объем тела, а если тело погружено в жидкость не целиком, то под V_n понимается объем части тела, погруженной под свободную поверхность жидкости.

2. Движение жидкостей называется *течением*, а совокупность частиц движущейся жидкости — *потоком*. Течение жидкости называется *стационарным* (установившимся), если в заданных точках пространства скорость жидкости не зависит от времени. При этом в разных точках пространства скорости жидкости могут быть неодинаковыми.

Внутренним трением (вязкостью) жидкости называется явление возникновения сил, препятствующих относительному перемещению слоев жидкости или газа. Силы внутреннего трения направлены вдоль соприкасающихся слоев (а не перпендикулярно к поверхности, как силы упругости) и зависят от их относительных скоростей.

Идеальной (невязкой) жидкостью называется сплошная среда, в которой вязкость отсутствует или ею можно пренебречь. В противном случае жидкость называется *вязкой*.

Течение жидкости называется *ламинарным*, если слои жидкости скользят друг относительно друга, не перемешиваясь. Течение, сопровождающееся образованием вихрей и перемешиванием слоев, называется *турбулентным* (от лат. *turbulentus* — бурный, беспорядочный). Установившееся течение может быть только ламинарным.

При стационарном течении жидкость не скапливается в отдельных частях трубки тока, не образует пустот и не переходит

в соседние трубки тока. Это позволяет записать уравнение неразрывности для стационарного течения жидкости:

$$\rho v S = const, \quad (1.5.3)$$

где ρ — плотность жидкости, v — модуль скорости жидкости в произвольном поперечном сечении трубки тока площадью S .

Если жидкость несжимаема, то плотность ρ постоянна во всех точках жидкости, и уравнение неразрывности принимает вид:

$$v S = const \text{ или } v_1 S_1 = v_2 S_2.$$

Согласно закону сохранения энергии при течении идеальной несжимаемой жидкости должно выполняться равенство

$$p + \rho gh + \rho v^2 / 2 = const, \quad (1.5.4)$$

где ρ — плотность жидкости; v — модуль скорости течения жидкости в сечении трубки тока, находящейся на высоте h от условно выбранного уровня, p — давление в том же сечении трубки тока, вызванное силами упругости жидкости.

Выражение (1.5.4) называется уравнением Бернулли.

Для горизонтальной трубки тока уравнение Бернулли упрощается:

$$p + \rho v^2 / 2 = const. \quad (1.5.5)$$

Величина p в этом уравнении называется *статическим давлением*, $\rho v^2 / 2$ — *скоростным (динамическим) напором*, а сумма $p + \rho v^2 / 2$ — *полным давлением* (p_0). Из уравнения Бернулли (1.5.5) следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление больше в широких местах трубы.

**§ 1.6. Устойчивость механических систем.
Математические модели устойчивости движения.
Устойчивое развитие экосистем**

1. Понятие устойчивости, как для неживой, так и для живой материи является одним из первостепенных. Существует важная область инженерной науки, изучающая условия равновесия твердых тел, находящихся в покое под действием сил (напряжений), — эта область называется *статикой*. Законы статики — это законы устойчивого механического равновесия.

В общем случае в физике различают *статическое* и *динамическое равновесие*. Устойчивостью движения должны обладать различного рода двигатели, автомобили, самолеты, ракеты, гироскопические приборы и др. Чтобы держать тело в покое (статическом равновесии), необходимо выполнение двух условий:

1) векторная сумма всех сил должна быть равна нулю:

$$\sum \vec{F}_i = 0; \quad (1.6.1)$$

2) векторная сумма всех моментов сил должна быть равна нулю (правило моментов):

$$\sum \vec{M}_i = 0. \quad (1.6.2)$$

Различают три вида равновесия: устойчивое, неустойчивое и безразличное.

Устойчивое равновесие имеет место, если тело, будучи выведено из положения равновесия в ближайшее положение, а затем предоставлено самому себе, всегда возвращается в это исходное положение.

Неустойчивое равновесие имеет место, если тело, будучи выведено из положения равновесия в ближайшее положение, а затем предоставлено самому себе, будет еще больше отклоняться от положения равновесия.

Безразличное равновесие имеет место, если тело, будучи выведено из положения равновесия в ближайшее положение и затем предоставлено самому себе, остается в новом положении.

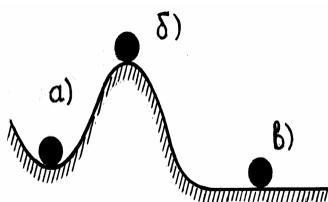


Рис 1.7. Виды равновесий:
a — устойчивое равновесие;
б — неустойчивое равновесие;
в — безразличное равновесие

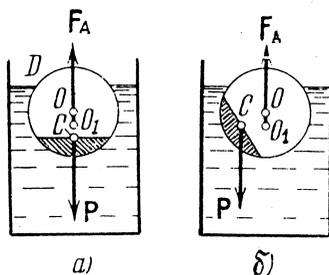


Рис 1.8. Устойчивое равновесие шара: при отклонении (либо погружении) шара возникают силы, возвращающие шар в исходное положение

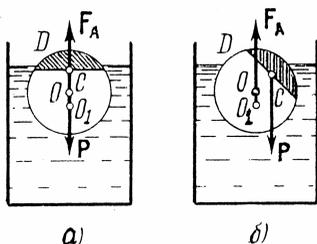


Рис 1.9. Неустойчивое положение шара: при небольшом повороте шар и дальше поворачивается, занимая положение, при котором его более плотная часть находится внизу

Равновесие тела будет: а) устойчивым, если в положении равновесия центр масс занимает наинизшее положение из всех возможных ближайших соседних его положений; б) неустойчивым, если центр масс занимает наивысшее положение из всех возможных ближайших его положений; в) безразличным, если центр масс тела во всех ближайших возможных положениях этого тела находится на одном горизонтальном уровне (рис. 1.7 *a*, *б*, *в*). На рисунках 1.8 *б* и 1.9 также показаны примеры, иллюстрирующие состояния устойчивого и неустойчивого видов равновесия.

На этих рисунках неоднородный шар плавает в жидкости. Плотность заштрихованной части шара больше плотности остальной части шара. Сила тяжести \vec{P} приложена в центре масс C шара, а выталкивающая сила \vec{F}_A приложена в точке O_1 , расположенной несколько ниже геометрического центра шара O (шар не полностью погружен в жидкость). Если повернуть шар вокруг центра O , возникнет момент пары сил \vec{F}_A и \vec{P} , возвращающий шар в начальное положение устойчивого равновесия (рис. 1.8 *a*, *б*).

Если погрузить шар глубже в жидкость, то возрастет выталкивающая архимедова сила, равнодействующая сила заставит шар возвратиться в начальное положение. Наоборот, на рисунке 1.9 а, б показано состояние неустойчивого равновесия шара, так как при малом повороте шара вокруг центра О будет возникать момент пары сил \vec{P} и \vec{F}_A , приводящий к дальнейшему отклонению шара от начального положения.

2. Наиболее общими методами анализа механических систем на устойчивость являются вариационные методы, принцип виртуальных перемещений и др. Обсуждение этих вопросов выходит за рамки курса.

Если заданные силы являются потенциальными (силы тяготения, силы упругости, электрические силы и др.), то уравнения равновесия получаются простыми.

Пусть для простоты потенциальная энергия тела (системы) W_p зависит только от одной координаты x . Работа консервативной силы F_x на пути dx связана, как отмечалось, с убылью потенциальной энергии:

$$F_x \cdot dx = -dW_p, \text{ Отсюда легко получить, что сила} \\ F_x = -dW_p/dx, \quad (1.6.3)$$

т.е. направлена в сторону убывания потенциальной энергии.

График потенциальной энергии $W_p(x)$ называется *потенциальной кривой*, он позволяет судить о характере движения частицы (тела). На рисунке 1.10 изображена потенциальная кривая произвольного вида (ее можно сравнить с профилем горы, по поверхности которой — без трения — перемещается тело).

Сила $F_x = -dW_p/dx$ особенно велика на крутых участках кривой. В точках 1 и 3 $dW_p/dx = 0$ и сила $F_x = 0$. Если в этих точках скорость

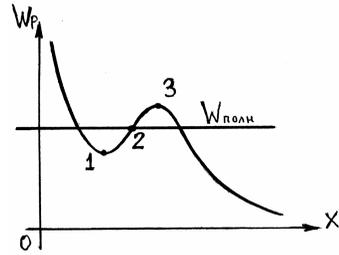


Рис. 1.10. Потенциальная кривая произвольного вида. Точка 1 соответствует устойчивому равновесию, точка 3 — неустойчивому равновесию; в точке 2 — седлообразное равновесие

тела равна нулю, оно будет находиться в равновесии. Однако устойчивым равновесие будет лишь в положении 1, где потенциальная энергия частицы W_p минимальна, отклонение тела из положения 1 ведет к росту энергии W_p , т.е. к возникновению сил, возвращающих систему к равновесию. Наоборот, максимуму энергии W_p (положение 3) соответствует неустойчивое равновесие, так как система, выйдя из него, удаляется от равновесия дальше и дальше. В точке 2 (это точка перегиба) производная также равна нулю $dW_p/dx=0$, но этой точке соответствует *седлообразное равновесие*: система стремится к возвращению в положение равновесия при ее отклонении в сторону возрастания энергии и удаляется от положения равновесия в противоположном случае. Наконец, если график W_p представлен прямой, параллельной оси X , равновесие системы безразличное. Рисунки иллюстрируют приведенный анализ.

Принцип экстремума потенциальной энергии для анализа устойчивости систем имеет всеобщий характер. Он используется для самого широкого класса систем в природе. Таким образом, **если в положении равновесия потенциальная энергия системы имеет наименьшее значение из возможных ее значений в соседних положениях, то равновесие устойчиво, и наоборот, если в положении равновесия потенциальная энергия имеет наибольшее значение, то равновесие неустойчиво.**

3. Математический анализ устойчивости макроскопических коллективных систем обогатился в последнее время новыми идеями и подходами. Среди них назовем науку *синергетику* (особенно плодотворными эти идеи оказались для анализа устойчивости сложных биологических систем, в экологии — устойчивости экосистем).

Состояние системы можно считать известным, если известны положения и движения всех частиц, входящих в нее. Иными словами, для описания системы, состоящей из N частиц, нужно знать $3N$ координат (x, y, z) и $3N$ скоростей (либо импульсов: P_x, P_y, P_z).

Таким образом, эволюцию сложной системы принято представлять в так называемом *фазовом пространстве*: под фазовым

пространством системы понимается воображаемое $6N$ -мерное пространство всех координат (обобщенных координат) и импульсов (обобщенных импульсов). Реальная система в определенный момент времени всегда изображается одной точкой в фазовом пространстве.

Изменение состояний системы со временем изображается в фазовом пространстве некоторой линией, так называемой *фазовой траекторией*. Например, фазовая траектория гармонического осциллятора (математического маятника) представляет собой замкнутый эллипс: состояние осциллятора изображается точкой эллипса, которая со временем перемещается по этому эллипсу (рис. 1.11).

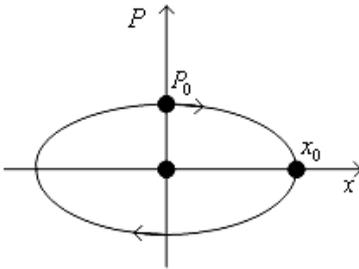


Рис. 1.11. Фазовая траектория гармонического осциллятора

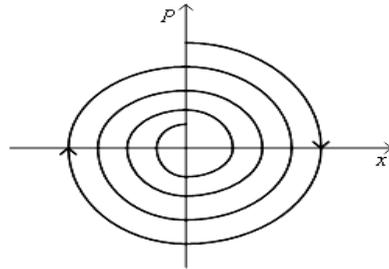


Рис. 1.12. Фазовый портрет затухающего осциллятора

Действительно, для осциллятора координата и импульс подчиняются уравнениям:

$$x(t) = x_0 \sin \omega_0 t; P(t) = P_0 \cos \omega_0 t.$$

Исключая время, получим уравнение фазовой траектории:

$$x^2/x_0^2 + P^2/P_0^2 = 1, \quad (1.6.4)$$

где x_0 — амплитуда отклонений осциллятора от положения равновесия; $P_0 = m x \omega_0$ — амплитудное значение импульса осциллятора. Уравнение (1.6.4) представляет собой уравнение эллипса.

В случае затухающих колебаний рассмотренного выше маятника фазовые траектории при любых начальных значениях заканчиваются в одной точке, которая соответствует покою в положении равновесия (рис. 1.12). Эта точка, или *аттрактор* (от лат. *attrahere* — притягивать), как бы притягивает к себе все фазовые

траектории нашего маятника со временем и является обобщением понятия равновесия.

Таким образом, фазовые траектории отражают характер механических движений. За аттракторами стоят визуальные образы неких «каналов», «конусов» или «воронков», которые свертывают (втягивают в себя) множество траекторий, предопределяя ход эволюции системы.

Современная наука *синергетика* (от греч. *synergetikos* — сотрудничество, кооперативность, совместное действие) занимается изучением явлений самоорганизации. Целью синергетики является выявление общих закономерностей в процессах образования, устойчивости и разрушения, упорядоченных временных и пространственных структур в сложных неравновесных системах различной природы (физических, химических, биологических, экологических и др.). При этом процесс упорядочения связан с коллективным поведением подсистем, когда при изменении определенных условий, которые называются *управляющими параметрами* (или *параметрами порядка*), в системе образуются качественно новые структуры.

Такие системы обязательно должны быть открытыми и иметь приток энергии и вещества извне, какими и являются системы живого мира. Именно такие системы И.Пригожин назвал *диссипативными* (от лат. *dissipatio* — разгонять, рассеивать). Переход диссипативной системы из критического состояния в устойчивое неоднозначен. В системе, пребывающей в критическом состоянии, развиваются сильные флуктуации, под действием одной из них происходит скачок в конкретное устойчивое состояние. «Выбор» конечного состояния оказывается случайным. Скачок носит одноразовый и необратимый характер. Критическое значение параметров системы, при которых возможен неоднозначный переход в новое состояние, называют точкой *бифуркации* (от лат. *bifurcatio* — раздвоение, разветвление).

Поведение всей системы определяется поведением небольшого числа параметров. В природе параметрами порядка могут служить, например, астрономические циклы, в организме — генераторы циклов сердца и др.

Классическими примерами синергетических процессов можно назвать химические реакции Белоусова-Жаботинского, в которых

реакции носят циклический характер, сопровождаемый переменной цвета реагирующей смеси. В гидродинамике — образование в подогреваемой вязкой жидкости структур, напоминающих пчелиные соты (шестигранные ячейки Бенара, рис. 1.13). Эти структуры возникали при градиентах выше порогового значения $\Delta T_{кр}$, эту точку можно назвать точкой бифуркации. Начиная с этого момента происходит так, как если бы каждый элемент объема следил за поведением своих соседей и учитывал его с тем, чтобы играть важную роль в общем процессе. В результате весь объем жидкости распадается на одинаковые шестигранные призмы. В центральной части такой призмы жидкость поднималась вверх, а по граням — опускалась. По поверхности жидкость растекалась от центра к краям, а в придонном слое — к центру. Жидкость у придонного слоя из-за теплового расширения имеет меньшую плотность, чем вблизи поверхности. Из-за силы тяжести и выталкивающей силы Архимеда система оказывается неустойчивой: слои «хотят» поменяться местами и, начиная с некоторого значения $\Delta T_{кр}$, возникают конвекционные потоки — так возникает структура, обеспечивающая максимальную скорость тепловых потоков.

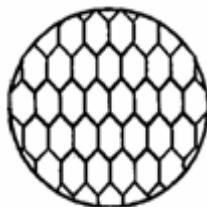


Рис. 1.13. Формирование ячеек Бенара (вид сверху)

Размеры ячеек Бенара невелики, но в каждой ячейке содержится около 10^{21} молекул. Тот факт, что такое огромное число частиц может демонстрировать когерентное (согласованное) поведение, несмотря на случайное тепловое движение каждой из частиц, является одним из основных свойств, характеризующих самоорганизацию.

Таким образом, открытость, нелинейность и хаос — основные предпосылки самоорганизации: управляющие параметры — это то, что ведет систему по пути макросостояний, а аттракторы — то, куда она идет. Флуктуации же и бифуркации — это промежуточные характеристики процесса.

На рис. 1.14 показана механическая модель бифуркационных процессов. В решающий момент перехода ($P_{кр}$) система должна

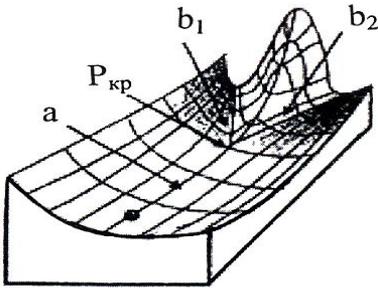


Рис. 1.14. Механическая иллюстрация явления бифуркации

совершить критический выбор — либо ветвь b_1 , либо ветвь b_2 . Решать будет лишь случай через динамику флуктуаций.

4. При изучении сложных систем прибегают к модельным представлениям. Модель — это всегда некое упрощение объекта исследования — и в смысле его структуры, и по сложности внутренних и внешних связей. Но модель обязательно должна отражать те основные свойства,

которые интересуют исследователей. Результатом моделирования является получение новых данных о протекании изучаемого процесса, его свойствах.

Среди большого разнообразия моделей значительное место занимают математические модели. Математические модели — описание процессов в реальном объекте с помощью математических уравнений (как правило, дифференциальных). Для реализации математических моделей в настоящее время широко используются компьютеры. Математические модели применяются в биологии, экологии, космологии и других науках.

Рассмотрим математические модели, описывающие динамику популяций, т.е. позволяющие найти зависимость изменения численности популяции от времени для различных условий функционирования системы. Динамика популяции — одно из наиболее значимых биологических и экологических явлений.

Основоположником математических популяционных моделей принято считать Т.Мальтуса (конец XVIII века). Его закон неограниченного экспоненциального роста (кривая 1 на рис. 1.15) обусловлен упрощенной моделью: скорость роста популяции определяется только величиной биотического (репродуктивного) потенциала, динамику ее не лимитируют факторы внешней среды абиотического происхождения (прежде всего климат) и биотического (конкуренция, хищники, болезни и т.д.).

Модели, предложенные в дальнейшем, стали описывать наблюдаемую в природе стабилизацию численности популяции

с учетом внутривидовой конкуренции (модель Ферхюльста). В общем виде уравнение Ферхюльста записывается так:

$$\frac{dN}{dt} = r \left(\frac{K - N}{K} \right), \quad (1.6.5)$$

где r — биотический потенциал, $\frac{K - N}{K}$ характеризует так называемое сопротивление среды. Под эти термином понимают совокупность всех «ограничителей» роста популяции (неоптимальная температура, кислотность, влажность и т.д.).

Решением уравнения (1.6.5) является так называемая логистическая кривая роста, график ее показан на рисунке 1.15 (кривая 2).

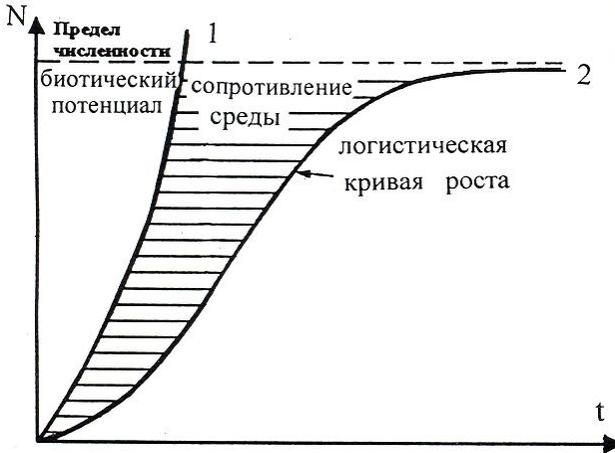


Рис. 1.15. Графики роста популяции

Следующим крупным шагом явилось моделирование взаимодействия двух и более видов (А.Лотка и В.Вольтерра).

Пусть в некотором пространстве живут два вида особей: зайцы (жертвы) и рыси (хищники). Зайцы питаются растительной пищей, имеющейся всегда в достаточном количестве (между ними отсутствует внутривидовая борьба). Рыси могут питаться только зайцами.

Введем величины:

x — число жертв в момент t ;

y — число хищников в момент t .

Уравнения баланса между численностью рожденных и гибнущих особей будут иметь вид:

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon x - \alpha xy \quad (1.6.6)$$

$$\frac{dy}{dt} = \delta xy - \beta y. \quad (1.6.7)$$

В уравнениях (1.6.6) и (1.6.7) в правой части первые слагаемые определяют прирост численности популяции, вторые — ее убыль (знак минус).

Это сложная система нелинейных дифференциальных уравнений. Сначала найдем стационарное решение $x = const$, $y = const$, когда $dx/dt = 0$ и $dy/dt = 0$. Система дифференциальных уравнений при этом сводится к алгебраическим:

$$x_{cm}(\varepsilon - \alpha y_{cm}) = 0; \quad y_{cm}(\delta x_{cm} - \beta) = 0,$$

откуда

$$x_{cm} = \beta / \delta, \quad y_{cm} = \varepsilon / \alpha. \quad (1.6.8)$$

Пусть теперь произошли малые отклонения численности хищников и жертв относительно стационарных значений:

$$x = x_{cm} + u(t); \quad y = y_{cm} + v(t),$$

где $u(t)$ — малые отклонения жертв, а $v(t)$ — малые отклонения хищников.

Учитывая (1.6.6), (1.6.7) и пренебрегая членами второго порядка малости, получим систему уравнений, описывающую гармонические колебательные процессы:

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \varepsilon \beta u = 0; \quad \frac{d^2 v}{dt^2} + \varepsilon \beta v = 0. \quad (1.6.9)$$

Решения уравнений (1.6.9) можно записать в виде двух синусоид: $u(t) = u_0 \sin \sqrt{\varepsilon \beta} t$; $v(t) = v_0 \sin(\sqrt{\varepsilon \beta} t + \varphi_0)$, где u_0, v_0 — амплитуды колебаний, $\sqrt{\varepsilon \beta} = \omega$ — частота колебаний.

Таким образом, численности особей при малых отклонениях от стационарных значений равны:

$$\begin{aligned} x(t) &= x_{cm} + u_{\max} \sin \sqrt{\varepsilon\beta t}; \\ y(t) &= y_{cm} + v_{\max} \sin(\sqrt{\varepsilon\beta t} + \varphi_0). \end{aligned} \quad (1.6.10)$$

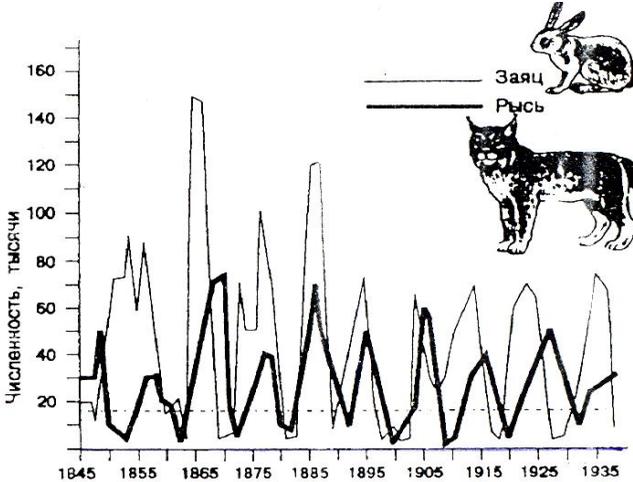


Рис. 1.16. Опытные данные по динамике популяции хищник—жертва

Отметим, что периодичность численности хищников и жертв наблюдалась и на опыте. На рис. 1.16 приведены опытные данные по количеству числа добытых шкурок зайцев и рысей в Канаде с 1845 по 1935 г. Из рисунка видно, что в реальном случае зависимости более сложные, чем это следует из модели. Необходимо подчеркнуть, что синусоидальное решение возможно лишь при малых отклонениях u и v относительно стационарных значений. Тем не менее, данная модель вполне адекватна действительности: колебания численностей хищников и жертв происходят с одинаковой частотой, наблюдается смещение колебаний по фазе.

Итак, волна за волной, происходят периодические колебания численности популяции хищника и жертвы с небольшим отклонением от оптимального уровня.

Здесь действует динамическая саморегулирующаяся система, где волна подъема численности хищника следует за волной подъема численности жертвы.

Зависимость y от x можно представить и в виде фазового портрета. Для периодических зависимостей портрет имеет вид эллипса (рис. 1.17), центр которого соответствует стационарным значениям.

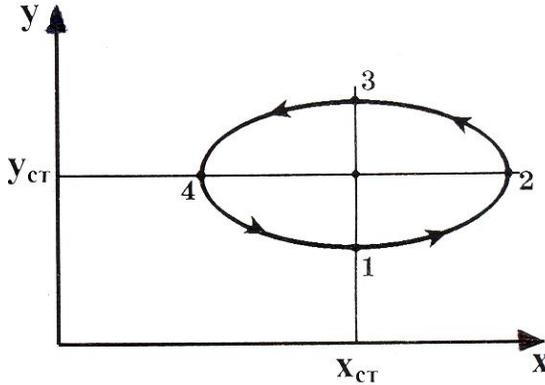


Рис. 1.17. Фазовый портрет хищник—жертва

Допустим, произошло отклонение численности зайцев от стационарного значения (1→2). Если число зайцев возросло, то число рысей также увеличивается, но количество зайцев при этом постепенно начнет уменьшаться (число рысей продолжает расти — вплоть до точки 3). Это повлечет уменьшение числа рысей (точка 4), а следовательно увеличение числа зайцев (точка 1).

Большой вклад в решение задач математического моделирования в экологии внесла школа советских математиков А.Н.Колмогорова, А.А.Андропова, В.И.Арнольда и др.

А.Н.Колмогоров подошел к максимально общему описанию системы хищник-жертва, не задавая наперед явных выражений характеристик межвидовых отношений, ограничиваясь лишь некоторыми общими качественными предположениями.

В отличие от модели Вольтера, в колмогоровской модели заранее не делается никаких специальных предположений относительно конкретного вида прироста хищников.

Можно отметить, что в модели Колмогорова уже из простых и естественных предположений о характере межвидовых и внутривидовых взаимоотношений возникает достаточно сложное поведение системы хищник-жертва. В этой модели существование

пределных циклов вытекает из самого решения системы дифференциальных уравнений.

Однако и в этой модели остается открытым вопрос, diskutируемый в математической экологии: может ли быть хищник регулятором, обеспечивающим стабильность популяции жертвы и тем самым устойчивость всей системы в целом? Каким же образом популяция хищников может оказывать регулирующее воздействие на популяцию жертв? Пока что система может быть устойчива только в том случае, когда в популяции жертвы существуют собственные внутренние регулирующие механизмы, например, внутривидовая конкуренция или эпизоотии.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите виды простейших механических движений. Что такое степень свободы? Чему равна степень свободы двухатомной молекулы?

2. Чему равна кинетическая энергия поступательного движения тела? Вращательного движения тела?

3. Что называется импульсом и моментом импульса тела? Сформулируйте законы сохранения энергии, импульса и момента импульса для механической системы.

4. Какие виды механического равновесия существуют? Назовите необходимое условие устойчивого равновесия механической системы.

5. Что такое популяция? Чем отличается динамика численности популяции по Мальтусу и Ферхюльсту (логистическая кривая)? Нарисуйте фазовый портрет популяции вида хищник—жертва.

Глава 2
ОСНОВЫ МКТ.
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ
ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ
И ОТКРЫТЫХ ЭКОСИСТЕМ

§ 2.1. Вещество. Структура и качество вещества

Гипотеза о том, что любое вещество (материя) состоит из мельчайших частиц — атомов, была высказана 2500 лет назад древнегреческим философом Демокритом. Книга, рука, вода, воздух — все это примеры вещества и все это состоит из молекул. Кроме вещества нас окружают также поля, через которые осуществляются взаимодействия в природе. Мы знаем поля гравитационные, электромагнитные и т.д.

Таким образом, по современным представлениям материя (все сущее) состоит из вещества и полей (рис. 2.1). По масштабам объекты материи можно разделить на *мегамир*, *макромир* и *микромир*. Мегамир простирается от 10^{27} до 10^6 м, макромир — от 10^6 до 10^{-6} м, микромир — от 10^{-7} до 10^{-18} м (масштаб дается в определенной степени условно).

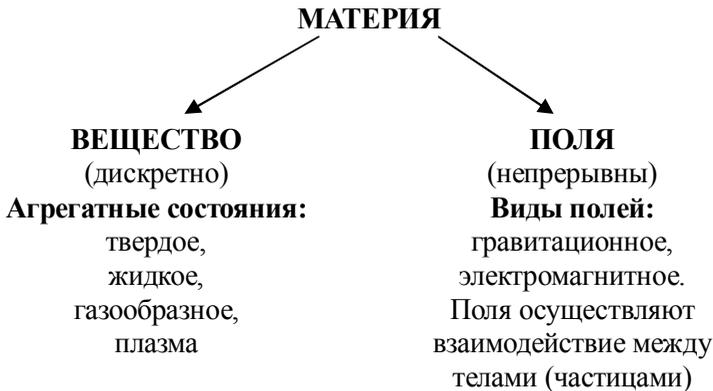


Рис. 2.1. Структура материи

Для удобства можно разделить структурные уровни вещества на низшие (элементарные частицы, атомы и молекулы) и высшие (организмы, популяции, сообщества, экосистемы и экосфера).

Любое вещество может находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Выделяют также особое, четвертое состояние вещества — плазму. Плазма, по существу, — преобладающее состояние материи во Вселенной (99%). Различают низкотемпературную плазму и высокотемпературную (вещество Солнца и звезд — это высокотемпературная плазма).

Количество вещества. Вещество имеет дискретную структуру: оно состоит из мельчайших частиц, объединенных названием *структурные элементы*; ими могут быть атомы, молекулы или ионы.

Количеством вещества принято называть физическую величину, пропорциональную числу структурных элементов данной системы. Единица количества вещества называется *моль*. 1 моль равен количеству вещества, в котором столько же частиц, сколько атомов содержится в 0,012 кг углерода ^{12}C — оно равно числу Авогадро:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

Таким образом, в одном моле любого вещества число структурных элементов одинаково: оно равно числу Авогадро. Число молей вещества можно определять по формулам:

$$\nu = \frac{N}{N_A} \text{ либо } \nu = \frac{m}{M}, \quad (2.1.1)$$

где N — число частиц, содержащихся в веществе массы m , M — молярная масса вещества. Молярная масса выражается отношением

массы вещества m к количеству вещества: $M = \frac{m}{\nu}$. Молярная

масса измеряется в килограммах на моль (кг/моль). Например, молярная масса атомарного водорода равна 0,001 кг/моль, атомарного кислорода — 0,016 кг/моль, молекулы воды — 0,018 кг/моль.

Количество частиц в веществе массы m выражается формулой:

$$N = N_A = \left(\frac{m}{M} \right) N_A. \quad (2.1.2)$$

Концентрация определяется числом частиц, содержащихся в единице объема: $n = \frac{N}{V}$, единица измерения концентрации $\frac{1}{\text{м}^3} = \text{м}^{-3}$.

Плотность вещества определяется массой, приходящейся на единицу объема: $\rho = \frac{m}{V}$, единица измерения плотности — $\text{кг}/\text{м}^3$.

Основные положения МКТ. Содержание основных положений молекулярно-кинетической теории (МКТ) сводится к следующим утверждениям:

1) все вещества состоят из мельчайших частиц — атомов и молекул;

2) эти частицы участвуют в непрерывном хаотическом движении;

3) между частицами существуют силы взаимодействия, которые имеют электромагнитное происхождение (природу), при сближении частиц силы носят характер отталкивания, а при удалении — притяжения.

Молекулы (в зависимости от сложности строения) могут совершать три вида простых механических движений: *поступательное, вращательное и колебательное*. При этом, если молекула одноатомна, она совершает только поступательное движение и имеет, как говорят, три степени свободы: $i = 3$. Для двухатомных молекул число степеней свободы $i = 5$ (кроме поступательного движения двухатомная молекула может совершать вращательное и колебательное движения). Для трехатомных (и более) молекул число степеней свободы $i = 6$.

Кинетическая энергия. Молекула массой m_0 , движущаяся поступательно со скоростью V , имеет кинетическую энергию

$W_k = \frac{m_0 V^2}{2}$. Если молекула совершает вращательное движение,

то кинетическая энергия вычисляется по известной в механике

формуле $W_k = \frac{J\omega^2}{2}$, где J — момент инерции тела (в нашем случае молекулы), ω — угловая скорость вращения. Если молекула совершает колебательное движение, то кинетическая энергия вычисляется по той же формуле, что и при поступательном движении,

но скорость V при этом изменяется по гармоническому закону: $V(t) = V_0 \sin \nu t$, где ν — циклическая частота колебаний.

Понятно, что при огромном количестве молекул, участвующих в бесперывном хаотическом движении, проследить за каждой отдельной молекулой, устанавливая значение ее кинетической энергии в любой момент времени, нет никакой возможности. Но этого и не нужно делать. В газе, который находится в состоянии равновесия, средняя кинетическая энергия молекул газа есть величина постоянная; согласно гипотезе Больцмана она определяется формулой:

$$\overline{W}_k = \frac{m\overline{V}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (2.1.3)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Таким образом, температура T есть мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

Потенциальная энергия. Если кинетическая энергия зависит только от состояния движения, то потенциальной энергией называется энергия взаимодействия тел (молекул), которая зависит от расположения взаимодействующих тел. Понятие потенциальной энергии вводят таким образом, что за счет ее убыли всегда совершается положительная работа:

$$-\Delta W_p = A. \quad (2.1.4)$$

Потенциальная энергия тела, поднятого на высоту h в поле тяжести Земли, равна: $W_p = mgh$; потенциальная энергия сжатой

пружины равна: $W_p = \frac{kx^2}{2}$, где k — коэффициент жесткости; потен-

циальная энергия взаимодействия двух точечных (одноименных) зарядов, находящихся на расстоянии R , определяется формулой:

$$W_p = \frac{kq_1q_2}{R},$$

где $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9$ — размерная постоянная в СИ.

Взаимодействие между молекулами (а также атомами в молекуле) имеет электромагнитную природу, но механизм взаимодействия более сложный, поэтому простой формулы для потенциальной энергии межмолекулярного взаимодействия не существует.

§ 2.2. Термодинамическая система. Первый закон термодинамики

Термодинамика изучает макроскопические системы и происходящие в них явления, опираясь на некоторые общие законы — начала термодинамики, являющиеся обобщением огромного числа опытных фактов. Законы термодинамики и МКТ дополняют друг друга. Законы термодинамики относятся к преобразованиям энергии, ее изменениям в различных процессах и к ряду связанных с ней величин. Отсюда понятна общность данных законов — ведь энергетические превращения сопутствуют всем явлениям природы.

В термодинамике различают неравновесные состояния макроскопической системы и равновесные.

Равновесным называется такое состояние, при котором параметры системы имеют определенные значения, одинаковые для всех ее частей. К термодинамическим параметрам относятся температура (T), давление (p), объем (V), число молей (ν) и др. Для неравновесного состояния параметры в различных частях системы различны.

Переход макроскопической (термодинамической) системы из одного равновесного состояния в другое представляет собой последовательность неравновесных состояний. Однако бесконечно медленный процесс можно считать как бы состоящим из последовательности равновесных состояний, то есть являющимся равновесным (квазистатическим) процессом.

Внутренняя энергия. Одним из важнейших параметров термодинамической системы является ее внутренняя энергия, которая складывается из кинетической энергии хаотичного (теплого) движения частиц (атомов или молекул) и потенциальной энергии взаимодействия этих частиц. Разумеется, при хаотичном движении молекул макроскопической системы беспорядочно меняются как кинетическая, так и потенциальная энергии отдельных

молекул. Однако для равновесных состояний, как отмечалось, можно ввести понятия *средней кинетической* и *средней потенциальной* энергии каждой молекулы: эти величины со временем не будут меняться. Таким образом, внутренняя энергия термодинамической системы равна:

$$U = \sum \overline{W}_k + \sum \overline{W}_p,$$

где первое слагаемое представляет собой сумму средних кинетических энергий всех молекул, составляющих данную систему, а второе слагаемое — сумму средних потенциальных энергий всех молекул системы.

Для разреженных газов взаимодействием между молекулами можно пренебречь. Такой газ называется *идеальным*. Состояние идеального газа описывается уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad (2.2.1)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Процессы, протекающие при строго фиксированном значении какого-либо параметра называются *изопроцессами*. Тогда на основании уравнения Клапейрона-Менделеева можно установить зависимость между двумя другими.

Изотермический процесс ($T = const$). Из (2.2.1) получим

$$pV = const. \quad (2.2.2)$$

Для газа данной массы произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется.

Это закон *Бойля—Мариотта*.

Изобарный процесс ($p = const$). Из (2.2.1) вытекает

$$V/T = const \text{ либо } V = const \cdot T. \quad (2.2.3)$$

Для газа данной массы отношение объема к температуре постоянно, если давление газа не меняется.

Это экспериментально открытый закон *Гей-Люссака*.

Изохорный процесс ($V = const$). Из (2.2.1) следует

$$p/T = const \text{ либо } p = const \cdot T. \quad (2.2.4)$$

Для газа данной массы отношение давления к температуре постоянно, если объем не меняется.

Этот закон был установлен *Ж.Шарлем*.

Внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму только кинетических энергий теплового движения его частиц (поскольку взаимодействием молекул идеального газа мы пренебрегаем: $\sum W_p = 0$).

Так как в молекулярно-кинетической теории на одну степень свободы молекулярного движения приходится энергия, равная $\frac{1}{2}kT$, то средняя кинетическая энергия одноатомной молекулы

($i = 3$) равна $U = \frac{3}{2}kT$, а внутренняя энергия газа, состоящего из N таких молекул, будет равна:

$$U = \frac{3}{2}NkT .$$

Поскольку $N = \left(\frac{m}{M}\right)N_A$, то $U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}N_AkT$, или окончательно:

$$U = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT , \quad (2.2.5)$$

где $R = kN_A$ — универсальная газовая постоянная.

Для двухатомных молекул ($i=5$) $U = \frac{5}{2}\frac{m}{M}RT$. Можно записать обобщенную формулу для внутренней энергии:

$$U = \frac{i}{2}\frac{m}{M}RT . \quad (2.2.6)$$

Приходим к выводу, что внутренняя энергия идеального газа зависит только от одного термодинамического параметра — его абсолютной температуры T .

Два способа изменения внутренней энергии. Изменить внутреннюю энергию какого-либо тела можно, приведя его в соприкосновение с другим телом, имеющим более высокую или более низкую температуру. При этом горячее тело передает часть своей энергии более холодному, то есть часть энергии беспорядочного движения частиц горячего тела переходит в энергию беспорядочного движения частиц более холодного тела. В результате температуры тел выравниваются: температура горячего тела понизится, а холодного повысится.

Такой процесс передачи энергии называется *теплообменом* (*теплопередачей*). Изменение внутренней энергии при этом равно количеству теплоты Q , переданной системе или отведенной от системы: $\Delta U = Q$; количество же теплоты Q , необходимое для нагревания тела, определяется по формуле:

$$Q = c m \Delta T, \quad (2.2.7)$$

где c — удельная теплоемкость вещества, $\Delta T = T_2 - T_1$ — изменение температуры. Если $\Delta T > 0$, то $Q > 0$ (теплота подводится к системе), внутренняя энергия увеличивается. Если $\Delta T < 0$, то $Q < 0$, внутренняя энергия уменьшается. Теплообмен в природе может осуществляться также и лучистой энергией. Например, камень, помещенный в вакуумный стеклянный баллон и выставленный под прямые солнечные лучи, нагреется, что свидетельствует о поглощении им солнечной электромагнитной энергии. Поэтому под Q следует понимать и нагрев лучистой энергией.

Важно отметить, что при теплообмене, в результате которого температуры тел выравниваются, не происходит перемещения ни самих тел, ни их частей, то есть работа при этом не совершается. Значит, *внутреннюю энергию, теряемую системой при изменении ее температуры без изменения объема, нельзя использовать для совершения механической работы.*

При каких же условиях за счет внутренней энергии может быть совершена работа? Работа связана с упорядоченным перемещением тел. Внутренняя же энергия связана с беспорядочным тепловым движением частиц вещества. Следовательно, для того, чтобы за счет внутренней энергии тела можно было совершить работу, необходимо каким-либо способом хотя бы частично преобразовать хаотическое движение ее частиц в упорядоченное движение. Для этого можно использовать, например, газ, находящийся в цилиндре с поршнем. Если газ расширится, его объем увеличится, при этом сила, с которой газ действует на поршень, совершит положительную работу:

$$A = p(V_2 - V_1) = p \Delta V. \quad (2.2.8)$$

Первый закон термодинамики. Анализ результатов опытов и наблюдений природных явлений, выполненных к середине XIX в., привел ученых Р.Майера, Д.Джоуля и Г.Гельмгольца к выводу

о существовании закона сохранения энергии: при любых взаимодействиях тел энергия не исчезает бесследно и не возникает из ничего. Энергия только передается от одного тела к другому или превращается из одной формы в другую. Внутренняя энергия U системы, изолированной от любых взаимодействий с внешней средой, не изменяется при любых взаимодействиях внутри системы. Следовательно, для изолированной системы справедливо соотношение:

$$U = \text{const}, \text{ или } \Delta U = 0.$$

Если же система не является изолированной, т.е. взаимодействует с внешней средой, то внутренняя энергия системы изменяется. При этом, как отмечалось, есть два способа изменения внутренней энергии: теплообмен и совершаемая механическая работа. Таким образом, мы приходим к формулировке первого закона термодинамики (первого начала термодинамики либо первого принципа термодинамики) — закона сохранения и превращения энергии:

$$\Delta U = Q - A. \quad (2.2.9)$$

Изменение внутренней энергии термодинамической системы равно разности полученного количества теплоты Q и работы A , совершенной системой.

Рассмотрим изменение внутренней энергии в изопроцессах идеального газа.

Изотермический процесс. Из формулы (2.2.6) вытекает, что изменение внутренней энергии определяется формулой

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (2.2.10)$$

Если же $T = \text{const}$, то и $U = \text{const}$, $\Delta U = 0$, но тогда на основании первого закона термодинамики можно записать: $Q = A$, т.е. при изотермическом процессе внутренняя энергия не изменяется, а положительная совершается за счет подводимого тепла.

Изобарный процесс. При изобарном процессе работа $A = p \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T$, а теплота

$$Q_p = \Delta U + A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T + \frac{m}{M} R \Delta T = \frac{i+2}{2} \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Из формулы (2.2.7) удельная теплоемкость равна

$$c_p = \frac{Q_p}{m\Delta T} = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}. \quad (2.2.11)$$

Изохорный процесс. При изохорном процессе ($\Delta V = 0$) работа $A = 0$, следовательно

$$Q_V = \Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T, \text{ а } c_V = \frac{Q_V}{m\Delta T} = \frac{i}{2} \frac{R}{M}. \quad (2.2.12)$$

Адиабатный процесс. В термодинамике рассматривается еще один процесс, так называемый, *адиабатный*, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой ($Q = 0$). В этом случае $\Delta U = -A$, т.е. положительная работа может совершаться только за счет убыли внутренней энергии. Для адиабатного процесса изменение давления и объема газа подчиняется уравнению Пуассона:

$$pV^\gamma = const, \quad (2.2.13)$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_V} = \frac{i+2}{i}$ — *показатель адиабаты* или *коэффициент Пуассона*.

Сравнивая (2.2.2) и (2.2.3), можно сделать вывод, что в координатах p - V адиабата идет круче изотермы (рис. 2.2).

Вечный двигатель первого рода. Современная жизнь человека невозможна без использования самых разнообразных машин, с помощью которых человек обрабатывает землю, собирает урожай, добывает нефть, уголь, руду, строит дома, дороги.

Основным общим свойством всех машин является их способность совершать работу. Многие изобретатели в прошлом пытались построить машину, способную совершать полезную работу без потребления энергии извне и без каких-либо изменений внутри самой машины. Машину с такими свойствами называют *вечным двигателем первого рода*. Все эти попытки окончились неудачей. Невозможность создания вечного двигателя первого рода

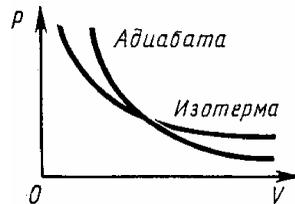


Рис. 2.2. Сравнение изотермического и адиабатического процессов. Адиабата идет круче изотермы

подтверждает, тем самым, первый закон термодинамики, согласно которому работа A , произведенная машиной, равна:

$$A = Q - \Delta U . \quad (2.2.14)$$

Любая машина может совершать работу над внешними телами только за счет получения извне некоторого количества теплоты или уменьшения ее внутренней энергии.

§ 2.3. Тепловые машины и стрела времени. Второй принцип термодинамики

Для получения механической энергии чаще всего используют внутреннюю энергию топлива. Преобразование внутренней энергии топлива в механическую происходит в тепловых двигателях, которые используются на тепловых и атомных электростанциях, на всех видах современного транспорта.

Не вся внутренняя энергия топлива в тепловых машинах используется на совершение механической работы. Циклический процесс, при котором все количество теплоты, полученное от нагревателя, шло бы на совершение работы, невозможен. Некоторая часть этого тепла обязательно отдается другим телам с более низкой температурой. Двигатель, который мог бы совершать работу только за счет источника энергии (без холодильника), получил название «вечного двигателя второго рода», так как он мог бы работать непрерывно за счет почти безграничных запасов энергии. Подчеркнем, вечный двигатель второго рода вовсе не противоречит первому закону термодинамики, закону сохранения энергии, который требует только, чтобы изменение энергии оказалось в точности равным механической работе.

Процессы, которые происходят без воздействия внешних сил, называются *самопроизвольными*. Самопроизвольно происходящие процессы теплообмена между телами всегда таковы, что горячее тело охлаждается, передавая энергию холодному телу, температура которого повышается. Обратный этому процесс самопроизвольно никогда не происходит. Процессы перехода системы из одного состояния в другое, которые можно провести в обратном направлении, через ту же последовательность промежуточных равновесных состояний, называются обратимыми. К ним

относятся и механические процессы в консервативных системах. Реальные процессы в природе, протекающие с трением, необратимы. Переход теплоты от горячего тела к холодному и механической энергии во внутреннюю — это примеры наиболее типичных необратимых процессов. Они говорят о том, что процессы в природе имеют определенную направленность, которая не отражена в первом законе термодинамики. Таким образом, все процессы в природе необратимы, в том числе в биологических системах (например, старение и смерть).

Как было отмечено выше, существуют определенные ограничения на полное использование внутренней энергии нагревателя на совершение работы в циклических тепловых двигателях. Рабочее тело в машине, получая некоторое количество теплоты от нагревателя и производя работу, обязательно отдает часть этой теплоты холодильнику. Это и есть содержание второго закона термодинамики. Кратко сформулируем его следующим образом: *в циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученного от источника энергии (нагревателя)* (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Невозможный периодический процесс

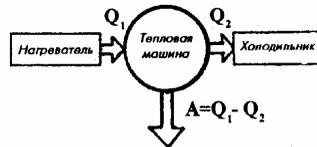


Рис. 2.4. Возможный периодический процесс

Таким образом, при совершении работы некоторое количество первично полученной полезной энергии (энергии нагретого до высокой температуры тела) переходит в менее качественную, менее полезную энергию, которая рассеивается в окружающей среде в виде низкотемпературного тепла и не может быть использована на работу (рис. 2.4).

Например, при движении автомобиля в механическую энергию, приводящую его в движение (и электрическую энергию всех его систем), превращается всего лишь 10% получаемой при сгорании

бензина высококачественной химической энергии. 90% в виде бесполезного тепла рассеивается в окружающей среде и в конечном счете теряется в космическом пространстве. Исследования, проведенные Р.Клаузиусом, убедительно показали, что не все процессы, при которых энергия сохраняется, возможны. Клаузиус ввел новое понятие — *энтропия* (от греч. — превращение, изменение, поворот) — и показал, что эта величина в природных процессах может либо оставаться постоянной, либо возрастать, но никогда не уменьшаться. Закон возрастания энтропии — фундаментальный закон природы.

Затем Л.Больцманом была установлена связь энтропии с вероятностью. Второй закон термодинамики, по Больцману, имеет вероятностный характер. В отличие от закона сохранения энергии, который справедлив в каждом акте взаимодействия и может быть применим к отдельным частицам (молекулам и атомам), второй закон термодинамики применим лишь к системам, состоящим из очень большого числа частиц. Тепло, как отмечалось, является хаотическим движением атомов и молекул, составляющих макроскопическую систему. Поэтому переход энергии механического движения отдельных частей системы в тепло означает переход организованного движения в хаотическое, увеличение беспорядка в системе. Именно в таком направлении самопроизвольно протекают процессы в природе.

Таким образом, энтропия является мерой упорядоченности системы: чем более упорядочена система, тем меньше ее энтропия; и наоборот, чем выше мера беспорядка в системе, тем выше ее энтропия. В состоянии равновесия энтропия достигает своего максимального значения — равновесие есть наиболее вероятное состояние.

Второй закон термодинамики справедлив и для живых систем. Зеленые растения преобразуют солнечную энергию в химическую энергию органических соединений (глюкозу, сахарозу, белки и т.д.), при этом часть солнечной энергии рассеивается в виде тепла. Когда человек питается растениями, химическая энергия превращается в организме в электрическую, механическую энергии, которые используются для движения и обеспечения других процессов жизнедеятельности, а также частично рассеиваются в виде тепла. При использовании энергии какое-то ее количество безвозвратно теряется и повышает энтропию окружающей среды (рис. 2.5).

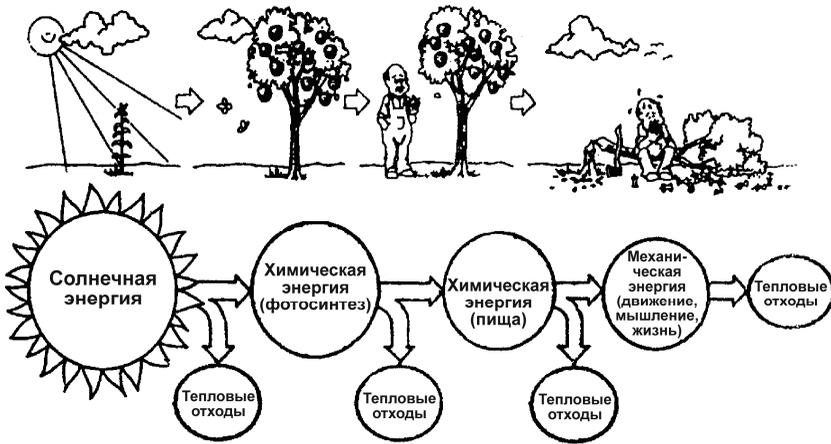


Рис. 2.5. Действие второго закона термодинамики в живых системах. Когда энергия переходит из одной в другую, некоторая часть первичной высококачественной энергии деградирует, превращаясь обычно в низкокачественное тепло, которое рассеивается в окружающей среде

Второй закон термодинамики позволяет понять сущность энергетических проблем человечества, энергетических ресурсов нашей планеты. Действительно, заманчивым было бы, например, использование почти безграничных запасов внутренней энергии, содержащейся в атмосфере и в водах океанов. Нетрудно оценить, каким огромным запасом внутренней энергии обладает атмосфера Земли (масса атмосферы составляет 10^{18} кг). Еще большим запасом внутренней энергии обладают моря и океаны. Масса воды в мировом океане составляет около 10^{21} кг. Охлаждение ее только на один градус привело бы к выделению энергии порядка 10^{24} Дж. Это в 10000 раз больше всей энергии, вырабатываемой на Земном шаре за год. Казалось бы, энергетические запасы на Земном шаре почти безграничны. Однако внутреннюю энергию морей и океанов не причисляют к энергетическим запасам. Ведь для получения работы за счет этой энергии необходимо иметь столь же гигантский холодильник, который принимал бы часть этого огромного количества теплоты и при этом не нагревался сам до температуры океана.

Два ключевых момента обуславливают качество вещества и энергии. Качество вещества есть мера полезности его как ресурса, основанная на степени его *доступности* и *концентрированности*.

Вещество высокого качества упорядочено, сконцентрировано и обычно находится вблизи земной поверхности. Такое вещество обладает *высоким ресурсным потенциалом*. Вещество низкого качества не упорядочено, находится в разбавленном или рассеянном состоянии и часто очень глубоко под землей. Обычно оно обладает низким ресурсным потенциалом.

Аналогично мы различаем энергию высокого качества и энергию низкого качества. Энергия высокого качества характеризуется большей степенью упорядоченности, или концентрации, а значит, высокой способностью производить полезную работу, и обладает низкой энтропией. В качестве примеров носителей таких форм энергии можно привести электричество, каменный уголь, бензин, концентрированную солнечную энергию, а также высокотемпературную плазму.

И наоборот, энергии низкого качества свойственны неупорядоченность и малая способность производить полезную работу. Она обладает высокой энтропией. Пример носителя такой энергии — упомянутое тепло в воздухе вокруг нас или в реке, озере, океане. Эта энергия настолько рассеяна, что мы не можем ее использовать для перемещения предметов или нагревания их до более высоких температур.

Таким образом, второй принцип или закон термодинамики имеет множество формулировок и смысловых оттенков. Для экологии важнейшими являются следующие три:

1) энергетические процессы могут идти самопроизвольно только при условии перехода энергии из концентрированной формы в рассеянную;

2) потери энергии в виде недоступного для использования тепла всегда приводят к невозможности стопроцентного перехода одного вида энергии в другой;

3) закон возрастания энтропии: в замкнутой (изолированной в тепловом и механическом отношении) системе энтропия либо остается неизменной (если в системе протекают обратимые процессы), либо возрастает (при неравновесных процессах) и в состоянии равновесия достигает максимума.

Закон снижения качества энергии — фундаментальный закон природы (рис. 2.5). Все формы жизни — это крошечные хранилища порядка, который поддерживается созданием океана беспорядка

в окружающей их среде. И современные промышленно развитые страны повышают энтропию окружающей среды в гораздо больших масштабах, чем это было на любом из предшествующих этапов человеческой истории.

На современном этапе при рассмотрении экологических проблем во взаимодействиях энергетики с природой следует выдвигать следующие требования к производству и потреблению энергии:

1. Переход к ресурсосберегающим и энергосберегающим технологиям.

2. Повышение коэффициента полезного действия при использовании энергии. Повышение энергоэффективности — лучший результат при меньших затратах.

3. Отказ от традиционных видов энергетики (получение энергии от ископаемого топлива: угля, нефти, мазута, природного газа, торфа, дров и т.д.).

4. Переход к нетрадиционным видам энергетики, т.е. к альтернативной энергетике.

К нетрадиционным видам энергетики относят так называемые вечные и возобновимые энергетические ресурсы, изначальным источником которых является Солнце. По существу, неиссякаемыми источниками возобновимой энергии для всех земель являются Солнце, ветер, текущие воды, биомасса и внутреннее тепло Земли (геотермальная энергия). Гелиоэнергетика включает в себя создание гелиоконденсаторов, солнечных батарей. В районах с достаточным солнечным излучением активные гелиоустановки являются малозатратным способом обеспечения горячей водой большинства домов. Перспективными также являются концентрация солнечной энергии для производства высокотемпературного тепла и электричества (солнечные башни), создание фотоэлементных ячеек.

Ко вторичной солнечной энергии мы также относим альтернативную гидроэнергетику («малые» ГЭС), волновые, ветровые и приливные электростанции, станции, использующие энергию морских течений, геотермальную энергетику, океанические солнечные тепловые электростанции (ОСТЭС), использующие разность температур глубин и поверхности моря и океана, биоэнергетику, развитие которых позволит также уменьшить современные нагрузки на окружающую среду (см. рис. 2.6).

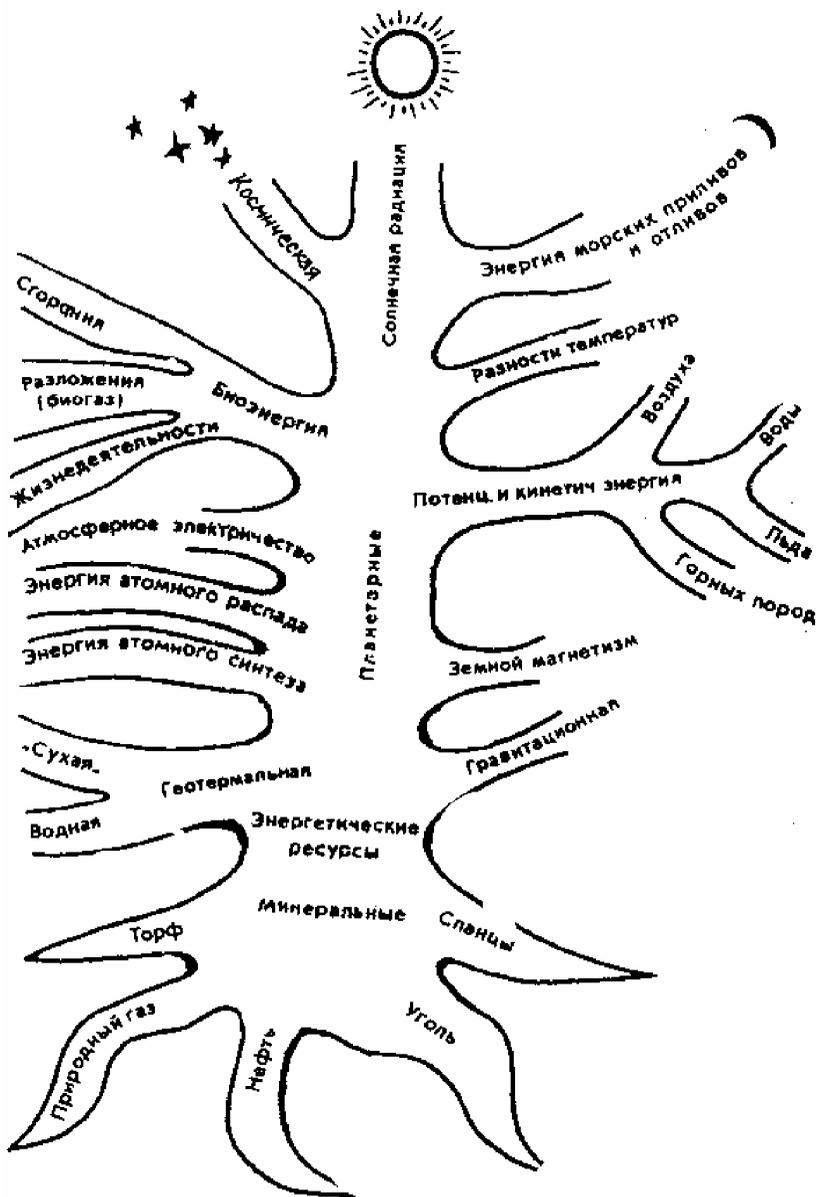


Рис. 2.6. Дерево энергетических ресурсов

В заключение коснемся вопроса о применении второго закона термодинамики ко всей Вселенной. Уже в XIX в., благодаря работам Клаузиуса и Томсона, окружающий мир представлялся ученым как огромная тепловая машина. Идеи Клаузиуса и Томсона легли в основу космологической формулировки первого и второго начал термодинамики:

1. Энергия Мира постоянна.

2. Энтропия Мира стремится к максимуму — необратимое увеличение энтропии описывает естественный ход процессов в Мире.

И действительно, какая еще система может быть изолирована лучше, чем вся Вселенная? Но для изолированной системы энтропия может только возрасть или оставаться постоянной. Таким образом, возрастающая энтропия соответствует эволюции космологической системы, энтропия становится показателем этой эволюции или, по выражению А.Эддингтона, «стрелой времени»: для изолированных систем будущее всегда расположено в направлении возрастания энтропии. Нельзя, перефразируя известное изречение Гераклита, дважды войти в Реку Времени, Река Времени вспять не течет.

Но тогда конечным состоянием Вселенной должно стать состояние теплового равновесия («тепловая смерть»): при достижении Миром конечного состояния исчезают всякие различия в температуре и способность производить механическую работу.

Однако, как отмечает современная наука, распространять выводы второго закона термодинамики на всю Вселенную без учета гравитационных взаимодействий, по крайней мере, некорректно, поскольку именно гравитация играет решающую роль в эволюции Вселенной.

§ 2.4. Принцип Ле Шателье—Брауна и его современное нарушение в рамках биосферы

Устойчивость состояния системы обеспечивается тем, что при выводе системы из состояния равновесия в ней возникают факторы, стремящиеся вернуть ее в состояние равновесия. Необходимость возникновения таких факторов вытекает из существования устойчивых состояний. В термодинамике это выражается в виде

принципа Ле Шателье—Брауна: если на систему, находящуюся в устойчивом термодинамическом равновесии, воздействуют внешние факторы, стремящиеся вывести ее из этого состояния, то в системе возникают процессы, стремящиеся уничтожить изменения, вызываемые внешними воздействиями.

В открытых системах, согласно теореме сохранения упорядоченности И.А.Пригожина, энтропия не возрастает — она в открытых системах падает до тех пор, пока не достигается минимальная постоянная величина, которая всегда больше нуля. При этом в системе вещество распределяется неравномерно и организуется таким образом, что местами энтропия возрастает, а местами — резко снижается. В целом же, используя поток энергии, система не теряет упорядоченности. Деятельность живых систем всегда *негэнтропийна*, пока сохраняется их свойство системности: таково индивидуальное развитие организмов, средообразующая их роль в биосфере.

Все системы, которые изучает экология, негэнтропийны, упорядочены таким образом, что, по известному выражению Ю.Одум, как бы «откачивают из сообщества неупорядоченность».

Это происходит до тех пор, пока действует принцип Ле Шателье—Брауна: при внешнем воздействии, выводящем систему из состояния устойчивого равновесия, это равновесие смещается в том направлении, в котором эффект внешнего воздействия ослабляется. В биосфере механизм осуществления принципа Ле Шателье—Брауна основывается на функционировании систем живого, эти механизмы служат основным регулятором общеземных процессов. В работах многих ученых показано, что действие принципа Ле Шателье—Брауна в рамках биосферы в наши дни глубоко нарушено. Если в конце прошлого века еще происходило увеличение биологической продуктивности и биомассы в ответ на возрастание концентрации углекислого газа в атмосфере, то с начала нашего века это явление не обнаруживается. Наоборот, биота выбрасывает углекислый газ, а ее биомасса автоматически снижается. Поскольку биосфера имеет лишь одно устойчивое состояние, единственным способом восстановить действие принципа Ле Шателье—Брауна будет сокращение площадей антропогенно измененных земель.

§ 2.5. Принцип минимума диссипации (рассеивания) энергии и принцип максимизации энергии и информации

Важное значение для экологических и биолого-эволюционных процессов имеет общефизический закон *минимума диссипации (рассеивания) энергии Л.Онсагера* или принцип экономии энергии: при вероятности развития процесса в некотором множестве направлений, допускаемых началами термодинамики, реализуется то, которое обеспечивает минимум диссипации энергии (или минимум роста энтропии). Данный закон тесно связан с законом оптимальности: с наибольшей эффективностью любая система функционирует в некоторых характерных для нее пространственно-временных пределах (или: никакая система не может сужаться или расширяться до бесконечности). Размер системы должен соответствовать выполняемым ею функциям.

Не менее важную роль в организации экологических систем имеет закон *максимизации энергии и информации*. Первоначально закон максимизации энергии был сформулирован так: выживание (сохранение) одной системы в соперничестве с другими определяется наилучшей организацией поступления в нее энергии и использования ее максимального количества наиболее эффективным способом. Для этой цели система:

- 1) создает накопители (хранилища) высококачественной энергии;
- 2) затрачивает накопленную энергию на обеспечение поступления новой энергии;
- 3) обеспечивает кругооборот различных веществ;
- 4) создает механизмы регулирования, поддерживающие устойчивость системы и ее способность приспосабливаться к изменяющимся условиям;
- 5) налаживает с другими системами обмен, необходимый для обеспечения потребности в энергии специальных видов.

Закон максимизации энергии справедлив и в отношении информации: наилучшими шансами на самосохранение обладает система, которая в наибольшей степени способствует поступлению, выработке и эффективному использованию энергии и информации.

Максимальное поступление вещества как такового не гарантирует успеха системе в ее выживании в конкурентной группе других аналогичных систем.

Закон максимизации энергии и информации имеет более обобщенную и краткую формулировку в виде *принципа максимизации мощи*: системы с мощной энергетикой вытесняют системы с более низкой энергетической «мощью». Однако иногда низкоэнергетические системы имеют преимущества в силу меньшего воздействия на среду и лучшего соответствия столь же низкому энергетическому потенциалу этой среды.

§ 2.6. Реальные газы. Жидкости. Уравнение Ван-дер-Ваальса

Любое вещество, как известно, находится в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном. Так, углерод может быть в газообразном состоянии, в твердом образует две кристаллические модификации — графит и алмаз. Графит, наконец, плавится при температуре 4200°C, становясь жидкостью.

В физике, кроме понятия агрегатного состояния, вводится более широкое понятие фазы. *Фаза* — это равновесное состояние вещества, отличающееся по своим физическим свойствам от других состояний того же вещества. Переход вещества из одной фазы в другую получил название *фазового перехода*. При таких переходах меняются механические, тепловые, электрические и магнитные свойства вещества.

Исследования свойств газов при высоких давлениях и низких температурах показали, что существуют значительные отклонения экспериментальных данных от предсказаний на основе уравнения состояния идеального газа — уравнения Клапейрона—Менделеева.

Расхождение результатов теории и практики в области низких температур и высоких давлений газов свидетельствовало о непригодности при этих условиях упрощенной модели строения газов, в которой не учитываются размеры молекул и силы взаимного притяжения.

Голландский физик И.Ван-дер-Ваальс в 1873 г предложил уравнение для описания состояния идеального газа, при выводе

которого он учел, во-первых, силы взаимодействия между молекулами и, во-вторых, размеры молекул. Это уравнение для одного моля вещества с учетом обеих поправок имеет вид:

$$(p + a/V_0^2)(V_0 - b) = RT, \quad (2.6.1)$$

где V_0 — объем одного моля газа; a — поправка Ван-дер-Ваальса, учитывающая силы взаимодействия между молекулами газа; b — поправка на объем, учитывающая размеры молекул.

Сравнение изотерм Ван-дер-Ваальса (рис. 2.7) показало хорошее согласие с экспериментальными изотермами. На рисунке 2.7 изотерма с $T=T_{кр}$ называется *критической изотермой*. Параметры состояния $T_{кр}$, $p_{кр}$, $V_{кр}$, соответствующие этой точке называются *критическими*. При $T > T_{кр}$ газ нельзя перевести в жидкое состояние при изотермическом сжатии, — сжимаясь, газ остается в газообразном состоянии.

Участок A_1B на рис. 2.7 описывает перегретую жидкость. Если из жидкости удалить воздух и другие примеси, то такая «очищенная» жидкость при температуре кипения некоторое время не переходит в парообразное состояние. Участок A_2E на этом рисунке соответствует переохлажденному (перенасыщенному пару). Экспериментально его можно обнаружить, если очистить пар от центров конденсации.

Уравнение Ван-дер-Ваальса достаточно хорошо описывает жидкое и газообразное состояние систем. Оно привело к учению о термодинамически неустойчивых состояниях и учению о критической температуре. В свое время попытки перевести в жидкое состояние некоторые газы заканчивались безуспешно. Их даже назвали «постоянными газами» (аммиак, кислород, азот, хлор, водород, гелий). В 1823 г. М.Фарадею удалось превратить в жидкость хлор путем охлаждения его при повышенном давлении.

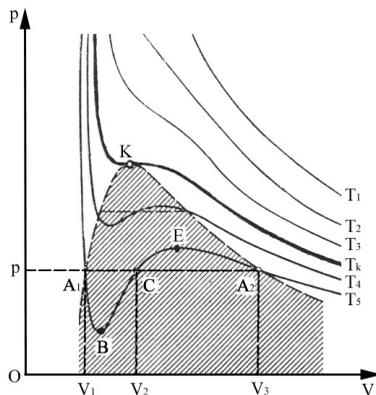


Рис. 2.7. Изотермы Ван-дер-Ваальса.
 T_k — критическая температура

Затем ученые добились сжижения кислорода. В 1898 г. английский физик Д.Ж.Дьюар получил жидкий водород. В 1908 г. в Голландии Г.Камерлинг-Оннес перевел в жидкое состояние гелий — последний газ, который до него никому не удавалось превратить в жидкость.

Стало понятным: для того чтобы перевести газ сжатием в жидкое состояние, надо сначала охладить его до температуры $T < T_{кр}$. При температуре выше критической газ не превращается в жидкость ни при каких давлениях.

Жидкости. Жидкость занимает некоторое промежуточное положение между кристаллами и газами. Молекулы (или другие частицы) упакованы в жидкости достаточно плотно, в особенности вблизи точки плавления, вследствие чего плотность жидкости всего лишь на 9—10% меньше плотности твердого тела, а у расплавленных металлов — всего лишь на 3% (плотность воды даже больше плотности льда на 9%).

Маленькие капельки росы на листьях растений также принимают форму почти правильных шариков. Такую же форму имеют капли воды на парафине.

Но из геометрии известно, что наименьшую площадь поверхности из всех тел равного объема имеет шар. Следовательно, в наших примерах **жидкость принимала такую форму, при которой площадь ее поверхности оказывалась минимальной.**

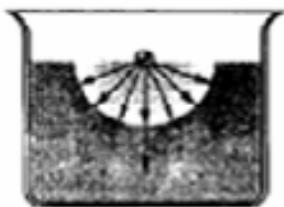


Рис. 2.8. Молекула на поверхности жидкости испытывает действие молекулярных сил этой жидкости — результирующая направлена внутрь жидкости

На молекулу, находящуюся в тонком слое вблизи поверхности жидкости, действуют силы как со стороны других молекул жидкости, так и со стороны молекул газа над поверхностью жидкости, но эти силы значительно меньше, поэтому равнодействующая всех сил направлена внутрь жидкости (рис. 2.8). Если молекула из глубины всплывает на поверхность, то совершается работа против равнодействующей межмолекулярных сил. Таким образом, поверхностная пленка обладает

поверхностным натяжением, характеризуемым коэффициентом σ . Из опытов с мыльными пленками (рис. 2.9) можно установить величину коэффициента поверхностного натяжения:

$$\sigma = F / l, \quad (2.6.2)$$

где l — длина растягиваемой пленки по периметру (в данном случае — длина подвижной перекладины).

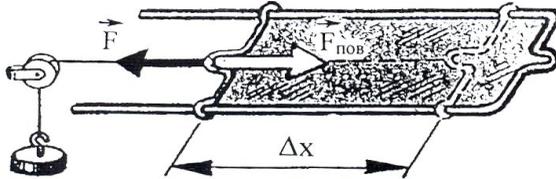


Рис. 2.9. Под действием внешней силы F мыльная пленка растягивается, перекладина смещается на величину Δx . Работа против поверхностных сил численно равна $\Delta x \cdot F_{\text{пов}}$

Коэффициент поверхностного натяжения σ может быть выражен в джоулях на квадратный метр либо в ньютонах на метр ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$): $1 \text{ Дж}/\text{м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}$.

$$[\sigma] = 1 \text{ Дж}/\text{м}^2 = 1 \text{ Н}/\text{м}.$$

Если на поверхность твердого тела капнуть каплю жидкости, то она либо растекается тонкой пленкой по твердому телу (в этом случае ее называют *смачивающей* данное твердое тело), либо жидкость не растекается, а стягивается в каплю (ее называют *не смачивающей* это тело). Смачивание наступает тогда, когда силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем силы взаимодействия между молекулами самой жидкости, явление несмачивания — в обратном случае.

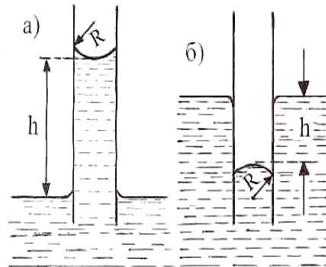


Рис. 2.10. Если жидкость смачивает стенки трубки, она поднимается в трубке (а), если не смачивает — то опускается (б)

На границе с твердым телом смачивающие и несмачивающие жидкости образуют кривые поверхности — мениски — соответственно с острым и тупым краевым углом. Смачивающая жидкость образует вогнутый, а несмачивающая — выпуклый мениск (рис. 2.10 а, б).

Если опустить в воду тонкую стеклянную трубку, называемую *капиллярной* (от лат. *capillus* — волос), то вода, которая смачивает стенки трубки, поднимается в ней на некоторую высоту h над ее уровнем в широком сосуде (рис. 2.10 а). Если аналогичный опыт провести с жидкостью, не смачивающей стенок трубки, то окажется, что уровень жидкости в капилляре будет ниже, чем в широком сосуде (рис. 2.10 б). Эти явления называются *капиллярными*.

Жидкость поднимается в капилляре под действием сил поверхностного натяжения. При полном смачивании (несмачивании) угол $\theta = 0$ (либо 180°) и мениск будет представлять собой полусферу, радиус которой r равен радиусу канала капилляра, в этом случае силы поверхностного натяжения $F_{\text{пов}} = \sigma \cdot 2\pi r$. Эти силы направлены вверх, заставляя жидкость подниматься. Поднятие жидкости прекращается, когда сила тяжести поднятого столба жидкости mg уравнивается силами поверхностного натяжения:

$$mg = \sigma \cdot 2\pi r .$$

Масса поднятого столба жидкости равна $m = \rho \cdot V = \rho \cdot \pi r^2 \cdot h$, где ρ — плотность жидкости; V — объем цилиндрического поднятого столба. Следовательно, $2\pi r \cdot \sigma = \rho \cdot g \pi r^2 h$, откуда

$$h = 2\sigma / \rho g ,$$

где r — высота, на которую поднимается жидкость в капилляре.

Капиллярные явления весьма распространены в природе. Такие вещества, как керамика, бумага, ткань, дерево, кожа, почва, различные строительные материалы и другие пористые тела, имеют в себе множество каналов. Вода и другие смачивающие вещества, придя в соприкосновение с такими телами, впитываются ими, поднимаясь по естественным капиллярам этих тел.

Осмотическое давление. Если раствор некоторого вещества и чистый растворитель в сосуде разделены полупроницаемой перегородкой, которая пропускает молекулы растворителя, но не пропускает молекул растворенного вещества (к таким перегородкам

относятся в большинстве случаев пленки растительного и животного происхождения), то через достаточно большой промежуток времени устанавливается равновесие, при котором молекулы растворителя свободно взаимодействуют между собой через полупроницаемую перегородку.

В результате общее давление с одной стороны перегородки, равное сумме давлений растворенного вещества и растворителя, больше, чем давление с другой стороны перегородки, равное давлению растворителя, уровень чистого растворителя установится ниже уровня раствора. (рис. 2.11).

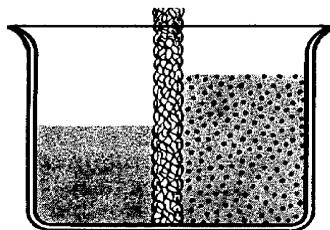


Рис. 2.11. Разность давлений между чистым растворителем и раствором по разные стороны перегородки (мембраны)

Это явление проникновения (диффузия) растворителя через полупроницаемую перегородку называется *осмосом* (от греч. *ostos* — толчок, давление). Разность давлений, которая возникает между областями, занятыми чистым растворителем, и раствором, разделенным полупроницаемой перегородкой, называется *осмотическим давлением*.

В разбавленных растворах молекулы растворенного вещества ведут себя, как в разреженном газе, поэтому осмотическое давление равно давлению разреженного газа этих молекул и рассчитывается по формуле для идеальных газов:

$$p_{осм} = nkT = \nu RT/V, \quad (2.6.3)$$

где n — концентрация молекул растворенного вещества в объеме V ; ν — число молей молекул. Иными словами, осмотическое давление $p_{осм}$ аналогично парциальному давлению какого либо газа, подмешенного (в малом количестве) другому газу, находящемуся при большом давлении p .

Формула (2.6.3) выражает *закон Вант—Гоффа*.

Приведем пример. Если животный пузырь, наполненный спиртом и завязанный, опустить в воду, то вода проникает внутрь пузыря. Пузырь раздувается и может лопнуть. Явление осмоса играет громадную роль в животном и растительном мире. Большинство перегородок в живых и растительных организмах являются

полупроницаемыми. Например, осмотическое давление в растительных клетках достигает нескольких атмосфер, благодаря чему жидкость из почвы может подниматься по стволу деревьев на большую высоту. Благодаря осмотическому давлению происходит переход воды из одних жидких сред в другие через соответствующие перегородки в организмах живых существ.

Взаимное превращение жидкостей и газов. Фазовые переходы (первого рода) — это процессы плавления, кристаллизации, испарения, конденсации и т.п. Эти процессы характеризуются тем, что при их осуществлении поглощается или выделяется теплота.

Рассмотрим процесс перехода из жидкой фазы в газообразную — процесс испарения. Процесс испарения заключается в том, что молекулы жидкости, обладающие наибольшей кинетической энергией, преодолев силы молекулярного притяжения, выходят через поверхность жидкости наружу. В результате этого средняя энергия оставшихся молекул в жидкости уменьшается, поэтому и процесс испарения будет сопровождаться охлаждением, это охлаждение определяет теплоту испарения. Одновременно происходит и противоположный процесс. Некоторые молекулы пара из воздуха проникают обратно в жидкость, происходит процесс *конденсации*. Оба противоположно идущих процесса происходят непрерывно. Если испарение более интенсивно, чем конденсация, то жидкость испаряется, если конденсация идет более интенсивно, то количество жидкости увеличивается. Может преобладать или первый, или второй процессы, но может быть и равновесие, состояние равновесия носит характер динамического равновесия: при таком равновесии за единицу времени испаряется столько же молекул, сколько их конденсируется.

Пар в состоянии равновесия называется *насыщенным паром*. Равновесная плотность паров данной жидкости, а следовательно, и их давление зависит только от температуры: с возрастанием температуры давление насыщенных паров быстро возрастает. Пар, давление которого ниже давления насыщенного пара при данной температуре, называется *ненасыщенным*.

При уменьшении объема, занимаемого насыщенным паром, концентрация его молекул увеличивается, и пар становится перенасыщенным.

Процесс испарения, идущий по всему объему жидкости, называется кипением. Для того чтобы началось кипение, жидкость должна содержать пузырьки воздуха или другого газа, система должна быть двухфазной, иначе кипение не может начаться.

Количество теплоты, необходимое для превращения при постоянной температуре 1 кг жидкости в пар, называется *удельной теплотой парообразования*. Удельная теплота парообразования обозначается буквой r . Зная эту величину, можно записать количество теплоты, необходимое для превращения в пар жидкости массой m :

$$Q = r \cdot m.$$

При конденсации выделяется такое же количество теплоты:

$$Q = -r \cdot m.$$

У воды очень велика удельная теплота парообразования: $r = 2,256$ МДж/кг. У других жидкостей удельная теплота парообразования меньше (в 3—10 раз меньше, чем у воды).

Теплота парообразования складывается из двух частей. Первая часть тратится на работу выхода молекул через поверхностный слой, вторая часть — на работу расширения, равную $p\Delta V$.

При длительном кипении можно получить состояние перегретой жидкости. Оно наступит, когда почти весь растворенный воздух будет унесен всплывающими пузырьками и новые пузырьки будут состоять почти из одного пара.

Процесс конденсации пара в жидкость, подобно кипению, также не может происходить в строго однофазной системе. Для начала конденсации необходима вторая фаза, которая может быть жидкостью, в которую переходят молекулы из газообразной фазы, либо должны быть центры конденсации в виде мельчайших пылинок, кристаллов или заряженных частиц — ионов. Молекулы пара, соприкасаясь с такими центрами конденсации, оседают на них, образуя мелкие, а затем и более крупные капли жидкости. Если очистить воздух, содержащий водяные пары, от пыли и других примесей, пропустив его через фильтр, и принять меры к недопущению образования ионов, то можно получить состояние перенасыщения, при котором нормальное давление водяных паров может быть в несколько раз больше равновесного давления. Относительная влажность такого перенасыщенного пара может

достигать 400—420%. Если теперь в объем, занятый таким перенасыщенным паром, ввести ионы и произвести адиабатное расширение, сопровождающееся охлаждением, то начнется конденсация на ионах. Именно на этом принципе основана работа *камеры Вильсона*, в которой можно наблюдать треки движения заряженных частиц.

Состояние же перегретой жидкости нашло применение в так называемых пузырьковых камерах — для регистрации космических частиц.

Относительная влажность воздуха. В атмосферном воздухе интенсивность испарения воды зависит от того, насколько близко давление паров воды к давлению насыщенных паров при данной температуре. Отношение давления паров воды (p) к давлению насыщенного водяного пара (p_0) при данной температуре, выраженное в процентах, называется *относительной влажностью* воздуха:

$$\varphi = \frac{p}{p_0} \cdot 100\%. \quad (2.6.4)$$

С небольшой погрешностью в формуле (2.6.4) вместо отношения давлений можно подставить отношение плотностей. Относительная влажность (100%) означает установление динамического равновесия между процессами испарения и конденсации воды.

Точка росы. Так как давление насыщенного пара тем ниже, чем ниже температура, то при охлаждении воздуха находящийся в нем водяной пар при некоторой температуре становится насыщенным. Температура, при которой находящийся в воздухе водяной пар становится насыщенным, называется *точкой росы*.

Плавление твердых тел. При нагревании твердого тела его температура повышается — сначала быстро, потом медленнее. Чем выше температура, тем больше потери теплоты в окружающее пространство; поэтому происходит замедление нагрева. Сообщаемая телу во время изотермического плавления теплота определяется формулой: $Q = \lambda \cdot m$, где λ — называется *удельной теплотой плавления*, для льда она составляет 335 кДж/кг.

При некоторой температуре T_0 начинается процесс плавления и, пока он идет, температура не меняется: сообщаемая телу теплота идет на разрушение кристаллической структуры данного тела.

На рисунке 2.12 изображена диаграмма трех фазовых состояний вещества. Равновесному состоянию между жидкостью и ее паром соответствует кривая испарения АК. Равновесие между твердым и жидким состояниями вещества характеризует кривая плавления АВ.

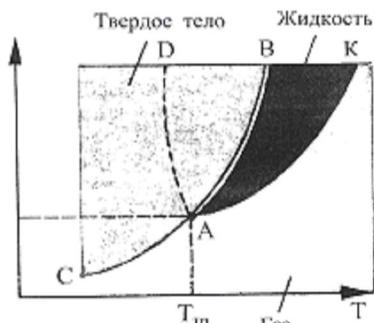


Рис. 2.12. Диаграмма трех фазовых состояний: АК — кривая испарения; АВ — кривая плавления; СА — кривая сублимации; точка А называется тройной

При давлениях и температурах, соответствующих точкам этой кривой, твердое тело и расплав, приведенные в соприкосновение, находятся в динамическом равновесии. Кривая СА на диаграмме состояний вещества

отвечает значениям давления и температуры, при которых устанавливается равновесие между процессами испарения молекул (атомов) твердого тела и конденсации их на поверхность твердого тела. Процесс испарения твердых тел называется *сублимацией*. Например, обледенелое белье на морозе сохнет — лед переходит прямо в пар, минуя жидкую фазу.

Кривые плавления и парообразования пересекаются в точке А. Эту точку называют *тройной точкой*, так как если при давлении $P_{тр}$ и температуре $T_{тр}$ некоторые количества вещества в твердом, жидком и газообразном состояниях находятся в контакте, то без подведения или отвода тепла количество вещества, находящегося в каждом из трех состояний, не изменяется.

Поскольку тройной точке соответствует вполне определенная температура, она может служить опорной (основной) точкой термометрической шкалы. Например, температура тройной точки воды равна 273,16 К (т.е. 0,01°C). Это позволило ввести в Международной системе единиц следующее определение единицы термодинамической (абсолютной) температуры 1 К: **один кельвин равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды.**

§ 2.7. Температура и тепловые факторы загрязнения

Одним из наиболее важных факторов, определяющих жизнедеятельность и распространение организмов по земному шару, является температура.

Для живых организмов большое значение имеет не только абсолютное количество тепла, но и тепловой режим, т.е. распространение тепла во времени. Только в тропических зонах тепловой режим сравнительно постоянен в течение всего года. К северу и югу сезонные и суточные колебания температур возрастают по мере удаления от экватора. Северное полушарие теплее южного, и термический экватор почти целиком лежит в северном полушарии; среднегодовые изотермы 30°C проходят только в северной и центральной Африке, именно поэтому данный материк обладает жарким климатом.

В тропических районах суточные колебания температуры превосходят годовые (разница между средними температурами самого теплого и самого холодного месяцев). Во внетропических зонах тепловой режим в течение года выражен четко: в северном полушарии январь наиболее холодный месяц, а июль теплый; в южном полушарии картина обратная.

Тот или иной вид приспособлен к существованию в сравнительно узком температурном диапазоне. Для каждого организма есть диапазон оптимальных температур, при которых наиболее активно протекают все его жизненные процессы и осуществляется интенсивный рост и развитие. Крайние минимальные и максимальные температуры нижнего и верхнего пессимумов называются соответственно нижним и верхним порогом развития. За его пределами развитие не происходит.

Например, для картофеля наивысшая продуктивность фотосинтеза достигается при температуре среды $+20^{\circ}\text{C}$; при температуре $+48^{\circ}\text{C}$ этот процесс полностью тормозится.

Известны виды, которые обитают в условиях сравнительно высоких и низких температур. Так, в горячих гейзерах Йеллоустонского национального парка (США) живут рыбы при $+70^{\circ}\text{C}$, а есть рыбы, которые водятся в холодных водоемах и способны переносить замораживание.

У хладнокровных животных, для которых характерен мигрирующий способ жизни, отмечено поведенческое регулирование температуры. Эти животные, как и растения, относятся к пойкилотермным, т.е. их температура тела обусловлена температурой среды.

Гомойотермные животные (млекопитающие, птицы) способны поддерживать постоянную оптимальную температуру тела за счет более высокого (по сравнению с пойкилотермными) уровня обмена веществ. Другим механизмом поддержания температурного гомеостаза у них является наличие термоизоляционного слоя (оперение, жир, шерстяной покров). Для гетеротермных животных физиолого-экологическая адаптация обеспечивается за счет низкого уровня потерь энергии во время зимней спячки и высокого обмена веществ в период активности. К таким животным относятся суслики, медведи, летучие мыши, барсуки, хомяки и др. Выделяют и эвритермные организмы — бактерии, лишайники, которые способны переносить значительные колебания температуры. Стенотермные организмы, напротив, весьма чувствительны и не могут адаптироваться даже к незначительным изменениям температур (растения и животные высокогорий, глубоководные организмы).

В настоящее время в результате хозяйственной деятельности человека происходит тепловое загрязнение биосферы. Остаток тепла от сжигания топлива, не использующийся по прямому назначению (например, для обогрева) и попадающий в воду и воздух, называется *тепловым загрязнением*. Это одна из форм физического загрязнения, происходящего в результате повышения температуры среды. Тепловое загрязнение возникает и как вторичный результат изменения химического состава воздуха (парниковый эффект).

Источниками теплового загрязнения могут быть теплотрассы, подземные газопроводы. Наибольший вклад в тепловое загрязнение вносят электростанции с охлаждением открытого типа (когда нагретая вода для охлаждения поступает в водоем). При сбрасывании горячих вод в реки и озера происходит повышение температуры воды, усиление эвтрофикации, изменения в балансе питательных веществ. Результатом этих изменений может стать смена фауны и флоры (появление теплолюбивых видов). На реках в зоне

сбросов горячих вод ценные местные виды рыб гибнут или откочевывают, появляются малоценные виды, в том числе даже аквариумные — гуппи, цихлиды. Повышение температуры воды в водоемах вследствие теплового загрязнения способствует также усилению токсичности многих ксенобиотиков.

Тепловое загрязнение может иметь и отдаленные последствия, оно ведет к упрощению экосистем, снижению биоразнообразия.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте первый и второй закон термодинамики. Приведите формулировки второго закона термодинамики, важные для экологии.

2. Сформулируйте принцип Ле Шателье—Брауна. В чем причины его нарушения в биосфере на современном этапе?

3. В чем суть закона максимизации энергии и информации?

4. Что такое «стрела времени»? В чем смысл термина «тепловая смерть Вселенной»?

Глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

§ 3.1. Электрическая активность живых организмов. Биопотенциалы

Среди четырех типов взаимодействий в природе (гравитационных, электромагнитных, ядерных и слабых) электромагнитные взаимодействия занимают первое место по широте и разнообразию проявлений. Этими взаимодействиями обусловлена структура материи в областях размером от 10^{-14} до 10^5 м. В повседневной жизни и технике мы чаще всего встречаемся с различными видами электромагнитных сил. Силы упругости и силы трения, хорошо известные в механике, — это тоже проявление электромагнитного взаимодействия.

А.Л.Чижевский (1897—1964), впервые установивший существование самого факта связи солнечной активности с процессами в биосфере, высказал также важную идею о том, что в механизме этой связи существенная роль должна быть отведена электромагнитным явлениям.

Различают биологическое действие электростатического (постоянного) поля, статического магнитного поля (магнитобиология) и переменного электромагнитного поля, которое еще называют электромагнитным излучением.

Все тела живой и неживой природы построены из атомов, в состав которых входят заряженные элементарные частицы: электроны и протоны. При этом заряд протона численно равен заряду электрона, но протон несет положительный заряд, а электрон — отрицательный.

Протоны вместе с нейтронами образуют положительно заряженное атомное ядро (напомним, что нейтроны — это нейтральные частицы, не имеющие электрического заряда). Вокруг ядра обращаются электроны, образующие электронную оболочку. Электрические силы взаимодействия связывают ядро и электронную оболочку в единую систему — электрически нейтральный атом (рис. 3.2).

Накопление избыточного заряда в теле называют *электризацией*. Тело электризуется положительно, если его атомы теряют электроны, и отрицательно, если тело принимает избыточные электроны извне.

Заряд тела Δq при электризации может иметь значения, кратные заряду e электрона, называемому, как отмечалось, *элементарным зарядом*:

$$\Delta q = Ne.$$

Элементарный заряд e является фундаментальной физической постоянной (наряду со скоростью света c , постоянной Планка h и другими). Численное значение элементарного заряда впервые определил Р.Милликен. В настоящее время для заряда электрона известно поразительно точное значение:

$$e = (1,6021917 \pm 0,0000070) \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Силовой характеристикой электрического поля является напряженность \vec{E} — векторная величина; на любую заряженную частицу со стороны поля действует электростатическая сила:

$$\vec{F} = q \vec{E}. \quad (3.1.1)$$

Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал. Потенциал данной точки поля равен работе, совершаемой полем при перемещении единичного положительного заряда из этой точки поля в бесконечность:

$$\varphi = \frac{W_p}{q} = \frac{A_\infty}{q}. \quad (3.1.2)$$

Если заряд q перемещается из точки с потенциалом φ_1 в точку с потенциалом φ_2 , то силы поля совершают работу:

$$A = -(W_{p_2} - W_{p_1}) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (3.1.3)$$

За единицу потенциала принят вольт (В):

$$1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}.$$

В некоторых разделах физики и химии широко применяется удобная внесистемная единица — *электронвольт (эВ)*. За 1 эВ принимается энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В. На основе формулы (3.1.3) находим:

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}. \quad (3.1.4.)$$

Наоборот, в 1 Дж содержится:

$$1 \text{ Дж} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 6,25 \cdot 10^{18} \text{ эВ}.$$

Диполь. Действие электрического поля на диполь. Понятие электрического диполя является чрезвычайно важным для понимания электрических процессов, происходящих как в живой, так и неживой материи.

Электрический диполь представляет собой жесткую систему двух равных по модулю точечных зарядов $+q$ и $-q$, расположенных на расстоянии l , называемом плечом диполя. Плечу l приписывается направление от заряда $-q$ к заряду $+q$ (рис. 3.1). Основная характеристика диполя — электрический (дипольный) момент \vec{p} :

$$\vec{p} = q \vec{l}. \quad (3.1.5)$$

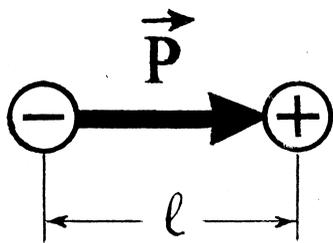


Рис. 3.1. Электрический диполь

$$\vec{p} = q \vec{l}$$

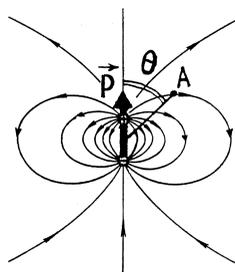


Рис. 3.2. Электрическое поле диполя

Диполь, в целом электрически нейтральный, образует вокруг себя электрическое поле, схематически показанное на рис. 3.2.

Молекулы в зависимости от электронной структуры могут либо иметь дипольный момент, либо не иметь. Молекулы, не обладающие электрическим моментом (молекулы с симметричным распределением заряда), называются *неполярными*, а молекулы, обладающие электрическим моментом, получили название *полярные*. Полярные молекулы электрически асимметричны (молекулы спиртов, эфиров и др.).

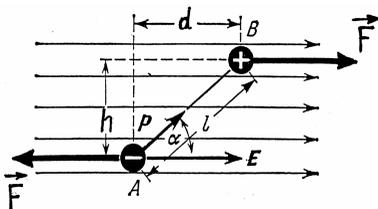


Рис. 3.3. Ориентирующее действие электрического поля на диполь

Внешнее электрическое поле стремится повернуть диполь так, чтобы векторы \vec{p} и \vec{E} стали параллельными ($\alpha = 0$, рис. 3.3). Такое положение диполя является устойчивым и соответствует минимальной энергии. Для поворота диполя в любое другое положение надо затратить энергию.

Ионы в жидких либо газообразных средах с полярными молекулами «обрастают» оболочкой из молекулярных диполей (рис. 3.4).

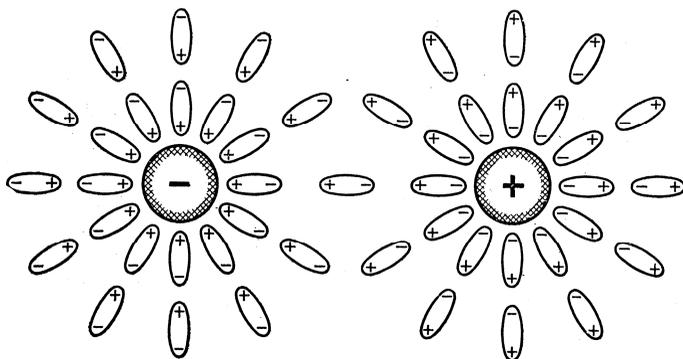


Рис. 3.4. Образование сольватных оболочек из полярных молекул вокруг иона

Поляризация диэлектриков. Если диэлектрик поместить в электрическое поле, например, между пластинами заряженного конденсатора, то на противоположных гранях диэлектрика, прилегающих к пластинам конденсатора, индуцируются так называемые *связанные* или *поляризационные* заряды разноименного знака (рис. 3.5). Эти заряды нельзя разделить: они связаны в атомах, молекулах, кристаллах и под действием поля могут лишь смещаться на очень малые расстояния (порядка атомных).

Процесс смещения положительных и отрицательных связанных зарядов диэлектрика в противоположные стороны называется *поляризацией*. Поле внутри диэлектрика в результате поляризации

ослабляется. Отношение силы, действующей на пробный заряд в вакууме F_0 и каком-либо диэлектрике F , называется диэлектрической проницаемостью среды (вещества) ε :

$$\varepsilon = \frac{F_0}{F} = \frac{E_0}{E}. \quad (3.1.6)$$

Диэлектрическая проницаемость воды $\varepsilon = 81$, диэлектрическая проницаемость тканей и жидкости живого организма за счет большого содержания в них воды близка к 80. Дипольный момент молекулы воды также высокий: $p = 6,2 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Свойства воды как растворителя объясняются именно наличием у ее молекул большого дипольного момента.

Для веществ из неполярных молекул характерна *деформационная (электронная) поляризация* — она сводится к относительному смещению электронного облака и ядра в каждой молекуле. В жидкостях и газах с полярными молекулами имеет место *ориентационная поляризация*.

В ионных кристаллах, в узлах которых расположены ионы разных знаков, можно условно выделить две подрешетки, образуемые соответственно положительными и отрицательными ионами. Под действием внешнего поля обе подрешетки сдвигаются в противоположные стороны, и на поверхности диэлектрика появляется связанный заряд. Ионные кристаллы способны также поляризоваться за счет деформации (пьезоэффект).

Прямой и обратный пьезоэффекты используют для преобразования электрических сигналов в механические и наоборот, например, в датчиках пульса, вибраций, микрофонах, телефонах, звукоснимателях, ультразвуковых излучателях.

Биопотенциалы. Биологические жидкости, циркулирующие в телах животных и растений, содержат значительное число носителей заряда — положительных и отрицательных ионов. Процессы обмена, непрерывно происходящие в живом организме, приводят к перераспределению зарядов в тканях и возникновению разности

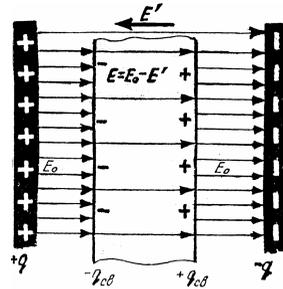


Рис. 3.5. Поляризация диэлектриков. Возникновение связанных зарядов

потенциалов, названных *биопотенциалами*. Все клетки животных и растительных организмов обладают тем или иным видом энергетической активности.

Для клеток в состоянии покоя характерна определенная разность потенциалов порядка 60—100 мВ (милливольт) между внутренним содержимым клетки и наружной средой. Образующийся двойной электрический слой создает в мембране (ее толщина 7—10 нанометров) сильное электрическое поле, которое, в свою очередь, оказывает влияние на ионообмен в клетках (рис. 3.6). Мембраны, таким образом, выступают в роли конденсаторов-накопителей электрической энергии. Емкость мембран велика и в расчете на 1 см² поверхности составляет порядка нескольких микрофард (мкФ).

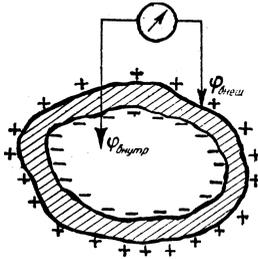


Рис. 3.6. Двойной электрический слой в мембране

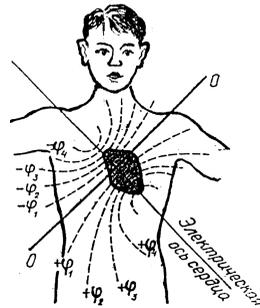


Рис. 3.7. Сердце как электрический диполь

При переходе ткани к активной деятельности проницаемость и электрическое состояние клеточных мембран резко меняется, в результате чего возникает импульс — электрический по своей природе, который распространяется по нервному волокну со скоростью 20 м/с. Способность превращать все внешние воздействия в электрические — универсальное свойство живого организма.

Сердце, например, ведет себя как электрический диполь, момент которого периодически меняется, образуя переменное электрическое поле в организме. Это позволяет регистрировать био-потенциалы поля сердечной мышцы на поверхности тела. На рис. 3.7 показаны эквипотенциальные поверхности электрического поля сердца. В этом как раз и состоят физические основы *электрокардиографии*. С электродов, размещенных на участке тела с различными

потенциалами, снимают слабый электрический сигнал, периодически меняющийся во времени. Каждый орган имеет специфическое электрическое поле и характерные потенциалы действия, отражающие его функциональное состояние. Их регистрация используется для физиологических исследований. Кроме электрокардиографии большое значение приобрела регистрация биопотенциалов мозга — *электроэнцефалография*, мышц — *электромиография*.

Исследования показывают, что тело рыб является своего рода электрическим диполем, образующим в окружающей среде электрическое поле. Некоторые виды рыб: электрический угорь, скат, сом и др. — имеют специальный орган для накопления электрической энергии — своеобразную батарею конденсаторов из множества чередующихся прослоек нервной (проводящей) и соединительной (непроводящей) ткани.

Таким образом, все жизненно важные процессы в живых организмах теснейшим образом связаны с электрическими эффектами. Этим, в первую очередь, можно объяснить тот факт, что внешние электрические поля могут в определенной степени влиять на эти процессы.

Так, постоянное электрическое поле может ускорять фотосинтез и рост растений (если линии напряженности поля направлены сверху вниз) или замедлять их (при обратной полярности). Изменение околосреднего поля в результате различных атмосферных явлений — циклоны, грозы и т.д. — приводит к перераспределению зарядов в организме человека и влияет на его состояние. По существу, человеческий организм — это электромагнитная система.

Клетки вырабатывают энергию в системе клеточного дыхания. Процесс превращения глюкозы в углекислоту, при котором выделяется энергия, идет с участием электрически заряженных частиц — ионов. Этот процесс называется биологическим окислением. Можно сказать, что энергия в клетке производится по электрической технологии.

Вторым жизненно важным вопросом для клетки является вопрос ее общения с внешним миром. И этот вопрос решен с использованием технологии, созданной на электрической основе. Дело в том, что сама мембрана находится под электрическим напряжением, как будто к ней подключена электрическая батарейка. Электрическая батарейка создается электрическими зарядами, которые несут на

себе ионы калия и ионы натрия, растворенные в воде и находящиеся по обе стороны мембраны. При этом внутри клетки в водном растворе содержатся ионы калия, а вне ее — ионы натрия. В мембране создается электрическое поле, на наружной стороне мембраны плюс, а на внутренней — минус.

Таким образом, не только технология образования энергии в клетке, но и регулировка ее общения с внешним миром происходит благодаря действию электрического потенциала, создаваемого движением и определенным распределением электрических зарядов.

§ 3.2. Примеры воздействия статического электричества

В повседневной жизни мы сталкиваемся с электростатическими полями, которые могут иметь как малые значения, так и высокие.

При соприкосновении разнородных тел электроны могут перейти с одного тела на другое, так как значения сил, которые их удерживают в каждом из тел, различны. Плотный контакт таких тел при трении может привести к значительной их электризации вследствие перераспределения электронов.

В земных условиях воздух практически всегда содержит некоторое количество ионов, благодаря природным ионизаторам, главным образом, радиоактивным веществам в почве и газах и космическому излучению. Ионы и электроны, находящиеся в воздухе, могут, присоединяясь к нейтральным молекулам и взвешенным частицам, образовывать более сложные ионы. Ионы в атмосфере получили название *аэроионы*. Их условно делят на легкие (газовые ионы) и тяжелые (взвешенные заряженные частицы — пылинки, частицы дыма и влаги).

Тяжелые ионы вредно действуют на организм. Легкие и, в основном, отрицательные аэроионы оказывают благотворное влияние, их используют, в частности, для лечения — *аэроионотерапия*. Различают естественную аэроионотерапию, связанную с пребыванием больного в природных условиях с повышенной ионизацией воздуха (горы, водопады и пр.), и искусственную. Разновидностью искусственной аэроионотерапии является электростатический душ (франклинизация). При франклинизации применяют постоянное электрическое поле высокого напряжения — до 50 кВ. Лечебное действие

оказывают образующиеся при этом аэроионы и небольшое количество озона.

§ 3.3. Магнитное поле и живой организм.

Биологическое действие постоянных магнитных полей

Впервые в опытах Х.К.Эрстеда, в 1820 г., было установлено, что вокруг проводника с током существует магнитное поле. В том же году А.М.Ампер установил, что проводники с током взаимодействуют друг с другом, будучи расположены на некотором расстоянии (благодаря наличию магнитного поля вокруг каждого проводника).

Магнитное поле представляет собой вид материи, посредством которого осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов. Магнитное поле сопутствует любому переносу зарядов в рассматриваемой системе координат: току в проводниках, жидкостях и газах, движению электронов или ионов в вакууме, перемещению заряженного тела. Вокруг покоящихся в данной системе координат зарядов магнитное поле не обнаруживается.

Силовые линии магнитного поля являются всегда замкнутыми сами на себя. Поля с замкнутыми силовыми линиями называют *вихревыми*. Магнитное поле — вихревое поле. Замкнутость линий магнитного поля представляет собой фундаментальное свойство этого поля. Силовые линии магнитного поля прямого тока представляют собой concentрические окружности (с центром на оси провода), а линии магнитного поля длинной катушки (соленоида) подобны магнитному полю прямого магнита (рис. 3.8).

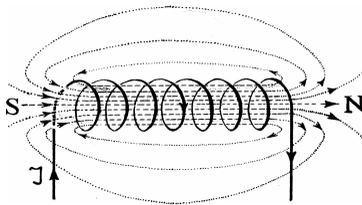


Рис. 3.8. Магнитное поле соленоида подобно полю прямого (стержневого) магнита

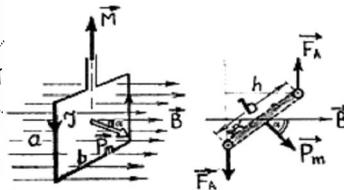


Рис. 3.9. Ориентирующее действие магнитного поля на рамку с током

Согласно закону Ампера сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле, численно равна:

$$F_A = I\Delta l B \sin \alpha, \quad (3.3.1)$$

где I — сила тока в проводнике, Δl — длина проводника, B — индукция внешнего магнитного поля, α — угол между направлением тока и вектором \vec{B} . Вектор магнитной индукции \vec{B} является основной силовой характеристикой магнитного поля, аналогичной вектору напряженности \vec{E} для электрического поля. Модуль вектора \vec{B} на основе закона Ампера при взаимной перпендикулярности проводника и силовых линий магнитного поля ($\sin \alpha = 1$) равен:

$$B = \frac{F_A}{I\Delta l}. \quad (3.3.2)$$

Единицей магнитной индукции является тесла (Тл):

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Замкнутый контур с током под действием сил Ампера разворачивается таким образом, что положительная нормаль рамки устанавливается параллельно силовым линиям внешнего магнитного поля (рис. 3.9), такое положение рамки с током во внешнем магнитном поле является устойчивым.

Опыт показывает, что максимальное значение момента сил M_{\max} , поворачивающего свободный контур, равно:

$$M_{\max} = BIS = BP_m,$$

где величина $P_m = IS$ называется магнитным моментом замкнутого контура (эта величина аналогична дипольному моменту и является вектором, рис. 3.10).

Таким образом, величина индукции равна:

$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}. \quad (3.3.3)$$

Сила Лоренца. Действие сил Ампера на проводник с током означает, что на каждую из заряженных частиц, участвующих в переносе заряда, также действует некоторая сила f_l со стороны магнитного поля. Выражение для этой силы впервые вывел Х.А.Лоренц.

Его можно получить, если взять отношение силы Ампера, действующей на проводник с током, к числу N носителей заряда в нем:

$$f_{\text{л}} = \frac{F_A}{N} = qvB \sin \alpha, \quad (3.3.4)$$

где q — положительный заряд частицы, v — ее скорость, B — индукция магнитного поля, α — угол между вектором скорости \vec{v} и вектором \vec{B} .

Направление силы Лоренца (как и направление силы Ампера) определяется по правилу левой руки. Направления силы Лоренца, действующей на положительный и отрицательный заряды, показаны на рис. 3.11.

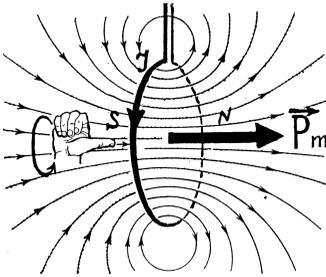


Рис. 3.10. Магнитный момент кругового тока.

Вектор \vec{P}_m и направление тока подчиняются правилу буравчика

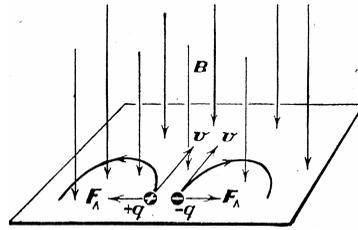


Рис. 3.11. Действие силы Лоренца на заряженные частицы: направление силы Лоренца подчиняется правилу левой руки (правилу буравчика)

Характерной особенностью силы Лоренца является то, что она, будучи всегда перпендикулярной к вектору скорости \vec{v} , не совершает работы и не изменяет кинетической энергии свободной частицы; сила Лоренца сообщает заряженной частице центростремительное ускорение, частица равномерно движется по окружности радиусом R :

$$R = \frac{mv}{qB}. \quad (3.3.5)$$

Электрические и магнитные поля позволяют управлять движением заряженных частиц в электронных микроскопах, телевизорах, ускорителях и т.д. Сила, действующая на заряженную частицу

со стороны электрического и магнитного полей, выражается формулой Лоренца:

$$\vec{f} = q \vec{E} + \vec{f}_л. \quad (3.3.6)$$

На действии магнитного поля на заряженные частицы основана работа таких приборов, как масс-спектрометры, камера Вильсона, пузырьковая камера и др.

Магнитное поле для заряженных частиц может явиться своеобразной «магнитной ловушкой»: попав в такое поле, частица не может покинуть его, — двигаясь по спирали, она как бы «навивается» на линии магнитной индукции. Этот эффект используется для удержания от рассеивания высокотемпературной плазмы (известные установки типа ТОКАМАК).

Магнитное поле Земли является также ловушкой для потоков заряженных частиц из космоса. Наша планета постоянно подвергается бомбардировке заряженными частицами высоких энергий, приходящими из космического пространства. В основном, это поток протонов, электронов, α -частиц, а также более тяжелых атомных ядер. Различают *галактические космические* лучи и *солнечные космические* лучи. Потоки солнечных частиц особенно обильны в периоды сильных возмущений (магнитных бурь) на поверхности Солнца и образуют так называемый *солнечный ветер*. Но благодаря магнитному полю Земли большая часть заряженных частиц не достигает поверхности Земли, частицы «навиваются» на силовые линии магнитного поля, дрейфуя в пространстве от полюса к полюсу (см. Практическая работа № 5).

Интересным явлением, связанным с движением заряженных частиц в магнитном поле Земли, является *полярное сияние*. Полярные сияния разной формы и окраски возникают на высотах от 80 до 1000 км. Их образование связано с тем, что в полярных областях частицы, двигаясь вдоль линий индукции магнитного поля, которые там почти перпендикулярны поверхности, проникают в атмосферу. Частицы бомбардируют молекулы воздуха, ионизируют их и возбуждают свечение. Цветовые оттенки полярного сияния обусловлены свечением различных газов атмосферы. Во время солнечных возмущений число заряженных частиц, достигающих верхних слоев атмосферы, резко возрастает, и тогда можно наблюдать величественное зрелище наиболее интенсивных полярных сияний.

Захваченные магнитным полем Земли, заряженные частицы образуют вокруг Земли *радиационные пояса*. Эти пояса также являются своеобразной защитой для всего живого на Земле от мощных потоков космических лучей.

Отметим, наконец, что магнитное поле Земли под воздействием солнечного ветра сильно деформируется. В результате силовые линии земного поля искажаются в направлении к Солнцу настолько сильно, что магнитосфера резко обрывается на расстоянии 8—10 земных радиусов; в направлении же от Солнца силовые линии образуют длинный геомагнитный хвост в пространстве (рис. 3.12).

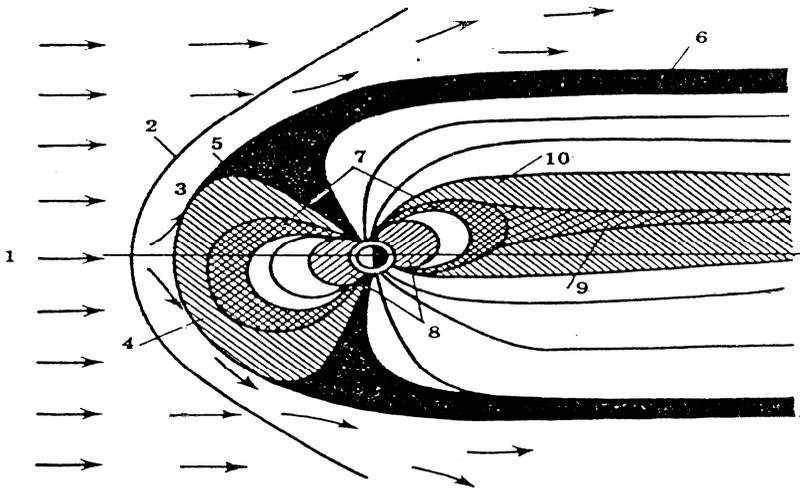


Рис. 3.12. Столкновение солнечного ветра с земным магнитным полем. Солнечный ветер «выдувает» земное магнитное поле в противоположную сторону от Солнца

§ 3.4. Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция

В 1831 г. английский физик М.Фарадей в результате настойчивых опытов получил электрический ток в замкнутом проводочном контуре, воздействуя на него магнитным полем (по его словам, «превратил магнетизм в электричество»). Явление возникновения тока в контуре было названо *электромагнитной индукцией*,

а полученный ток — *индукционным*. Это фундаментальное открытие выявило неразрывную связь электрических и магнитных явлений.

Причиной возникновения индукционного тока является ЭДС индукции ε_i , возникающей в контуре. Закон Фарадея выражается формулой:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.4.1)$$

ЭДС индукции определяется быстротой изменения во времени магнитного потока, пронизывающего контур. Формула (3.4.1) справедлива для всех возможных случаев изменения магнитного потока. Напомним, что магнитным потоком Φ называется число силовых линий индукции, пронизывающих площадку ΔS :

$$\Phi = B\Delta S \cos \alpha, \quad (3.4.2)$$

где α — угол между направлением нормали n к поверхности S и вектором магнитной индукции \vec{B} . Единица измерения магнитного потока — вебер (Вб): $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$.

Знак минус в законе Фарадея (3.4.1) связан с полярностью возникающей ЭДС, а следовательно, с направлением индукционного тока. Согласно правилу Ленца возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем всегда противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.

Согласно Дж.Максвеллу любое переменное во времени магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Это поле и является причиной появления в проводнике индукционного тока. Наличие проводника лишь помогает выявить это электрическое поле.

Электрическое поле, возбуждаемое нестационарным магнитным полем, не связано с зарядами и имеет замкнутые линии напряженности, т.е. является *вихревым*.

Явление самоиндукции состоит в возбуждении ЭДС в контуре при изменении в нем тока: всегда при включении либо выключении цепи в ней возникает ЭДС самоиндукции. Магнитный поток, связанный с контуром, пропорционален протекающему в нем току: $\Phi = LI$, где L — индуктивность контура.

Если за время Δt ток в контуре изменился на величину ΔI , то изменение магнитного потока равно: $\Delta\Phi = L\Delta I$, на основании закона Фарадея ЭДС самоиндукции будет равна:

$$\varepsilon_s = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (3.4.3)$$

Индуктивность L измеряется в генри (Гн), из формулы (3.4.3) вытекает:

$$1 \text{ Гн} = 1 \frac{\text{Вс}}{\text{А}}.$$

При замыкании электрической цепи, когда в ней нарастает ток (следовательно, растет и магнитное поле), источник тока тратит часть энергии на создание магнитного поля. Работа, совершенная источником тока за время установления тока, определяется формулой:

$$A = \frac{LI^2}{2}.$$

Если в цепи имеется катушка, обладающая большой индуктивностью L , то эту катушку можно рассматривать как своеобразный резервуар энергии:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu} V. \quad (3.4.4)$$

Материальным носителем этой энергии является магнитное поле. В формуле (3.4.4) B — индукция магнитного поля внутри катушки, V — объем катушки.

Магнитные свойства вещества. Любое вещество при введении его в магнитное поле намагничивается. Это означает, что в веществе создается собственное магнитное поле. Магнитные свойства любого вещества обусловлены магнетизмом атомов или молекул, из которых это вещество состоит. Магнетизм же молекул, согласно гипотезе Ампера, объясняется так называемыми молекулярными токами. Гипотеза Ампера оказалась верной, хотя строение атомов и молекул не было тогда еще известно. Теперь мы понимаем природу молекулярных токов. Согласно планетарной модели атома Резерфорда—Бора, каждая электронная орбита в атоме является круговым током и создает собственный магнитный

момент. Затем выяснилось, что магнитным моментом обладает всякий свободный электрон (не находящийся в атоме), наличие этого момента связано со спином (*spin* — веретено, вращение), что эквивалентно некоторой дополнительной внутренней степени свободы, имеющей квантовую природу.

В настоящее время считают, что спин (и спиновый магнитный момент) — это такие же неотъемлемые и фундаментальные свойства электрона, как свойство иметь массу и заряд. Наличие у электрона спина доказано целым рядом независимых опытов.

Таким образом, магнитный момент атома (молекулы) является в общем случае векторной суммой орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов, входящих в состав данного атома (молекулы):

$$\vec{P}_{mat} = \vec{P}_{ml(orb.)} + \vec{P}_{ms(спин)} .$$

Здесь же подчеркнем, что у спаренных электронов магнитный момент равен нулю (скомпенсирован). Завершенные электронные слои также не обладают магнитным моментом (он скомпенсирован).

Все вещества по их поведению в магнитном поле можно разделить на три типа (класса).

1. Диамагнетики. Вещества этой группы отличаются тем, что атомы данных веществ не имеют магнитных моментов: $\vec{P}_{mat} = 0$. При помещении в магнитное поле магнитный момент у них возникает (индуцируется) за счет действия поля на каждую отдельную электронную орбиту, в результате диамагнетики слабо намагничиваются против внешнего поля:

$$B = \mu B_0, \quad \mu < 1 .$$

К диамагнетикам относятся все инертные газы, поскольку у них заполнены электронные оболочки. Некоторые твердые тела в силу электронного строения их атомов также диамагнитны (например, стекло, кварц, медь, свинец, висмут, серебро). К диамагнетикам относится вода.

2. Парамагнетики. Это вещества, у которых каждый атом обладает магнитным моментом. Но в силу теплового хаотического движения, пока не наложено внешнее магнитное поле, магнитные моменты атомов ориентированы беспорядочно — тело не намагничено. При наложении внешнего магнитного поля магнитные моменты

атомов стремятся сориентироваться в направлении поля, что приводит к намагничиванию вещества. В парамагнетике появляется собственное магнитное поле, направленное в ту же сторону, что и внешнее поле, магнитное поле внутри парамагнетика равно:

$$B = \mu B_0, \quad \mu > 1.$$

3. Ферромагнетики. Ферромагнетизм имеет спиновую природу, ферромагнитные свойства вещества определяются не столько свойствами атомов, сколько особой структурой кристаллической решетки. Причиной сильного намагничивания ферромагнетиков является наличие доменов — областей самопроизвольной намагниченности (их размер $\approx 10^{-2}$ мм). В пределах домена спиновые магнитные моменты электронов сориентированы в строго определенном направлении. Таким образом, каждый домен является носителем локального (высокого) магнитного поля. Для ферромагнитных материалов характерна остаточная намагниченность, благодаря которой при перемагничивании ферромагнетика возникает так называемая петля гистерезиса; форма гистерезисной петли определяет область применения того или иного ферромагнетика.

К ферромагнетикам относятся такие сильномагнитные кристаллические вещества, как железо — Fe, никель — Ni, кобальт — Co, гадолиний — Gd и многие другие сплавы. Нагревание кристалла до температуры Кюри (и выше) приводит к разрушению доменов, и ферромагнитные свойства вещества пропадают.

§ 3.5. Действие магнитного поля на живой организм

К настоящему времени накоплено большое количество опытных фактов, свидетельствующих о влиянии магнитных полей — как сильных, так и слабых — на биологические тела.

Ткани организма в значительной степени диамагнитны, подобно воде, однако имеются и парамагнитные вещества. Ферромагнитных частиц в организме нет.

Биотоки, возникающие в организме, являются источниками слабых магнитных полей. В некоторых случаях индукции таких полей удается измерить. Так, например, на основании регистрации временной зависимости индукции магнитного поля сердца (биотоков сердца) создан диагностический метод — *магнитокардиография*.

Естественно, что первичными во всех случаях при таких воздействиях являются физические или физико-химические процессы. Такими процессами могут быть ориентация молекул, изменение концентрации молекул или ионов в неоднородном магнитном поле, силовое воздействие на ионы, перемещающиеся вместе с биологической жидкостью.

В последнее время экспериментально изучается влияние магнитного поля на свойства крови, интенсивность водного обмена, активность многих ферментов.

Поверхностным электрическим зарядом обладают клетки крови: эритроциты, лейкоциты и тромбоциты. Поэтому кровь в движении представляет собой электромагнитную систему. В работах А.Л. Чижевского впервые было показано, что эритроциты внутри сосудистого русла перемещаются не поступательно, а катятся (эритроциты имеют форму диска с несколько вогнутыми по направлению к оси диска стенками). При этом они сближаются своими вогнутыми сторонами, образуя кольцо. Когда эритроциты вращаются, то их электрические заряды создают конвективные электрические токи. Эти токи порождают магнитное поле. Поэтому каждый эритроцит является не только электрически заряженным диском, но еще и магнитом.

Отсюда можно сделать вывод, насколько эта электрическая система — какой является наша кровь — не защищена от действия электрических и магнитных полей. Под воздействием электромагнитного поля изменяется электрический состав крови (электрический заряд эритроцитов уменьшается), это приводит к нарушению метаболизма, увеличивается вязкость крови.

Таким образом, внешние и внутренние факторы действуют на весь организм прежде всего через кровь, через те изменения в крови, которые происходят под их действием.

Считается, что воздействие внешнего магнитного поля на биосистему носит, как правило, информационный характер, то есть под действием внешнего магнитного поля меняется скорость и характер передачи информации внутри организма.

С магнитным полем Земли связано воздействие космических факторов на земную атмосферу, а также живое вещество биосферы (вирусы, микроорганизмы, грибы, растения, животные и человек). Живые организмы широко используют чувствительность

к магнитным полям во взаимоотношениях с внешней средой. Магнитное поле Земли, в котором в естественных условиях находятся все живые организмы биосферы, не остается постоянным, оно меняется в результате действия на него солнечного ветра. Существуют суточные, сезонные, годовые возмущения магнитного поля Земли, которые оказывают влияние на жизнедеятельность организма. Доказано влияние магнитосферы на урожайность растений, то есть продуктивность экосистем. В Прибалтике проведены исследования по изучению численности грызунов: увеличение их численности связано с периодами активности магнитного поля Земли. Магнитные поля оказывают влияние на ориентацию насекомых, птиц, рыб, млекопитающих. Процесс ориентации лежит в основе механизмов миграции животных. Миграционные процессы являются одним из важных факторов регуляции динамики популяции и устойчивости экосистемы.

§ 3.6. Постоянный и переменный ток. Действие электрического тока на живой организм

Электрическим током называется направленное движение электрических зарядов. Различают ток проводимости и конвективный ток.

Основной характеристикой тока является сила тока, численно равная заряду, протекающему через поперечное сечение проводника за единицу времени. Если сила тока I постоянная, то:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (3.6.1)$$

В общем случае вводится понятие мгновенного значения силы тока:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (3.6.2)$$

т.е. сила тока определяется производной заряда по времени. Единица силы тока — ампер (А): $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$.

Исторически сложилось, что направление тока принято определять по направлению движения положительных носителей.

Для электрических цепей постоянного тока справедливы законы:

1. Закон Ома для однородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.6.3)$$

2. Закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (3.6.4)$$

3. Закон Джоуля—Ленца:

$$Q = I^2 R \Delta t. \quad (3.6.5)$$

Для цепей переменного тока справедливы законы Ома и Джоуля—Ленца, но только для мгновенных значений силы тока, напряжения и ЭДС.

Закон Ома для цепи, состоящей из резистора, конденсатора и катушки, выражается формулой:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad (3.6.6)$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$ — полное сопротивление цепи переменного тока, называемое еще импедансом.

Ток в газе. Ионизация молекул. Плазма, ее использование. Газ, состоящий только из нейтральных частиц, является изолятором. Если его ионизировать, то он становится электропроводным.

Процесс протекания электрического тока через газ называют *газовым разрядом*.

Чтобы ионизовать нейтральный атом, следует совершить некоторую работу A_i по отрыву электрона, равную энергии ионизации:

$$A_i = e\varphi_i,$$

где φ_i — ионизационный потенциал. Работу ионизации принято выражать в электрон-вольтах; в этом случае A_i и φ_i численно равны. Например, для атомов водорода $A_i = 13,6$ эВ, потенциал ионизации $\varphi_i = 13,6$ В.

Ионизированный газ с высокой концентрацией заряженных частиц, но в целом не имеющий избыточного заряда (квази-нейтральный), называется *плазмой*.

Плазма обладает рядом специфических свойств, что позволяет рассматривать ее как особое, четвертое состояние вещества:

1. В отличие от нейтрального газа, между молекулами которого существуют короткодействующие молекулярные силы, между заряженными частицами плазмы действуют кулоновские силы. Каждая частица взаимодействует сразу с большим количеством окружающих частиц, благодаря этому наряду с беспорядочным (тепловым) движением частицы плазмы могут участвовать в разнообразных упорядоченных (коллективных) движениях.

2. В плазме легко возбуждаются разного рода колебания и волны.

3. Проводимость плазмы увеличивается по мере роста степени ионизации. При высокой температуре полностью ионизированная плазма по своей проводимости приближается к сверхпроводникам.

Различают плазму низкотемпературную, или холодную ($T \approx 10^4$ — 10^5 К), и высокотемпературную, или горячую ($T \approx 10^8$ К). Солнце и другие звезды состоят из полностью ионизированной плазмы, температура в центре звезд достигает 100 млн. градусов и выше. Плазмой окружена также наша планета, что оказывает существенное влияние на взаимодействие биосферы с космосом.

Действие электрического тока на живой организм. Тело человека (как и любой организм) является хорошим проводником электрического тока. Однако по проводимости организм очень неоднороден, в нем сложным образом чередуются хорошо проводящие участки (нервные ткани, биологические жидкости, содержащие значительное количество ионов) и участки с низкой проводимостью (кожа, костная и связочная ткани, оболочки клеток). Внутри организма ток распространяется в основном по кровеносным и лимфатическим сосудам, мышцам. Наибольшей проводимостью обладают нервные волокна, поэтому даже слабый ток является своеобразным «ударом» для нервной системы. В целом сопротивление зависит прежде всего от состояния кожи в местах прикосновения электродов.

Опасность для организма представляет не само напряжение, а протекающий электрический ток, особенно постоянный, который оказывает на ткани раздражающее воздействие, вызывает непроизвольное сокращение мышц, параличи, расстройства дыхания, кровообращения. Особенно опасно, если ток проходит через жизненно важные органы — сердце, мозг. Если ток протекает между руками

через сердце, то при силе тока $I \approx 0,025$ А наступает расстройство дыхания (сокращение мышц грудной клетки), при $I \approx 0,08$ А — аритмия сердца, при $I \approx 0,1—0,4$ А — фибрилляция желудочков сердца, а при $I \approx 0,4—10$ А — обратимая остановка сердца. Опасно братья за оголенный провод, находящийся под напряжением (создается цепь: провод—человек—земля); человек не в состоянии выпустить провод из-за сильного сокращения мышц. Сильные токи приводят к тяжелым ожогам.

Раздражающее действие слабых токов используют при физиологических исследованиях, а также для лечебных целей. Сильные электрические импульсы применяются для раздражения сердца после его остановки.

§ 3.7. Электромагнитное излучение. Основные свойства электромагнитных волн

Обобщая результаты опытов Эрстеда по воздействию электрического тока на магнитную стрелку, опытов Фарадея по электромагнитной индукции и других опытов, Максвелл создал в рамках классической физики теорию единого электромагнитного поля.

В основе теории Максвелла лежат два положения:

1. Всякое переменное во времени магнитное поле порождает вихревое электрическое — это основной закон электромагнитной индукции.

2. Всякое переменное во времени электрическое поле порождает вихревое магнитное. Переменное электрическое поле было названо Максвеллом током смещения, так как оно, подобно обычному току, вызывает магнитное поле, вихри которого охватывают линии напряженности электрического поля.

Фундаментальные законы природы, к числу которых относятся открытые Максвеллом законы электромагнетизма, привели к понятию электромагнитной волны.

Из теории Максвелла вытекало, что наличие ускорения у зарядов — главное условие излучения электромагнитных волн. Ускоренное перемещение заряда вызывает «всплеск» электромагнитного поля, который, распространяясь, охватывает все большие и

большие области окружающего пространства, перестраивая по ходу то поле, которое существовало до смещения заряда.

Электромагнитная волна является поперечной: векторы \vec{E} и \vec{B} в электромагнитной волне перпендикулярны друг к другу и перпендикулярны направлению распространения волны.

Экспериментальное подтверждение теории Максвелла было получено в опытах Г.Герца. Для получения электромагнитных волн Герц использовал простое устройство, называемое вибратором Герца (переменный диполь). Экспериментируя с вибраторами, Герц установил основные свойства электромагнитных волн. Опыты Герца блестяще подтвердили предсказания Максвелла. Дальнейшие исследования многих ученых привели к открытию электромагнитной природы различных видов излучений, которые отличаются друг от друга частотой и условиями возникновения.

§ 3.8. Шкала электромагнитных волн

На рис. 3.13 приведена шкала электромагнитных волн, простирающаяся от длинных радиоволн до очень коротких гамма-лучей.

Низкочастотные волны (их часто называют шумы) возникают при работе любого электрического устройства (двигатели, генераторы, трансформаторы и т.д.).

Радиоволны — характеризуются длиной волны от 10 км до долей миллиметра. Регистрируются они с помощью колебательного контура.

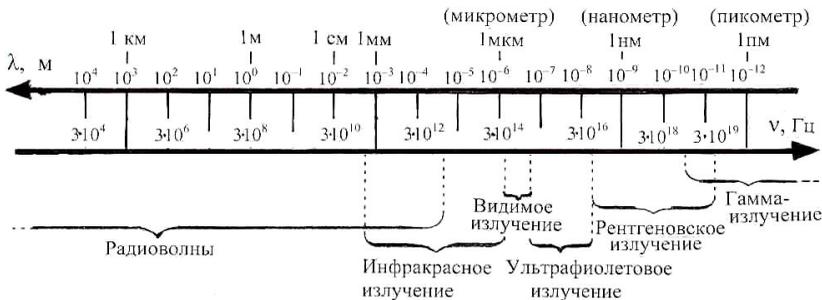


Рис. 3.13. Шкала электромагнитных волн

Инфракрасные лучи (ИК-лучи) — имеют длину волны от 1 мм до 760 нм (нанометров). Различают две области ИК-лучей: ближнюю (760—5000 нм) и дальнюю (5000 нм—1 мм).

Регистрируются ИК-лучи с помощью тепловых приемников — термопар и болометров, фотоэлементов и фотосопротивлений, специальных фотопластинок.

Видимое излучение — это электромагнитные волны, воспринимаемые глазом (видимый свет). Длины волн видимого света лежат в диапазоне от 380 до 760 нанометров. Длины световых волн, соответствующие основным цветам видимого спектра, приведены в таблице (в нанометрах и ангстремах; ангстрем — это внесистемная единица, часто употребляемая в оптике: $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм} = 10^{-10} \text{ м}$; $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA}$). С изменением длины цвета плавно переходят друг в друга, образуя множество промежуточных (средний человеческий глаз начинает различать разницу в цветах при $\lambda \geq 2 \text{ нм}$).

Цвет	Длина волны	
	нм	Å
Красный	760—620	7600—6200
Оранжевый	620—590	6200—5900
Желтый	590—575	5900—5750
Зеленый	575—510	5750—5100
Голубой	510—480	5100—4800
Синий	480—450	4800—4500
Фиолетовый	450—380	4500—3800

Ультрафиолетовое излучение (УФ-лучи) занимает в спектре электромагнитных волн участок между фиолетовой областью видимого излучения (400 нм) и рентгеновским излучением (10 нм).

Естественными источниками ультрафиолетового излучения являются Солнце, звезды, туманности. Искусственными источниками являются нагретые до температуры 3000 К и выше твердые тела, высокотемпературная плазма. Для практических применений используются ртутные и ксеноновые лампы с баллоном из кварцевого стекла.

Для обнаружения и регистрации УФ-лучей используются фотоэлементы, фотопластинки, фотосопротивления и другие приборы.

Специфические свойства ультрафиолетового излучения проявляются при его взаимодействии с веществом. Ультрафиолетовое излучение сильно поглощается атмосферой Земли. Например, к поверхности Земли достигается лишь его длинноволновая часть, коротковолновая часть задерживается слоем озона, находящегося в верхних слоях атмосферы ($h \approx 25$ км).

УФ-лучи оказывают сильное биологическое действие. Малые дозы оказывают благотворное действие на организм человека — способствуют образованию витаминов группы Д, улучшают иммунобиологические свойства. Большие дозы могут вызвать повреждение глаз, ожог кожи и даже привести к возникновению злокачественных опухолей.

Сильное биологическое действие ультрафиолетового излучения используется в бактерицидных лампах для стерилизации воздуха, в операционных помещениях больниц, производственных помещениях, в пищевой и фармацевтической промышленности. Способность веществ к поглощению ультрафиолетового излучения используется для обнаружения вредных примесей в атмосфере.

Рентгеновское излучение. Рентгеновские лучи имеют диапазон волн от 10 нанометров до 0,01 нанометра (10×10^{-9} — 10×10^{-12} м).

Поглощение рентгеновского излучения веществом зависит от его плотности: чем больше плотность вещества, тем сильнее оно поглощает рентгеновские лучи. В частности, мягкие ткани организма человека поглощают рентгеновские лучи слабее, чем кости. Это позволило Рентгену сделать первый снимок кисти руки в невидимых лучах.

Было установлено, что рентгеновское излучение имеет волновую природу и представляет собой электромагнитные волны.

Опыты показали, что существуют два типа рентгеновских лучей: *тормозное* со сплошным спектром (подобным спектру белого света) и *характеристическое* с линейчатым спектром. Рентгеновские линейчатые спектры возникают при процессах, происходящих в глубинных электронных оболочках атомов.

Применения рентгеновского излучения исключительно широки. Рентгеновские лучи используют для получения снимков отдельных органов человека в целях определения очагов заболеваний (рентгенодиагностика), для лечения злокачественных опухолей (рентгенотерапия) и т.д.

Гамма-лучи (γ -лучи) имеют длину волны меньше 0,1 нанометра. Испускаются γ -лучи радиоактивными ядрами атомов. Это самое коротковолновое электромагнитное излучение. Оно обладает большой проникающей способностью и биологически очень активно. Обнаруживаются γ -лучи по вызываемой ими ионизации атомов вещества, сквозь которые они проходят.

В заключение отметим, что границы диапазонов длин условны, эти диапазоны частично перекрываются. Так, область ультракоротких радиоволн (УКВ) смыкается с участком инфракрасных лучей. Граница между ними чисто условная и определяется способом их получения: ультракороткие радиоволны получают с помощью особых генераторов (радиотехнические методы), а инфракрасные лучи излучаются нагретыми телами. Области рентгеновских лучей и γ -лучей также частично перекрываются, и различить эти волны можно не по свойствам, а по методу получения: рентгеновские лучи возникают в специальных трубках, а γ -лучи испускаются радиоактивными ядрами.

§ 3.9. Воздействие электромагнитных излучений на живой организм

Всю шкалу электромагнитных излучений можно разделить на ионизирующие излучения (γ -лучи, рентгеновские лучи, ультрафиолетовое излучение) и не ионизирующие излучения (инфракрасные лучи, микроволны, радиоволны).

Механизм действия электромагнитных полей (ЭМП) на клетки и ткани организма, как уже отмечалось, сложны и разнообразны. Ионизирующие излучения, как правило, приводят к ионизации молекул, разрыву молекулярных цепочек на фрагменты, фотоядерным реакциям, ядерно-магнитному резонансу, радиолизу водной среды организма и т.д. Не ионизирующие излучения также могут оказывать негативное воздействие на организмы. Микроволновая и радиочастотная энергия, поглощаясь тканями, превращается в тепло, что приводит к повышению температуры, ожогам, кровоизлияниям, вплоть до теплового удара и смерти от перегрева.

Антропогенные источники постоянных и переменных ЭМП, по сравнению с естественными, имеют обычно более высокую интенсивность и могут становиться экологически опасным фактором. Например, на расстоянии 3 см магнитная индукция при работе фена равна 2000 мкТл, электробритвы — 1500 мкТл, в то время как естественный геомагнитный фон — 30—60 мкТл. Антропогенные источники электромагнитных излучений (ЭМИ) разнообразны. В настоящее время установлено влияние ЭМИ на структуру почвы, в результате которого огромные площади становятся непригодными для сельского хозяйства. На растительных и животных тест-системах наблюдались тератогенные эффекты, было установлено, что высокие уровни интенсивности микроволнового и радиочастотного воздействия могут индуцировать хромосомные аберрации. В последние годы много говорят о канцерогенном действии ЭМИ особо низкой частоты (до 300 Гц) — в основном, лейкозов и опухолей мочевого тракта.

Подводя итоги всему сказанному, вновь подчеркнем: практически все главные функции живого организма обеспечиваются благодаря процессам, которые по своей природе являются электромагнитными. Они связаны с движением электрических зарядов, действием электрических потенциалов, с излучением органами электромагнитных волн.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое биопотенциалы? Какова их роль в функционировании организма?
2. Приведите примеры воздействия на организм статических электрических полей.
3. Приведите примеры воздействия на организм статических магнитных полей.
4. Каково воздействие электромагнитных излучений на живой организм?
5. Какова роль электромагнитных излучений в биосфере?

Глава 4

МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. АКУСТИКА. ДЕЙСТВИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

§ 4.1. Гармонические колебания. Превращение энергии при колебаниях

1. Механические колебания и волны окружают нас повсюду. Всякую колеблющуюся систему в физике называют *осциллятором*.

В механике рассматриваются колеблющиеся системы: математический маятник, пружинный маятник и другие. В электродинамике осциллятором является колебательный контур.

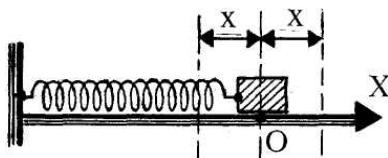


Рис. 4.1. Пружинный маятник

Пусть тело массы m прикреплено к пружине жесткости k , l — длина пружины в нерастянутом состоянии. Это механическая колебательная система. Если растянуть пружину на малую величину x и отпустить, то тело начнет совершать колебания под действием силы упругости (рис. 4.1):

$$F = -kx. \quad (4.1.1)$$

Применяя закон динамики, можно записать $ma = -kx$, но ускорение — это вторая производная от смещения по времени, следовательно,

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx.$$

Разделив на массу правую и левую части уравнения и перенося правую часть влево, окончательно запишем:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0. \quad (4.1.2)$$

Уравнение (4.1.2) — это стандартная (каноническая) форма дифференциального уравнения, описывающего свободные колебания гармонического осциллятора любой природы.

Величина

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (4.1.3)$$

называется *собственной частотой* колебательной системы. Решением дифференциального уравнения (4.1.2) является тригонометрическая функция:

$$x(t) = x_0 \cos \omega_0 t, \quad (4.1.4)$$

где x_0 — амплитуда колебаний.

Период свободных колебаний (время одного полного колебания) выражается следующим образом:

$$T_0 = 2\pi/\omega_0 = 2\pi\sqrt{m/k}. \quad (4.1.5)$$

Особенностью гармонических свободных колебаний является независимость их частоты от амплитуды: частота ω_0 определяется только свойствами самой системы.

Колебания математического маятника (шарик на длинной нерастяжимой нити) также описываются дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(\frac{g}{l}\right)\alpha = 0, \quad (4.1.6)$$

совпадающим с уравнением (4.1.2), что позволяет записать для частоты и периода колебаний выражения

$$\omega^2_0 = g/l; \quad \omega_0 = \sqrt{g/l}; \quad T_0 = 2\pi\sqrt{l/g}. \quad (4.1.7)$$

2. Если на систему помимо квазиупругой силы действуют силы сопротивления, то колебания являются затухающими. На рис. 4.2 показан график затухающих колебаний. Амплитуда колебаний со временем падает по экспоненциальному закону

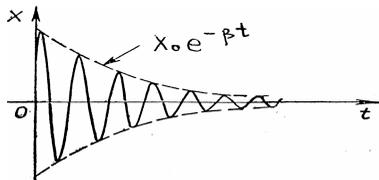


Рис. 4.2. Затухающие колебания. Амплитуда колебаний падает по экспоненциальному закону

$$x = x_0 e^{-\beta t}, \quad (4.1.8)$$

где β — коэффициент затухания, он характеризует быстроту затухания колебаний.

3. Реальные колебательные системы являются затухающими. Но если на колебательную систему действует внешняя периодическая сила $f = F_{max} \cos \omega t$, где F_{max} — амплитудное значение силы, то в системе через некоторое время установятся вынужденные колебания с частотой, равной частоте ω колебаний внешней силы:

$$x(t) = A \cdot \cos \omega t, \quad (4.1.9)$$

где

$$A = \frac{F_{max}}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (4.1.10)$$

амплитуда колебаний, она зависит от того, насколько собственная частота ω_0 колебательной системы отличается от частоты ω колебаний внешней силы. При приближении частоты ω вынуждающей силы к собственной частоте ω_0 колебательной системы амплитуда A вынужденных колебаний резко возрастает. Это явление называется *резонансом*.

Механический резонанс может быть как полезным, так и вредным явлением. Известен ряд случаев, когда происходило разрушение сооружений из-за работы маломощных двигателей, но на частоте, равной собственной частоте сооружения. Вращающиеся части машин, валы двигателей самолетов и кораблей невозможно абсолютно точно уравновесить. В результате они испытывают переменную нагрузку, совершая вынужденные колебания и вызывая вынужденные колебания всей системы. Различные части системы или система в целом могут прийти в резонанс с вынуждающей силой, что может привести к их разрушению или повреждению.

Примером полезного использования резонанса является уплотнение сыпучих материалов с помощью специальных вибраторов-уплотнителей, вибрационный метод погружения свай в грунт при строительстве морских и озерных сооружений.

Каждый музыкальный инструмент для усиления звука снабжен резонатором той или иной формы; носовая и ротовая полости млекопитающих и человека также являются своеобразными резонаторами, благодаря которым звуковые колебания усиливаются.

Если бы коэффициент затухания внутренних органов человека и других животных был невелик, то резонансные явления, возникающие в этих органах под действием внешних вибраций или

звуковых волн, могли бы привести к трагическим последствиям: разрыв органов, повреждение связок и т.п. Однако такие явления при умеренных внешних воздействиях практически не наблюдаются, поскольку коэффициент затухания биологических систем достаточно велик. Сильные механические вибрации тем не менее оказывают вредное влияние на организм человека.

4. Свободные колебания, как отмечалось, всегда затухают. Но если систематически компенсировать потери энергии, то колебания перестанут затухать.

Колебательные системы, совершающие незатухающие колебания за счет действия источника энергии, не обладающего колебательными свойствами, называются *автоколебательными*, а незатухающие колебания, существующие в какой-либо системе при отсутствии переменного внешнего воздействия, называются *автоколебаниями*.

Автоколебания широко распространены в природе и технике. Автоколебательными системами являются электрические звонки, зуммеры, паровые машины и двигатели внутреннего сгорания, отбойные молотки и т.п. Автоколебания совершают струны под действием смычка (скрипка, виолончель); воздушные столбы в трубах (духовые музыкальные инструменты).

Для работы автоколебательной системы принципиальную роль играет наличие обратной связи и выбор фазы обратной связи. Необходимо, чтобы в течение того промежутка времени, пока сила действует на систему, направления силы и скорости совпадали. Тогда источник энергии произведет над колебательной системой положительную работу, т.е. передаст ей энергию. Если же направления силы и скорости будут разными, то работа будет отрицательной, источник отберет энергию от колебательной системы и тем самым усилит затухание. В первом случае говорят, что в системе действует **положительная обратная связь**, во втором — **отрицательная**. Положительная обратная связь используется для возбуждения автоколебаний, отрицательная — для подавления нежелательных автоколебаний там, где они не нужны.

5. Колебания, возникнув в одном месте упругой среды, передаются соседним частицам (за счет взаимодействия с ними) и распространяются с некоторой скоростью \vec{v} . Процесс распространения колебаний в среде называется *волной*.

Линия, указывающая направление распространения волны, называется *лучом* (или ходом луча). Если колебания частиц среды происходят перпендикулярно лучу, то волна является *поперечной*. Если же частицы колеблются вдоль луча, то волна является *продольной*.

Длиной волны λ называется расстояние между точками, колеблющимися с разностью фаз 2π . За время, равное периоду T колебаний, фронт волны перемещается в однородной среде на расстояние, равное λ : $\lambda = v \cdot T$ или $\lambda = \frac{v}{\nu}$, $\nu = \frac{1}{T}$ — частота колебаний частиц в волне.

Уравнение плоской волны, имеющей частоту колебаний $\omega = 2\pi\nu$ и скорость распространения $v = \nu \cdot \lambda$, можно записать в виде:

$$x = x_0 \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right), \quad (4.1.11)$$

где $\omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$ является фазой колебаний среды в бегущей волне.

Зависимость аргумента $t - \frac{r}{v}$ от координаты и времени — признак волнового процесса.

6. Волновое движение сопровождается переносом энергии, которая складывается из кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии деформированных участков среды. Энергия, переносимая волной через некоторую поверхность за единицу времени, называется *потоком энергии* через эту поверхность. Плотностью потока энергии, или *интенсивностью волны*, называется количество энергии, переносимое волной в среднем за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны. Следовательно, интенсивность волны определится по формуле:

$$I = \frac{\Delta W}{S \cdot \Delta t} = w \cdot v, \quad (4.1.12)$$

где w — плотность энергии (измеряется в Дж/м³), v — скорость волны.

Если учесть, что средняя плотность энергии, переносимая плоской волной, выражается формулой: $w = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2$, где ρ — плотность вещества; ω — циклическая частота; A — амплитуда колебаний, то, умножая плотность энергии на скорость волны, получим для интенсивности волны выражение

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2, \quad (4.1.13)$$

откуда видно, что интенсивность волны пропорциональна квадрату амплитуды.

7. При наложении когерентных волн может возникать явление интерференции. **Явление интерференции состоит в таком наложении двух (и более) волн, которое приводит к стационарному (не зависящему от времени) усилению колебаний частиц среды в одних местах и ослаблению (или полному погашению) в других местах пространства.** При этом усиление происходит в тех именно местах пространства, где две волны сходятся с одинаковыми фазами, а гашение волн — в тех местах пространства, где волны оказались в противофазе.

Явление дифракции заключается в огибании волной каких-либо препятствий или при прохождении через небольшие отверстия (щели).

§ 4.2. Звук. Характеристики звука. Инфразвук. Ультразвук

1. Акустика — учение о звуке, т.е. об упругих механических колебаниях и волнах в газах, жидкостях и твердых телах, воспринимаемых человеческим ухом (частоты от 16 до 20 000 Гц). В акустике также рассматриваются и *пограничные* со звуком области: ниже 16 Гц — *инфразвук*, выше 20 кГц — *ультразвук*.

В жидкостях и газах звуковые волны могут быть *только продольными*: распространение звука сопровождается попеременным сжатием и растяжением участков среды и соответствующим изменением давления в сравнении с давлением в невозмущенной среде.

Звуки различают по *высоте*, *тембру* и *громкости*. Звуки, соответствующие синусоидальным волнам (например, от камертонов), называются *тонами*. Высота тона определяется частотой

колебаний. Музыкальные звуки являются наложением ряда гармонических колебаний, образующих *акустический спектр* звука. Наименьшая частота ν этого спектра (*основной тон*) определяет высоту звука, а высшие частоты (*обертонны*) — его *тембр*.

Громкость звука связана с его интенсивностью I , которая характеризует среднее значение плотности потока энергии, переносимой звуковой волной. Ухо человека способно воспринимать звук в широком диапазоне интенсивности. При частоте 1000 Гц границами этого диапазона являются $I_0 \approx 10^{-12}$ Вт/м² (*порог слышимости*) и $I_{\max} \approx 10$ Вт/м² (*болевого порог*). Значения I_0 и I_{\max} зависят от частоты. Громкость звука L как характеристика *субъективного* восприятия звуковой волны приблизительно пропорциональна логарифму ее интенсивности:

$$L = \lg \frac{I}{I_0}, \quad (4.2.1)$$

где I_0 — стандартная для всех частот начальная интенсивность, принимаемая равной 10^{-12} Вт/м² (она соответствует порогу слышимости при частоте 1000 Гц). Громкость звука измеряется в *белах* (Б). Чаще используют дольную единицу — *децибел* (дБ). В этом случае

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}. \quad (4.2.2)$$

Изменению интенсивности звуковой волны от I_0 до I_{\max} соответствует изменение громкости звука от 0 до 130 дБ. Примерные значения L и I для некоторых звуков приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Примерные значения L и I для некоторых звуков

Источник звука	дБ	Вт/м ²
Порог слышимости	0	10^{-12}
Тихий шепот (1 м)	20	10^{-10}
Громкая речь (1 м)	70	10^{-5}
Симфонический оркестр (3—5 м)	80	10^{-4}
Отбойный молоток	100	10^{-2}
Авиамотор (5 м)	120	1
Болевой порог	130	10

Совокупность точек, отвечающих порогу слышимости, и точек, соответствующих порогу болевых ощущений, образуют на диаграмме I, ν две кривые (рис. 4.4), которые могут быть экстраполированы до пересечения (точки А, В). Область, ограниченная этими кривыми, называется *областью слышимости*.



Рис. 4.4. Область слышимости человеческого уха в зависимости от интенсивности

Человеческое ухо может воспринимать звуки, различающиеся по интенсивности в 10^{13} (!) раз. Ни один прибор, созданный руками человека, не имеет столь широкого диапазона измеряемой величины.

2. Инфразвуки — низкочастотные упругие волны — сопровождают человека в повседневной жизни. Мощными источниками инфразвука являются грозовые разряды (гром), орудийные выстрелы, взрывы, обвалы, штормы, работа машин, городской транспорт. Постоянно действующие мощные инфразвуки определенных частот (3—10 Гц) вредны для здоровья человека. Инфразвуки вызывают резонанс во внутренних органах человека, при этом происходит трансформация механической энергии звуковых колебаний в тепловую, что приводит к резкому изменению биохимических и биоэлектрических процессов в организме. Возникают болевые и неприятные симптомы, ощущения тревоги, испуга, страха. Инфразвуки могут вызывать ухудшение зрения, нервные расстройства, потерю памяти.

Особенность инфразвуков — слабое поглощение их веществом. Поэтому они легко проходят сквозь препятствия и могут распространяться на очень большие расстояния. Это позволяет, например, предсказать приближение стихийного бедствия — шторма, цунами. Многие рыбы, морские животные и птицы, по видимому, воспринимают инфразвуки, так как реагируют на приближение шторма.

3. Ультразвуки — высокочастотные упругие волны — генерируются с помощью специальных излучателей, действие которых основано на свойстве некоторых тел изменять свои размеры под действием электрического и магнитного полей. Это так называемые пьезоэлектрические и магнитострикционные излучатели.

Важная особенность ультразвуковых волн состоит в том, что, подобно свету, они могут излучаться в виде узких направленных пучков, называемых ультразвуковыми лучами. Это свойство является результатом малости длины ультразвуковой волны. Отражение и преломление ультразвуковых лучей на границе раздела двух сред происходит также по законам геометрической оптики.

На законе прямолинейного распространения ультразвуковых волн основаны такие технически важные методы, как ультразвуковая локация и дефектоскопия. Принцип ультразвуковой локации состоит в следующем. Источник ультразвука излучает короткий сигнал, распространяющийся в определенном направлении. Если на его пути встретится какое-либо препятствие, то при отражении от него образуется эхо-сигнал, распространяющийся в обратном направлении. Измеряя промежуток времени Δt между посылкой сигнала источником и моментом возвращения эхо-сигнала, можно определить расстояние l от источника сигнала до препятствия: $l = v \cdot \Delta t / 2$, где v — скорость ультразвука в среде.

Ультразвуковые гидролокаторы широко применяются для измерения глубин моря, обнаружения подводных лодок, крупных косяков рыб и т.д.

Ультразвук широко применяется для обнаружения внутренних дефектов (раковин, трещин) в твердых телах. В хирургии его используют для разрушения злокачественных опухолей, распиливания костей и т.д.

Ультразвуки обладают дробящим действием — они разрушают находящиеся в жидкости твердые тела, микроорганизмы, сложные молекулы и т.д. Дробящее действие ультразвуков широко применяют для осуществления и ускорения различных технологических процессов: образования эмульсий и суспензий, снятия пленок окислов (например, с поверхности алюминиевых деталей, благодаря чему возникает возможность их пайки).

4. Всем хорошо известен тот факт, что частота звука, создаваемого сиреной движущегося автомобиля, сильно изменяется, когда

автомобиль проходит мимо нас: если источник звука приближается к нам, то мы слышим более высокую частоту, а когда источник звука, проходя мимо нас, удаляется, мы слышим более низкую частоту. Зависимость частоты волнового возмущения от относительного движения источника и наблюдателя называется *эффектом Доплера*.

Частота ν_B , воспринимаемая наблюдателем, равна:

$$\nu_B = \frac{\nu}{\lambda_B} = \nu_S \left(\frac{\nu}{\nu - \nu_S} \right) = \frac{\nu_S}{1 - \nu_S/\nu}, \quad (4.2.3)$$

где ν_S — скорость источника звука, ν — частота звука.

Источник здесь движется к наблюдателю. Если же источник звука движется по направлению от наблюдателя, то знак скорости ν_S изменяется, и знак минус в формуле (4.2.3) превращается в плюс. Следовательно, частота звука, воспринимаемая наблюдателем, понижается.

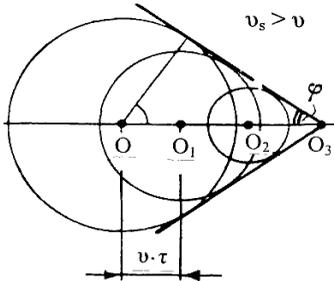


Рис. 4.5. Волновые поверхности при движении источника со скоростью, превышающей скорость волн в данной среде

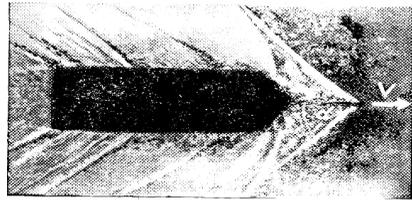


Рис. 4.6. Конус Маха пули, движущейся со сверхзвуковой скоростью

Особенно интересен случай, когда скорость источника больше скорости распространения волн в среде: $\nu_s > \nu$. Источник опережает созданные им волны. Положение фронтов волн, испущенных в точке O_3 , показано на рисунке 4.5. Огибающая этих фронтов представляет собой поверхность кругового конуса, ось которого совпадает с траекторией источника, вершина в каждый момент времени совпадает с источником, а угол φ между образующей осью определяется, как следует из рисунка, соотношением:

$$\sin \varphi = \nu/\nu_s. \quad (4.2.4)$$

Этот фронт волны получил название *конуса Маха*. С такой формой фронта приходится сталкиваться во всех случаях движения тел со сверхзвуковой скоростью — снарядов, ракет, реактивных самолетов. В случаях, когда уплотнение среды на фронте волны значительно, фронт волны можно сфотографировать. На рисунке 4.6, сделанном по фотографии, показаны конус Маха пули, движущейся со сверхзвуковой скоростью, и фронт звуковой волны, созданной пулей при ее движении в стволе с дозвуковой скоростью. Снимок сделан в тот момент, когда пуля обгоняет фронт звуковой волны.

Эффект Доплера наблюдается в волновых процессах любого типа — в волнах на воде, звуковых волнах, а также при распространении радио-, световых и других электромагнитных волн. Однако в случае электромагнитных волн эффект Доплера оказывается значительно более сложным, чем в случае механических волн.

Аналогом конуса Маха в оптике является так называемое черенковское излучение, возникающее при движении заряженных частиц в веществе со скоростью, превышающей скорость света в этой среде.

§ 4.3. Волны на воде и в атмосфере

1. Волны, возникающие на поверхности воды, отличаются большим разнообразием. Самые простые волны — это волны, возникающие на поверхности от брошенного камня и расходящиеся кругами. Существуют приливные волны, которые порождает движение Луны вокруг Земли, волны, возникающие при землетрясениях, и т.д.

Но основной причиной возникновения волн на поверхности воды является ветер. Вызываемые ветрами волны называются *ветровыми волнами*; именно они и определяют картину волнений на море.

Скорость волны на воде зависит от скорости ветра и длительности его воздействия на волну, причем скорость волны всегда меньше скорости ветра. При постоянном ветре скорость установившихся волн составляет 0,8 от скорости ветра.

На глубокой воде волна распространяется, как говорят, не «чувствуя» дна: в волнении участвует лишь поверхностный слой

воды толщиной не более половины длины волны ($\lambda/2$). При этом скорость волны на глубокой воде описывается формулой:

$$v = \sqrt{g\lambda/2\pi}. \quad (4.3.1)$$

Иное дело — волна на мелкой воде, где в движение вовлекается вся масса воды, волна «чувствует» дно, ее скорость зависит от глубины:

$$v = \sqrt{gH}. \quad (4.3.2)$$

В этих формулах g — ускорение свободного падения; λ — длина волны; H — глубина дна.

2. *Цунами* — это длинные океанские волны, возникающие, главным образом, при подводных землетрясениях, когда происходят быстрые смещения участков морского дна. Цунами могут возникать также в результате взрывов подводных вулканов и сильных обвалов. Длина волн цунами составляет *десятки и даже сотни километров*.

Следует подчеркнуть, что в открытом море цунами не только не разрушительны, но и *незаметны*. Чтобы зарегистрировать их, нужны специальные приборы. Для волн цунами все моря и океаны являются мелкой водой. Поэтому скорость распространения цунами можно легко вычислить по формуле (4.3.2). Допустим, что глубина океана равна 4 км. Подставляя в формулу (4.3.2) значения $g = 10$ м/с, $H = 4\,000$ м, получим:

$$v = \sqrt{gH} = \sqrt{10 \cdot 4 \cdot 10^3} = 200 \text{ м/с} = 720 \text{ км/ч.}$$

Будучи совершенно безопасной в открытом океане, волна цунами становится крайне опасной *в прибрежной полосе*. *Всю свою огромную энергию вкладывает она в сокрушительный удар по берегу*. При этом скорость волны снижается до 100—200 км/ч, существенно уменьшается ее длина; высота же возрастает до десятков метров.

3. Обычные внетропические циклоны возникают в результате взаимодействия друг с другом холодного и теплого воздушных фронтов, они представляют собой крупномасштабные вихри диаметром около 1000—2000 км и высотой 2—20 км. Воздушные массы движутся *в области циклона по спирали, закручивающейся к его центру: против часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой стрелке в Южном*.

Тропические циклоны зарождаются в низких широтах субтропических областей океанов в результате взаимодействия дующих в этих областях постоянных ветров (*пассатов*) с мощными конвективными восходящими потоками воздуха, возникающими над сильно нагретой поверхностью океана. Основным источником энергии тропических циклонов — *выделение огромных количеств скрытой теплоты при конденсации водяных паров в восходящих воздушных потоках*. Ветер в тропическом циклоне достигает исключительно огромной силы — его скорость может стать равной 400—500 км/ч.

Скорость ветра возрастает по мере приближения к центру циклона. Ветры бешено крутятся, но не могут перейти некоторого предела, оставляя в самом центре циклона область диаметром 10—40 км, где царит затишье — так называемый *глаз тайфуна* (рис. 4.7). Область глаза характеризуется наиболее низким атмосферным давлением и повышенной температурой.

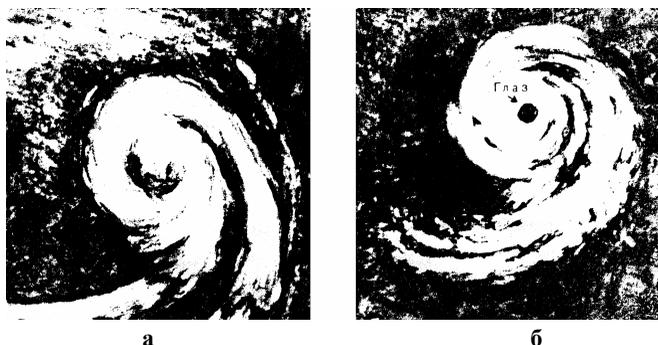


Рис. 4.7. Так выглядят обычный (а) и тропический (б) циклоны сверху (например, с орбитальной космической станции). Тропический циклон имеет меньший диаметр и более четкие очертания по сравнению с обычным циклоном. В центре тропического циклона находится «глаз тайфуна»

Опасность штормовых приливов еще более усиливается, когда они совпадают с обычным (астрономическим) приливом.

В отличие от волн цунами, волны, поднимаемые тайфуном, очень опасны не только в прибрежной полосе, но и в открытом океане.

4. Среди других волновых процессов можно назвать *приливные волны* (приливы и отливы), а также *сейсмические волны* (возникающие в результате землетрясений).

У берегов океанов и морей дважды в сутки наблюдается поднятие морской воды до некоторого максимального уровня — это *прилив*; после чего происходит опускание воды до минимального уровня — *отлив*. Время между приливом и отливом составляет 12 ч 25 мин — половину промежутка времени, в течение которого Луна совершает полный оборот вокруг Земли.

Первые попытки объяснения этого явления принадлежат Ньютону. Приливы и отливы, согласно Ньютону, объясняются действием полей тяготения Луны и отчасти Солнца.

Различают три типа землетрясений: *обвальные*, *вулканические* и *тектонические*. Обвальные землетрясения очень редкие и слабые, они происходят у самой поверхности земли в тех местах, где имеются пещеры.

Основную группу землетрясений составляют вулканические и тектонические землетрясения. Они возникают как на суше, так и под дном океанов. Место зарождения тектонических землетрясений называется *гипоцентром*, или *очагом*. На поверхности земли, над гипоцентром, находится *эпицентр* землетрясения. Здесь сила землетрясения наиболее велика, а при удалении от эпицентра она ослабевает.

5. Мир живой природы полон звуков. При этом голосовые аппараты многих животных, человека, птиц принадлежат к типу духовых «музыкальных» инструментов, звук в них образуется за счет движения воздуха, выдыхаемого из легких.

Особенно интересны голосовые аппараты птиц. Например, пение канарейки по громкости сравнимо с голосом человека, хотя по массе канарейка составляет менее одной тысячной доли его массы. У птиц имеется не одна гортань, а две: верхняя, как у всех млекопитающих, и нижняя, причем главная роль в образовании звуков принадлежит нижней гортани, устроенной очень сложно и разнообразно у разных видов птиц. Движениями тела и натяжением специальных мышц птица может в значительной степени управлять свойствами своего голоса. Разнообразие в строении голосового аппарата соответствует и разнообразию звуков, издаваемых птицами — от низких басовых криков (гуси, утки, вороны) до высочайших мелодичных свистов у певчих птиц из семейства воробьиных. Песни некоторых птиц целиком состоят из

ультразвука. Голосовой аппарат млекопитающих мало отличается от голосового аппарата человека, но последний богаче тонами.

В мире живой природы большую роль играет эхо. Локационный аппарат, созданный живой природой, представляет значительный интерес для ученых, поскольку обладает большей точностью, чем созданные человеком радио- и гидролокаторы. Ученые считают, что изучение эхолокационных устройств разных представителей животного мира важно не только для разработки новых принципов радиолокации, но и для обеспечения работы этих устройств в условиях помех.

К животным, имеющим уникальный локационный аппарат, относятся летучие мыши (отряд рукокрылых) и дельфины (отряд китообразных). И те, и другие — млекопитающие, но в результате эволюции они приобрели способности, которые для млекопитающих не свойственны. Летучие мыши — это летающие звери, а дельфины — плавающие звери. Первые живут в мире птиц, а вторые — в мире рыб, но не являются ни птицами, ни рыбами.

● **Антропогенное шумовое загрязнение** также является одним из опасных экологических факторов окружающей среды, особенно в больших городах.

Звуки в 20—30 децибелов (дБ) безвредны для человека, это естественный шумовой фон. Допустимая граница громких звуков составляет примерно 80 дБ. Звук в 130 дБ вызывает у человека болевые ощущения, а 150 становятся для него непереносимыми.

Естественные звуки природы: шелест листьев, шум прибоя, птичьи голоса и т.д. — необходимы человеку. Они успокаивают, снимают стрессы и утомляемость.

В наши дни происходит шумовое загрязнение окружающей среды, которое проявляется в виде превышения естественного уровня шума и ненормального изменения звуковых характеристик (периодичности, силы звука и т.д.) в населенных пунктах, на производстве. Любые звуки, возникающие не из природных источников или не от объектов, окружающих человека в течение тысячелетий его эволюции, рассматриваются как антропогенное шумовое загрязнение.

Основные источники шума — автомобильный, воздушный, рельсовый транспорт, промышленные предприятия. Например, шум в горно-обогатительном или металлургическом производстве

достигает 75—80 дБ, шум от взрывов и турбореактивных двигателей — 110—130 дБ, на магистралях с непрерывным движением — до 85 дБ.

Шумовое загрязнение отрицательно воздействует на организм человека. Реакция на шум со стороны нервной системы, по данным ВОЗ, начинается уже с уровня 40 дБ, а при уровне 70 дБ наблюдаются глубокие расстройства, вплоть до появления психических заболеваний. Шум 90 дБ вызывает постепенное ослабление слуха, нервно-психические болезни, снижение умственной активности, ишемическую болезнь, язвенную болезнь, гипертонию, утомляемость, повышенную агрессивность и т.д. Шум, превышающий 80—90 дБ, влияет на гормоны гипофиза, которые контролируют деятельность эндокринной системы. Физиолого-биохимическая адаптация к шуму невозможна. Акустические раздражения, накапливаясь в организме, все сильнее угнетают нервную систему.

Неслышимые звуки также могут оказывать вредное воздействие на здоровье человека. Так, инфразвуки вызывают резонанс во внутренних органах человека, при этом происходит трансформация механической энергии звуковых колебаний в тепловую, что приводит к резкому изменению биохимических и биоэлектрических процессов организма. Возникают болевые и неприятные симптомы: ухудшается настроение, появляются ощущения тревоги, испуга, страха, нервно-психические расстройства.

Как показали современные исследования, ультразвук также опасен для человека: субъективно он не воспринимается, но разрушительно действует на здоровье, особенно на клетки нервной системы.

Для ликвидации шумового загрязнения окружающей среды используется *шумозащита* — комплекс мероприятий по снижению шума на производстве (установка звукоизолирующих кожухов на оборудовании, глушителей в компрессорах, вентиляторах и пр.), на транспорте (глушители выбросов, создание на дорогах акустических экранов, шумозащитных зон), при гражданском и промышленном строительстве. Разрабатывают также бесшумные технологии. Так, процесс клепки, сопровождающийся большим шумом, заменен сваркой. На смену резцам токарных, строгальных и других станков пришел ультразвук. Исследования ученых показывают, что производительность труда служащих в спокойной, тихой обстановке на 10% выше, чем работающих в условиях

шума (следует подчеркнуть, что и в условиях абсолютной угнетающей тишины человек также не может жить и работать).

Исключительной способностью задерживать и поглощать значительную часть звуковой энергии, особенно звуки высокой частоты, обладают растения, которые представляют собой в этом отношении своеобразные фильтры и экраны. Их листовая поверхность, отражая и поглощая звуковую энергию вследствие высокого акустического сопротивления, переводит ее в тепловую.

Наибольшим звукопоглощающим эффектом характеризуются древесные породы, имеющие большую площадь и густоту листьев. Хвойные породы отличаются более низкой звукопоглощающей способностью, но их влияние проявляется в течение всего года. Установлено, что клен поглощает звук в 2 раза интенсивнее, чем ель. Наилучшей звукопоглощающей способностью обладают насаждения, в составе которых находятся как деревья, так и кустарники в виде живой изгороди. Применение таких насаждений позволит значительно снизить шумовое загрязнение внешней среды.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое дифференциальное уравнение лежит в основе описания колебательных процессов? Поясните параметры, входящие в это уравнение.
2. Какие колебания называются гармоническими? Поясните превращения кинетической, потенциальной и полной энергии при гармонических колебаниях?
3. Что такое звук? Назовите основные параметры, характеризующие звук. Что такое инфразвук, ультразвук? Где используются инфразвуки, ультразвуки?
4. Какие волны бывают на воде и в атмосфере? Дайте им краткую характеристику.
5. Приведите примеры воздействия звука на живые организмы. Назовите источники шумовых загрязнений. Какие существуют способы защиты от шумов?

Глава 5 ОПТИКА. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ

§ 5.1. Волновые свойства света

Оптика — одна из древнейших наук, тесно связанная с потребностями практики. Прямолинейность распространения света была известна народам Месопотамии за 5 тысяч лет до н.э. Пифагор в VI веке до н.э. высказал близкую к современной точку зрения, что тела становятся видимыми благодаря испускаемым ими частицам. Аристотель в IV веке до н.э. полагал, что свет есть возбуждение среды, находящейся между объектом и глазом. Он занимался атмосферной оптикой и считал, что причиной появления радуг является отражение света каплями воды. В том же веке в школе Платона были сформулированы два важнейших закона геометрической оптики: прямолинейность лучей света и равенство углов падения и отражения.

На природу света существовали две точки зрения, возникшие почти одновременно в XVII в. Одна из этих теорий — *корпускулярная* — связана с именем И.Ньютона, другая — *волновая* — с именем Г.Гюйгенса. По Ньютону, свет — поток частиц, идущих от источника во все стороны. Согласно же представлениям Гюйгенса, свет — это волны, распространяющиеся в особой гипотетической среде — эфире, заполняющем все пространство и проникающем внутрь всех тел.

Волновые свойства света проявляются в таких явлениях, как интерференция, дифракция, поляризация, дисперсия.

Световая волна. Процесс распространения периодически меняющегося электромагнитного поля в пространстве образует световую волну. В световой волне совершают быстрые (частота $\nu \approx 10^{14}$ Гц) непрерывные колебания векторы напряженности электрического поля и индукции магнитного поля, их колебания, как отмечалось в 3 главе, взаимосвязаны и происходят в направлениях, перпендикулярных лучу, причем \vec{E} и \vec{B} также взаимно перпендикулярны (рис. 5.1).

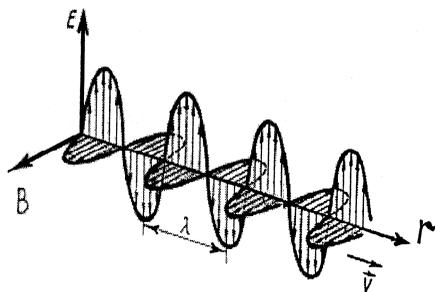


Рис. 5.1. Электромагнитная волна: вектор $\vec{E} \perp \vec{B}$;
в свою очередь, плоскость колебаний векторов \vec{E} и \vec{B}
перпендикулярна направлению распространения волны

Как показывает опыт, действие света на глаз и другие приборы обусловлено колебаниями электрического вектора \vec{E} , называемого поэтому *световым*.

При переходе света из одной среды в другую его частота остается неизменной, а соответствующая ей длина волны меняется, так как скорость света в разных средах различна. Скорость света в вакууме:

$$c = 2,9979 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Величина, равная отношению скорости света c в вакууме к фазовой скорости V в данной среде, называется *абсолютным показателем преломления* этой среды:

$$n = \frac{c}{V}. \quad (5.1.1)$$

Для всех веществ $n \geq 1$. Из двух сред оптически более плотной называют среду с большим значением n . Если n_1 и n_2 — абсолютные показатели преломления сред 1 и 2, а V_1 и V_2 — фазовые скорости света в них, то отношение:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{V_1}{V_2} = n \quad (5.1.2)$$

называют *относительным показателем преломления второй среды по отношению к первой*. В таблицах обычно дается показатель преломления данной среды по отношению к воздуху.

Световой поток. Светочувствительность глаза. Световые волны несут с собой энергию. Поток энергии (в данном интервале длин волн) может быть оценен двояко: 1) энергетически — как количество энергии, проходящей сквозь данную площадь в единицу времени (энергетическая мощность, выраженная в ваттах); 2) по зрительному ощущению. Оцененный по зрительному ощущению поток энергии световой волны называется *световым потоком* и обозначается через Φ (заметим, что магнитный поток обозначается также буквой Φ , но это разные величины).

Световой поток выражается в люменах (лм). Поток световой энергии, проходящий сквозь единичную площадку, перпендикулярную лучу, называется интенсивностью света или плотностью потока световой энергии (обозначается через I). Как уже упоминалось, интенсивность света I пропорциональна квадрату амплитуды светового вектора:

$$I \sim E_{\max}^2.$$

Чувствительность глаза к свету зависит от длины световой волны λ . Глаз человека наиболее чувствителен к лучам с $\lambda_0 = 555$ нм в желто-зеленой области, с переходом к фиолетовой и красной областям чувствительность сильно уменьшается и становится равной нулю на границах светового диапазона (при $\lambda_{\phi} = 380$ нм и $\lambda_{\text{кр}} = 760$ нм). Ультрафиолетовые и инфракрасные лучи глаз человека не воспринимает.

Мерой спектральной чувствительности глаза к излучению с длиной волны λ служит коэффициент видности δ_{λ} . Он равен отношению попадающей в глаз в 1 секунду энергии монохроматического излучения с длиной волны $\lambda_0 = 555$ нм к энергии монохроматического излучения произвольной

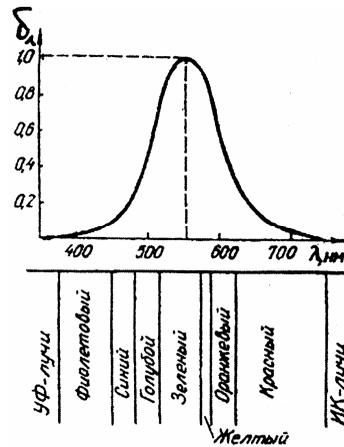


Рис. 5.2. Кривая видности δ_{λ} . Максимум спектральной чувствительности человеческого глаза приходится на длину волны 555 нм

длины волны λ , попадающей в глаз также в 1 секунду. Полученная из многочисленных измерений зависимость δ_λ от λ называется *кривой видности* (рис. 5.2).

Заметим, что максимум в спектральной кривой интенсивности излучения Солнца приходится на ту же длину волны, что и максимум спектральной чувствительности глаза человека. Исследования показали, что такого совпадения не наблюдается у многих животных. Например, глаза пчелы, как и большинства насекомых, наиболее чувствительны к коротковолновой части спектра, включая ближний ультрафиолет. Глаза птиц лучше всего воспринимают красный цвет.

Световой поток, попадающий на единицу площади освещаемой поверхности, называется *освещенностью* (обозначается через E):

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}.$$

Освещенность выражается в люксах (лк): 1 лк = 1 лм/м².

Световой поток, приходящийся на единицу телесного угла, называется *силой света* (обозначается через I):

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}.$$

Сила света и освещенность от точечного источника связаны соотношением:

$$E = \frac{I \cos \varphi}{r^2}, \quad (5.1.3)$$

где r — расстояние от точечного источника до освещаемой поверхности, φ — угол между лучом и нормалью к поверхности (рис. 5.3).

Сила света измеряется в канделах (кд), в системе СИ кандела является основной единицей, она определяется с помощью специального эталонного источника.

Если источник излучает равномерно по всем направлениям, то:

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi}, \quad (5.1.4)$$

где Φ_0 — полный световой поток, излучаемый источником, 4π — полный телесный угол.

Световыми лучами мы будем называть линии, которые являются осями тонких световых пучков.

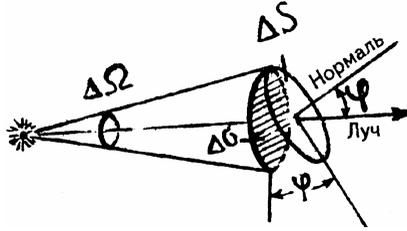


Рис. 5.3. Геометрические соотношения в фотометрии

Поверхность, перпендикулярная к световым лучам, называется *волновой поверхностью*, или *фронтом волны*.

Закон отражения состоит в следующих утверждениях:

- 1) падающий луч, луч отраженный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости;
- 2) угол отражения всегда равен углу падения.

Закон преломления состоит в следующих утверждениях:

- 1) падающий луч, луч преломленный и перпендикуляр, восстановленный в точке падения, лежат в одной плоскости;
- 2) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления есть величина постоянная для двух сред:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_2}{n_1} = n. \quad (5.1.5)$$

Полное отражение. Если свет распространяется из оптически более плотной среды в оптически менее плотную среду, т.е. $n_1 > n_2$, то угол преломления β всегда больше, чем угол падения α . При увеличении угла падения увеличивается и угол преломления, при этом может наступить такой момент, когда угол $\beta \rightarrow 90^\circ$, т.е. преломленного луча уже нет. Это явление называется полным отражением.

Угол падения α_0 , соответствующий углу преломления $\beta = 90^\circ$, называют *предельным углом полного отражения*. При этом:

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (5.1.6)$$

Явление полного отражения света используется в призмах, световодах. Световоды — пучки прозрачных волокон, покрытых предварительно пленкой из оптически менее плотного вещества и собранных в жгуты.

Гибкие световоды употребляются для передачи изображения по любому криволинейному пути, их успешно используют в медицине для осмотра внутренних органов (желудка, пищевода и др.).

По мере улучшения технологии изготовления длинных пучков световодов, все шире начинает применяться связь с помощью световых лучей (в том числе и телевизионная). Преимущество световодов состоит еще и в том, что на них не оказывают влияние внешние электромагнитные поля. Если вначале полное отражение представляло собой лишь любопытное явление, то сейчас оно постепенно приводит к революции в способах передачи информации.

Интерференция света. Наложение двух или нескольких волн, приводящее к устойчивому во времени усилению колебаний в одних точках пространства (светлые полосы) и ослаблению — в других (темные полосы), называется *интерференцией*. Интерферировать могут только *когерентные* волны. Два источника называются когерентными, если они имеют одинаковую частоту и постоянную во времени разность фаз их колебаний. Вследствие интерференции происходит перераспределение энергии в пространстве. Путь от источника света до экрана, где сходятся лучи, называется *ходом луча* (рис. 5.4).

Если на разности хода будет укладываться целое число волн (четное число полуволн), то это означает, что в точку А приходят две волны с одинаковыми фазами; складываясь, они будут усиливать друг друга (условие максимумов):

$$\Delta = \frac{2k\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots).$$

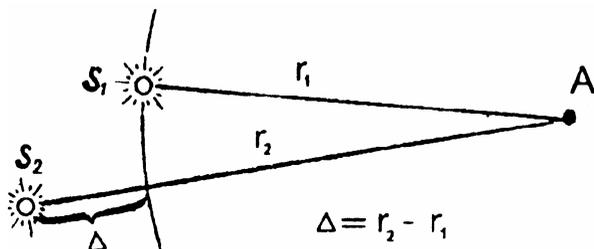


Рис. 5.4. Свет от двух когерентных источников S_1 и S_2 приходит в точку А; Δ — разность хода этих лучей

Если же на разности хода будет укладываться нечетное число полуволн, то это означает, что волны от двух источников в точку А приходят в противофазе (у одной волны «гребень», у другой «впадина»); складываясь, они будут гасить друг друга (условие минимумов) (рис. 5.4):

$$\Delta = \frac{(2k + 1)\lambda}{2} \quad (k = 0, 1, 2, 3 \dots).$$

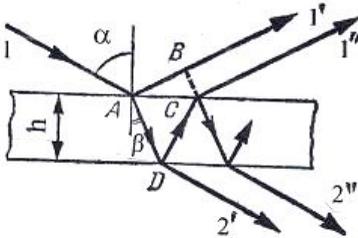


Рис. 5.5. Возникновение разности хода при отражении (прохождении) света от тонкой пленки

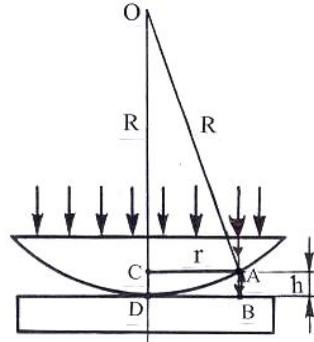


Рис. 5.6. Установка для наблюдения колец Ньютона

Типичными примерами интерференционной картины являются: интерференция на тонких пленках: мыльные пузыри, пленки керосина или нефти (рис. 5.5); кольца Ньютона (рис. 5.6) и др.

Явление интерференции не только доказывает наличие у света волновых свойств, но и позволяет измерить длину волны света. Существуют специальные приборы — интерферометры, действие которых основано на явлении интерференции. Назначение их может быть различным: высокоточное измерение длин световых волн, измерение показателя преломления, проверка качества обработки поверхностей и др.

Дифракция света. При распространении волн в среде, содержащей неоднородности, наблюдается явление, называемое *дифракцией*. Суть его состоит в том, что волна, встречая на своем пути препятствие, огибает его, изменяя направление своего распространения. Дифракция — огибание волнами краев препятствия — присуща любому волновому движению.

Впервые явление дифракции световых волн наблюдал Т.Юнг в 1802 г. В непрозрачной ширме он сделал малое отверстие А, на небольшом расстоянии в другой непрозрачной ширме сделал два маленьких отверстия В и С (рис. 5.7). В результате на экране Э наблюдались интерференционные полосы; закрывая одно из отверстий (В или С), Юнг обнаруживал, что интерференционные полосы исчезают.

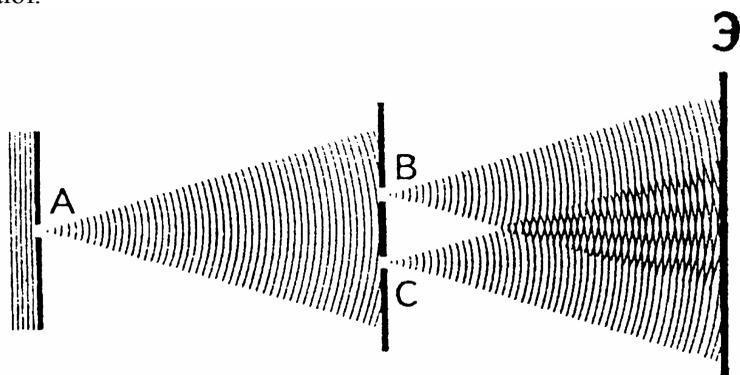


Рис. 5.7. Классический опыт Юнга по дифракции световых волн

Исследование дифракции получило свое завершение в работах французского ученого О.Френеля. Значительных успехов Френель добился, объединив известный принцип Гюйгенса с идеей интерференции вторичных волн. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля *волновая поверхность в любой момент времени представляет собой не просто огибающую вторичных волн, а результат их интерференции.*

Френель рассмотрел количественно дифракцию на щелях и различного рода препятствиях, применив вспомогательный прием разбиения волновой поверхности падающей световой волны на определенные участки — зоны Френеля.

На явлении дифракции основано устройство замечательного оптического прибора — *дифракционной решетки*. Дифракционная решетка представляет собой совокупность большого числа очень узких щелей, разделенных непрозрачными промежутками. В хорошей решетке число штрихов доходит до нескольких тысяч на 1 мм, они наносятся с помощью специальной делительной

машины. Дифракционная решетка разлагает белый свет в спектр и позволяет очень точно измерять длину световых волн (рис. 5.8).

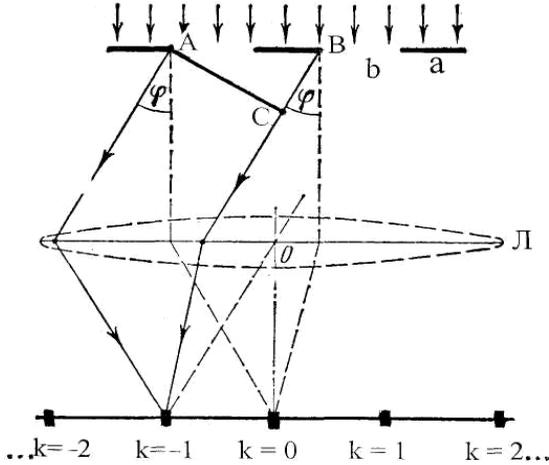


Рис. 5.8. Дифракция светового пучка при прохождении через дифракционную решетку

Поляризация света. Свет называется *плоскополяризованным* (или *линейнополяризованным*), если колебания светового вектора происходят в определенной плоскости, называемой плоскостью *поляризации*. Плоскость поляризации — это плоскость, содержащая вектор \vec{E} и вектор направления распространения волны, поэтому вектор \vec{E} часто называют *световым вектором*.

Естественный свет, излучаемый множеством отдельных атомов, не является поляризованным: векторы \vec{E} и \vec{B} колеблются беспорядочно во всех направлениях, перпендикулярных к лучу.

В естественном свете все направления колебаний вектора \vec{E} оказываются равновероятными. Некоторые кристаллы (турмалин, исландский шпат) обладают свойством поляризовать естественный свет. На основе таких кристаллов изготавливают специальные устройства — *поляризаторы*, способные пропускать только составляющую светового вектора \vec{E} , лежащую в некоторой плоскости PP , называемой плоскостью поляризатора (глаз человека не отличает поляризованный свет от естественного).

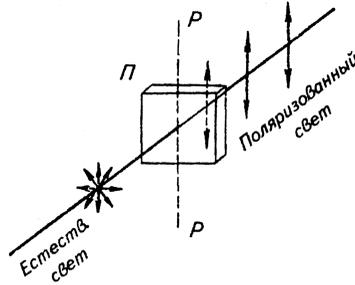


Рис. 5.9. Поляризатор. PP — плоскость поляризации

Если на поляризатор П (рис. 5.9) падает естественный свет, интенсивность которого I_0 , то интенсивность I прошедшего поляризованного света не зависит от ориентации поляризатора (его поворота вокруг луча) и равна половине интенсивности падающего естественного света:

$$I = \frac{I_0}{2}.$$

Такое же устройство может служить для анализа поляризованного света, в этом случае оно называется *анализатором*.

Если естественный свет с интенсивностью I_0 проходит последовательно сквозь поляризатор и анализатор, выходящий пучок имеет интенсивность:

$$I = \frac{I_0 \cos^2 \alpha}{2}, \quad (5.1.7)$$

где α — угол между плоскостями поляризатора PP и анализатора AA. Формула (5.1.7) выражает *закон Малюса*.

При падении естественного света на границу двух диэлектриков отраженный и преломленный лучи частично поляризуются. Если угол падения (в литературе он чаще обозначается i_B) удовлетворяет условию:

$$\operatorname{tg} i_B = n, \quad (5.1.8)$$

то отраженный луч полностью поляризуется в плоскости, перпендикулярной плоскости падения, а преломленный луч поляризуется частично.

Соотношение (5.1.8) выражает закон Брюстера, а угол i_B , удовлетворяющий ему, назван углом Брюстера.

Эффект поляризации отраженного света используется, например, для обнаружения с воздуха или из космоса пленок нефти на поверхности моря.

Дисперсия. Радужную окраску изображения, даваемого линзой, наблюдали многие ученые до Ньютона, но именно он заинтересовался этим явлением и открыл дисперсию, разложив белый свет на семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Полученную радужную полосу он назвал *спектром*.

Дисперсией называется зависимость показателя преломления света от частоты световых колебаний (или длины волны).

Абсолютный показатель преломления среды определяется формулой:

$$n = \frac{c}{V}.$$

В силу того, что скорость световой волны (говорят: *фазовая скорость*) в среде зависит от ее частоты $V(\nu)$, то показатель преломления среды также зависит от частоты (напомним, что $\nu\lambda = V$, а в вакууме $\nu\lambda = c$). Фазовая скорость световых волн красного цвета наибольшая, а фиолетового — наименьшая.

§ 5.2. Оптическая активность веществ

При пропускании плоскополяризованного света через некоторые вещества наблюдается вращение плоскости поляризации. Вещества, способные вращать плоскость поляризации, называют *оптически активными*.

Оптической активностью могут обладать кристаллы (кварц, киноварь), жидкости (скипидар, никотин), растворы оптически активных веществ в неактивных растворителях (водные растворы сахара, яблочной кислоты). Оптическую активность проявляют многие природные соединения: белки, сахара, углеводы, гормоны, эфирные масла и др.

Вращение плоскости поляризации растворами обусловлено взаимодействием электромагнитной волны с асимметричными молекулами растворенного оптически активного вещества. Такие молекулы не обладают зеркальной симметрией.

В зависимости от пространственной структуры молекул или кристаллической решетки вещества могут вращать плоскость поляризации по часовой стрелке (вправо) или против часовой стрелки (влево). Поэтому говорят о двух модификациях оптически активных веществ (оптических изомерах): *правовращающих* (*d*-типа) и *левовращающих* (*l*-типа).

Пространственные формы молекул *l*- и *d*-типа являются зеркальными отображениями друг друга: их нельзя совместить ни поворотом, ни перемещением (трансляцией).

Характерно, что все важнейшие биологические молекулы (белки, нуклеиновые кислоты, полисахариды и т.п.) асимметричны и могут быть представлены попарно антиподами: *l*- и *d*-типа. Однако при этом в веществах биологического, а не синтетического, происхождения обычно представлен только один оптический антипод. Так, например, сахар, изготовленный обычным путем, является правовращающим, но при синтезе химическими методами получают смесь, содержащую равное количество «правых» и «левых» молекул. Такая смесь, называемая рацемической, не вращает плоскости поляризации, так как происходит взаимная компенсация действия различных молекул. Если в раствор синтетически полученного сахара поместить бактерии, которые питаются сахаром, то они будут усваивать только молекулы правовращающего сахара. Через некоторое время левовращающего сахара в растворе окажется гораздо больше, чем правовращающего, что можно будет обнаружить по повороту плоскости поляризации. Спустя некоторое время бактерии усвоят из смеси весь правовращающий сахар и начнут голодать: хотя в растворе останется еще масса левовращающего сахара, организм живых существ его не усвоит.

Оптическая активность многих биополимеров обусловлена, в частности, спиральной структурой их молекул. Все белки построены только из «левых» аминокислотных остатков.

§ 5.3. Элементы теории относительности

Важнейшим физическим принципом, имеющим общефилософский смысл, является *принцип относительности*, утверждающий, что явления в природе не могут зависеть от того, наблюдаем мы за ними или нет, не должны зависеть от инерциального движения наблюдателя. *Все процессы природы протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета*. Иными словами, этот принцип утверждает физическое равноправие всех инерциальных систем отсчета (ИСО). Математической формой этого принципа является утверждение, что все правильно написанные уравнения, отражающие физические законы, не должны менять своей математической формы при переходе от одной ИСО к другой. Например, в классической физике, основанной на преобразованиях Галилея (при переходе от одной ИСО к другой), 2-ой закон Ньютона удовлетворяет принципу относительности. Однако уравнения Максвелла, описывающие электромагнитные явления (столь богатые и глубокие по своему физическому содержанию), изменяют свой вид при переходе от одной ИСО к другой, т.е. при преобразованиях Галилея. Получалось, что основные электромагнитные законы и явления выглядят по-разному в разных инерциальных системах отсчета.

А.Эйнштейн в 1905 г. в знаменитой статье «К электродинамике движущихся сред» разрешил противоречия в теории, создав так называемую специальную теорию относительности (СТО), в основе которой лежат два постулата:

1. Принцип относительности — главный постулат теории — гласит: все процессы природы (механические, электромагнитные, оптические и т.д.) протекают одинаково во всех инерциальных системах отчета.

2. Постулат постоянства скорости света: скорость света в вакууме одинакова для всех инерциальных систем отсчета, она не зависит ни от скорости источника, ни от скорости приемника светового сигнала.

Опираясь на эти постулаты, Эйнштейн разработал кинематику и динамику *релятивистской механики*.

Теория относительности представляет собой новое учение о пространстве и времени, пришедшее на смену старым классическим представлениям. Согласно теории относительности

одновременность событий, расстояния и промежутки времени являются не абсолютными, а относительными. Они зависят от системы отсчета.

С другой стороны, нельзя упрощенно понимать смысл теории относительности только в утверждении относительных величин. Наоборот, конечная цель ее — отыскание тех физических величин, которые остаются неизменными при переходе от одной ИСО к другой, то есть являются *инвариантными*. Пример такой величины — заряд q . Величина q не зависит от движения, это инвариантная величина ($q = q_0$), в то время, как, например, масса m не остается постоянной, а растет в соответствии с формулой Эйнштейна:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5.3.1)$$

Важнейшим для ядерной физики и физики элементарных частиц следствием теории относительности является вывод о связи между массой и энергией. Энергия E тела или системы тел равна массе, умноженной на квадрат скорости света: $E = mc^2$. Если изменяется энергия системы, то изменяется и ее масса:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (5.3.2)$$

Поскольку коэффициент $\frac{1}{c^2}$ очень мал, то заметные изменения массы возможны лишь при очень больших изменениях энергии. При химических реакциях, при электромагнитных взаимодействиях изменения энергии настолько малы, что соответствующие изменения масс не удается обнаружить на опыте. И только лишь при превращениях атомных ядер и элементарных частиц изменения энергии оказываются большими и соответствующие изменения массы экспериментально доказаны.

Замечательна также формула $E_0 = m_0 c^2$: любое тело уже только благодаря факту своего существования обладает энергией, которая пропорциональна массе покоя m_0 . При превращениях элементарных частиц, например, при столкновении электрона и позитрона, может произойти их *аннигиляция*, то есть превращение в γ -кванты; при этом суммарная энергия γ -квантов равна энергии покоя электрона

и позитрона: $h\nu = 2m_0c^2 = 1,02$ МэВ. Сами же γ -кванты, имея электромагнитную природу, массой покоя не обладают (масса покоя любого фотона $m_{0\phi} = 0$).

§ 5.4. Основы квантовой оптики

Зарождение квантовой гипотезы. Виды излучений. Излучение, испускаемое нагретыми телами, называется *тепловым*. Всякое нагретое тело является источником теплового излучения. При этом не следует думать, что тепловое излучение возникает только при высоких температурах — оно происходит и при комнатной температуре, но при этом испускаются, в основном, инфракрасные лучи. На шкале электромагнитных волн инфракрасные лучи занимают обширный участок от миллиона до тысячи нанометров. При повышении температуры интенсивность излучения повышается, а цвет излучаемого света становится сначала красным, затем оранжевым, затем желтым и, наконец, обычным белым. Тело, нагретое, до нескольких тысяч градусов (температура поверхности Солнца, например, 6000 К) имеет сплошной спектр, занимающий область от невидимого инфракрасного излучения до невидимого ультрафиолетового излучения (рис. 5.10).

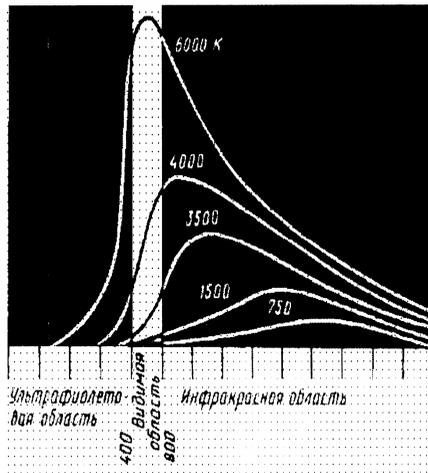


Рис. 5.10. Сплошной спектр излучения абсолютно черного тела

Все эти закономерности были установлены экспериментально, однако попытки объяснить их с волновой точки зрения, представляя свет как электромагнитную волну, терпели неудачу. Многократно проверенные законы электромагнетизма Максвелла неожиданно отказывали, когда их пытались применить к проблеме излучения веществом света. И это тем более удивительно, что эти же законы превосходно описывали излучение радиоволн антенной, а в свое время существование электромагнитных волн было предсказано Максвеллом на основе именно электромагнитной теории.

В поисках выхода из создавшегося противоречия между теорией и опытом немецкий физик М.Планк ввел так называемую квантовую гипотезу: гипотезу о прерывистом характере излучения нагретыми телами. Мы уже отмечали, что видимый свет излучается атомами (либо молекулами). Нагретое тело состоит из колоссального количества атомов, каждый из которых может стать источником излучения электромагнитной энергии. Но не зная, как устроен атом, ничего достоверного о механизме излучения сказать нельзя. Ясно лишь, что внутри атома нет света так же, как в струне рояля нет звука. Подобно струне, начинающей звучать лишь после удара молоточком, атомы рожают свет только после их возбуждения. Но если в классической физике струна может колебаться с произвольной частотой, порождая при этом звуковые волны соответствующей частоты, атомные системы могут «колебаться» и «звучать» только с набором избранных частот.

М.Планк предположил: *нагретые тела испускают и поглощают электромагнитную энергию не непрерывно, а определенными конечными порциями — квантами. Энергия E каждой порции прямо пропорциональна частоте излучения:*

$$E = h\nu, \quad (5.4.1)$$

где h — постоянная Планка, которая в современной физике играет исключительно важную роль; ее значение определено с высокой точностью:

$$h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}.$$

Гипотеза Планка о прерывистом характере излучения нагретыми телами объяснила экспериментально найденные зависимости излучения от температуры тела (закон смещения Вина, закон Стефана-Больцмана). И если сам Планк воспринимал свою гипотезу как

дополнительный удачный прием, позволяющий объяснить закономерности теплового излучения, ее значение оказалось несравненно большим — она знаменовала рождение новой физической теории, теории микромира, т.е. квантовой теории.

Когда была открыта планетарная модель атома Бора—Резерфорда, гипотеза Планка получила дальнейшее физическое обоснование, поскольку была вскрыта дискретность (квантованность) энергетических уровней атомных систем.

Кроме теплового излучения известны следующие виды излучений.

Электролюминесценция. При разряде в газах электрическое поле сообщает электронам большую кинетическую энергию, быстрые электроны испытывают неупругие соударения с атомами. Часть кинетической энергии электронов идет на возбуждение атомов. Благодаря этому разряд в газе сопровождается свечением. Это и есть электролюминесценция.

Катодолюминесценция. Свечение твердых тел, вызванное бомбардировкой их электронами, называют катодолюминесценцией. Благодаря катодолюминесценции светятся экраны электронно-лучевых трубок телевизоров.

Хемилюминесценция. При некоторых химических реакциях, идущих с выделением энергии, часть этой энергии непосредственно расходуется на излучение света. Источник света остается холодным (он имеет температуру окружающей среды). Это явление называется хемилюминесценцией. Свойством светиться обладают многие живые организмы: светлячки, насекомые, бактерии, многие рыбы, обитающие на большой глубине. Часто светятся в темноте кусочки гниющего дерева.

Фотолюминесценция. Падающий на вещество свет частично отражается, а частично поглощается. Энергия поглощаемого света в большинстве случаев вызывает лишь нагревание тел. Однако некоторые тела сами начинают светиться непосредственно под действием падающего на него излучения. Это и есть фотолюминесценция. Свет возбуждает атомы вещества (увеличивает их внутреннюю энергию), и после этого они высвечиваются сами.

Явление фотолюминесценции широко используется в лампах дневного света. Советский физик С.И.Вавилов предложил покрывать внутреннюю поверхность разрядной трубки веществами,

способными ярко светиться под действием коротковолнового излучения газового разряда. Лампы дневного света примерно в три-четыре раза экономичнее обычных ламп накаливания.

Световые кванты. Фотонная теория. Квантовым законам подчиняется поведение всех микрочастиц. Впервые квантовые свойства материи были обнаружены, как отмечалось, при исследовании закономерностей излучения и поглощения света. Но кроме явления теплового излучения, можно назвать другие явления, где проявляются квантовые свойства света. Это, например, явление фотоэффекта.

Фотоэффектом называют вырывание электронов из вещества под действием света. Явление это было открыто Г.Герцем в 1889 г. и затем тщательно исследовано русским физиком А.Г.Столетовым. Опытным путем он установил три закона фотоэффекта (внешнего фотоэффекта):

1. Максимальная начальная скорость фотоэлектронов определяется частотой света и не зависит от его интенсивности.

2. Для каждого вещества существует красная граница фотоэффекта, т.е. такая наименьшая частота света ν_0 , при которой еще возможен внешний фотоэффект.

3. Число фотоэлектронов, вырываемых из катода за единицу времени (фототок насыщения), прямо пропорционально интенсивности света.

Законы фотоэффекта просты по форме, однако 1-й и 2-й законы находятся в явном противоречии с волновой электромагнитной теорией света.

А.Эйнштейну удалось преодолеть эти противоречия, создав в 1905 г. фотонную теорию света. Он высказал гипотезу о том, что электромагнитное излучение не только испускается порциями (квантами), но распространяется и поглощается веществом в виде отдельных частиц электромагнитного поля — фотонов, обладающих энергией $E = h\nu$.

Если Планк, выдвигая гипотезу квантов, считал, что квант необходим лишь как вспомогательное понятие, то Эйнштейн пошел дальше, он увидел в кванте реально существующую частицу электромагнитного поля — фотон — и выдвинул основные положения *фотонной теории*. Фотон, будучи частицей электромагнитного поля, движется со скоростью света c . Он существует

только в движении. Остановить фотон нельзя, он либо движется со скоростью света, либо не существует.

Каждый фотон несет энергию:

$$E = h\nu.$$

По закону пропорциональности массы и энергии каждый фотон обладает и массой:

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Подчеркнем, что поскольку фотон существует только в движении со скоростью света, то у него нет массы покоя. В этом заключается принципиальное отличие фотона от обычных частиц вещества. Далее, поскольку фотон движется, он обладает также импульсом:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c}. \quad (5.4.2)$$

Наличие у фотона импульса подтверждается существованием светового давления.

На основе фотонной теории, применив закон сохранения энергии, Эйнштейн пришел к гениальному по своей простоте результату:

$$h\nu = A + \frac{mV^2}{2}. \quad (5.4.3)$$

То есть энергия фотона $h\nu$ идет на совершение работы выхода A (работы, которую нужно совершить для извлечения электрона из металла) и на сообщение электрону кинетической энергии.

Чтобы вырвать электрон из металла — даже без сообщения ему кинетической энергии — нужно совершить работу выхода A . Следовательно, энергия кванта должна быть больше этой работы:

$$h\nu \geq A.$$

Предельную частоту ν_0 называют *красной границей* фотоэффекта. Она выражается так:

$$\nu_0 = \frac{A}{h}.$$

Работа выхода A зависит от рода вещества. Поэтому и красная граница ν_0 для разных веществ различна.

Давление света. Давление света было предсказано Максвеллом с позиций волновой природы. Однако его можно объяснить

и с позиций квантовых представлений — как суммарный импульс, передаваемый фотонами облучаемой поверхности. Если на поглощаемую поверхность (единичной площади) в каждую секунду падает N фотонов, каждый фотон при этом передает поверхности импульс $\frac{h\nu}{c}$, то суммарный импульс будет равен $p = \frac{Nh\nu}{c}$, но $h\nu N$ — это энергия, передаваемая фотонами поверхности единичной площади за единицу времени, следовательно:

$$p = \frac{\Delta W(1+R)}{c} = u(1+R),$$

где $u = \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0}$ — плотность энергии электромагнитного излучения, R — коэффициент отражения; для абсолютно черного тела $R = 0$, для зеркальной поверхности $R = 1$.

Эффект Комптона. Подтверждением квантового характера взаимодействия электромагнитного излучения с веществом является также известный эффект Комптона, открытый американским ученым А.Комптоном в 1923 г. Он изучал рассеяние рентгеновских лучей при прохождении через пластинку из парафина. В результате опытов было установлено, что частота рассеянных рентгеновских лучей уменьшается (длина волны соответственно увеличивается), что не находило объяснения с волновой точки зрения (по волновой теории частота не должна изменяться).

Однако наблюдаемый эффект легко объясняется с квантовых позиций: как частично неупругий удар двух частиц — электрона и γ -фотона, в полном соответствии с законами сохранения энергии и импульса.

Итак, каждый отдельный фотон обладает и волновыми, и квантовыми свойствами. Это получило название *корпускулярно-волнового дуализма*. Волновые свойства света проявляются в опытах по интерференции света, дифракции и др., а квантовые — во взаимодействии излучения с веществом.

Такое истолкование связи между волновыми и квантовыми свойствами света было предложено А.Эйнштейном. Оно сыграло выдающуюся роль в развитии современной физики.

В проявлении двойственных свойств света имеется важная закономерность: чем короче длина волны, тем ярче проступают квантовые свойства, и, наоборот, чем длиннее волна, тем ярче проявляются волновые свойства излучения. Приведенная ниже табл. 5.1 иллюстрирует сказанное.

Таблица 5.1

**Проявление волновых и квантовых свойств
в зависимости от частоты волны**

Наименование диапазона	Частота, Гц	Преобладание свойств
Переменный ток. Токи высокой частоты	50— 210^4	Волновые
Радиоволны	210^4 — 310^9	Волновые
Сантиметровые радиоволны	310^9 — 310^{10}	Волновые
Миллиметровые радиоволны	310^{10} — 310^{11}	Волновые
Инфракрасное излучение	310^{11} — 410^{14}	Волновые и квантовые
Видимое излучение	410^{14} — 810^{14}	Волновые и квантовые
Ультрафиолетовое излучение	810^{14} — 310^{16}	Волновые и квантовые
Рентгеновское излучение	310^{16} — 310^{20}	Волновые и квантовые
Гамма-излучение	310^{20} и более	Квантовые

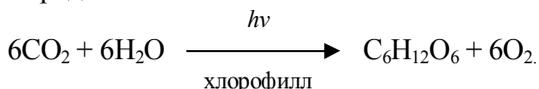
§ 5.5. Фотохимическое действие света

Как установлено, всякое взаимодействие света с веществом, связанное с его поглощением, имеет квантовый характер. Свет, поглощенный веществами, может вызвать химические превращения этих веществ. Реакции, происходящие под действием света, называются *фотохимическими реакциями* (выцветание красок, образование углеводов в зеленых частях растений и т.д.).

Фотохимические реакции весьма разнообразны. Можно назвать два типа таких реакций: реакции синтеза и реакции разложения.

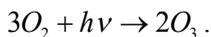
Реакция синтеза состоит в том, что под действием света происходит преобразование молекул исходных веществ в более сложные молекулы. Фундаментальное значение для поддержания

условий жизни и самой жизни в биосфере играют реакции фотолитерного разложения и синтеза, которые идут при фотосинтезе. Эту функцию осуществляют зеленые растения-автотрофы, или продуценты. Именно фотосинтез обеспечивает включение солнечной энергии в пищевые сети экосистем и биологические круговороты. Поглощенные при фотосинтезе молекулами хлорофилла (зеленые пигменты листа) кванты солнечного света трансформируются в энергию химических связей органических соединений. Например, сахаров: глюкозы, фруктозы, сахарозы и т.д. Этот процесс сопровождается реакцией фотолитерного разложения (фотолитерного разложения) воды и выделением кислорода:



Ежегодно за счет фотосинтеза на планете Земля образуется около 160 млрд. тонн органических соединений, поглощается 300 млрд. тонн CO_2 , образуется 100 млрд. тонн кислорода. На примере фотосинтеза хорошо видна энергетическая и средообразующая роль живого вещества. Процессы окисления органического вещества в биосфере (дыхание организмов, горение) давно бы привели к огромному накоплению углекислоты и нарушению круговоротов кислорода и углерода. Функции поддержания этих круговоротов наряду с другими факторами выполняют зеленые растения.

Примером реакции синтеза является и образование под действием ультрафиолетового излучения озона, которое идет по схеме:



Реакции разложения приводят к образованию под действием света более простых молекул из сложных. Например, аммиак под действием света разлагается на азот и водород, а бромистое серебро — на серебро и бром.

§ 5.6. Экологически опасные световые факторы

Среди абиотических факторов свет является одним из основных, если не главным.

Солнце испускает в космическое пространство колоссальный по мощности поток излучения, основная доля которого приходится

на видимый свет и инфракрасное излучение (рис. 5.11). Полная мощность излучения Солнца, т.е. светимость, равна $4 \cdot 10^{23}$ кВт, за год Солнце излучает около $12 \cdot 10^{30}$ кДж. Земля же получает всего лишь одну двухмиллиардную долю солнечного излучения. При этом видимый свет и инфракрасное излучение составляют около 90%, а ультрафиолетовое излучение — около 9%. Около 30% солнечной энергии отражается и уходит в мировое пространство, навсегда теряясь для Земли.

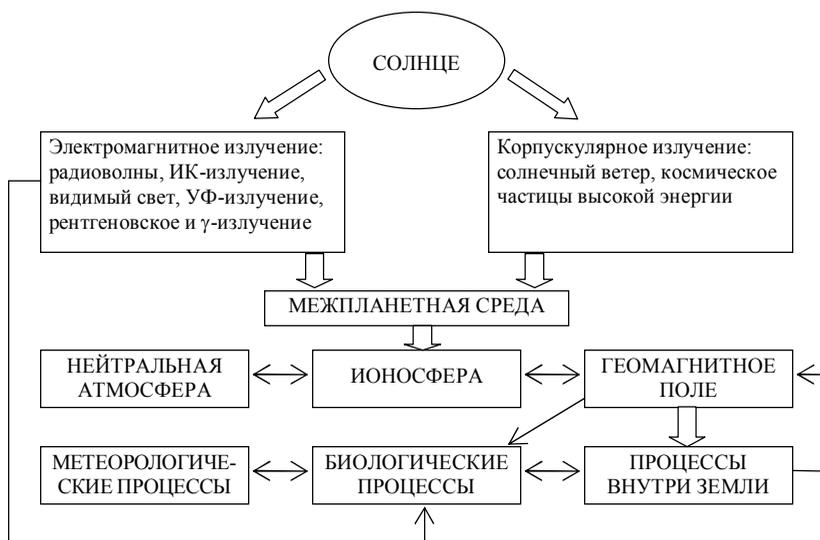


Рис. 5.11 Влияние солнечного излучения на природные процессы Земли

Поглощенная энергия затем переизлучается Землей и атмосферой, уже в инфракрасном (ИК) диапазоне. Большая часть ИК-переизлучения задерживается атмосферными газами: CO_2 , CH_4 , NO_2 и др. (эти газы получили название парниковых) и возвращается к поверхности Земли. Таким образом, инфракрасное (тепловое) излучение играет заметную роль в природных экосистемах. Для животных организмов световой фактор необходим для зрительной ориентации. Свет вызывает фотохимические реакции в фоторецепторах сетчатки глаза (палочек и колбочек), давая начало сложному процессу зрительного восприятия.

По требованию к условиям светового режима растения принято делить на следующие группы:

1. Гелиофиты — светлюбивые, произрастающие на хорошо освещенной местности (гвоздичные, амарантовые, молочайные, многие луговые травы и т.д.).

2. Сциофиты — тенелюбивые, плохо переносящие освещение прямыми солнечными лучами (зеленые мхи, плауны, ель, пихта, самшит, марьяник лесной и др.).

3. Факультативные гелиофиты — теневыносливые, легко адаптирующиеся к изменению светового режима, могущие развиваться и на свету, и в тени (мятлик луговой, земляника, липа, черемуха, большинство комнатных растений).

Световой режим играет важную роль в местах обитания самых разных организмов. Например, в океане водоросли, в основном, живут в освещенной зоне, обычно на глубинах 20—40 м, однако при повышении прозрачности воды эти же виды водорослей встречаются и на глубинах до 200 м.

Ультрафиолетовое излучение. Напомним, что электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между фиолетовой границей видимого света ($\lambda = 400$ нм) и длинноволновой частью рентгеновского излучения ($\lambda = 10$ нм), называется ультрафиолетовым (УФ).

Область УФ 200—10 нм сильно поглощается в атмосфере (решающую роль здесь играет озоновый слой) и до поверхности Земли не доходит (этот диапазон ультрафиолетового излучения был бы губителен для всего живого).

Остальную часть УФ-спектра условно делят на три области: область А — 400—315 нм, область В — 315—280 нм, область С — 280—200 нм.

Область А ультрафиолета играет важную роль в образовании пигмента, который придает коричневую окраску коже.

Бактерицидное действие УФ-излучения вызывается областью С. Это свойство используют для предотвращения распространения заразных болезней и стерилизации помещений, в которых проводятся микробиологические работы.

Ультрафиолет области В и С обладает антирахи́тным действием, так как фотохимическим путем образует витамин Д из его

провитамина. Эти же области УФ-излучения в большой дозе вызывают покраснение кожи (эритему) и могут вызвать даже ожоги.

Световое загрязнение (экологически опасный фактор) представляет собой вид физического воздействия на окружающую среду, обусловленного периодическим или продолжительным превышением уровня естественного светового фона, главным образом, за счет использования источников искусственного излучения.

Искусственные источники УФ-излучения — это ртутные, ксеноновые, водородные лампы, флюоресцентные лампы, лазеры газовые и на красителях, специальные медицинские аппараты и т.д. При обращении с такими источниками необходимо строго соблюдать меры предосторожности.

Повышенные дозы УФ солнечного излучения получают, например, люди, работающие на открытом воздухе: моряки, рыбаки, сельскохозяйственные рабочие, работники при фотопроцессах, где используются УФ-генерирующие высокоомощные галогеновые лампы и вспышки. Увеличение дозы УФ-облучения приводит:

1) к ущербу здоровья людей: рост заболеваний, связанных со злокачественными опухолями кожи, поражение иммунной системы, заболевание глаз;

2) к нанесению ущерба производству продовольствия: снижение урожайности сельскохозяйственных культур, уменьшение промышленных запасов Мирового океана;

3) к глобальным изменениям климата, состава атмосферы: нарушение радиационного баланса Земли, накопление углекислоты в атмосфере, изменение микробиологического равновесия в почвах, т.е. снижение плодородия.

Вообще опухоли, вызываемые УФ-лучами, распространены довольно широко. УФ-излучение (область В и С) способно вызвать опухоли кожи двух типов — немеланомный рак и злокачественную меланому, но и УФ области А также канцерогенен, хотя и в значительно меньшей степени.

Острые воздействия УФ-облучения вызывают воспаление роговицы и век, ослабление световой чувствительности, но наиболее серьезной патологией является развитие катаракты. В умеренных широтах около 20% пожилых людей болеют катарактой, а в экваториальных широтах — до 30% (рис. 5.12).

Установлено, что одноклеточные и микроорганизмы подвержены опасности в большей степени, чем крупные животные, потому что УФ-лучи способны повреждать только поверхностные слои клеток.

Мишенью для действия УФ-излучения В и УФ-излучения С служат ДНК, клеточные мембраны и другие органеллы клетки. Как у прокариотов, так и у эукариотов наблюдаются при воздействии УФ-облучения гибель клеток, хромосомные изменения, мутации, морфологическая трансформация.

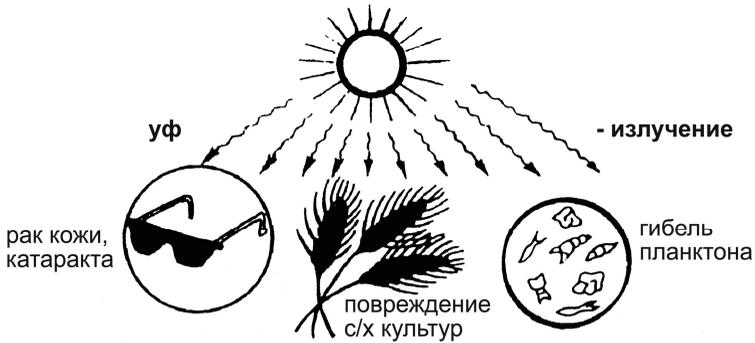


Рис. 5.12. Негативное воздействие ультрафиолетовых лучей

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите позитивные и негативные влияния УФ-излучения на живые организмы.
2. В чем проявляется оптическая активность природных веществ?
3. Что такое фотосинтез? Какова его роль в биосфере?

Глава 6

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ В КУРСЕ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

§ 6.1. Основы атомной физики. Постулаты Бора. Квантование энергии

Спектры излучения не взаимодействующих атомов, как известно, состоят из отдельных линий, сгруппированных в серии.

Спектральной серией называют совокупность линий, положение которых в спектре подчиняется определенной закономерности, наиболее отчетливо это проявляется в простейшем атоме водорода.

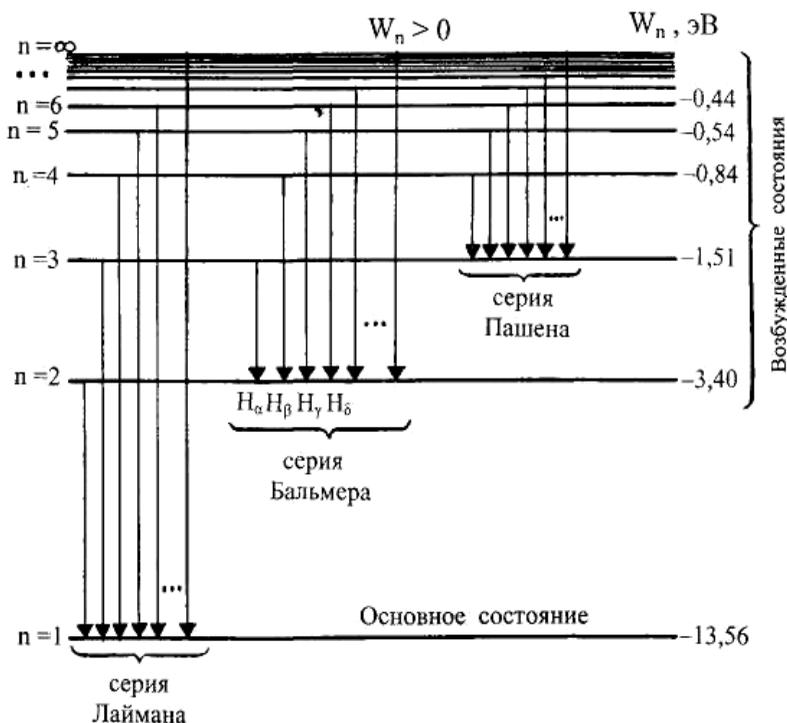


Рис. 6.1. Энергетические уровни атома водорода по Бору.
Показаны спектральные серии излучения

Первой была обнаружена и изучена серия линий атомарного водорода в видимой и близкой ультрафиолетовой областях И.Бальмером в 1885 г. Позднее были обнаружены серии линий и в других областях спектра атомарного водорода. Все они могут быть представлены обобщенной формулой:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right), \quad (6.1.1)$$

где n — целое число, постоянное для каждой серии, а k — ряд целых чисел, начиная с $k = n + 1$. Значению $n = 1$ соответствует серия Лаймана (УФ-область), значению $n = 2$ — серия Бальмера (видимая область), $n = 3$ — серия Пашена, $n = 4$ — серия Брэкета (рис. 6.1) и т.д.

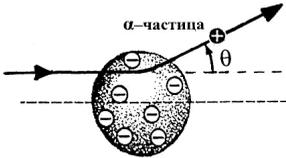


Рис. 6.2. Модель атома по Томсону (модель «пудинга»)

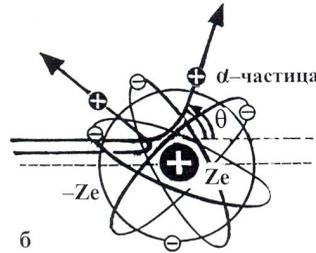


Рис. 6.3. Планетарная модель атома кислорода

Модель атома Дж.Дж.Томсона (модель «пудинга», рис. 6.2) не давала правильного объяснения спектральным сериям. В 1911 г. Э.Резерфорд в результате тщательно проведенных опытов установил совершенно иную модель атома — ядерную (или планетарную), согласно которой атом состоит из ядра, в котором сосредоточен положительный заряд и сконцентрирована практически вся масса, а вокруг ядра обращаются отрицательно заряженные электроны, образуя так называемую электронную оболочку, при этом размеры электронных орбит могут превышать в десятки и сотни тысяч раз размеры ядра (рис. 6.3). Но тут же возникла парадоксальная ситуация: планетарная модель противоречила самому факту существования атомов. Действительно, если модель атома Томсона — статичная модель, то модель Резерфорда — динамическая: электроны в атоме обращаются вокруг ядра, то есть обладают центростремительным ускорением. Но в электродинамике

Максвелла всякий заряд, движущийся с ускорением, излучает. Следовательно, электроны в этой модели должны излучать электромагнитную энергию. Было подсчитано, что за миллионную долю секунды атомы должны прекратить свое существование: электроны, потеряв энергию на излучение, должны все упасть на ядро. Но ведь атомы существуют!

Выход из затруднительного положения в теории атома был найден выдающимся физиком XX столетия Нильсом Бором. Именно ему удалось связать в единое целое ядерную (планетарную) модель атома Резерфорда, закономерности линейчатых спектров и квантовый характер излучения и поглощения света.

В основу своей теории Бор положил три постулата:

1. Атомы, несмотря на то, что электроны в них движутся с ускорением, могут длительно находиться в состояниях, в которых они не излучают. Эти состояния получили название *стационарных*. В каждом из стационарных состояний атом может обладать только строго определенной энергией; все стационарные состояния пронумерованы от 1 до бесконечности, номер состояния атома назвали *главным квантовым числом* — n .

2. Атом может скачком переходить из одного стационарного состояния в другое. При переходе атома из k -ого стационарного состояния с большей энергией в n -е состояние с меньшей энергией атом излучает, энергия излучения кванта определяется формулой:

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n. \quad (6.1.2)$$

3. Стационарным состояниям соответствует движение электрона по круговым орбитам определенного радиуса r . При движении по этим орбитам величина момента импульса электрона может принимать только дискретные, квантованные значения:

$$mVr = n\hbar, \quad (6.1.3)$$

где $n = 1, 2, 3, \dots$ — главное квантовое число, m — масса электрона,

V — скорость электрона на орбите радиуса r , $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \cdot 10^{-34}$

Дж·с — постоянная Планка, единица измерения момента импульса (читается: «аш с чертой»).

На основе сформулированных постулатов Н.Бор получил выражение для энергии электрона в атоме водорода в любом стационарном состоянии:

$$E_n = -\frac{me^4}{8h^2\varepsilon_0^2n^2}. \quad (6.1.4)$$

Формулу (5.1.4) удобно представить в виде:

$$E_n = -\frac{W_i}{n^2}, \quad (6.1.5)$$

где $W_i = 13,56$ эВ — энергия ионизации атома водорода: именно такую энергию надо сообщить атому водорода, чтобы оторвать электрон от ядра.

На диаграмме (рис. 6.1) представлены энергетические уровни атома водорода. Энергию при этом мы откладываем по оси ординат в электронвольтах (эВ).

С возрастом n энергия электрона в атоме увеличивается. Состояние атома с минимальным значением энергии E_1 ($n = 1$) называется *основным*, а состояния с $n > 1$ — *возбужденными*. Основное состояние является устойчивым, а возбужденные — неустойчивыми. Время нахождения атома в возбужденном состоянии чрезвычайно мало ($\tau \approx 10^{-8}$ с).

При переходе электрона с более высокого уровня на более низкий будет испущен квант энергии (квант света):

$$h\nu_{kn} = E_k - E_n = W_i \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right). \quad (6.1.6)$$

На рис. 6.1 показаны переходы, дающие серии излучений атомов водорода. Группа переходов на основной уровень ($E_2 \rightarrow E_1$, $E_3 \rightarrow E_1$, ... $E_\infty \rightarrow E_1$) дает излучение, соответствующее линиям серии Лаймана, при переходах со всех вышележащих уровней на уровень с $n = 2$ возникает серия Бальмера, при переходах на уровень с $n = 3$ — серия Пашена и т.д.

В каждой серии есть граничные линии, т.е. линии, соответствующие фотонам с наибольшей энергией и наименьшей энергией. Так, в серии Лаймана фотон с наибольшей энергией $h\nu_{max} = E_\infty - E_1 = 13,56$ эВ, а фотон с наименьшей энергией $h\nu_{min} = E_2 - E_1 = 10,16$ эВ. Как видим, серия Лаймана располагается в УФ-области. В серии Бальмера максимальная энергия фотонов $h\nu_{max} = E_\infty - E_2 = 3,4$ эВ,

а минимальная энергия $h\nu_{min} = E_3 - E_2 = 1,89$ эВ, эта серия составляет видимую область спектра.

Теория Бора прекрасно объяснила спектральные серии атома водорода и явилась основой учения о строении электронной оболочки атомов.

§ 6.2. Лазеры

Итак, излучать энергию атом может только в том случае, если он за счет поглощения энергии извне будет возбужден, т.е. переведен из основного энергетического состояния в более высокое — возбужденное.

Возбуждаться атом может различными способами: при соударениях с другими частицами, при поглощении фотона (за счет облучения) и т.д.

Процесс испускания фотона атомом может происходить самопроизвольно, т.е. спонтанно, или под действием внешнего электромагнитного поля, в последнем случае излучение называют *индуцированным*.

Обычно время жизни возбужденных состояний мало: $\tau \approx 10^{-8}$ с. Однако в некоторых случаях возбужденные энергетические состояния могут существовать достаточно долго (10^{-3} с и более). Такие состояния и соответствующие им энергетические уровни называются *метастабильными*. Переход атома с метастабильного уровня на основной может быть стимулирован внешним электромагнитным полем. В этом случае, как было предсказано А.Эйнштейном в 1916 г., возникает *индуцированное излучение*.

На основе использования индуцированных переходов Н.Г.Басовым и А.М.Прохоровым в СССР и Ч.Таунсом в США в 1953 г. были разработаны генераторы когерентного излучения — лазеры, или квантовые генераторы.

Излучение лазера обладает рядом замечательных свойств: острая направленность пучка и большая мощность в импульсе, полная поляризация, высокая монохроматичность и когерентность, не достижимые никакими другими методами.

Фокусируя пучок излучения лазера с помощью линз, можно создать в малых объемах огромную плотность энергии, способную

испарять металл, высверливать в алмазах тонкие отверстия, производить микросварку. В медицине лазерный луч успешно используют для «приваривания» отслоившейся сетчатки к тканям глазного дна, для разрушения опухолей и хирургических операций на внутренних органах (поглощая излучение, участки ткани испаряются — образуется надрез), а в биологии — для ювелирных «операций» на клетке (луч лазера играет роль тонкого хирургического скальпеля), для стимуляции роста растений и т.д.

Луч лазера способен разрушать определенные участки биомолекул. Представляется возможным таким образом вызывать нужные мутации в молекулах ДНК.

Нагрев плазмы лазерным лучом может быть использован для осуществления управляемых термоядерных реакций (см. §. 6.7).

Острая направленность лазерного луча позволяет применять его для космической связи, передачи энергии на большие расстояния.

§ 6.3. Рентгеновское излучение

Как отмечалось, спектр излучения рентгеновской трубки представляет собой наложение тормозного и характеристического излучений. Тормозное излучение возникает при резком торможении электронов на аноде (антикатоде). Спектр тормозного излучения сплошной и имеет четкую границу (λ_{min}) со стороны коротких волн.

Второй тип рентгеновского излучения — характеристическое, такое название оно получило потому, что эти лучи характеризуют вещество антикатады рентгеновской трубки. Характеристические рентгеновские лучи имеют линейчатые спектры. Появление характеристического излучения становится возможным, если атом поглощает порцию энергии, достаточную для вырывания или возбуждения одного из внутренних электронов, близких к ядру. Атомные рентгеновские спектры просты: число линий в них невелико и они сгруппированы в несколько серий. В атомах с большим атомным номером Z внутренние электронные оболочки K, L, M, N полностью заполнены электронами. Если с одной из этих оболочек будет удален электрон, то на освободившееся место переходит электрон из более удаленной от ядра оболочки, такой переход будет связан с излучением рентгеновского кванта — так возникает характеристическое

излучение. Линейчатый спектр индивидуален для атомов каждого элемента, что позволяет использовать его для количественного и качественного анализа состава веществ.

Дифракция рентгеновских лучей. Рентгеноструктурный анализ. В 1912 г. М.Лауэ получил дифракционную картину (лауэграмму), пропуская узкий пучок R-лучей через монокристалл. Примерный вид лауэграммы показан на рис. 6.4.

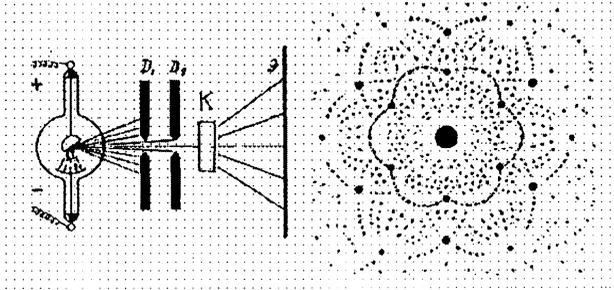


Рис. 6.4. Лауэграмма — дифракционная картина, возникающая при прохождении рентгеновских лучей сквозь монокристалл К

Дифракцию рентгеновских лучей при отражении от кристалла исследовали Г.В.Вульф, Г.Брэгг и Л.Брэгг (отец и сын). В их опытах решетка кристалла играла роль дифракционной решетки. Дифракция R-лучей на кристаллах используется для решения двух задач:

1) по дифракционной картине, полученной на неизвестной кристаллической структуре при помощи рентгеновских лучей известной длины волны, можно найти расположение частиц, составляющих эту структуру (рентгеноструктурный анализ);

2) по дифракционной картине от известного кристалла можно определить длину волны R-лучей (рентгеновская спектроскопия).

Метод рентгеноструктурного анализа дает весьма точные и надежные результаты (межатомные расстояния определяются с точностью до $10^{-3}10^{-4}$ нм, а валентные углы — с точностью до 1°). Методом рентгеноструктурного анализа исследуются также волокнистые вещества, жидкости, жидкие кристаллы (вещества, сочетающие в себе подвижность жидкостей и структурные свойства кристаллов), коллоидные частицы кристаллического строения и т.д.

Интересные результаты получены в биологии. Многие биологические вещества, в том числе и белки, можно закристаллизовать

и получить препараты, годные для рентгеноструктурного анализа. Описанным методом расшифрованы пространственные структуры гемоглобина, лизоцима, химотрипсина, рибонуклеазы и др. Основываясь на анализе рентгенограмм, Ф.Крик и Дж.Уотсон воспроизвели пространственную форму молекулы ДНК. С помощью рентгеноструктурного анализа удалось понять, как функционируют молекулы ряда ферментов, выяснить структурные основы многих наследственных заболеваний, структуру вирусов и т.д.

§ 6.4. Радиоактивный распад. Естественная радиоактивность. Изотопы

После открытия французским ученым А.Беккерелем явления радиоактивности (1896 г.) стало понятно, что атомы имеют сложную структуру. Изучением радиоактивных элементов (уран, торий, радий и др.), кроме Беккереля и супругов Кюри, занялся Резерфорд.

Было установлено, что радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием трех видов излучения: α -лучи, β -лучи, γ -лучи. При этом оказалось, что α - и β -лучи являются заряженными частицами, а γ -лучи — это электромагнитные волны, напоминающие рентгеновские, но с еще меньшей длиной волны: в опыте Резерфорда γ -лучи не отклонялись в сильном магнитном поле, а α - и β -частицы отклонялись в противоположные стороны.

В результате тщательно проведенных исследований Резерфорд установил, что β -частицы — это поток электронов, несущих элементарный отрицательный заряд, α -частицы — это поток ядер гелия, заряд α -частицы положительный и равен двум элементарным, масса α -частицы равна 4 атомным единицам массы (а.е.м.). При α -распаде ядро теряет положительный заряд $2e$, а масса его убывает на 4 а.е.м. (два протона плюс два нейтрона), в результате элемент смещается на две клетки к началу периодической системы:



При β -распаде из ядра вылетает электрон, в результате заряд ядра увеличивается на единицу, а масса практически остается

неизменной, поэтому элемент смещается на одну клетку ближе к концу периодической системы:



Здесь ${}^0_{-1} e$ обозначает электрон.

Гамма-излучение не сопровождается изменением заряда, масса ядра также меняется ничтожно мало, поэтому при гамма-излучении не происходит смещение элемента.

Закон радиоактивного распада. Радиоактивный распад подчиняется статистическому закону. Для каждого радиоактивного вещества существует определенный интервал времени, на протяжении которого активность убывает в два раза. Этот интервал носит название *периода полураспада*.

Период полураспада T — это то время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.

Активностью радиоактивного источника (препарата) называется число распадов в единицу времени:

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t}.$$

За единицу активности в Международной системе единиц принята активность препарата, в котором за 1 с происходит 1 распад. Эту единицу назвали *беккерель* (обозначается Бк): 1 Бк = 1 расп/с. Внесистемная единица активности — *кюри* (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ расп/с.

Математическая форма закона радиоактивного распада проста:

$$N_{(t)} = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T}}, \quad (6.4.3)$$

где $N_{(t)}$ — число нераспавшихся к моменту времени t атомов радиоактивного препарата, T — период полураспада. График этого закона показан на рис. 6.5, где период полураспада T — 5 часов.

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем меньше времени живут атомы, тем быстрее происходит распад, тем больше активность данного препарата.

Закон радиоактивного распада (6.4.3) чаще представляют в экспоненциальной форме:

$$N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (6.4.4)$$

где $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ — постоянная радиоактивного распада, а число e — основание натурального логарифма.

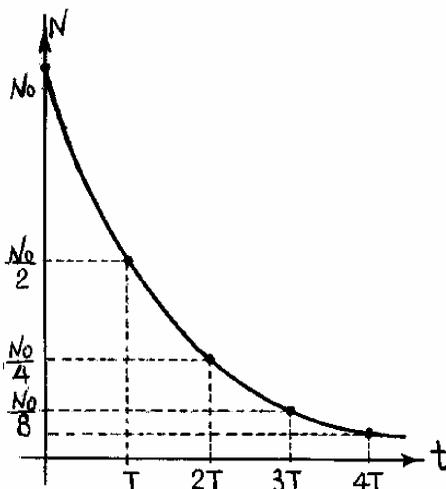


Рис. 6.5. Закон радиоактивного распада.

За время, равное периоду T , активность препарата уменьшается вдвое

Изотопы. *Изотопами* называются разновидности данного химического элемента, тождественные по химическим свойствам, но отличающиеся атомными массами и радиоактивностью. Когда был открыт нейтрон и окончательно установлен состав ядра (ядро состоит из заряженных частиц — протонов и незаряженных частиц — нейтронов, массы которых почти одинаковы), сформировалось окончательное понимание изотопов: изотопы данного элемента обладают одинаковым количеством протонов, но различным количеством нейтронов в ядре (в таблице Менделеева, естественно, они занимают одну клетку).

В настоящее время установлено существование изотопов у всех химических элементов, при этом некоторые элементы имеют только нестабильные (т.е. радиоактивные) изотопы.

Особенно замечательны изотопы водорода, так как они отличаются друг от друга по массе в два или три раза. Изотоп с

относительной массой 2 называется *дейтерием* (обозначается ${}^2_1\text{H}$ либо D). Дейтерий стабилен (т.е. нерадиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1:5500) в обычный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая *тяжелая вода*: D_2O . Ее физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении она кипит при $101,2^\circ\text{C}$ и замерзает при $3,8^\circ\text{C}$. В естественной воде по числу атомов содержится примерно 0,015% дейтерия. Это означает, что в 18 г воды содержится $\text{Na} \cdot 0,00015 \approx 9 \cdot 10^{18}$ дейтерия.

Изотоп водорода с атомной массой 3 называется *тритием* (обозначается ${}^3_1\text{H}$ либо T). Этот изотоп β -радиоактивен с периодом полураспада 12,3 года. Тритий образуется в небольших количествах в атмосфере под действием космических лучей. Соединяясь с кислородом воздуха, он образует сверхтяжелую воду (T_2O), но из-за распада трития такая вода не накапливается. Таким образом, можно сказать, что из-за радиоактивности тритий в естественном состоянии в природе не встречается.

Не менее замечательными являются изотопы тяжелых элементов — «отцы» радиоактивных семейств: уран-238, уран-235 и торий-232. Периоды полураспада у них соответственно равны: 4,5 млрд. лет, 700 млн. лет и 10 млрд. лет. Конечными продуктами цепочки радиоактивных распадов этих семейств являются стабильные изотопы свинца: для урана-238 стабильный изотоп свинца Pb-206, для урана-235 — стабильный Pb-207, для тория-232 — стабильный Pb-208.

Семейства урана и тория имели значительное влияние на эволюцию нашей планеты, формирование ее нынешнего состояния. Когда Земля стала жить своей самостоятельной жизнью, по мнению многих ученых, она была холодным небесным телом. В связи с гравитационным сжатием и нагревом от распада радиоактивных изотопов перечисленных трех семейств произошло быстрое повышение температуры. В результате этого образовалась большая область расплавленного вещества: внешнее ядро и часть примыкающей к внешнему ядру мантии, в верхней мантии возникают также магматические очаги. И в настоящее время главным источником тепловой энергии внутри Земли является распад радиоактивных веществ. Как

показывают расчеты, около 90% радиогенной тепловой энергии обусловлено распадом. Поэтому главными «термоэлементами» Земного шара следует назвать активные изотопы урана, тория и самария (период полураспада 50 млн. лет): именно эти изотопы обеспечивают сбалансированный тепловой режим нашей планеты.

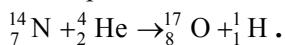
Сейчас урана-235 стало в 33 раза меньше, чем было, например, 4 млрд. лет назад. Запасы урана-238 сократились более, чем на 40%, а тория-232 — на 16%. Но еще много миллиардов лет должно пройти, прежде чем уран и торий исчезнут с лица Земли. Впрочем, весьма вероятно, что процесс их израсходования будет значительно ускорен самим человеком.

Среди изотопов с большим периодом полураспада, который не рождает никакого семейства, распадаясь сразу на дочернее ядро путем β -распада, очень важным для практических применений в датировке событий является изотоп калия-40: ${}_{19}^{40}\text{K} \rightarrow {}_{18}^{40}\text{Ar} + \beta^+ + \nu$. Период полураспада для этой реакции 1,2 млрд. лет.

В настоящее время кроме естественных радиоизотопов более тысячи радиоактивных изотопов получают искусственным путем, в атомных реакторах и на ускорителях.

§ 6.5. Искусственная радиоактивность. Деление ядер

Первая искусственная ядерная реакция была осуществлена Резерфордом в 1919 г., сумевшим, бомбардируя ядра азота α -частицами, превратить их в ядра кислорода:



В качестве частиц, способных проникнуть в ядро и вызвать ядерную реакцию, используют, кроме α -частиц, также протоны, нейтроны, дейтроны, γ - и R-фотоны. Особенно удобны для проведения ядерных реакций нейтроны, поскольку они не испытывают кулоновского отталкивания от ядра и легко проникают в них даже при малой энергии.

Многие продукты искусственного превращения ядер являются радиоактивными. Таким путем можно получать искусственные радиоактивные изотопы элементов, которые в естественных условиях являются стабильными. Явление искусственной радиоактивности

было открыто французскими учеными Ирен и Фредериком Жолио-Кюри.

С открытием нейтрона в физике установилась протонно-нейтронная модель ядра, при этом сумму числа протонов Z и числа нейтронов N в ядре называют *массовым числом* и обозначают буквой A : $A=Z+N$.

Между ядерными частицами действуют особые силы — *ядерные силы*, которые почти в 140 раз превосходят электрические. Это самые мощные силы из всех, которыми располагает природа. Ядерные силы — короткодействующие, каждый нуклон в ядре (протоны и нейтроны называются общим термином «нуклоны») взаимодействует только с ближайшими частицами, поэтому для ядерных сил имеет место явление насыщения. Именно этим объясняется неустойчивость ядер, начиная с ядра урана — с ростом числа протонов кулоновские силы растут, они стремятся разорвать ядро, а ядерные силы, получив насыщение, растут медленно.

Деление ядер урана было открыто в 1938 г. Механизм деления поясняется на основе капельной модели ядра: поглотив лишний нейтрон, ядро урана-235 возбуждается и начинает деформироваться, при этом образуется тонкая «шейка», после чего ядро, как капля, разрывается на две части, под действием кулоновских сил отталкивания эти осколки разлетаются со скоростью, равной почти $1/30$ скорости света. При делении ядра урана освобождаются два-три нейтрона. Это позволяет осуществлять цепную реакцию деления урана, которая сопровождается выделением огромной энергии. При делении одного ядра урана-235 выделяется ≈ 200 МэВ. При полном же делении всех ядер, содержащихся в 1 г урана, выделяется энергия $2,3 \cdot 10^4$ кВт·ч. Это эквивалентно энергии, получаемой при сгорании 3 тонн угля или 2,5 тонн нефти.

Ядерный реактор. Для использования в мирных целях высвобождающейся энергии при делении ядер урана необходимо, чтобы цепная реакция была управляемой. Она должна развиваться не лавинообразно, а длительное время с некоторой постоянной скоростью, которую можно было бы регулировать. Для этих целей служат ядерные реакторы.

Ядерным (или атомным) реактором называется устройство, в котором осуществляется управляемая реакция деления ядер.

Существуют два типа ядерных реакторов: реактор на медленных (тепловых) нейтронах и реактор на быстрых нейтронах.

Важным условием для работы реактора является критическая масса. *Критической массой* называют наименьшую массу делящегося вещества, при которой может протекать цепная ядерная реакция.

В самом первом ядерном реакторе, созданном под руководством Э.Ферми в декабре 1942 г. содержалось 52 т урана в виде блоков, переложенных примерно 472 т графита, который служил замедляющим веществом (рис. 6.6).

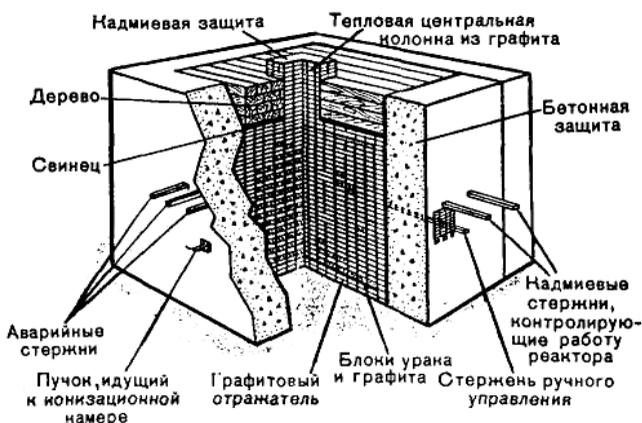


Рис. 6.6. Общий вид ядерного реактора, созданного под руководством Э.Ферми

Для чистого (без замедлителя) урана $^{235}_{92}\text{U}$, имеющего форму шара, критическая масса приблизительно равна 50 кг. При этом радиус шара равен примерно 9 см (уран — очень тяжелое вещество). Применяя замедлители нейтронов и отражающую нейтроны оболочку из бериллия, удалось снизить критическую массу до 250 г.

Построены также реакторы, работающие без замедлителя, на быстрых нейтронах. Преимущество реакторов на быстрых нейтронах в том, что при их работе образуется значительное количество плутония, который затем можно использовать в качестве ядерного топлива. Эти реакторы называются реакторами-размножителями, так как они воспроизводят делящийся материал. Строятся реакторы с коэффициентом воспроизводства 1,5; это значит, что в реакторе при делении 1 кг урана-235 получается до 1,5 кг плутония-239.

§ 6.6. Атомная энергетика

Создание в СССР первой в мире атомной электростанции (в 1954 г.) ознаменовало собой начало нового направления в энергетике. Развитие атомной (ядерной) энергетики получило быстрое распространение во многих странах. Ядерная энергетика широко шагнула по планете и прошла большой путь развития, познав блистательные победы и крупные неудачи.

Первоначально атомная энергия рассматривалась как источник чистой, безопасной и дешевой энергии. Предполагалось, что уже к концу XX в. атомные электростанции будут поставлять около 25% мировой дополнительной энергии. Теперь эти розовые мечты можно приводить как пример технологического опьянения.

Оказалось, что атомные электростанции отнюдь не безопасны. Известно в мире несколько серьезных аварий на ядерных установках, из них самая крупная — авария на Чернобыльской АЭС, произошедшая 26 апреля 1986 г., которая вызвала целую волну остановок работавших до этого электростанций и прекращение строительства новых, что привело к резкому снижению производства электроэнергии. Многие страны после случившейся аварии на Чернобыльской АЭС также пересмотрели планы строительства новых атомных электростанций в сторону его уменьшения или вовсе отказались от них.

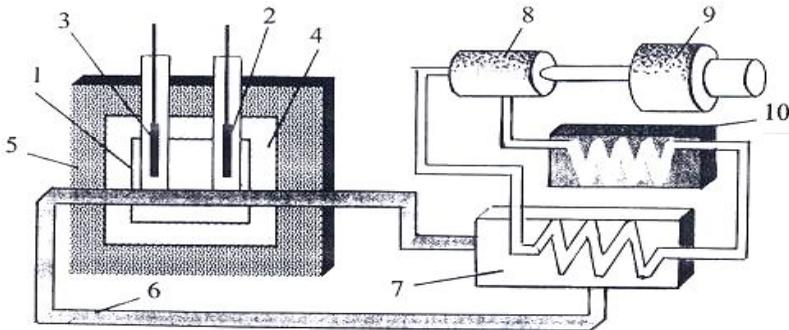


Рис. 6.7. Принципиальная схема атомной электростанции:

- 1 — ядерное горючее с замедлителем; 2 — аварийные стержни;
- 3 — регулирующие стержни; 4 — отражатель нейтронов;
- 5 — бетонная защита от радиации; 6 — теплоноситель; 7 — парогенератор;
- 8 — паровая турбина; 9 — генератор тока; 10 — конденсатор пара

Несомненно, Чернобыльская катастрофа подорвала общественную поддержку атомной энергетики во всем мире и продемонстрировала людям, что им следует проявлять озабоченность по поводу безопасности ядерных установок в своих странах и за их пределами.

Тем не менее, многие ученые, ведущие эксперты, полагают: утверждение о том, что атомные электростанции опасны, является неверным. При грамотной эксплуатации атомных электростанций они совершенно безопасны.

Индустриальные страны, такие, как Франция, Швеция, Япония, обладающие незначительными запасами ископаемых видов топлива, стратегическим направлением в своей энергетике выбирают атомную, использование атомной энергии является лучшим способом уменьшения зависимости этих стран от импорта нефти.

В таблице 6.1 приводятся данные по странам мира о количестве действующих АЭС и доли их в общем объеме вырабатываемой электроэнергии.

Таблица 6.1

Количество действующих АЭС и их доля в общем объеме вырабатываемой электроэнергии по странам мира

Страна	Число действующих реакторов	Доля вырабатываемой электроэнергии
Франция	59	80
Бельгия	7	61
Южная Корея	9	50
Швеция	12	45
Швейцария	5	42
Испания	10	38
Финляндия	4	35
Япония	55	40
Германия	30	23
Англия	39	22
США	104	18
Канада	18	16
Россия	31	16,5

Франция планирует вырабатывать 90% своей электроэнергии исключительно на АЭС. В 1990 г. около 80% всей энергии во Франции было произведено на атомных электростанциях, 13% — на гидроэлектростанциях и 7% — на тепловых электростанциях. Интересно отметить, что 12% своей электроэнергии Франция продает Англии, Швейцарии, Италии, Бельгии, ФРГ.

Атомные электростанции имеют следующие неоспоримые преимущества перед другими:

1. АЭС являются экологически наиболее «чистыми» источниками энергии. При правильной эксплуатации атомные электростанции не производят в атмосферу и воду никаких выбросов (ни радиоактивных, ни нейтральных). Дозовые же нагрузки в виде ионизирующих излучений на природную среду в сравнении с радиационными дозами за счет естественного фона крайне незначительны.

2. Для работы атомных электростанций требуется сравнительно немного атомного топлива, за сутки на самых мощных электростанциях «сгорает» около 1 кг ядерного горючего.

3. В противоположность тепловым электростанциям, сжигающим органические топлива и требующим при выделении тепла больших затрат атмосферного кислорода, АЭС выделяют энергию в результате ядерного распада и не требуют воздушных затрат. Затраты же воздуха на вентиляцию и другие потребности АЭС весьма незначительны.

4. Если ТЭС приходится строить ближе к месторождениям топлива, то АЭС можно строить непосредственно там, где будет использоваться эта энергия, что уменьшает ее потери при передаче. К тому же АЭС могут работать буквально во всех климатических поясах.

После аварии на Чернобыльской АЭС Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) установлены дополнительные специальные требования к строительству АЭС для предотвращения возможности аварий и повышения уровня радиоактивности в окружающих АЭС районах. Запрещено строительство АЭС в сейсмических районах и вблизи больших городов.

И все-таки АЭС потенциально опасны. До тех пор, пока радиоактивные изотопы находятся в герметичной упаковке внутри реактора, никакой опасности для человека не существует. Но что делать (даже в безаварийном варианте работы АЭС) с отходами? Пожалуй, это самый острый вопрос в атомной энергетике. Количество

отработанного, но все еще обладающего радиоактивностью, ядерного горючего стремительно растет.

Поначалу герметичные контейнеры с отходами сбрасывали в океан, считая, что его глубоководные слои не перемешиваются с поверхностными. Однако циркуляция вод постоянно идет, и от такого «захоронения» отказались. Герметические бетонные контейнеры или железные бочки с отходами стали укладывать в бетонные «Саркофаги». Такой, например, огромный склад находится в Бретани, на северо-западе Франции. Но он уже переполнен. Новым решением создать в другом районе страны, он займет 100 га и обойдется в 0,5 млрд. франков. Однако уже сегодня ясно, что и этот «Саркофаг» через 30 лет будет заполнен. Нужны кардинально новые решения, только тогда у ядерной энергетики есть будущее. Многие специалисты считают, что единственно приемлемый подход — это переработка отходов, т.е. утилизация. Отходы доставляют на завод, где растворяют в азотной кислоте. Дальше азотнокислые соли урана и плутония выделяют в виде твердого вещества, чтобы снова использовать на АЭС. В Англии, ФРГ и Японии вслед за Францией тоже перерабатывают часть радиоактивных отходов.

К вопросу об отходах примыкает другой — о тех АЭС, которые отработали свой 30-летний срок. Нетрудно подсчитать, что к 2001 г. в таком положении окажется 2/3 атомных электростанций, работающих сегодня в разных странах мира. Как же обезопасить отжившую АЭС? Первый вариант — хранить станцию целиком, не трогая, пока не снизится уровень радиоактивности реактора до безопасного, это очень продолжительный — несколько сотен лет — процесс. Альтернативный вариант — это полный демонтаж АЭС и освобождение площадки для нового строительства. Но он требует сразу больших затрат и больших складов для размещения радиоактивных отходов. Накопленный опыт показывает, что вывод АЭС из эксплуатации — сложный и продолжительный процесс.

§ 6.7. Термоядерные реакции.

Управляемые термоядерные реакции. Энергетика будущего

Кроме реакций деления ядер урана могут проходить реакции слияния легких ядер, при которых выделяется еще большее количество

энергии в расчете на один нуклон. Но подобного рода реакции могут протекать только при очень высоких температурах. Поэтому они называются *термоядерными*. Для слияния ядер необходимо, чтобы они сблизилась на расстояние около 10^{-15} м, т.е. чтобы они попали в сферу действия ядерных сил. Но этому сближению препятствует кулоновское отталкивание положительно заряженных ядер, которое может быть преодолено лишь за счет большой кинетической энергии теплового движения ядер.

Энергия излучения Солнца и звезд имеет термоядерное происхождение. Температура внутри звезды столь велика ($T \approx 10^7$ К), что в ней протекают реакции слияния ядер водорода с образованием гелия. Затем при слиянии ядер гелия образуются и более тяжелые элементы. Все эти реакции сопровождаются выделением энергии, обеспечивающей излучение света звездами на протяжении миллиардов лет.

На Земле первая термоядерная реакция была осуществлена в водородной бомбе: в ней произведен синтез ядер гелия из ядер дейтерия и трития. Источником высокой температуры в водородной бомбе является взрыв атомной бомбы, помещенной внутри термоядерной (рис. 6.8).

Но если неуправляемые термоядерные реакции в водородных бомбах способны уничтожить человечество, то осуществление управляемых термоядерных реакций способно решить энергетическую проблему.

Наиболее перспективной в этом отношении реакцией является упомянутая выше реакция слияния дейтерия с тритием:



При этом выделяется энергия:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0,01889 \cdot 931,4 = 17,6 \text{ МэВ} .$$

Но эта реакция может идти только при нагревании реагирующих веществ до температуры порядка сотен миллионов градусов, такие температуры могут быть в принципе достигнуты путем создания в плазме мощных электрических разрядов. Основная трудность на этом пути состоит в том, чтобы удержать плазму столь высокой температуры внутри установки. Никакие стенки из вещества здесь не годятся, так как при столь высокой температуре они сразу же превратятся в пар. Единственно возможным является метод удержания

высокотемпературной плазмы в ограниченном объеме с помощью очень сильных магнитных полей. Однако до сих пор решить эту задачу не удается из-за неустойчивости плазмы, которая приводит к диффузии заряженных частиц сквозь магнитные «стенки».

Ученые высказывают уверенность в том, что эта проблема будет решена. Особенно перспективными являются экспериментальные установки типа ТОКАМАК (рис. 6.9). В них плазма создается в тороидальной камере, которую заполняют дейтерием при низком давлении. Для устойчивости плазменного шнура создается стабилизирующее тороидальное магнитное поле с помощью магнитных катушек.

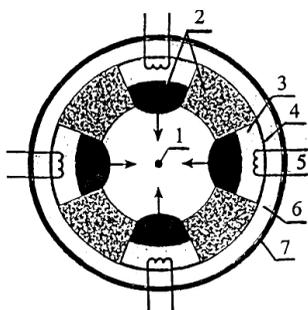


Рис. 6.8. Принципиальная схема термоядерной (водородной) бомбы системы деление-синтез-деление:

1 — источник нейтронов,
2 — делящееся вещество (U-235 или Pu-239, 3 — химическое взрывчаточное вещество, 4 — отражатель нейтронов, 5 — детонатор, 6 — дейтерид лития, 7 — вещество делящееся на быстрых нейтронах (U-238)

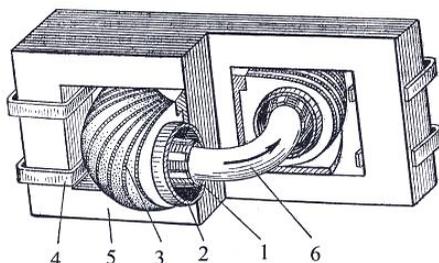


Рис. 6.9. Установка ТОКАМАК состоит из: 1 — внутренней камеры,

2 — внешней медной камеры,
3 — обмотки, создающей магнитное поле вдоль тора,
4 — первичной обмотки трансформатора,
5 — железного сердечника,
6 — плазменного витка

Второе направление в решении проблемы — это создание лазерных установок для термоядерного синтеза. Первая лазерная установка была запущена в СССР в Физическом институте Академии Наук в 1970 г. В настоящее время в лабораториях США, Франции, Японии также запущены мощные лазерные установки. Но лазерный термоядерный синтез еще не вышел за рамки научно-исследовательских лабораторий.

§ 6.8. Применение радиоактивных изотопов. Биологическое действие ионизирующих излучений

Радиоизотопы в настоящее время применяют в биологии, медицине, химии, технике. Наибольшее распространение получил так называемый метод «меченых атомов». Он основан на том, что химические свойства стабильного изотопа и радиоактивного элемента одинаковы. Радиоактивные атомы (меченые) легко могут быть обнаружены по их излучению с помощью счетчиков и других детекторов радиоактивных излучений. Это открывает возможность проследить за перемещением и химическими превращениями атомов элемента. Методом меченых атомов получены интересные данные о перемещениях вещества сквозь клеточные мембраны, о скорости проникновения их из крови в спинномозговую жидкость, костные ткани и другие органы.

Опыты показали, например, что ионы натрия очень быстро поступают в кровь из пищеварительного тракта. Было также установлено, что радиоизотопы, попавшие в организм, могут накапливаться в отдельных его участках и органах. Так, йод у человека концентрируется, в основном, в щитовидной железе, уран, стронций и радий — в костях, калий — в нервной и мускульной тканях.

Одним из самых выдающихся исследований, проведенных с помощью «меченых атомов», явилось исследование обмена веществ в организме, в результате которого было доказано, что за сравнительно небольшое время организм подвергается почти полному обновлению. Слагающие его атомы заменяются иными. Лишь железо, как показали опыты по изотопному исследованию крови, является исключением из этого правила. При введении в пищу радиоактивных атомов Fe-59 было обнаружено, что они почти не поступают в кровь. Только в случае, когда запасы железа в организме иссякают, железо начинает усваиваться организмом.

Успешно используется и само излучение радиоизотопов. В селекции его применяют для выведения новых сортов ценных растений, так как под действием радиации увеличивается число генетических мутаций. Небольшие дозы облучения в ряде случаев увеличивают всхожесть семян и проростков, повышают урожайность растений.

Ионизирующие излучения оказывают сильное поражающее действие на живые существа. Поражение проявляется как на уровне молекул и клеток, так и на уровне отдельных органов или всего организма.

Живая клетка — это сложнейший механизм, не способный продолжать нормальную деятельность даже при малых повреждениях отдельных его участков. Между тем, даже слабые излучения способны нанести клеткам существенные повреждения и вызвать опасные заболевания. При достаточно больших дозах организм гибнет, при меньших — возникают различные заболевания (лучевая болезнь). Опасность излучений усугубляется тем, что они не вызывают никаких болевых ощущений даже при смертельных дозах.

Физический механизм действия излучения на биологические клетки достаточно сложен и разнообразен.

Ионизирующие излучения, проходя через различные вещества, взаимодействуют с их атомами и молекулами. Такое взаимодействие приводит к возбуждению атомов и вырыванию отдельных электронов из электронных оболочек нейтрального атома. В результате атом, лишенный одного или нескольких электронов, превращается в положительно заряженный ион — происходит первичная ионизация. Выбитые при первичном взаимодействии электроны, обладающие определенной энергией, сами взаимодействуют со встречными атомами и также создают новые ионы — происходит вторичная ионизация. Электроны, потерявшие в результате многократных столкновений свою энергию, остаются свободными или присоединяются, «прилипают» (в газах) к какому-либо нейтральному атому, образуя отрицательно заряженные ионы.

Таким образом, энергия излучения при прохождении через биологическое вещество расходуется, в основном, на ионизацию атомов и молекул, это приводит к изменению их химической активности.

Альфа-частицы обладают большой ионизирующей и малой проникающей способностью. В мягких тканях человека пробег α -частиц измеряется долями миллиметра. При этом наибольшая удельная ионизация отмечается в последней трети длины пробега.

При взаимодействии β -частиц с веществом, кроме ионизации возбуждения, возникает тормозное рентгеновское излучение. Далее, при попадании β^+ -частицы (позитрона) в вещество при столкновении

с электроном с большой вероятностью может произойти аннигиляция: вместо пары электрон—позитрон образуются два γ -фотона: $\beta^+ + \beta^- \rightarrow 2\gamma$. Энергия каждого γ -фотона при этом должна быть не меньше энергии покоя электрона (либо позитрона), т.е. не менее 0,51 МэВ.

При попадании γ -излучения в вещество наряду с такими процессами, как фотоэффект, эффект Комптона, могут возникать процессы образования пар: электрон—позитрон (явление, обратное аннигиляции). Пучок нейтронов, попадающий в любое вещество, практически не взаимодействует с электронными оболочками атомов и молекул, поскольку нейтроны не обладают электрическим зарядом. Взаимодействие нейтронов происходит лишь с ядрами, чем и обусловлена бóльшая — по сравнению с заряженными частицами — проникающая способность нейтронов.

Порождаемое ионизацией повреждение молекул белков, нуклеиновых кислот и других клеточных структур при прямом действии проявляется в разрыве связей (выбиваются электроны, ответственные за связь между отдельными частями молекул), в образовании сшивок, радиационном окислении и т.д. При высоких дозах облучения сложные органические молекулы превращаются в короткие обрывки и клубки. Из-за радиационного искажения пространственной структуры некоторые молекулы, например, молекулы ферментов, теряют свою биологическую активность.

Наиболее чувствительным к облучению является ядро клетки. При его поражении нарушается способность клетки к делению, разлагается синтез белков и нуклеиновых кислот (даже если поражается ничтожная доля молекул).

К наиболее тяжелым следует отнести повреждения тонкой структуры хромосом: происходят разрывы одной или сразу обеих цепей ДНК, их части могут сшиваться, при этом ряд звеньев выпадает, и нарушается генная структура. Это ведет к потере жизнеспособности клеток или вызывает резкие наследственные изменения — мутации, которые могут проявиться даже через несколько поколений.

С другой стороны, высокая чувствительность к радиации быстроделющихся клеток злокачественных опухолей используется для лечения рака (облучение γ - или R-лучами). Наименее чувствительны к радиации клетки с медленной сменой поколений — нервная, мышечная, костная ткани.

§ 6.9. Дозиметрические величины и единицы их измерения

Ввести универсальные дозиметрические величины и единицы их измерения затруднительно, так как эффективность действия излучения зависит от многих факторов.

Поглощенной дозой называется энергия ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы вещества за время облучения. Иными словами, это отношение энергии W излучения, поглощенной облучаемым телом, к его массе:

$$D = \frac{\Delta W}{m}. \quad (6.9.1)$$

За единицу поглощенной дозы для любых видов излучения в Международной системе единиц (СИ) принят *грэй* (Гр):

$$1 \text{ Гр} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ кг}}.$$

То есть за 1 Гр принимается доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения 1 Дж.

Практическая оценка поглощенной дозы затруднительна, поэтому пользуются понятием *экспозиционная доза* излучения, которая оценивается по ионизирующему действию излучения на воздух. Она равна отношению суммарного заряда ионов, возникающих при действии ионизирующего излучения, к массе:

$$X = \frac{Q}{m}. \quad (6.9.2)$$

За единицу экспозиционной дозы излучения принят в СИ кулон на килограмм (1 Кл/кг). Кулон на килограмм — интенсивность такого излучения, которое производит в 1 кг сухого воздуха такое число ионов, суммарный заряд которого составляет 1 Кл.

На практике чаще используется внесистемная единица — рентген (и ее дольные единицы):

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} = 0,88 \text{ рад}; \quad 1 \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}.$$

В радиобиологии и радиационной гигиене широкое применение находит внесистемная единица поглощенной дозы — рад. 1 рад —

это такая поглощенная доза, при которой количество поглощенной энергии в 1 г любого вещества составляет 100 эрг:

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 100 \text{ рад} . \quad (6.9.3)$$

Опыт показывает, что действие ядерных излучений на ткани живого организма определяется не только дозой облучения, но и природой ионизирующих частиц. Тяжелые частицы: α -частицы, нейтроны, протоны, быстрые ионы — производят больше физиологических нарушений, чем легкие (β^- , β^+ , а также γ - и R-лучи). Особенно опасны сильно проникающие потоки нейтронов.

Поэтому принято сравнивать биологическое действие всех видов излучения с биологическим действием рентгеновского и γ -излучения, иными словами, учитывать эффективность соответствующего вида излучения.

Коэффициент, показывающий во сколько раз поражающее действие данного вида излучения выше, чем рентгеновское, при одинаковой дозе поглощенного излучения, называют *коэффициентом относительной биологической эффективности (КОБЭ)*, или *коэффициентом качества излучения*.

Поэтому для оценки действия излучения на живые организмы введена специальная величина — *эквивалентная доза*. Эквивалентной дозой поглощенного излучения (биологической дозой) называют величину, равную произведению поглощенной дозы на коэффициент биологической эффективности:

$$Дб = Н = \text{КОБЭ} \cdot Д . \quad (6.9.4)$$

В СИ за единицу эквивалентной дозы принят 1 зиверт (Зв). Эта единица соответствует поглощенной дозе в 1 грэй при коэффициенте относительной биологической эффективности, равном единице.

Для коэффициента биологической эффективности существуют еще обозначения: КОБА (коэффициент биологической активности), КК (коэффициент качества излучения). Для рентгеновских лучей, γ - и β -излучений КОБЭ равен 1, для медленных (тепловых) нейтронов — 5, для быстрых нейтронов и протонов — 10, для α -частиц и осколков деления — 20.

На практике для измерения эквивалентной дозы поглощенного излучения часто используют внесистемную единицу бэр (*биологический эквивалент рентгена*):

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}; 1 \text{ бэр} = \text{КОБЭ} \times 1 \text{ рад}.$$

Для рентгеновского или γ -излучения $1 \text{ бэр} = 1 \text{ рад}$, $1 \text{ Зв} = 100 \text{ рад} = 113,6 \text{ Р}$.

Мощность дозы (поглощенной, экспозиционной или эквивалентной) — это отношение приращения дозы за определенный интервал времени к величине этого временного интервала:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}, \quad \dot{X} = \frac{dX}{dt}, \quad \dot{H} = \frac{dH}{dt}, \quad (6.9.5)$$

где \dot{D} — мощность поглощенной дозы, Гр/с; \dot{X} — мощность экспозиционной дозы, Р/с; \dot{H} — мощность эквивалентной дозы, Зв/с. При этом $1 \text{ Зв/с} = 113,6 \text{ Р/с} = 100 \text{ бэр/с}$.

Дозы облучения. Облучение, которому может подвергнуться организм, разделяют на внешнее (от внешних источников) и внутреннее (от радиоактивных источников, попавших внутрь организма).

Источниками внешнего облучения могут быть ядерные взрывы, ядерные реакторы, ускорители, рентгеновские установки, а также радиоактивные препараты и естественные источники: горные породы, радиоактивные лечебные воды, космические лучи. Внутреннее облучение обусловлено долгоживущими радиоактивными элементами естественного происхождения: углерод-14, калий-40, радон-226, входящими в состав пищи и тканей организма, радиоактивными препаратами, вводимыми в организм для лечения или исследования, а также радиоактивными веществами, попавшими внутрь при аварийных ситуациях (через рот, дыхательные пути, раны и т.д.).

Естественный фон радиации, который образуют излучения, падающие на Землю из космоса (космическая радиация), и радиоактивные элементы, содержащиеся в земных породах, стройматериалах (земная радиация), составляет в среднем 25 мкКл/кг (около 97 Р).

Международная комиссия радиационной защиты установила для лиц, работающих с излучением, предельную допустимую

дозу 1,3 мКл/кг в год (примерно 5 рентген в год). С целью ограничения генетических эффектов установлена индивидуальная доза: лица до 30 лет не должны получать в сумме более 1,3 мКл/кг.

Предельно допустимая доза облучения для людей в населенных пунктах — 5 мЗв/год (или 0,5 бэр/год). Для специалистов, чья работа непосредственно связана с источниками излучения, эти дозы на порядок выше, т.е. 50 мЗв/год (или 5 бэр/год).

Величина смертельной дозы облучения зависит от вида организма. Наиболее устойчивы к облучению микроорганизмы, некоторые их виды могут обитать даже в условиях ядерного реактора.

В течение года каждый человек в среднем получает дозу около 400—500 мбэр, которая распределяется следующим образом:

- 1) космическое и земное излучение ≈ 150 мбэр;
- 2) излучение, полученное при рентгеноскопии ≈ 140 мбэр;
- 3) излучение, полученное при просмотре телевизионных передач ≈ 100 мбэр;
- 4) прочие виды ≈ 80 мбэр.

По данным международной комиссии по радиологической защите, опасными являются дозы, превышающие 35 бэр в год. В таблице 6.2 приведены ориентировочные данные действия излучения на человека при облучении всего организма.

Таблица 6.2

Доза, мКл/кг (Р)	Действие
0—5 (0—19,4)	Явных повреждений нет
5—12,5 (19,4—48,5)	Легкое изменение состава крови
12,5—25 (48,5—96,9)	Изменение состава крови, усталость, плохое самочувствие
25—50 (96,9—193,8)	Возможна потеря трудоспособности
50—100 (193,8—387,6)	Потеря трудоспособности, возможна смерть
100 (полулетальная доза)	Смертность 50% через 30 дней после облучения
150 (летальная доза)	Смертность около 100%

Радиоактивное загрязнение среды, возникающее при ядерных взрывах, может удерживаться на местности довольно долго, если время жизни образовавшихся при взрыве искусственных радионуклидов достаточно велико. Кроме того, радиоактивные продукты

могут разноситься ветром и водой на большие расстояния. Особую опасность представляет β -активный стронций-90 ($T = 28$ лет), который, попадая через воду, растения, рыбу и другие продукты питания в организм человека и накапливаясь в костной ткани, становится источником длительного облучения костного мозга.

Следует также подчеркнуть, что значительную дозу облучения человек может получать с вдыхаемым воздухом, находясь длительное время в непроветриваемом помещении. Наибольший вклад здесь вносит радиоактивный газ — радон. Среди изотопов радона известны радон-222 с периодом полураспада 3,8 дня, радон-220 с периодом полураспада 54,5 с и радон-219 с периодом полураспада 3,9 с. Наиболее опасным из них является α -активный радон-222.

Главным источником поступления радона в закрытые помещения является грунт. Просачиваясь через фундамент и пол из грунта или высвобождаясь из материалов, использованных при строительстве дома, радон накапливается в закрытых непроветриваемых помещениях (подвалах, ванных комнатах, кухнях). В настоящее время во многих странах разрабатываются государственные программы по выявлению и оздоровлению таких домов. Эффективным средством уменьшения концентрации радона, просачивающегося через пол, являются вентиляционные установки в подвалах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите экологические проблемы традиционной и альтернативной энергетики.
2. В чем заключается проблема радиоактивных отходов?
3. Какие методы утилизации радиоактивных отходов используются сегодня?
4. Из чего складывается естественный радиационный фон?
5. В чем заключается радоновая проблема? Какие мероприятия необходимо проводить с целью уменьшения концентрации радона внутри жилых помещений?

Глава 7

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ЛИТОСФЕРЫ. КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫЕ ФАКТОРЫ

§ 7.1. Состав и строение атмосферы. Антропогенное воздействие на атмосферу

Атмосфера Земли имеет определенный состав и строение. Она сформировалась в течение длительной эволюции Земли и служит средой жизни организмов. Живые организмы биосферы являются одним из главных факторов формирования и поддержания стабильности атмосферы.

Состав атмосферы. Состоит атмосфера из механической смеси газов: 78% ее объема составляет азот, 21% — кислород и менее 1% — гелий, аргон, криптон и другие инертные газы.

Кроме названных газов в атмосфере содержится около 0,03% углекислого газа, который обычно концентрируется вблизи земной поверхности и размещается неравномерно: в городах, промышленных центрах и в районах вулканической активности его количество возрастает.

В атмосфере всегда находится некоторое количество примесей — водяного пара и пыли, благодаря наличию в воздухе пароводяной воды возможны такие атмосферные явления, как радуга, рефракция солнечных лучей и т.п.

Строение атмосферы. Плотность атмосферы меняется с высотой: у поверхности Земли она наивысшая, на высоте 5,5 км плотность атмосферы в 2 раза, а на высоте 11 км — в 4 раза меньше, чем в приземном слое.

В зависимости от плотности, состава и свойств газов атмосферу разделяют на пять концентрических слоев.

Нижний слой называют *тропосферой*. В тропосфере содержится до 80% всей массы атмосферы и почти весь водяной пар (масса атмосферы — 6×10^{15} т). Верхняя граница тропосферы проходит на высоте 8—10 км на полюсах и 16—18 км — на экваторе, в средних

широтах 10—12 км. Температура воздуха в тропосфере с высотой понижается и у верхней ее границы составляет до 55°С ниже нуля.

Воздух в тропосфере постоянно перемешивается, перемещается в разных направлениях. Только здесь наблюдаются туманы, дожди, снегопады, грозы, бури и другие погодные явления.

Стратосфера простирается до высоты 50—55 км. Плотность воздуха и давление в стратосфере незначительны. Разреженный воздух состоит из тех же газов, что и в тропосфере, но в нем больше озона. Наибольшая концентрация озона наблюдается на высоте 15—30 км. Температура в стратосфере повышается с высотой. Это объясняется тем, что озон поглощает коротковолновую часть солнечной энергии, в результате чего воздух нагревается.

Над стратосферой лежит *мезосфера*, простирающаяся до высоты 80 км. В ней температура вновь понижается и достигает –90°С. Плотность воздуха там в 200 раз меньше, чем у поверхности Земли.

Термосфера — от 80 до 800 км. Температура в этом слое повышается: на высоте 150 км — до +220°С; 600 км — до +1500°С. Газы термосферы находятся в ионизированном состоянии (ионосфера). В связи с небольшой плотностью солнечные лучи там не рассеиваются, поэтому небо черное, на котором видны ярко светящиеся звезды и планеты.

Значение атмосферы. Роль атмосферы в жизни нашей планеты исключительно велика. Без нее Земля была бы мертва. Атмосфера предохраняет поверхность Земли от сильного нагревания и охлаждения, губительного действия на живые организмы коротковолновой и корпускулярной радиации Солнца.

Атмосфера — среда, где происходят погодные явления, с которыми связана вся человеческая деятельность. Озоновому слою принадлежит главная роль в задержании высокоэнергичного ультрафиолета, этот слой еще называют «озоновый щит» планеты. Одна из глобальных проблем современной экологии — уменьшение озонового слоя под влиянием антропогенной деятельности человека.

§ 7.2. Источники загрязнения атмосферы

Существуют два главных источника загрязнения атмосферы: *естественный* и *антропогенный*. Они представлены на схеме (рис. 7.1).

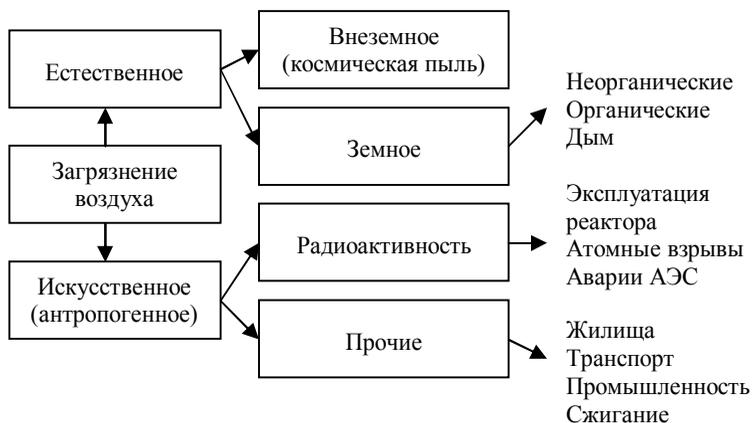


Рис. 7.1. Источники загрязнения атмосферы

Как правило, естественное загрязнение не угрожает отрицательными последствиями для биогеоценозов и обитающих в них живых организмов, хотя кратковременные последствия возможны.

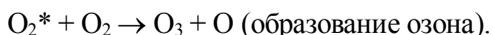
Распространенными выбросами промышленности являются следующие: зола, пыль, оксиды металлов, альдегиды, углеводороды, смолы, оксид и диоксид азота, аммиак, озон, радиоактивные газы, аэрозоли и др.

Наибольшее количество загрязняющих атмосферу веществ выбрасывается с выхлопными газами автомобилей. В настоящее время в мире насчитывается свыше 200 млн. автомобилей, выхлопные газы которых содержат примерно 200 веществ, в том числе канцерогенные углеводороды и тетраэтилсвинец.

Предприятия цветной металлургии выбрасывают запыленные газы, содержащие диоксид серы, фтористые газы и металлы. Из тонны пыли, выделяемой в атмосферу при плавке медных руд, можно извлечь до 100 кг меди и немного меньше свинца и цинка.

Особую тревогу вызывает разрушение озонового слоя в стратосфере, которое происходит в результате окисления озоном различных веществ. Общее количество озона в атмосфере оценивается всего лишь в 3,3 млрд. тонн, что очень мало. Если весь озон «собрать» у поверхности Земли при нормальной температуре и давлении, то получится слой толщиной всего 3 мм.

Озон, как известно, образуется в результате процесса фотодиссоциации кислорода:



Образовавшиеся молекулы озона существуют недолго; происходит обратная реакция фоторазложения O_3 (которая и представляет собой поглощение озоном коротковолновых фотонов):



Следовательно, в стратосфере существует *цикл озона* — сбалансированное образование и разложение. В процессе истории нашей планеты лишь с накоплением достаточного количества озона в стратосфере живые организмы смогли выйти из воды на сушу и создать мощные наземные экосистемы: леса, степи, луга и т.д.

Процесс истощения озонового слоя получил название возникновения «*озоновых дыр*».

Впервые озоновая дыра была обнаружена в 1975 г. над Антарктидой. Под «дырой», конечно, не следует понимать то, что в данной области совсем нет O_3 . Происходит лишь сильное утончение этого слоя, отчего защитный эффект ослабевает.

Комплексное загрязнение воздушной среды является причиной образования фотохимического смога. *Фотохимический смог* обусловлен застаиванием масс воздуха в крупных городах с развитой промышленностью и большим количеством транспорта. Происхождение этого английского слова становится ясным из следующей схемы:



Кроме оксидов NO_x и озона (тропосферного), в фотохимическом смоге присутствуют различные углеводороды и другие газы.

§ 7.3. Гидросфера. Антропогенные воздействия на гидросферу

Так же, как атмосфера, гидросфера является средой жизни живых организмов. Организмы водных экосистем принимают активное участие в очищении и поддержании параметров этой среды в пределах, необходимых для жизни. *Гидросферой* называют водную оболочку Земли. В ее состав входят воды суши — реки, болота, ледники, подземные воды — и воды Мирового океана. Общее количество воды на планете оценивается в $(1,5—2,5) \times 10^{21}$ кг. Основная масса воды находится в морях и океанах — 94%, в земной коре содержится 4,12% воды и 1,69% — в ледниках Антарктиды, Арктики и в горных странах. На долю пресной воды при этом приходится всего лишь 2% из общих ее запасов.

Вода — это самый распространенный в природе минерал. Чистая вода прозрачна, бесцветна, не имеет запаха. Она обладает удивительными свойствами, отличающими ее от других природных тел. Жизнь на Земле зародилась в воде, она стала первичной средой для эволюции органического мира и входит в состав всех живых существ. По химическому составу морская вода, где развивалась начальная земная жизнь, очень близка к человеческой крови (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Химический состав воды Мирового океана и крови человека

Химический элемент	Доля в % от суммы растворенных солей	
	В воде Мирового океана	В крови человека
Хлор	55,0	49,3
Натрий	30,6	30,0
Кислород	5,6	9,9
Калий	1,1	1,8
Кальций	1,2	0,8

В воде, потребляемой человеком, растворены важные для жизнедеятельности организма органические и неорганические вещества. Вода является обязательным компонентом практически всех технологических процессов как сельскохозяйственного, так и промышленного производств. Она выступает то как сырье, то как

теплоноситель, то как транспортная система, и почти всегда как среда, удаляющая отходы.

Вода не должна содержать болезнетворных бактерий и вирусов. Водный путь распространения характерен для возбудителей холеры, брюшного тифа, паратифов и лептоспирозов, бруцеллеза. С водой в организм человека могут попасть цисты дизентерийной амебы, яйца аскарид и др.

Приведем в таблице 7.2 содержание различных химических веществ и ингредиентов в питьевой воде, концентрации которых считаются безвредными для организма человека.

Таблица 7.2

№	Наименование	Содержание в воде, мг/л (не более)
1	Свинец	0,1
2	Мышьяк	0,05
3	Фтор	0,7—1,5
4	Бериллий	0,0002
5	Молибден	0,5
6	Нитраты	10,0
7	Полиакриламид (ПАА)	2,0
8	Стронций	2,0

Роль мирового океана в стабилизации природных условий на поверхности Земли. В стабилизации природных условий на поверхности Земли велика роль Мирового океана. Это обусловлено прежде всего его массой и значительной занимаемой площадью.

Вода является самым мощным поглотителем солнечного тепла на поверхности Земли. Решающая роль в поглощении солнечной энергии на нашей планете принадлежит Мировому океану, чья способность поглощать солнечную энергию в 2—3 раза больше, чем у поверхности суши. От поверхности океана отражается лишь 8% солнечной радиации. Из-за особых тепловых свойств воды (например, высока теплоемкость) океан выступает накопителем солнечной энергии на планете. Нагревается он, в основном, в экваториальном поясе примерно в полосе от 15° южной широты до 30° северной широты. А в более высоких широтах обоих полушарий он отдает тепло, полученное в поясе нагревания. Поверхностные течения являются основными переносчиками накопленного в океане солнечного тепла.

Рассматривая гидросферу как кибернетическую систему, в соответствии с законом Эшби, можно сделать вывод, что гидросфера может быть устойчивой к внешним и внутренним возмущениям только при достаточном внутреннем разнообразии. Занимая большую часть поверхности планеты, гидросфера обладает большим разнообразием природных условий, которое создается одновременным существованием воды в трех фазах, резко различающимися составляющими, большим набором растворенных в ней веществ и газов, формированием разнообразных статических и динамических структур. На первый взгляд, однородный океан на самом деле представляет анизотропную среду, в которой неоднородности в масштабах от микрометров до сотен километров создаются физико-химическими процессами, деятельностью живых организмов и под воздействием деятельности человека.

Гидросфера Земли как компонент экосистемы представляет собой глобальную термодинамическую открытую систему со своим «входом» и «выходом». Вход — это поток солнечной энергии, который приводит в движение гидросферу, а выход — вещества, накапливающиеся в результате потоков энергии и веществ в сообществах. На вход этой системы поступает также энергия из недр нашей планеты и энергия гравитационного притяжения (Луны и Солнца), но эти величины намного меньше потока солнечной радиации.

К сожалению, гидросфера оказалась наиболее уязвимой частью природы. И если в ближайшее время кардинально не улучшатся ее использование и охрана, жизнь на планете окажется под угрозой.

Существует важный критерий, с помощью которого определяют, насколько загрязнена вода. Этот критерий — количество растворенного в воде кислорода. Живущие в воде аэробные бактерии с помощью кислорода окисляют органические вещества, попавшие в воду, так как последние служат им пищей и удовлетворяют их энергетические запросы. Органические вещества, способные окисляться в воде бактериями, называют *биоразложимыми*.

Количество растворенного O_2 , необходимое для превращения всех биоразложимых органических отходов в воде, называют *биохимической потребностью в кислороде* — БПК, этот показатель характеризует перегруженность воды органическими загрязнителями.

Пятидневная проба БПК (БПК₅) — стандартная проба в гидрологических лабораториях на качество воды.

Очищают воду различными физико-химическими и биологическими методами, например, такими, как хлорирование, озонирование (озон является более сильным окислителем, чем хлор и, следовательно, более эффективен как обеззараживающее средство; кроме того, озонирование более экологически безопасно, чем хлорирование), облучение ультрафиолетовыми лучами, осаждение и ионный обмен (эти способы используют для удаления из воды главным образом металлов).

Металлы как загрязнители воды. Органические отбросы, биогенные вещества и тепло наносят вред водным экосистемам, когда перегружают их. Но загрязненная ими вода может при благоприятных условиях очиститься сама (естественное самоочищение). Однако существуют загрязнители, которые абсолютно чужды экосистемам (ксенобиотики), поэтому вред от них более существен, а последствия их воздействия на экосистему подчас непредсказуемы.

Среди таких загрязнителей особое место занимают металлы. Многие металлы чрезвычайно токсичны уже в малых дозах (ртуть, свинец, кадмий, таллий), другие вызывают токсические эффекты в больших дозах, хотя и являются микроэлементами (медь, цинк). Металлы-токсиканты вездесущи: в различных формах они могут загрязнять все три области биосферы — воздух, воду и почву, наиболее активное накопление металлов происходит в морской воде.

§ 7.4. Литосфера. Экологические проблемы литосферы

Литосфера (греч. *litos* — камень) — верхняя твердая оболочка Земли, включающая земную кору и верхнюю мантию Земли. Мощность литосферы 50—200 км, в том числе земной коры — до 50—75 км на континентах и 5—10 км на дне океана. В земной коре на глубинах 10—20 км содержится: кислорода — 50%, кремния — 26%, алюминия — 7,5%, железа — 4,2%, кальция — 3,2% и др.

Природные химические соединения элементов земной коры называются *минералами*. Из них и состоят многочисленные типы горных пород, основными группами которых являются *магматические, осадочные и метаморфические*.

Почва — это верхний, плодородный слой литосферы, обладающий рядом свойств, присущих живой и неживой природе. Образование и существование этого природного тела нельзя представить без живых существ. Поверхностные слои горной породы являются лишь исходным субстратом, из которого под воздействием растений, микроорганизмов и животных образуются различные виды почв.

Почва состоит из твердой, жидкой, газообразной и живой частей.

Гумус почвы — это набор устойчивых органических соединений, образующихся при разложении растительных и животных остатков и продуктов их жизнедеятельности с участием микроорганизмов. В почве происходит распад первичных минералов и образование глинистых вторичных минералов. Таким образом, в почве протекает круговорот веществ. Почвенный раствор является активным компонентом, который осуществляет перенос вещества внутри почвы, вынос из почвы, снабжение растений водой и растворенными элементами питания.

Под влиянием факторов почвообразования (климат, материнская порода, растительный и животный мир, хозяйственная деятельность человека) в почве протекают разнообразные процессы, которые объединяются в три основные группы:

1. Обмен веществами и энергией между почвой и другими природными телами.
2. Процессы превращения веществ и энергии, происходящие в самом почвенном теле без перемещения веществ.
3. Процессы передвижения веществ и энергии в почве.

Важную роль в круговороте веществ в природе, почвообразовании и формировании плодородия играют почвенные микроорганизмы. По общей массе почвенные микроорганизмы составляют большую часть микроорганизмов нашей планеты, они очень разнообразны по своим свойствам и функциям: среди них есть гетеротрофы и автотрофы, аэробы и анаэробы.

Антропогенные воздействия на литосферу разнообразны. В результате эксплуатации месторождений полезных ископаемых верхние горизонты земной коры подвергаются сильной трансформации, а при неправильной эксплуатации почвы безвозвратно уничтожаются в результате эрозии, засоления, загрязнения промышленными и иными отходами. Под влиянием деятельности людей возникает

ускоренная эрозия, когда почвы разрушаются в 100—1000 раз быстрее, чем в естественных условиях. В результате такой эрозии за последнее столетие утрачено 2 млрд. га плодородных земельных угодий или 27% земель сельскохозяйственного использования.

Главные источники загрязнения почвы следующие: жилые дома, бытовые и промышленные предприятия, теплоэнергетика, сельское хозяйство, транспорт.

Самоочищение почв, как правило, медленный процесс. Токсичные вещества накапливаются, что способствует постепенному изменению химического состава почв, нарушению единства геохимической среды и живых организмов. Из почвы токсичные вещества могут попасть в организмы животных, людей и вызвать нежелательные последствия.

Почвенные микроорганизмы способны разрушать все природные органические соединения, а также ряд неприродных органических соединений. Они выполняют важную роль в очистке окружающей среды от загрязнителей. Поэтому применение новых прогрессивных технологий в народном хозяйстве, направленных на интенсификацию урожаев и совершенствование производств, не должно отрицательно влиять на деятельность почвенных микроорганизмов.

§ 7.5. Комплексные экологически опасные факторы

Экологически опасные факторы (ЭОФ) представляют собой такие воздействия окружающей среды, которые способствуют и (или) приводят к качественным и количественным нарушениям в экосистемах (от любого сообщества живых существ и среды их обитания вплоть до биосферы в целом), к тем изменениям, которые оказывают влияние на жизнеспособность и адаптацию популяций, размножение, рост, поведение и выживание отдельных особей.

С практической точки зрения принято выделять химические, физические, биологические, информационные и комплексные ЭОФ.

Остановимся на комплексных ЭОФ, характеризующихся всесторонним действием, хотя необходимо учесть, что эта классификация в значительной мере условна. Практически все перечисленные

ранее факторы являются комплексными: физико-химическими, биохимическими и т.д.

К комплексным (или глобальным) ЭОФ принято относить следующие:

1. Кислотные осадки («дожди»).
2. Нарушения озонового слоя («озоновые дыры»).
3. Глобальное потепление климата (парниковый эффект).
4. Необратимые загрязнения твердыми бытовыми и промышленными отходами.

К глобальным факторам следует отнести также влияние космических факторов, например, падение астероидов, которые приводят к изменениям всей экосистемы Земли. Многие ученые считают, что именно падение крупного метеорита 65 млн. лет назад привело к гибели динозавров.

Кислотные осадки. По общему определению кислотными осадками называются осадки, pH которых ниже 5,6. В основном, это, как уже упоминалось, серосодержащие и азотсодержащие соединения. Эти соединения могут попадать в атмосферу как в результате естественных природных процессов, так и деятельности человека.

К естественным источникам эмиссии двуокиси серы, окиси и двуокиси азота относятся:

1. Процессы разрушения органических веществ с помощью анаэробных бактерий (30—40 млн. тонн в год).
2. Извержение вулканов (около 2 млн. тонн в год).
3. Грозовые разряды.
4. Испарение воды с поверхности морей и океанов.
5. Лесные пожары, в результате которых в воздух поступает около 12 млн. тонн оксидов азота в год.

Среди антропогенных источников образования атмосферных соединений серы и оксидов азота основное место занимает сжигание угля, нефтепродуктов, металлургическая промышленность, транспорт.

В целом количество естественных и искусственных выбросов, соединений, принимающих участие в образовании кислотных осадков, приблизительно одинаково, однако антропогенные выбросы серы и оксидов азота сосредоточены на ограниченных территориях с развитой промышленностью и, таким образом, именно

в этих местах создаются высокие концентрации кислотных микроэлементов в атмосфере. Поэтому загрязнение окружающей среды вследствие антропогенного вмешательства в природные процессы резко увеличивает кислотность. Воздействия кислотных осадков могут быть прямыми или косвенными. Показателен следующий пример косвенного воздействия: известно, что грибы *Mikorhiza*, являясь симбионтами, живут на корневой системе дубов и значительно увеличивают способность этой системы к всасыванию питательных веществ. Но эти грибы чрезвычайно чувствительны к повышению кислотности и, погибая сами, являются причиной омертвления дубов.

Эффект длительного воздействия осадков на деревья может оставаться незаметным несколько десятилетий. Затем внезапно большая часть деревьев начинает погибать из-за истощения питательных веществ в почвах и повышенной чувствительности к бактериям, болезням, грибам, мхам и засухам. Явление, известное как *Waldsterben* («смерть леса»), превратило целые леса в Европе в засоренные пнями поляны. Если в некоторых западногерманских лесах в 1982 г. оказались мертвыми 8%, то через год эта цифра возросла до 34%, а к 1987 г. доля погибших деревьев составляла 52%.

Кислотные осадки оказывают пагубное влияние на водные экосистемы. Особо интенсивное закисление озер наблюдается в Скандинавии и Канаде. Дело в том, что большинство этих озер имеет бедное известняками (гранитное) ложе и потому не обладает достаточной способностью к нейтрализации. В Норвегии и Швеции по крайней мере 68 тыс. озер либо вовсе лишены рыб, либо утратили восстановительную способность. Исследования, проводимые в Швеции, показали, что почти 18 тыс. озер имеют pH ниже 5,5.

Нарушение озонового слоя. Как отмечалось, на пути солнечного ультрафиолета к поверхности Земли заградительным щитом является тончайшая пленка озонового слоя («вуаль»), расположенная в пределах стратосферы. В обычных условиях количество озона, возникшее в результате эволюции на Земле, остается постоянным.

Однако в процессе антропогенной деятельности многие загрязняющие воздух вещества способны разрушать озоновый слой, вступая в реакции с молекулами озона. Прежде всего это относится к свободным атомам хлора. Основными поставщиками хлора служат хлорфторуглероды (ХФУ): ХФУ-11, ХФУ-12, ХФУ-13

(так называемые фреоны). Вначале ХФУ казались одними из самых полезных соединений, синтезированных человеком. Эти вещества не токсичны и стабильны, не горят, практически не реагируют с другими соединениями, обладают высокой теплоизоляционной способностью и обладают еще многими преимуществами. Благодаря этому область их применения чрезвычайно широка, а производство экономически выгодно — ХФУ используются как охладители, вспениватели жидких пластмасс, средства для очистки компьютерных микросхем и т.д.

Но в 1974 г. американские ученые Ш.Роуланд и М.Молина опубликовали свою гипотезу о том, что именно ХФУ, попадая в стратосферу, разрушают озоновый слой.

Чем же опасно разрушение озонового слоя? В первую очередь, истощаясь, он теряет свойства защитного экрана, что приводит к снижению поглощения озоном ультрафиолетового света. Следует отметить, что истончение озонового слоя на 1% уже повысит интенсивность ультрафиолетового излучения на поверхности Земли на 2%, а это, в свою очередь, приведет к росту заболеваемости раком кожи на 3—6%. На каждый процент истощения озонового слоя прогнозируется 0,6—0,8% увеличения частоты катаракт. Еще одна опасность, связанная с ХФУ,— парниковый эффект, о котором речь пойдет ниже.

Следует отметить, что проблема истончения озонового слоя поначалу явно недооценивалась. Однако прямое доказательство этой новой для человечества экологической опасности было получено осенью 1984 г., когда британские ученые над Южным полюсом с помощью наземных и спутниковых систем слежения обнаружили «озоновую дыру» размером с территорию США. В ней содержание озона упало на 40%, причем мониторинговые наблюдения в течение предшествующих 10 лет показали непрерывное уменьшение озона. В результате специальных экспедиций, наземных и аэростатических измерений озона и аэрозольных частиц над Гренландией, островами Шпицберген, Северной Европой также были обнаружены «озоновые дыры», хотя и меньших размеров.

Принимая во внимание длительный период достижения молекулами ХФУ стратосферы, дальнейшее истощение озонового слоя будет продолжаться еще по крайней мере на протяжении 100 лет,

даже если сегодня будет полностью прекращено производство ХФУ и аналогичных соединений.

Осознание опасности «озонового кризиса» привело к подписанию в 1987 г. Монреальского протокола, по которому предусматривалось замораживание производства ХФУ с 1989 г. Этого было недостаточно для спасения озоносферы, и в июне 1990 г. было принято Лондонское соглашение, в котором предусмотрено 50%-ное сокращение производства ХФУ к 1995 г. и полное его запрещение к 2000 г.

Глобальное потепление климата. Парниковые эффекты. Падающее коротковолновое излучение, включая и видимый солнечный свет, нагревает атмосферу, водные пространства и земную поверхность. Эта световая энергия, преобразовавшись в тепловую, выделяется обратно в виде длинноволнового (инфракрасного) отраженного света. Часть этого излучения поглощается так называемыми «парниковыми газами», всегда содержащимися в атмосфере, и повторно излучается на Землю. Благодаря этому и создается природный «парниковый эффект», который обеспечивает среднегодовую температуру Земли $+15^{\circ}\text{C}$ и естественный «нормальный» климат.

Но в результате антропогенной деятельности в атмосферу выбрасываются дополнительно огромные количества парниковых газов — это приводит к постоянному усилению парникового эффекта.

Основной вклад в формирование парникового эффекта (55%) дает углекислый газ, который образуется при сжигании любого угле содержащего топлива. Ежегодно в атмосферу поступает 5—6 млрд. тонн углекислого газа. Около половины выбрасываемой человеком двуокиси углерода поглощается наземными растениями и морским фитопланктоном, вторая же половина поступает в атмосферу. Метан также вносит большой вклад в парниковый эффект — 15%. На закись азота, которая образуется в результате использования азотных удобрений и сжигания ископаемых топлив и древесины, приходится около 6% увеличения парникового эффекта (рис. 7.2). Озон, оказывающий экранирующее действие на ультрафиолетовое излучение, о котором речь шла выше, находится в стратосфере на высоте 15—35 км. Приземный же (тропосферный) озон является загрязнителем и парниковым газом. На его долю приходится 8% участия в формировании парникового эффекта.

Совместное действие парниковых газов будет неуклонно приводить к глобальному потеплению климата.

Компьютерные модели показывают, что при сохранении существующих тенденций к середине уже наступающего столетия (ориентировочно между 2030—2050 гг.) может наступить повсеместное потепление на 1,5—4,5°C. Это потепление будет неравномерным — более выраженным в северных районах и менее существенным вблизи экватора. Чем же опасно такое глобальное изменение климата? Прогнозы носят вероятностный характер и основаны на том, что количество парниковых газов в атмосфере будет увеличиваться. Наиболее известны прогнозы, суммированные в докладе «Наше общее будущее», опубликованном в 1987 г. Международной комиссией ученых, социологов, политиков, экономистов (доклад Брундтланда). Большинство специалистов склоняется к мысли, что уровень моря будет повышаться каждое десятилетие примерно на 6 сантиметров за счет таяния горных ледников и полярных льдов. К 2030 г. ожидается повышение уровня моря на 20 см, а к 2100 г. — на 65 см, что приведет к затоплению огромных территорий.

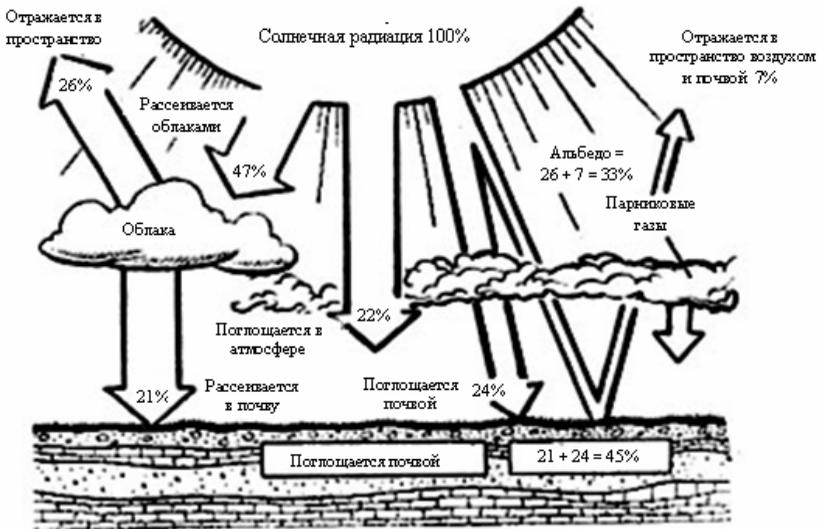


Рис. 7.2. Поглощение и переизлучение Землей солнечной энергии. «Парниковый эффект» атмосферы

Вообще, из этих прогнозов нетрудно видеть, что изменения климата затронут не только небольшие биогеоценозы и мезоэкосистемы, но и макроэкосистемы и биосферу в целом.

Во избежание подобных изменений необходимо принятие экстренных мер по существенному снижению поступления в атмосферу парниковых газов. Необходимость стабилизации последних констатировала в 1990 г. Межправительственная комиссия ООН по изменениям климата. Она рекомендовала уменьшить выбросы углекислого газа не менее, чем на 60%, метана — на 15—20%, закиси азота — на 70—80% и ХФУ — на 40—85%.

Необратимые загрязнения твердыми бытовыми и промышленными отходами. Сегодня загрязнения проявляются в огромных и беспрецедентных масштабах по всему миру, становясь экологически опасным фактором. Ежедневно, по данным экспертов, американцы, например, покупают более 200 млн. алюминиевых банок пива и прохладительных напитков, а также миллионы стеклянных и пластмассовых бутылок — и все это отправляется в отходы. Америка занимает лидирующее положение в мире по потреблению и расходованию бумаги, картона: основной вклад в нерациональное использование бумаги вносит, как отмечают, чрезмерная упаковка товаров и продуктов.

Пластмассы в настоящее время являются самым быстрорастущим видом мусора на свалках. Ожидается, что к 2000 г. пластмассовые отходы будут занимать 66% по объему от городских твердых отходов. Но подавляющее большинство пластмасс являются неразложимыми, с годами они будут накапливаться. Последствия загрязнения как бытовыми, так и промышленными отходами, имеют не только локальный уровень, но и глобальный, поскольку многие загрязнители переносятся ветрами и стоками в сельские и даже неосвоенные районы Земли. Со временем это будет отражаться в изменении систем жизнеобеспечения, изменении климата, снижении естественного круговорота веществ.

Наиболее оптимальный путь решения проблемы отходов — это не борьба с самими отходами, а преобразование общества, производящего большие количества отходов в природосберегающее общество. В качестве примера можно привести Японию, которая обладает наиболее обширной программой утилизации и рециркуляции отходов. Примерно в 90% городов Японии каждый дом и каждое

предприятие сортирует мусор по четырем категориям. Среднее количество отходов, приходящихся на одного жителя Японии, вдвое меньше, чем в Америке. Переход к безотходным технологиям в промышленности позволит значительно снять технологическую нагрузку на окружающую среду.

§ 7.6. Физические методы наблюдения за параметрами окружающей среды

В физических приборах экологического назначения используются как электрические свойства компонентов природной среды, так и тепловые, гравитационные, гидродинамические и т.д.; довольно широк диапазон приборов, основанных на оптических свойствах.

Важнейшим элементом большинства приборов и установок, предназначенных для измерения исследуемых систем, является *детектор*, принцип работы которого в значительной степени определяется характером эффекта, вызванного взаимодействием биологической среды с веществом детектора. Например, в приборах для обнаружения и измерения радиоактивных излучений большинство детекторов основано на обнаружении эффекта от ионизации (либо возбуждения) атомов или молекул вещества тем или иным ионизирующим агентом. Обычно применяются такие детекторы, в которых энергия излучения преобразуется в электрический сигнал.

К детекторам, основанным на обнаружении эффекта ионизации в газе, относятся ионизационные камеры и газоразрядные счетчики.

В *ионизационной камере* электроны и положительные ионы, образованные излучением, под действием сил электрического поля перемещаются к соответствующим электродам, что приводит к появлению тока во внешней цепи. Величина этого тока может служить мерой ионизационного эффекта.

В *газоразрядном счетчике*, в отличие от ионизационных камер, используется эффект усиления тока за счет вторичной ионизации, в результате которого число электронов и положительных ионов, достигающих электродов, во много раз превышает число ионов, образованных при первичной ионизации.

Химические детекторы основаны на измерении выхода радиационно-химических реакций, протекающих под действием ионизирующих излучений. Количественно результат воздействия излучения оценивается по радиационно-химическому выходу. Под выходом реакции понимают число характерных превращений (число вновь образованных атомов, ионов и т.д.) на 100 эВ поглощенной энергии.

Достоинством химических детекторов является возможность выбора таких веществ, которые по воздействию на них ионизирующих излучений мало отличаются от тканей живого организма. Следовательно, химические изменения, происходящие в этих веществах под действием излучения, могут непосредственно служить мерой энергии излучения, поглощенной тканью.

Фотографические детекторы основаны на свойстве ионизирующих излучений воздействовать на чувствительный слой фотоматериалов аналогично видимому свету. Для детектирования обычно применяют рентгеновские пленки, представляющие собой чувствительную эмульсию, нанесенную с одной или двух сторон на целлулоидную подложку.

Сцинтилляционный счетчик. При прохождении ионизирующих излучений через некоторые вещества возникает флюоресценция (свечение) в результате перехода возбужденных атомов или молекул в основное состояние. Световые вспышки с помощью фотоэлектронного умножителя преобразуются в электрический сигнал. Детекторы, в которых используется эффект флюоресценции, называются сцинтилляционными счетчиками.

Сцинтилляционный счетчик состоит из сцинтиллятора — вещества, способного испускать видимое излучение под действием заряженных частиц,— и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), в котором энергия этих световых вспышек преобразуется в импульсы электрического тока.

В настоящее время благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими детекторами сцинтилляционные счетчики нашли широкое применение для регистрации ионизирующих излучений.

Аэрокосмический мониторинг. Любой объект излучает и отражает электромагнитную энергию в соответствии с особенностями своей природы. Различия в длинах волн и интенсивности

излучения могут быть использованы для познания свойств удаленного объекта без непосредственного контакта с ним.

Современная техника дистанционных съемок позволяет измерить излучения как в узких, так и в широких спектральных диапазонах.

Картины Земли из космоса — это прежде всего интегральные изображения природных и хозяйственных систем; именно они легче всего выделяются и характеризуются в процессе аэрокосмического мониторинга. Исследователь оперирует изображениями или цифровыми данными о земной поверхности как в широкой зоне видимого света, так и в ультрафиолетовом, инфракрасном и радиолокационном диапазоне (рис. 7.3).

Многозональная съемка в оптическом диапазоне выполняется на основе фотографических и фотоэлектронных методов. К первым относятся методы, известные под названием многоспектральной фотосъемки, ко вторым — методы многоканальной спектрометрической съемки.

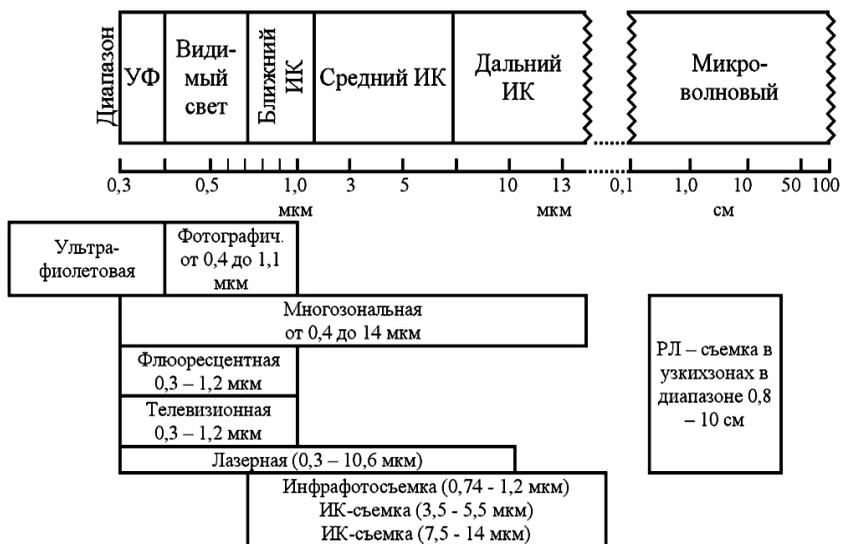


Рис. 7.3. Основные виды дистанционных съемок

Метод многоспектральной фотосъемки основан на одновременном фотографировании местности на разные типы пленок, различающиеся спектральной чувствительностью. Многоспектральные снимки могут быть получены также с помощью многоэмульсионных (спектрозональных) пленок. Благодаря эмульсионному слою, чувствительному к красному и инфракрасному излучению, спектрозональные пленки особенно полезны при дешифрировании состояния растительного покрова.

Съемка в коротковолновой и длинноволновой зонах спектра. Новые перспективы открывает техника съемки в коротковолновой и длинноволновой зонах спектра. К их числу относятся методы ультрафиолетовой, флюоресцентной, инфракрасной и радиолокационной съемки. Среди них выделяют пассивные методы, использующие отраженную солнечную радиацию или собственное излучение объектов, и активные методы, основанные на зондировании местности в определенном диапазоне электромагнитного спектра. Активные методы особенно эффективны, так как они частично или полностью снимают ограничения, связанные со съемкой в ночное время и в плохих погодных условиях. Совместное применение изображений, полученных с помощью различных дистанционных приемников, существенно повышает информативность дешифрирования.

Ультрафиолетовая и флюоресцентная съемка. Ультрафиолетовый участок электромагнитного спектра по условиям поглощения излучения атмосферой делится на два интервала: дальний (10—300 нм) и ближний (300—400 нм). Ближнее ультрафиолетовое излучение может быть использовано для одного из перспективных видов дистанционных исследований — флюоресцентной съемки, основанной на способности углеводородов (нефти) и газов, разнообразных синтетических материалов, загрязняющих окружающую среду, светиться при облучении их ультрафиолетом.

Инфракрасная (ИК) съемка. ИК-съемка проводится в трех диапазонах (атмосферных окнах), в которых находится область минимального поглощения ИК-излучения: 740—1200 нм; 350—550 нм; 750—1400 нм.

Существующая ИК-аппаратура имеет высокую чувствительность и удовлетворительное пространственное разрешение,

позволяющее получать ИК-изображение суши, близкое по своему разрешению к фотоснимкам.

Важной сферой применения ИК-съемки является контроль за промышленными стоками и загрязнением прибрежных акваторий. ИК-съемка с успехом используется и для обнаружения пятен нефти на поверхности моря.

Радиолокационная (РЛ) съемка. Развитие РЛ-съемки обусловлено рядом ее преимуществ, связанных с возможностью получения изображения в мелком масштабе со средних высот практически при любых метеорологических условиях днем и ночью, а также благодаря дополнительной информации о природе объектов, которую можно получать вследствие иных физических особенностей РЛ-изображений по сравнению с фотографическими.

Работа РЛ-станции основана на принципе регистрации отраженного сигнала.

Важным достоинством РЛ-съемки является его всепогодность. Качество РЛ-изображения не зависит от освещения Солнцем, прозрачности атмосферы или наличия облачного покрова (за исключением мощных, низвергающихся дождей, туч и грозных облаков). РЛ-съемка может проводиться круглосуточно, что является большим преимуществом при изучении слабо освещенных полярных районов, а ее всепогодность особенно важна при работе в районах, часто закрытых облачностью. Систематическая РЛ-съемка является быстрым и надежным методом составления фотокарт для изучения динамики рельефа.

Космический мониторинг. Отметим следующие особенности и достоинства космического мониторинга:

— наблюдаются и регистрируются сведения об обширных пространствах, вплоть до всей видимой в момент съемки части Земного шара; большая обзорность позволяет проследивать глобальные и крупные региональные особенности природы Земли;

— мгновенность изображения обширных площадей сводит к минимуму влияние переменных факторов; возможность регулярного проведения повторных съемок позволяет выбрать лучшие изображения; по материалам повторных съемок изучается динамика природных процессов;

— комплексный характер информации, содержащейся на космоснимках, позволяет использовать их для изучения сложных

процессов взаимодействия компонентов природы: атмосферы и океана, гидрологических процессов с литогенной основой, животных и растений со всем многообразием условий их обитания; благодаря естественной генерализации изображения на космических снимках отображаются наиболее крупные и существенные элементы ландшафтной структуры географической оболочки и следы антропогенного воздействия.

Одной из самых насущных и трудных проблем сегодняшнего дня является борьба за чистоту атмосферы вообще — не только в одном регионе, а над всей планетой. Ученые-исследователи находят частицы пыли и газов в воздухе самых отдаленных от цивилизованного мира мест, вплоть до Антарктиды.

Для измерения содержания вредных примесей в атмосфере служат нефелометры (они основаны на явлении рассеяния света мельчайшими твердыми частицами, содержащимися в воздухе), ротаметры, газоанализаторы самых различных конструкций и назначений.

Большим достижением в настоящее время явилось создание универсального пылемера, основанного на лазерном методе определения концентрации любой пыли в воздухе.

Для борьбы с пылью успешно применяются ультразвук, центробежные устройства, вихревые аппараты.

Ловцами пыли по праву можно назвать ионы и мелкодисперсные заряженные частицы. Если загрязненный пылью газ пропускать между электродами электрофильтров, заряженные частицы газа, двигаясь по силовым линиям электрического поля, по пути захватывают с собой частицы пыли или тумана, находившиеся в газовом потоке, и доставляют их к электродам. Электрофильтры устанавливают на сажевых, графитных, суперфосфатных заводах.

В последнее время разработаны установки для плазменной переработки металлургических шламов. Через вращающийся слой шлама продувается доменный газ. В центре находится электрическая плазма. Восстановленные частицы металла уносятся из камеры и на выходе осаждаются на холодную подложку.

Из всего перечисленного можно сделать вывод: применение физических методов и приборов в изучении состояния окружающей среды весьма разнообразны. Это и эффективное использование космической и ракетной техники (аэрокосмический мониторинг),

самолетов-лабораторий, вертолетов, мобильных экологических лабораторий, укомплектованных метео-комплексами, средствами оперативного контроля воздуха, фотоэлектрическими счетчиками, полевыми хроматографами и т.д.

И хотя освоение полностью безотходных технологий — это оптимальное решение для окружающей среды (на повестке дня такая задача, разумеется, поставлена), однако на данном этапе, это, скорее всего, вопрос будущего. Поэтому, наряду с внедрением безотходных технологий, следует всячески совершенствовать существующие очистные сооружения, разрабатывать новые способы очистки воздуха, пылеуловители, газоочистные и водоочистные установки и оборудования.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите антропогенные воздействия на атмосферу, гидросферу, литосферу.
2. Назовите комплексные экологически опасные факторы.
3. Что такое детектор? Какие детекторы вы знаете, перечислите их.

ГЛОССАРИЙ

Экология. Термин происходит от греческих слов *oikos* — жилище, дом, место обитания, и *logos* — наука; в буквальном смысле — это наука о доме, местообитании. Термин «экология» был введен в науку немецким ученым Э.Геккелем в 1866 г. Под экологией Геккель понимал изучение всей совокупности взаимосвязей животного организма с окружающей его средой, как органической, так и неорганической.

Окружающая среда и экологический фактор. В основе функционирования любой экологической системы лежит ее взаимодействие с окружающей средой. *Среда* — это все, что окружает организм и прямо или косвенно влияет на его состояние, развитие, рост, выживаемость, размножение и т.д.

Выделяют следующие среды жизни: гидросфера (водная среда), наземно-воздушная среда, почвенная среда. Живые организмы также могут являться средой жизни, например, животные и растения, которые ведут совместный образ жизни, организм, на котором или в котором они поселяются.

В экологии элементы среды, необходимые организму или отрицательно на него действующие, называются *экологическими факторами*. Все экологические факторы делят на абиотические (абиогенные), биотические (биогенные) и антропогенные (факторы, которые возникают под влиянием культурно-хозяйственной деятельности человека).

Абиотические факторы — к абиотическим космическим факторам относятся: космическое излучение, космическая пыль, метеоритное вещество, солнечный ветер, солнечная активность и связанное с ним электромагнитное излучение. К абиотическим факторам наземной среды относят: солнечный свет, влажность воздуха, осадки, температура, движение воздушных масс (ветер), давление атмосферы.

К абиотическим факторам водной среды относят: подвижность воды, изменение температуры воды по глубине водного объекта, прозрачность воды, растворимость газов, кислотность среды и другие.

Биотические факторы — это совокупность взаимодействия живых организмов и влияние их друг на друга, которое может быть прямым и косвенным. Например, под пологом леса условия жизни совсем другие, чем на открытом пространстве: снижается освещенность, повышается влажность, изменяется температура.

Антропогенные факторы — совокупность воздействия человека на живые организмы и природу. человека и его хозяйственной деятельности. Они могут быть:

- физические — радиация, шум, электромагнитные излучения, тепло, свет;
- химические — тяжелые металлы, окислы серы и азота, диоксины, пестициды, углеводороды;
- механические — вибрация, механическое разрушение почвенного покрова, твердые бытовые отходы;
- биотические, например, введение в природные экосистемы видов растений и животных, не свойственных данной системе, часто приводит к сдвигу стабильности экосистемы.

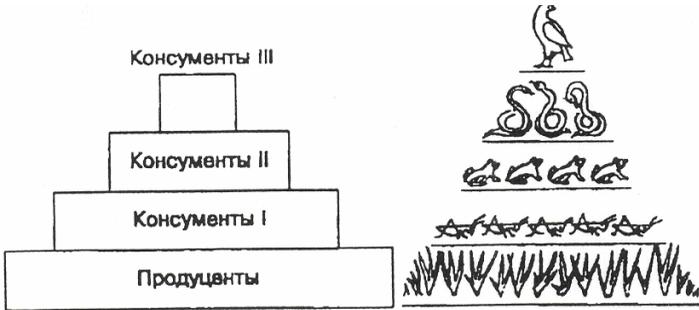


Рис. Г.1. Упрощенная схема экологической пирамиды (1) и пирамиды чисел (2)

Влияние факторов среды на организм показано на рис. Г.1. Наиболее благоприятная для жизни организма интенсивность экологического фактора называется оптимальной, или *оптимумом*. Отклонение от оптимального значения фактора приводит к угнетению жизнедеятельности организма. Условия, при которых жизнедеятельность организма максимально угнетается, но организм еще может существовать, называют *пессимумом*. Граница, за пределами которой организмы существовать не могут, называется *пределом выносливости*. Эта граница различна для разных видов, для особей

одного вида, для отдельных стадий развития одного организма. Например, для рыб, обитающих в холодных морях Антарктики и Северного Ледовитого океана, диапазон переносимых температур составляет от +4 до +8°C. Рыбы экваториальных и умеренных широт переносят колебания температуры от +10 до +40°C. Древесные и кустарниковые породы в Якутии не вымерзают даже при температуре –70°C.

Свойство видов адаптироваться к тому или иному диапазону факторов среды обозначается понятием *экологической пластичности* вида. Чем шире диапазон колебаний экологического фактора, в пределах которого данный вид может существовать, тем больше его экологическая выносливость и пластичность. Это свойство определяет деление организмов на *стенобионтные* и *эврибионтные*.

В природе на организм одновременно воздействует несколько факторов. Это обстоятельство учитывает закон лимитирующего (ограничивающего) фактора Ю.Либиха и В.Шелфорда. Фактор, уровень которого в качественном или количественном отношении (недостаток или избыток) оказывается близким к пределам выносливости данного организма, называется ограничивающим. *Закон лимитирующего фактора* можно сформулировать так: лимитирующий фактор как в минимуме, так и в максимуме определяет пределы устойчивости организма к данному фактору.

Популяции. Любой вид в природе существует и приспособляется к условиям внешней среды в виде популяций. Популяция — это совокупность особей одного вида, обладающих способностью свободно скрещиваться между собой и обитающих длительное время на определенной территории. *Популяция* — структурная единица вида, именно на уровне популяций происходят основные эволюционные процессы, создаются и закрепляются адаптивные признаки, которые позволяют организмам приспособиться к определенным условиям обитания.

Вид — это сложная биологическая система, состоящая из группировок организмов (популяций), обладающая характерными особенностями строения, физиологии и поведения.

Популяция как структурная единица вида характеризуется такими признаками, как численность и плотность, рождаемость и смертность, размещение в пространстве.

Численность популяции — это общее количество особей, обитающих на данной территории или в данном объеме.

Плотность популяции — это количество особей или биомасса на единицу площади или объема. Например, 150 растений сосны на 1 га, 0,5 г циклопов в 1м³ воды. Численность и плотность популяции никогда не бывают постоянны, они колеблются в различные годы и сезоны и зависят от климатических факторов, интенсивности размножения, смертности, миграции особей.

Рождаемость характеризует способность популяции к воспроизведению, частоту появления новых особей за единицу времени (число детенышей, отложенных яиц, икринок у животных, семян и спор у растений). У микроорганизмов рождаемость зависит от скорости деления клеток.

Смертность — это количество особей, погибших за определенный период. Она, как и рождаемость, изменяется в зависимости от условий среды, возраста и состояния популяции. У большинства видов смертность в раннем возрасте всегда выше.

Экосистема — это единый природный комплекс, образованный живыми организмами и средой их обитания. Понятие «экосистема» иногда заменяют термином «биогеоценоз». *Биогеоценоз* — однородный участок земной поверхности с исторически сложившимся определенным составом живых организмов и компонентами неживой природы.

Таким образом, любая экосистема (биогеоценоз) состоит из абиотического компонента — единства физических и химических факторов и биотического — живых организмов. Главное свойство экосистемы (биогеоценоза) — это наличие глубоких взаимных связей между основными его компонентами.

Пищевые цепи и сети. Все живые организмы связаны между собой веществом и энергией и образуют трофическую цепочку. В функционирующей природной экосистеме не существует отходов (!). Все организмы, живые или мертвые, потенциально являются пищей для других. Последовательность организмов, в которой каждый из них съедает или разлагает другой, называется *пищевой цепью*, где происходит перенос высокоэффективной, поглощенной при фотосинтезе солнечной энергии через организмы экосистемы.

Первым звеном этой цепочки являются *продуценты* — автотрофные организмы, синтезирующие органические соединения (сахара, белки, жиры и др.) из неорганических (кислород, вода минеральные соединения). Фотоавтотрофные — зеленые растения, некоторые микроорганизмы — осуществляют этот процесс за счет энергии солнечного света, которая в их теле преобразуется в энергию химических связей органических соединений.

Консументы — второе звено пищевой цепи. Гетеротрофные организмы (их называют «потребители») питаются готовыми органическими соединениями. В зависимости от источника питания консументы делят на:

1. Фитофаги (растительоядные) — консументы 1-го порядка, которые питаются исключительно живыми растениями (птицы, кузнечики, зайцы, олени, лоси и т.д.).

2. Хищники (плотоядные) — консументы 2-го порядка, которые питаются растительноядными животными, и консументы 3-го порядка, которые питаются только плотоядными (пауки и птицы, поедающие хищных насекомых).

3. Эврифаги (всеядные) поедают как растительную, так и животную пищу (медведи, свиньи, крысы, лисы, тараканы, а также человек).

Редуценты — организмы, питающиеся мертвыми организмами. Их делят на детритофаги и деструкторы.

Детритофаги питаются собственно мертвыми организмами или органическими остатками (крабы, шакалы, дождевые черви, муравьи).

Деструкторы разлагают сложные органические молекулы мертвой материи на простые неорганические соединения (грибы, микроорганизмы). Они могут служить источником пищи для червей, насекомых.

Экологическая пирамида. Выделяют следующие экологические пирамиды:

— пирамида чисел — отражает число особей на каждом уровне пищевой цепи;

— пирамида биомассы — количество органического вещества, синтезированного на каждом уровне;

— пирамида энергии — характеризует величину потока энергии, круговорот веществ в экосистемах.

Из трех типов экологических пирамид пирамида энергий дает наиболее близкое представление о функциональной организации сообщества.

Организмы в экосистеме в зависимости от типа используемой пищи занимают различные трофические уровни. Продуценты — первый уровень, консументы 1-го порядка — второй и т.д. (рис. Г.1). Согласно второму закону термодинамики, с каждым переходом от одного трофического уровня к другому в пищевой цепи (сети) происходит сокращение энергии, которую могут использовать организмы последующего уровня. Это происходит потому, что при совершении работы организмами в окружающую среду выделяется тепловая энергия. В связи с уменьшением энергии на каждом уровне идет и уменьшение биомассы. Это отражает *правило экологической пирамиды* (рис. Г.1). Данное правило впервые сформулировал в 1942 г. Р.Линдемманн, оно получило название «закон превращения энергии в экосистемах», или «закон 10%».

Законы экологии.

Правило 10% (правило пирамиды энергий): с одного трофического уровня экологической пирамиды переходит на другой, более высокий уровень (по лестнице продуценты—консументы), в среднем около 10% поступившей на предыдущий уровень энергии.

Правило 1%: изменение энергетики природной системы в пределах 1% выводит природную систему из равновесия (квазистационарного) состояния.

Закон толерантности [от лат. *tolerantia* — терпение]: лимитирующим фактором процветания организма может быть как минимум, так и максимум экологического фактора, диапазон между которыми определяет предел толерантности (выносливости) организма. Установлен в 1914 г. американским зоологом и экологом В.Шелфордом (1877—1968).

Принцип Ле Шателье: при внешнем воздействии, выводящем систему из состояния устойчивого равновесия, равновесие смещается в том направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется. Для химической реакции этот принцип устанавливает: если на систему, находящуюся в равновесии оказать

какое-либо внешнее воздействие, то оно благоприятствует протеканию той из двух противоположных реакций, которая ослабляет это воздействие. В электродинамике аналогом служит правило Ленца, в механике ему соответствует закон инерции.

Принцип минимума диссипации (рассеивания) энергии, или принцип экономии энергии (Л.Онсагер — И.Пригожин): при вероятности развития процесса в некотором множестве направлений, допускаемых началами термодинамики, реализуется то, которое обеспечивает минимум диссипации энергии.

Закон максимизации энергии и информации: наилучшими шансами на самосохранение обладает система, которая в наибольшей степени способствует поступлению, выработке и эффективному использованию энергии и информации.

Правило внутренней непротиворечивости: в естественных экосистемах деятельность входящих в них видов направлена на поддержание этих экосистем как среды собственного обитания. Иначе говоря, виды в естественной природе не могут разрушать среду своего обитания, так как это вело бы их к самоуничтожению. Напротив, деятельность растений и животных направлена на создание (поддержание) среды, пригодной не только для их жизни, но и для потомства.

Правило Бергмана: средние размеры тела теплокровных животных меньше у популяций, населяющих более холодную часть ареала вида. Объясняется приспособлением к температурным условиям (при меньших размерах меньше теплоотдача). Сформулировано в 1847 г. немецким ученым К.Бергманом. Правилу Бергмана подчиняются 50% видов теплокровных животных, большинство которых (до 90%) птицы.

Принцип конкурентного исключения или принцип Гаузе (закон Гаузе): два вида не могут сосуществовать, если они занимают одну экологическую нишу.

Принцип системной дополнителности: подсистемы одной природной системы в своем развитии обеспечивают предпосылку для успешного развития и саморегуляции других подсистем, входящих в ту же систему.

Закон экологической корреляции: в экосистеме, как и любом другом целостном природно-системном образовании, особенно в биотическом сообществе, все входящие в него виды живого

и абиотические компоненты функционально соответствуют друг другу. Выпадение одной части системы (например, уничтожение какого-либо вида) неминуемо ведет к исключению всех тесно связанных с этой частью системы других ее частей. Понимание закона экологической корреляции особенно важно в аспекте сохранения видов.

«*Законы*» экологии Б.Коммонера: экологические закономерности, сформулированные в общей афористической форме Б.Коммонером:

1. Все связано со всем.
2. Все должно куда-то деваться.
3. Природа знает лучше.
4. Ничто не дается даром.

Динамика популяции — одно из наиболее значимых биологических и экологических явлений.

Любая популяция способна (теоретически) к неограниченному росту численности, если ее не лимитируют факторы внешней среды абиотического (прежде всего климат) и биотического (конкуренция, хищники, паразиты, болезни) происхождения. В таком случае динамика описывается уравнением:

$$\frac{dN}{dt} = rN,$$

где N — численность особей, t — время, r — биотический потенциал.

График этой функции есть экспонента.

В природе, однако, рост численности популяций любого вида никогда не бывает бесконечным, поскольку ресурсы, за счет которых существуют виды, на любой территории имеют пределы. Эти пределы называют емкостью среды (K) для конкретных популяций. Например, еловый лес — более емкая среда для белок, нежели смешанный с березами, поскольку основная пища этих зверьков — семена шишек.

Модель динамики численности популяции при ограниченных (лимитированных) ресурсах описывается так называемым логистическим уравнением А.Ферхюльста.

Гомеостаз популяции. Способность популяции поддерживать определенную численность своих особей называется гомеостазом популяции. В основе этого важнейшего, эволюционно приобретенного свойства лежат изменения физиологических особенностей, роста, поведения каждой особи в ответ на увеличение или уменьшение числа членов популяции, к которой эта особь принадлежит.

Механизмы популяционного гомеостаза определяются экологической спецификой вида, его подвижностью, степенью воздействия хищников, паразитов и др.

Это означает, что популяции присуще важнейшее свойство — *саморегуляция*. Она осуществляется действующими в природе двумя взаимно уравновешивающимися силами: способностью к размножению и зависящей от плотности популяции реакции, напротив, ограничивающей воспроизводство.

Экологическая ниша — комплекс всех физических, химических и биологических факторов среды, которые необходимы виду для жизни, роста, размножения в данной экосистеме. Понятие ниши включает в себя и роль организма в экосистеме. Например, местообитание дрозда включает в себя леса, парки, луга, сады, огороды. Его же экологическая ниша включает такие факторы, как гнездование, высиживание птенцов на деревьях, питание насекомыми, плодами, перенос плодово-ягодных семян со своими экскрементами. Каждый биологический вид имеет определенную функцию в своей экосистеме.

Все организмы в экосистеме связаны между собой различными типами взаимоотношений, основные среди них: межвидовая конкуренция, хищничество, паразитизм, мутуализм, комменсализм.

Хищничество — форма взаимоотношений, при которой отдельная особь одного вида (хищник) питается организмами другого вида (жертва). *Паразитизм* — форма взаимоотношений, когда один вид питается за счет другого и живет на хозяине или внутри него. *Мутуализм* — форма взаимовыгодного, совместного существования. *Комменсализм* — сожительство, приносящее пользу одному партнеру и безвредное для другого.

Экологические ниши некоторых организмов могут пересекаться, когда они используют один и тот же ресурс (пищу). В этом случае может возникать *межвидовая конкуренция*.

Аллелопатия [от греч. *allelon* — друг друга, взаимно и *pathos* — страдание] — выделение растениями одного вида различных веществ, оказывающих влияние на растения другого вида; одно из проявлений межвидового взаимодействия.

Альbedo [от лат. *albus* — светлый] — отношение количества отраженной лучистой энергии к количеству лучистой энергии, падающей на объект.

Биосфера как глобальная экосистема. *Биосфера* — часть Земли, в которой обитают и размножаются живые организмы. Данный термин был предложен австрийским геологом Э.Зюссом в конце XIX в. Главную роль в создании учения о биосфере сыграли работы академика В.И.Вернадского. Вернадский считал, что биосфера состоит из следующих компонентов:

1. Живое вещество — растения, животные, грибы, микроорганизмы.

2. Биогенное вещество — органические и органоминеральные продукты, созданные живыми организмами на протяжении геологических эпох: каменный уголь, горючие сланцы, торф, нефть и т.д.

3. Косное вещество — горные породы неорганического происхождения и вода, среда обитания живых организмов.

4. Биокосное вещество — результат взаимодействия живого и неживого (косного) вещества: осадочные породы, кора выветривания, ил на дне водоемов и др.

Границы биосферы определяют пределы распространения живых организмов. Биосфера включает нижнюю часть атмосферы, толщу океана, донную пленку жизни, на континентах — тонкий наземный и мощный подземный слой. Живое вещество занимает участки планеты, где есть условия для жизни и размножения. Крайних границ биосферы достигают только низшие организмы.

Биогеохимические круговороты. В.И.Вернадский в своей книге «Биосфера» раскрывает ведущую роль живых организмов в трансформации солнечной энергии и преобразовании земного вещества. Живое вещество биосферы, по словам ученого, выполняет космическую функцию, связывая Землю с космосом. Оно

поглощает лучистую энергию солнца, трансформирует ее в другие виды энергии и за счет этого вовлекает неорганические вещества в непрерывный круговорот. Через живое вещество прошли атомы почти всех химических элементов. «Прекращение жизни, — писал Вернадский, — было бы неизбежно связано с прекращением химических изменений, если не всей земной коры, то, во всяком случае, ее поверхности — лика земли, биосферы». Процессы преобразования земных веществ живым веществом он назвал *биогеохимическими процессами*.

Биогенные элементы циркулируют в биосфере, т.е. совершают биогеохимические циклы. Все биогенные циклы взаимосвязаны в природе и в совокупности формируют устойчивую структуру биосферы. Каждый химический элемент, вовлекаемый живыми организмами в круговорот из окружающей среды, пройдя через ряд организмов, снова возвращается во внешнюю среду. Таким образом, каждый элемент используется живой материей многократно, именно круговороты обеспечивают длительное существование и развитие жизни на Земле. Первичным источником движения всех круговоротов является солнечная энергия. Показано, что полный круговорот кислорода совершается за 2000 лет, углекислого газа — за 300 лет, а воды — за 2000000 лет.

В связи с хозяйственной деятельностью человечества и вовлечением в биосферный поток техногенных продуктов этой деятельности происходит нарушение природных биогеохимических циклов. Многие циклы (азота, серы, фосфора, калия, тяжелых металлов) превратились в природно-антропогенные, характеризующиеся значительной незамкнутостью. Некоторые продукты вообще не способны включаться в биологические круговороты, вызывая загрязнение биосферы. Задача человеческого общества — содействовать возврату загрязняющих веществ в круговороты.

Функции живого вещества в биосфере.

Энергетическая. Выполняется, прежде всего, растениями, которые в процессе фотосинтеза аккумулируют солнечную энергию и превращают ее в органические соединения, энергия которых в дальнейшем используется всей земной корой.

Деструктивная. Состоит в разложении, минерализации органического вещества, химическом разложении горных пород, вовлечении образовавшихся минеральных соединений в биотический круговорот.

Концентрационная. Способность живых организмов собирать рассеянные в земной коре химические элементы и накапливать их в своем теле. Наибольшей способностью к этому обладают микроорганизмы. У некоторых из них концентрация марганца увеличивается в 1200000 раз, железа — в 6500 раз, ванадия — в 420000 раз.

Транспортная. Перенос веществ против силы тяжести и в горизонтальном направлении.

Средообразующая. Преобразование физико-химической среды. Средообразующая функция является результатом всех вышеуказанных. Она поддерживает баланс вещества и энергии в биосфере, обеспечивает стабильность экологических условий всех живых организмов и человека. В результате данной функции живых организмов был создан современный газовый состав атмосферы, химический состав морей и океанов, образовались толщи осадочных пород в литосфере, плодородный слой почвы. Живое вещество биосферы способно восстанавливать среду обитания, нарушенную под влиянием природных катастроф и антропогенного воздействия. Способность живого вещества к регенерации экологических условий выражает принцип Ле Шателье, который гласит: «При возникновении внешних возмущений, нарушающих состояние окружающей среды, в биоте возникают процессы, компенсирующие эти возмущения».

Важным фактором устойчивости биосферы является огромное разнообразие живых организмов и заложенный в них высокий биопотенциал — способность к размножению, адаптация и т.д.

Ноосфера — сфера разума. Происходит от греческого «ноос» — разум. Термин «ноосфера» был введен французскими учеными Э.Леруа и Т. де Шарденом в 1927 г.

В.И.Вернадский рассматривал ноосферу как высший этап развития биосферы, связанный с развитием в ней человеческого общества. Он писал: «Ноосфера есть новое геологическое явление на нашей планете. В ней впервые человек становится крупнейшей

геологической силой. Мы переживаем новое геологическое эволюционное изменение биосферы. Мы входим в ноосферу. Человек изменяет биосферу своим трудом». Преобразующая деятельность человека связана с его мозгом, разумом. Сможет ли человечество направить свой разум на сохранение биосферы, покажет время.

Этапы взаимоотношений человека с природой.

Первое сообщество людей было сообществом охотников-собирателей (≈ 40 тыс. лет назад). Первобытный человек мало отличался от животных по характеру взаимодействия с природой.

На позднем этапе своего развития охотники-собиратели, имея более совершенные орудия труда, явились (как считают ученые) причиной гибели многих крупных млекопитающих, на которых они охотились (шерстистый носорог, степной зубр, гигантский олень, пещерный лев, медведь).

Данный этап развития человека получил название эпохи *неолита*, иначе *неолитической революции*.

На смену сообществу охотников-собирателей приходит земледельческое общество (≈ 10000 лет). Переход от охоты и собирательства к оседлому сельскому хозяйству оказал такое огромное воздействие на человеческое общество, что этот период часто называют *сельскохозяйственной революцией*. Одно из самых важных ее последствий заключалось в том, что она сделала возможным накопление материальных благ. Демографический взрыв, ставший сегодня мировой проблемой,— результат развития сельского хозяйства.

Следующая резкая смена отношений человека и природы произошла в результате промышленной революции, которая началась в середине XVII в. в Англии. Индустриальный период развития общества сопровождается демографическим взрывом, развитием науки и техники, ростом промышленного производства и городов. Человек превращается в силу, соизмеримую с деятельностью природы. Антропогенное воздействие на биосферу возрастает во много раз, что проявляется в возникновении местных, региональных и глобальных экологических проблем.

Современные экологические проблемы.

Вся земля оказалась мала и беззащитна перед безмерно возросшим миром людей. Разразился быстро протекающий глобальный экологический кризис, в котором объединились глобальное энергетическое и химическое загрязнение, потери видов живого, грозящие снижением надежности экосистем.

Н.Ф.Реймерс

Современные экологические проблемы можно сгруппировать следующим образом (рис. Г. 3):



Рис. Г. 3. Глобальные экологические проблемы планеты Земля

- происходит деградация окружающей природной среды;
- ежегодно уничтожается 1,5—2% от общей площади лесов;
- из-за неправильного использования земель ежегодно возникает около 6 млн. га рукотворных пустынь;
- из-за кислотных дождей повреждены леса на площади более 31 млн. га;
- ежегодно на нашей планете теряется 26 млрд. тонн плодородного слоя пахотных земель;
- под угрозой исчезновения находятся не менее 25—30 тыс. видов сосудистых растений;
- происходит глобальное изменение климата (парниковый эффект, появление озоновых дыр и т.д.).

Загрязнение окружающей среды.

Загрязнение атмосферы — привнесение в атмосферу веществ в виде газа, пара или пыли в степени, оказывающей вредное воздействие на организмы, неживую природу или технические устройства.

Загрязняющие вещества поступают в атмосферу в виде аэрозолей при сжигании топлива, при промышленных выбросах и т.д.

Загрязнение воды — изменение состава, свойств или состояния воды, наносящее вред человеку и окружающей среде или препятствующее техническому применению воды.

Нефтяное загрязнение. Основные источники: сточные воды нефтеперерабатывающих предприятий, утечка при добыче нефти в зоне шельфа, сброс с самоходных судов, разливы при аварии танкеров, аварии нефтепроводов, стоки от автотранспорта, ж.-д. транспорта, нефтебаз и др.

Загрязнение тяжелыми металлами. Во внутренние водоемы и в Мировой океан смываются ртуть, свинец, кадмий, мышьяк и хром, медь и др. металлы. Многие из них накапливаются в морских организмах. Концентрация токсичных веществ в рыбах порой так высока, что ее опасно употреблять в пищу.

Загрязнение почвы — попадание в почву или образование в ней новых чужеродных, не характерных для нее веществ или существенное изменение характеристик ранее существовавших компонентов (например, повышение концентрации различных химических элементов, изменение формы и др.)

Технологии.

Малоотходная — технология, требующая минимальных затрат сырья, ресурсов и оказывающая минимальное воздействие на окружающую среду. В предельном случае — при полном отсутствии отходов — технологию называют *безотходной*. Однако ее практически реализовать невозможно (в особенности, если учитывать потери тепла).

Ресурсосберегающая — технология, обеспечивающая производство конечного продукта при минимальных затратах сырья и энергии на всех ступенях технологической схемы (начиная с добычи полезных ископаемых и кончая утилизацией отходов).

Практические работы. Задачи и вопросы

Информация для учителя

В предлагаемом пособии представлены практические экспериментальные работы разного уровня сложности, который определяется несколькими показателями:

- вариантом образовательной программы, реализуемой в школе;
- наличием специального оборудования для проведения работ;
- сложностью математического аппарата, необходимого при выполнении работы (расчеты, построение графиков, диаграмм).

Так, работы базового уровня наиболее доступны для учащихся 9—10 классов, обучающихся по базовым программам. Они не требуют специального оснащения и могут быть выполнены на том оборудовании, которое входит в перечень обязательного для кабинетов физики, химии, биологии.

Работы второго уровня сложности, отмеченные *, соответствуют программам для учащихся, изучающих интегративные курсы. Иногда эти работы требуют специального приборного оснащения. Расчеты соответствуют базовой программе по математике.

Наиболее сложные работы, отмеченные **, адресованы учащимся специализированных классов, занимающимся по программам углубленного изучения экологии, имеющим профильную направленность. Такие работы, как правило, требуют специального оборудования. Расчеты в данных работах также могут быть выполнены с помощью микрокалькуляторов.

В разделе «Задачи и вопросы» символом Δ обозначены типовые задачи, решение которых выносится, как правило, на аудиторские занятия, символ * обозначает задачи повышенной трудности. Для удобства рисунки к задачам нумеруются тем же номером, что и номер задачи.

Практическая работа 1

ИЗУЧЕНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

Цель работы: изучить основные абиотические экологические факторы среды, оценить санитарно-эстетическое состояние школьного помещения, производя измерения некоторых физических параметров.

Приборы и принадлежности: белая бумага, ножницы, фломастеры, клей, люксметр Ю116 (либо Ю16, Ю17) с фотоэлементом и набором насадок.

Краткая теория

Среда характеризуется экологическими факторами, которые принято делить на биотические, абиотические и антропогенные. Животные и среда взаимосвязаны и взаимозависимы.

Отдельные элементы среды, на которые реагируют организмы приспособительными реакциями (адаптациями), носят название экологических факторов.

Абиотическими факторами среды называется совокупность условий неорганической среды, влияющих на организмы. Абиотические факторы разделяются на химические и физические, или климатические (температура, влажность воздуха, осадки, снежный покров, барометрическое давление, ветер, лучистая и тепловая энергия Солнца, наклон земной оси, электромагнитные поля и др.).

Степень воздействия экологических факторов на организмы и популяции весьма различна. Поэтому при их анализе необходимо выделять наиболее значимые. Для разных организмов количественные пределы фактора, при котором они могут существовать, неодинаковы. Это касается температуры, влажности, продолжительности солнечного освещения, химического состава компонентов среды обитания и т.д. Но в любом случае жизнь того или иного организма протекает между минимальным и максимальным значением фактора. Из перечня экологических факторов любой фактор может выступать как лимитирующий, если он отсутствует, или находится ниже критического уровня, или превосходит максимально высокий уровень (рис. 1.1).

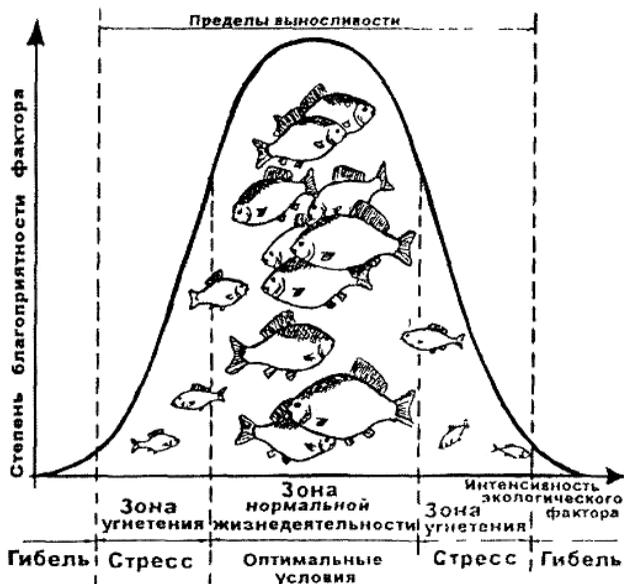
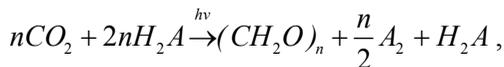


Рис. 1.1

Таким образом, лимитирующим называется такой фактор, который устанавливает рамки для протекания какого-либо процесса, явления или существования организма, вида, сообщества. Интенсивность факторов, наиболее благоприятную для жизнедеятельности особей, называют оптимальной или оптимумом. Как недостаточное, так и избыточное действие фактора отрицательно сказывается на жизнедеятельности особей.

Среди основных абиотических факторов рассмотрим свет, температуру и влажность.

Свет живой природе необходим, так как он служит единственным источником энергии для фотосинтезирующих растений; все остальные организмы, населяющие биосферу, в питании прямо или косвенно зависят от этих растений. Только на свету осуществляется важнейший в биосфере процесс фотосинтеза, который в общем виде может быть представлен следующим образом:



где A — донор электронов.

У зеленых растений (высших растений и водорослей) донором электронов является вода (кислород); у бактерий роль донора электронов могут выполнять, например, сероводород (сера), органические вещества.

Красные лучи оказывают на организмы тепловое воздействие, синие и фиолетовые — изменяют скорость и направление биохимических реакций. В целом свет влияет на скорость роста и развития растений, интенсивность фотосинтеза, активность животных, вызывает изменение влажности и температуры среды, является важным фактором, обеспечивающим суточные и сезонные биологические циклы.

Интенсивность (сила) света измеряется энергией, приходящейся на единицу площади в единицу времени, — Дж/м²с. На этот фактор сильно влияют особенности рельефа. Самым интенсивным является прямой свет, однако более полно используется растениями рассеянный свет.

Количество света определяется суммарной радиацией. От полюсов к экватору количество света увеличивается. Для определения светового режима необходимо учитывать и количество отраженного света, так называемое *альбе́до* (от лат. *albus* — белый) — отражающую способность поверхностей различных тел. Она измеряется в процентах от общей радиации и зависит от угла падения лучей и свойств отражающей поверхности. Например, альбе́до чистого снега — 85%, загрязненного — 40—50%, черноземной почвы — 5—14%, светлого песка — 35—45%, полога леса — 10—18%, зеленых листьев клена — 10%, осенних пожелтевших листьев — 28%.

По отношению к свету различают следующие группы растений: *гелиофиты* (от греч. *helios* — солнце, *phiton* — растение), *сциофиты* (от греч. *skia* — тень) и теневыносливые растения (*факультативные гелиофиты*).

Температура, как и свет, один из важнейших факторов, определяющих существование, развитие и распространение организмов по земному шару. При этом важно не только абсолютное количество тепла, но и его временное распределение, т.е. тепловой режим.

Растения не обладают собственной температурой: их анатомо-морфологические и физиологические механизмы терморегуляции

направлены на защиту от вредного воздействия неблагоприятных температур. К физиологическим способам приспособления растений, сглаживающим вредное влияние высоких и низких температур, могут быть отнесены интенсивность испарения — транспирации (от лат. *trans* — через, *spira* — дышу, выдыхаю); накопление в клетках солей, изменяющих температуру свертывания плазмы; свойство хлорофилла препятствовать проникновению солнечных лучей.

В мире животных наблюдаются определенные морфологические адаптации, направленные на защиту от неблагоприятного действия температур. Свидетельством этого может служить известное правило Бергмана (1847), согласно которому в пределах вида или достаточно однородной группы близких видов теплокровные организмы с более крупными размерами тела распространены в более холодных областях.

В зависимости от вида теплообмена различают два экологических типа животных: *пойкилотермные* и *гомойотермные*. Пойкилотермные организмы (от греч. *poikilos* — разнообразный и *therme* — теплота) — холоднокровные, к ним относятся беспозвоночные, рыбы, амфибии, земноводные; температура их тела изменяется с изменением окружающей среды.

Гомойотермные организмы (от греч. *homoios* — одинаковый и *therme* — теплота) — теплокровные с более высоким и устойчивым уровнем обмена веществ, в процессе которого осуществляется терморегуляция и обеспечивается относительная постоянная температура тела. К ним относятся птицы и млекопитающие, температура их тела поддерживается на относительно постоянном уровне.

Механизмы терморегуляции бывают химические и физические. Химический механизм обусловлен интенсивностью реакций в организме и осуществляется рефлекторным путем:

Изменение температуры окружающей среды => Терморесепторы => Центральная нервная система => Импульс => Механизмы, регулирующие процессы терморегуляции.

Физический механизм терморегуляции обеспечивают теплоизолирующие покровы (мех, перья, жировой слой), деятельность потовых желез, испарение влаги при дыхании, сосудистая регуляция кровообращения.

При медленном охлаждении в клетках живых организмов образуются кристаллики льда, которые разрывают их оболочку. При очень быстром охлаждении центры кристаллизации не успевают образоваться, и формируется стекловидная структура. В результате цитоплазма не повреждается. Таким образом, глубокое, но очень быстрое охлаждение, вызывает временную, обратимую приостановку всех жизненных процессов организма. Подобное состояние, получившее название *анабиоз*, наблюдается у вирусов, бактерий, беспозвоночных, земноводных, пресмыкающихся, лишайников, мхов.

Явление анабиоза впервые было обнаружено и описано А.Левенгуком (1701). Изучение анабиоза послужило толчком к развитию различных криотехнологий (от греч. *krios* — холод, мороз), например, *криоконсервации*.

Температурный фактор имеет важное значение в распределении живых организмов на Земле. В 1918 г. А.Хопкинс установил биоклиматический закон: **по мере продвижения на север, восток и в горы время наступления периодических явлений в жизнедеятельности организмов запаздывает на 4 дня на каждый градус широты, 5 градусов долготы и примерно на 100 м высоты.**

Влажность. Вода является важнейшим экологическим фактором в жизни организмов и их составной частью. К водным экологическим факторам относятся все физические и химические свойства воды. Воде принадлежит важнейшая роль в геологической истории Земли: она стала первой средой жизни на Земле, именно в ней возникла жизнь. По мере исторического развития многие организмы начали заселять наземно-воздушную среду.

Вода образует наиболее распространенную на планете среду обитания живых организмов; вся толща водной среды насыщена жизнью, в то время как на материках микроорганизмы не проникают глубже 4 км.

По химическому составу морская вода, где возникла земная жизнь, очень близка человеческой крови.

Простейшую формулу H_2O имеет водяной пар (гидроль). Молекула воды состоит из объединения двух простых молекул $(H_2O)_2$ (дигидроль), а молекула льда — из объединения трех простых молекул $(H_2O)_3$ (тригидроль).

В воде, потребляемой человеком, растворены важные для жизнедеятельности организма органические и неорганические вещества. Вода является обязательным компонентом практически всех технологических процессов как сельскохозяйственного, так и промышленного производства. Она выступает то как сырье, то как теплоноситель, то как транспортная система, то как промежуточный этап производства, то как растворитель и почти всегда как *среда, удаляющая отходы*.

Вода является самым мощным поглотителем солнечного тепла на поверхности Земли; решающая роль в поглощении солнечной энергии на нашей планете принадлежит Мировому океану. Его способность поглощать солнечную энергию в 2—3 раза больше, чем у поверхности суши. Поэтому океан выступает накопителем солнечной энергии на планете. Нагревается он в основном в экваториальном поясе примерно в полосе от 15 южной широты до 30° северной широты. А в более высоких широтах обоих полушарий он отдает тепло, полученное в поясе нагревания.

Задание 1. Попробуйте оценить санитарное состояние своего класса, используя следующие нормативы:

1. Размеры классной комнаты: площадь — не менее 50 м², высота 3 м.

2. Норма на одного ученика: площадь — не менее 1,25 м², объем не менее 375 м³.

3. Средняя температура 20—25°C (измеряется в центре комнаты) у наружных и внутренних стен на высоте 1,5 м от пола.

4. Естественное освещение определяется при помощи светового коэффициента (СК) по формуле

$$СК = \frac{\text{Площадь окон}}{\text{Площадь помещения}}.$$

Нормы СК: не менее 0,258 в учебных классах, 0,17 — в спортзале и столовой.

5. Искусственное освещение определяется при помощи коэффициента искусственного освещения (КИО) по формуле

$$КИО = \frac{\text{Количество ламп} \cdot \text{мощность ламп}}{\text{Площадь помещения}}.$$

Нормы КИО: не менее 40 Вт/м².

6. Проветриваемость помещения определяется при помощи коэффициента (КА) по формуле

$$KA = \frac{\text{Площадь вентиляционных отверстий}}{\text{Площадь помещения}}.$$

Нормы КА: не менее 0,02 в классах, не менее 0,018 — в других помещениях.

7. Количество комнатных растений в классе и их состояние (хорошее или плохое).

8. Чистота в классной комнате.

9. Шум в классной комнате (сильный или слабый).

Составьте таблицу, в одной колонке которой укажите факторы, согласующиеся с установленными нормами, в другой отметьте факторы с нарушением санитарных норм, в третьей — причины нарушения санитарных норм и меры по их устранению.

Задание 2. Вырежьте и наклейте полоски бумаги, окрашенные в цвета радуги. Подпишите под каждой полоской, где данный цвет встречается в природе. Какие цвета мы называем теплыми, а какие — холодными?

Пояснение. Цвета радуги: **красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый** («каждый охотник желает знать, где сидит **фазан**»).

Красный, оранжевый, желтый цвета и их оттенки ассоциируются с солнцем, огнем, поэтому человеческий глаз воспринимает их как теплые.

Синий, голубой, фиолетовый цвета и их оттенки ассоциируются с водой, льдом, металлом, поэтому человеческий глаз воспринимает их как холодные.

У зеленого цвета есть холодные и теплые оттенки.

В теплые тона нужно окрашивать стены, которые ориентированы на север, а в холодные — стены, ориентированные на юг. Тогда в комнате, ориентированной на север, будет казаться теплее, ориентированной на юг — прохладнее.

Задание 3. Определите освещенность рабочего места методом люксометрии.

Порядок выполнения задания

1. Люксометр и фотоэлемент поместите на рабочем месте (столе).
2. Отсоединив фотоэлемент, проверьте, находится ли стрелка прибора на нулевом делении шкалы. Подсоедините фотоэлемент.
3. Если величина измеряемой освещенности неизвестна, установите на фотоэлемент насадки К, Т.

При нажатии правой кнопки, напротив которой изображены наибольшие значения диапазонов измерений, кратные 10, пользуйтесь для отсечения показаний шкалой 0—100. При нажатии левой кнопки, напротив которой нанесены наибольшие значения диапазонов измерений, кратные 30, следует пользоваться шкалой 0—30.

Показания прибора в делениях по соответствующей шкале умножают на коэффициент пересчета шкалы (табл. 1) в зависимости от применяемых насадок. Например, на фотоэлементе установлены насадки К, Р, нажата левая кнопка, стрелка показывает 10 делений по шкале 0—30. Измеряемая освещенность равна $10 \cdot 100 = 1000$ лк.

Если при насадках К, М и нажатой левой кнопке стрелка не доходит до пятого деления по шкале 0—30, измерение производите без насадок, т.е. с открытым фотоэлементом.

Таблица 1

Диапазон измерений, лк	Используемые насадки	Коэффициент пересчета шкалы
5—30	Без насадок	1
17—100		
50—300	К, М	10
170—1000		
500—3000	К, Р	100
1700—10000		
5000—30000	К, Т	1000
17000—100000		

4. Измерьте с помощью люксометра освещенность классной доски.

Обработка результатов и выводы.

Полученные результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Место проведения измерений	Вид освещения (естественное, искусственное, комбинированное)	Уровень освещенности, лк	Минимально допустимый уровень освещенности, лк
Поверхность стола			300
Поверхность классной доски			500

Сделайте вывод о соответствии освещенности санитарно-гигиеническим нормам.

Оцените окраску и качество покрытия стола и классной доски, учитывая следующие данные: светлые тона (светло-зеленый, светло-голубой, зеленовато-желтый, серовато-голубой) увеличивают освещенность рабочего места на 20%; блестящая поверхность обладает слепящим действием и на 12—18% снижает устойчивость ясного видения, остроту зрения. Классная доска должна быть коричневого или зеленого цвета, и надписи мелом должны быть на ней хорошо видны.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение экологического фактора среды.
2. Приведите классификацию экологических факторов.
3. Дайте характеристику важнейших абиотических факторов среды: свет, температура, влажность.
4. Что называется интенсивностью света? Что такое альбедо? В чем измеряется освещенность?
5. Что называется абсолютной и относительной влажностью воздуха? Что такое дефицит насыщения воздуха?

Практическая работа 2

ИЗУЧЕНИЕ КРУГОВОРОТА ВЕЩЕСТВ И ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ В ЭКОСИСТЕМАХ

Цель работы: изучить большой и малый круговороты вещества в экосистемах и в биосфере в целом, а также роль физических законов сохранения в биогеохимических циклах.

Краткая теория

Каждый живой организм смертен. Количество неорганических веществ, из которых *фотоавтотрофы* и *хемотрофы* создают органические вещества в биосфере, конечно. Однако биосфера существует не менее 3—4 млрд. лет. Как можно объяснить этот феномен?

Ответ в том, что конечное количество вещества, имеющегося в биосфере, приобрело свойство бесконечности через круговороты веществ.

Круговорот веществ — многократное участие веществ в процессах, протекающих в атмосфере, гидросфере, литосфере, в том числе и в тех слоях, которые входят в биосферу планеты. Круговорот веществ складывается из отдельных процессов, где особое значение имеют биогеохимические циклы биогенных элементов, входящих в состав живого вещества и необходимых для жизнедеятельности. В ходе биогеохимических циклов атомы большинства химических элементов проходили бесчисленное количество раз через живое вещество. Например, весь кислород атмосферы оборачивается через живое вещество за 2000 лет, углекислый газ — за 300 лет, а вся вода биосферы — за 2 млн. лет (рис. 2.1)

Очевидно, что в экологических системах действуют общие термодинамические принципы и законы сохранения.

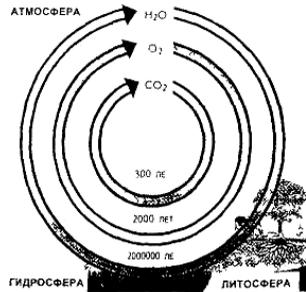


Рис. 2.1

Самым общим условием того, чтобы вообще происходили какие-либо направленные процессы в системе, является так называемый *принцип энергетической проводимости* — потоки энергии, вещества и информации должны быть сквозными, охватывающими всю систему, иначе система не будет иметь единства.

Этот закон (принцип) не следует понимать слишком упрощенно и ограничиваться короткими интервалами времени. Очевидно, для любой, в том числе и экологической, системы определенного уровня иерархии **длительность прохождения потока энергии, вещества и информации будет специфичной.**

Закон сохранения массы веществ утверждает: сумма массы вещества системы и массы эквивалентной энергии, полученной или отданной той же системой, постоянна. Или: **масса поступающего в систему вещества минус масса выходящего из системы вещества равна массе накапливаемого в системе вещества.**

Если накопления или убывания в системе не наблюдается, она находится в устойчивом, *гомеостатическом состоянии.*

Первый закон термодинамики утверждает: *при всех макроскопических процессах энергия не создается и не исчезает, а лишь переходит из одной формы в другую.*

Особое значение имеет второй закон термодинамики: **энергетические процессы в системе могут идти самопроизвольно только при условии перехода энергии из концентрированной формы в рассеянную (солнечная энергия переходит в химическую, химическая — в механическую, тепловую и др.).** Потери энергии в виде недоступного для использования тепла всегда приводят к невозможности стопроцентного перехода одного вида энергии в другой.

Имеет место также теорема *сохранения упорядоченности*: **в открытых системах энтропия не возрастает — она падает до тех пор, пока не достигается минимальная постоянная величина, всегда большая нуля.** При этом вещество в системе распределяется неравномерно и организуется таким образом, что местами энтропия возрастает, а местами — снижается. В целом же, используя поток энергии, система не теряет упорядоченности. Иными словами, по образному выражению Э.Шредингера, «организм питается отрицательной энтропией». Он непрерывно

извлекает упорядоченность из окружающей его среды, возвращая в нее большую неупорядоченность.

Перенос вещества и энергии осуществляется в основном посредством трофических цепей. Из внешней среды химические элементы поступают в тела живых организмов, затем в них происходит превращение элементов в сложные соединения и возвращение в процессе жизнедеятельности в почву, воду, атмосферу с ежегодной потерей части органического вещества или с полным отмиранием организмов, входящих в состав биогеоценоза.

Биологические круговороты характеризуются емкостью — количеством химических элементов, находящихся в составе живого вещества в данной экосистеме, и скоростью — количеством живого вещества, образующегося и разлагающегося в единицу времени. Любая экосистема — это не просто арифметическая сумма популяций и условий среды, но главным образом система взаимодействий между ними. Живое вещество путем круговорота веществ и превращения энергии поддерживает высокий уровень разнообразия биосистем, что служит одной из основ стабильности биосферы. Можно отметить, что в последние 600 млн. лет характер основных круговоротов и масса живого вещества на Земле существенно не изменилась.

Но современная техногенная деятельность человека, являясь не замкнутой по отношению к естественному ходу биосферных процессов, наносит вред окружающей среде и гомеостазу биосферы.

Рассмотрим некоторые из биогеохимических циклов.

Круговорот воды (гидрологический цикл) — это процесс непрерывного, взаимосвязанного перемещения воды на Земле, происходящий под влиянием солнечной энергии, силы тяжести и жизнедеятельности организмов. Объем гидросферы оценивается в 1,5 млрд. км³, причем 94% этого количества воды находится в Мировом океане.

Расчеты показывают, что водообмен в биологической особи занимает часы; влаги в атмосфере (следовательно, и в аэриобиосфере) — 8 дней; свободных континентальных вод — от 16 дней; в реках до 17 лет; подземные воды обновляются за 1400 лет, а воды океана — за 2500 лет.

Естественный гидрологический цикл состоит из трех отдельных процессов: испарения воды, конденсации паров, выпадения осадков и их стока.

Различают малый и большой круговороты воды. При малом круговороте вода, испарившаяся с поверхности океанов, возвращается в них в виде осадков. Однако с поверхности океана испаряется больше воды, чем возвращается в него. При большом круговороте вода, испарившись с поверхности океана, частично возвращается в него в виде осадков, другая часть переносится на сушу, где также выпадает в виде атмосферных осадков. На суше складывается обратная ситуация: здесь количество воды, испарившейся с поверхности почвы, растений и водоемов, меньше, чем количество выпавших осадков (исключение составляют пустыни, где испарение преобладает над осадками). Баланс между количеством осадков и испарением в конечном итоге достигается благодаря стоку воды с суши в океаны в виде рек, ручьев, грунтовых вод.

Круговорот углерода. Углерод встречается на Земле как в свободном виде (алмаз, графит), так и в связанном состоянии (углекислый газ, карбонаты, уголь, нефть, природный газ, сланцевое масло, битумы). Он образует молекулярный остов любого органического вещества, т.е. является одним из основных биогенных элементов (содержание углерода, например, в теле человека составляет 19,4%). Техногенная деятельность человека нарушает естественный баланс круговорота углерода. Во-первых, в результате сгорания органического топлива при существующем сегодня уровне его потребления ежегодно в атмосферу сбрасывается дополнительно около 6 млрд. т CO_2 . Во-вторых, интенсивная вырубка лесов с целью расширения сельскохозяйственных земель и увеличения производства изделий из древесины ведет к уменьшению количества CO_2 , которое способны поглотить растения. Часть избыточного углекислого газа поглощают океаны, но большая его часть остается в атмосфере. Результаты анализов убедительно свидетельствуют: содержание CO_2 в атмосфере начиная с 50-х годов неуклонно возрастает. Это способствует усилению так называемого парникового эффекта. В-третьих, при сжигании ископаемых видов топлива образуется еще и окись углерода (CO , монооксид углерода, угарный газ), который представляет опасность для здоровья людей.

Круговорот кислорода. Биогеохимический цикл кислорода является планетарным процессом, связывающим атмосферу, гидросферу и литосферу. Все органические вещества — это соединения кислорода, поэтому кислород является жизненно важным элементом почти для всех живых организмов (исключение составляют анаэробные бактерии). В количественном отношении кислород — преобладающий компонент живой материи. Так, например, тело человека состоит на 62,8% из кислорода (по массе). Господствующей формой нахождения кислорода в атмосфере является молекулярный кислород (O_2). Свободный кислород является продуктом жизнедеятельности организмов. В первичной атмосфере кислород отсутствовал: его начали вырабатывать организмы, первыми освоившие процесс фотосинтеза. Часть выделявшегося свободного кислорода под воздействием солнечного света превращалась в озон. Уже при концентрации кислорода, равной 1% от его современного содержания в атмосфере, образовался озоновый экран, способный задерживать наиболее опасную часть ультрафиолетовой радиации (200—300 нм) и тем самым защищать живое на земной поверхности.

После того как сформировался защитный озоновый слой, стали развиваться наземные растения и животные. С течением времени содержание кислорода в атмосфере значительно менялось, поскольку менялись уровни его образования и использования. В наше время природные процессы фотосинтеза и дыхания пока еще сбалансированы.

Круговорот кислорода в биосфере весьма сложен, т.е. он входит во множество различных химических форм. Основной круговорот происходит между атмосферой и живыми организмами. Продуцируется и выделяется кислород в процессе фотосинтеза зелеными растениями. Потребление его в качестве окислителя с образованием воды осуществляется в процессе дыхания гетеротрофами (животными). Небольшое количество кислорода образуется в процессе диссоциации молекул воды и озона в верхних слоях атмосферы под воздействием ультрафиолетовой радиации. Значительная часть кислорода расходуется на окислительные процессы в земной коре, при извержениях вулканов и т.д.

Круговорот азота. В свободном виде азот является главной составной частью воздуха, в связанном состоянии встречается

в форме неорганических соединений. В виде органических соединений азот содержится во всех организмах — входит в состав белков и нуклеиновых кислот, т.е. является жизненно важным элементом. В атмосфере Земли он находится в виде N_2 — химически инертного газа.

Большинство организмов не способны усваивать свободный азот из воздуха. Растения, например, извлекают азот из почвы с неорганическими веществами — солями аммония и нитратами, животные усваивают органически связанный азот при потреблении растительной или животной пищи.

В круговорот атмосферный азот вовлекается в виде соединений, образующихся под действием света и при разрядах молний, но преимущественно благодаря азотфиксации. Свободный азот фиксируют сине-зеленые водоросли (цианофиты), а также некоторые аэробные живущие свободно или в симбиозе бактерии (азотбактерии). Например, на корнях ольхи, облепихи, бобовых растений (соя, люцерна, клевер и др.) образуются небольшие вздутия — клубеньки, в которых живут азотбактерии. Эти бактерии снабжают растения нитратами, которые они вырабатывают из атмосферного воздуха, а взамен получают из растений углеводы.

Над отмершей органикой и нитратами «трудятся» сапрофиты (греч. *sapros* — гнилой, *phyton* — растение) — растения, грибы, бактерии, питающиеся за счет готового органического вещества и минеральных солей. В итоге связанный в органике азот высвобождается и возвращается в молекулярной форме в атмосферу.

Круговорот серы. Сера также относится к жизненно важным элементам — она необходима для построения белков и аминокислот. В природе сера существует в виде газообразных соединений, таких, как H_2S — сероводород, SO_2 — сернистый ангидрид, в свободном состоянии — самородная сера, а также в виде минералов — сульфидов (соли сероводорода) и сульфатов — (соли серной кислоты).

Преобладающая часть круговорота серы происходит в почве и воде благодаря жизнедеятельности различных микроорганизмов, которые превращают одни формы серы в другие. В почве и глубоководных осадках в анаэробных условиях в присутствии железа сера образует практически нерастворимые в воде сульфиды железа.

Деятельность человека, в особенности выбросы в атмосферу сульфатов, образующихся в результате сжигания мазута и угля с высоким содержанием серы для получения электроэнергии, приводит к перенасыщению атмосферного воздуха окислами серы, которые обычно присутствуют в нем в незначительном количестве. В атмосфере окислы серы реагируют с водяным паром, образуя в конечном итоге серную кислоту. В результате загрязняется атмосферный воздух, на землю выпадают осадки в виде кислотных дождей, нарушается природный круговорот серы.

Круговорот фосфора. Минеральный фосфор — довольно редкий элемент: содержание его в земной коре не превышает 1%. Источниками органического фосфора являются изверженные горные породы — апатиты и древние осадочные — фосфориты. Запасы фосфора, доступные живым организмам, полностью сосредоточены в литосфере.

Фосфор является жизненно важным элементом для всех организмов, т.к. они используют его в качестве основного компонента биологических молекул, аккумулирующих все виды энергии и распределяющих ее в зависимости от потребностей организма. Неорганический фосфор поглощается растениями и включается таким образом в пищевую сеть.

Общий круговорот фосфора включает два этапа — наземный и морской, причем основной этап — протекающий в океане.

Фосфор является наиболее слабым звеном в круговороте веществ и фактором, лимитирующим рост автотрофных организмов, которые обеспечивают стабильное существование биосферы. По существу, можно считать фосфор главным регулятором всех других биогеохимических круговоротов.

Превращение энергии. Поток солнечной энергии — это главный источник энергии в биосфере, важнейший экологический фактор. Солнечное излучение близко к равновесному излучению абсолютно черного тела с температурой $T_c \approx 6000$ К. Средняя температура Земли (15°C) составляет $T_3 \approx 300$ К. В силу большой разницы температур Земли и Солнца солнечное излучение на Земле представляет собой практически чистый источник свободной энергии.

Солнечная постоянная — это полный поток лучистой энергии Солнца на верхней границе атмосферы, при среднем расстоянии Земли от Солнца она равна

$$C=1367 \text{ Вт/м}^2.$$

Солнечная энергия, падающая на сечение Земли площадью πR_3^2 , распределяется затем по всей поверхности Земли площадью $4\pi R_3^2$ (за счет вращения Земли и энергетических потоков в атмосфере и океане). Поэтому средний поток солнечного излучения на единицу земной поверхности

$$J_3= C/4 = 341 \text{ Вт/м}^2.$$

В равновесном состоянии, когда температура Земли не меняется, энергия солнечного излучения, падающего на Землю, совпадает с энергией обратного теплового излучения Земли, а это означает, что каждый фотон солнечного излучения распадается в среднем на 20 фотонов теплового излучения, которые излучаются Землей обратно в космическое пространство (отношение температур Солнца и Земли: $T_\odot/T_3 \approx 6000/300 \approx 20$). Именно в результате распада солнечных фотонов и происходит генерация всех наблюдаемых нами упорядоченных процессов на земной поверхности.

На верхней границе атмосферы энергетический состав оптического излучения таков: УФ — 11%, видимый свет — 32%, ИК — 56%.

До 20% солнечной энергии поглощается в верхних слоях атмосферы, около 30% рассеивается в атмосфере или отражается облаками и поверхностью Земли, (отраженная планетой часть солнечного излучения носит название *альбедо*), приблизительно 50% достигает суши и поверхности океана. В результате средний поток солнечной энергии, достигающий поверхности Земли, равен примерно 170 Вт/м^2 . Но лишь ничтожная часть (всего около 0,1—0,2%) энергии, получаемой Землей от Солнца, улавливается зелеными растениями и обеспечивает весь биологический круговорот веществ в биосфере. Более 2/3 энергии затрачивается на испарение влаги и генерацию явных турбулентных потоков тепла в атмосфере и океане.

Коэффициент полезного действия фотосинтеза лежит в диапазоне 0,1—1,6%, поэтому суммарно только 1% лучистой энергии, которая достигает растений, превращается в потенциальную энергию химических связей органических соединений (пищи).

Пройдя путь от растений-продуцентов через *консументы* к *редуцентам*, солнечная энергия выносится в околоземное и космическое пространство.

Таким образом, в отличие от круговорота веществ, который протекает почти по замкнутому кругу (потери вещества в биосфере минимальны), энергия в биосфере, переходя в цепях питания с одного трофического уровня на другой, все время расходуется. Поэтому имеет смысл говорить лишь о *превращении энергии в природе*, а не о ее круговороте. Энергетические циклы очень слабы, и в биосфере преобладает однонаправленный поток энергии.

Закон однонаправленности потока энергии гласит: **энергия, которую получает сообщество, биогеоценоз, экосистема и усваивают продуценты, рассеивается или вместе с их биомассой необратимо передается консументам первого, второго и др. порядков, а затем — редуцентам, при этом на каждом из трофических уровней поток энергии десятикратно теряется (правило 10%).**

Поэтому пирамиды потоков энергии никогда не бывают перевернутыми, т.е. следующий трофический уровень может пропустить через себя лишь часть энергии, усвоенной предыдущим уровнем.

Информация в биосфере. Как и в кибернетике, информация в природе — это некоторые входные данные, перерабатываемые для получения данных на выходе.

Различают *внутреннюю* физико-химическую информацию, реализуемую, например, в информации генетической или получаемую от внутренних чувствительных нервных окончаний, и внешнюю — информацию в виде воздействия материально-энергетических абиотических и биотических факторов, в том числе сенсорную (чувственную).

Биологические системы можно рассматривать как информационные самовоспроизводящиеся и саморазвивающиеся системы. Существует некий алгоритм жизни, который передается из поколения в поколение и на основе которого создаются биосистемы.

Информация в биосфере теряется и видоизменяется вместе с гибелью видов и необратимыми генетическими перестройками.

В заключение отметим, что круговорот биотический хотя и закономерно повторяется, является процессом незамкнутым, т.е. в биосферу извне постоянно вливается поток солнечной энергии.



Рис. 2.2

Задание 1. Какие абиотические факторы вы можете выделить на рисунке 2.2? Определите, какое влияние могут оказать каждый из них и все факторы в совокупности на возникновение и распределение экосистем на планете.

Задание 2. Проследите по рис. 2.3 круговорот углерода (органическое вещество, углекислый газ) в природе и определите последовательность. Назовите биотические и абиотические факторы, которые участвуют в этом круговороте.



Рис. 2.3

Задание 3. Проследите по рис. 2.4 круговорот азота и определите последовательность. Назовите биотические и абиотические факторы, которые участвуют в этом круговороте.

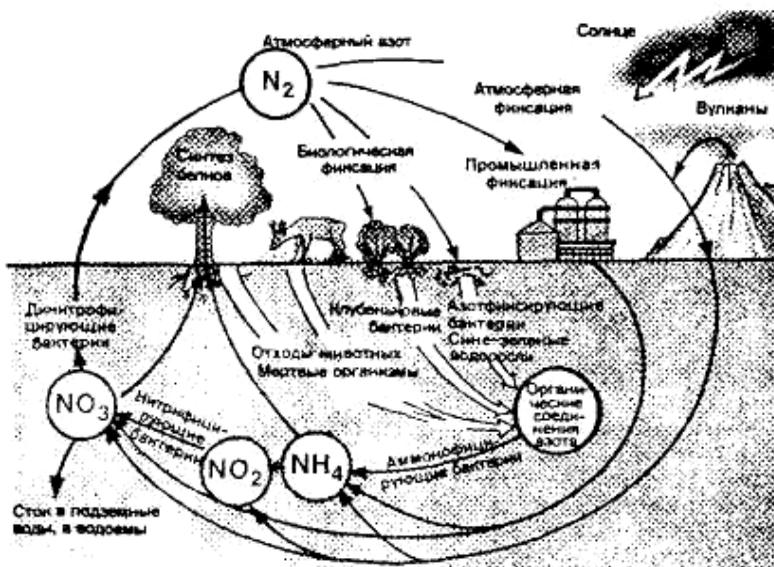


Рис. 2.4

Задание 4. Проследите по рис. 2.5 круговорот кислорода и определите последовательность. Назовите биотические и абиотические факторы, которые участвуют в этом круговороте.

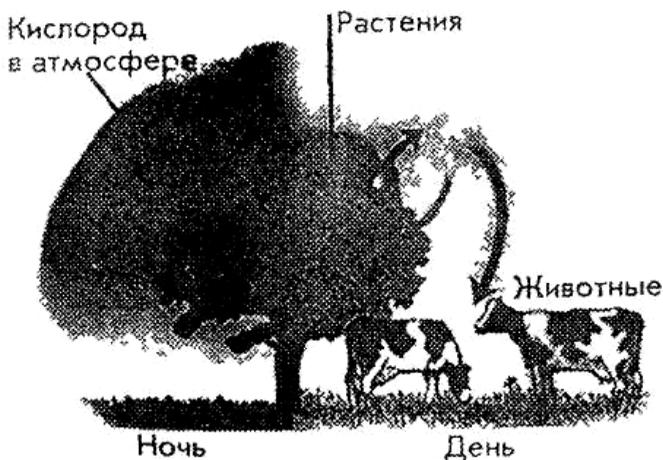


Рис. 2.5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение круговорота веществ. Назовите основные термодинамические законы, лежащие в основе круговорота веществ и энергетических потоков.
2. Какие группы организмов по способу питания принимают участие в круговороте химических элементов? Какова роль каждой из этих групп?
3. Почему только ядерные организмы не могут обеспечить существование глобальной экосистемы?
4. Какова длительность биологического (биосферного) и геологического циклов?
5. Как распределяется солнечная энергия в пределах Земли? Что такое альбедо?

Практическая работа 3

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА МИКРОКЛИМАТ ГОРОДА

Цель работы: изучить источники тепловых загрязнений среды и негативные последствия тепловых загрязнений.

Краткая теория

С возникновением цивилизации появился новый фактор, влияющий на судьбу живой природы, который достиг огромной силы в предыдущем столетии и особенно в последнее время. Шесть миллиардов наших современников оказывают на природу такое же (по масштабам) воздействие, какое могли оказать люди каменного века, если бы их численность составляла около 60 млрд. человек. Загрязнение среды приводит к изменениям физических, химических, биологических параметров поверхности нашей планеты, влияет на состояние экологических систем и здоровье человека. Именно поэтому загрязнение среды становится глобальной проблемой.

В настоящее время в результате интенсивной хозяйственной деятельности происходит тепловое загрязнение экосистем и биосферы в целом. *Тепловым загрязнением называется остаток тепла от сжигания топлива не использующийся по прямому назначению (например, для обогрева) и попадающий в воду и воздух.* Это одна из форм физического загрязнения, происходящего в результате повышения температуры среды. Тепловое загрязнение возникает и как вторичный результат изменения химического состава воздуха (парниковый эффект).

Источниками теплового загрязнения могут быть теплотрассы, подземные газопроводы. Наиболее ошутимое загрязнение идет от электростанций с охлаждением открытого типа (когда нагретая вода для охлаждения поступает в водоем). Например, в водоемах-охладителях атомных электростанций температура может повышаться на 5—10°C, что изменяет видовой состав флоры и фауны. При сбрасывании горячих вод в реки и озера происходит повышение температуры воды, усиление *эвтрофикации*, изменение в балансе питательных веществ. Результатом этого может стать смена фауны и флоры (появление теплолюбивых видов). На реках в зоне сбросов горячих вод ценные виды рыб гибнут или откочевывают, появляются малоценные виды, в том числе даже аквариумные — гуппи, цихлиды. Повышение температуры воды в водоемах вследствие теплового загрязнения способствует также усилению токсичности многих ксенобиотиков. Тепловое загрязнение может иметь и отдаленные последствия — оно ведет к упрощению экосистем, снижению биоразнообразия.

Большое влияние на перераспределение загрязнений в атмосфере оказывает микроклиматический фактор, возникающий над городом, — остров тепла. Например, разница между температурой воздуха в Москве и в ее окрестностях зимой при ясной погоде и сильном морозе может достигать 14°C. Подобное явление характерно для больших городов, для малых — в меньшей степени. В центральной части большого города формируется устойчивая зона повышенной температуры и возникают городские бризы (ветра) загрязненный воздух с окраин устремляется к центру. Зимой в центре города длительное время наблюдается помутнение воздуха, создаваемое большой концентрацией промышленных аэрозолей. В среднем за год разность между значениями температуры

в Москве и окрестностях составляет 2—4°С и имеет хорошо выраженный суточный ход.

Остров тепла образуется не только зимой, но и в другие сезоны. Поэтому городские бризы являются постоянным дополняющим неблагоприятным фактором формирования повышенного уровня загрязнения городского воздуха.

Задание 1. По графикам на рис. 3.1 определите сезон и время сток с наибольшей и наименьшей разностью температур воздуха между островом тепла и окрестностями Москвы.

Задание 2. Установите остров тепла в вашем городе путем непосредственных измерений либо в результате сбора информации метеослужб.

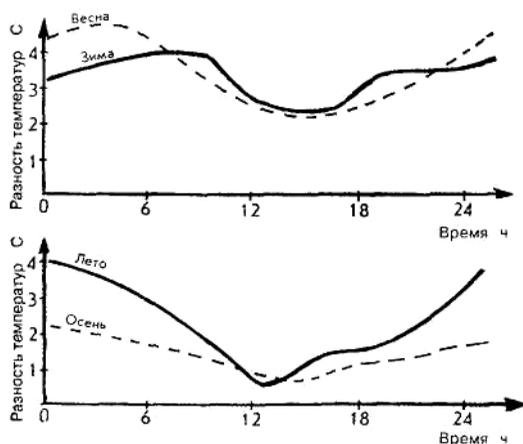


Рис. 3.1

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется тепловым загрязнением?
2. Назовите источники теплового загрязнения. Какая отрасль хозяйства дает наибольшие загрязнения?
3. Каковы негативные последствия теплового загрязнения?
4. Почему важно сохранять биологическое разнообразие видов на Земле?

Практическая работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ШУМА НА РАБОЧЕМ МЕСТЕ

Цель работы: изучение шумового загрязнения, его источников, его воздействия на живые организмы.

Приборы и принадлежности: шумомер «Шум-1 М30» или др.

Краткая теория

Шумовое антропогенное загрязнение становится одним из опасных экологических факторов окружающей среды, особенно в больших городах. Среди шумовых загрязнений различают *вибрации и шумы*.

Механические вибрации с разными амплитудами и частотами возникают практически во всех работающих механизмах, они могут быть *моногармоническими и полигармоническими*. Вибрации резко влияют на иммунную, сердечно-сосудистую системы, состав крови и т.д.

Шумом называют звук, отличающийся сложной, неповторяющейся временной зависимостью: звуки работающих машин, аплодисменты, шум пламени горелки, шорох, скрип и т.д. Звуковой удар — это кратковременное звуковое воздействие, хлопок, взрыв. В отличие от вибраций шум характеризуется более высокими частотами колебаний — от 20 Гц до 20 кГц.

Акустический шум всегда существует в природе в виде естественных звуков, к которым человек привык. Естественные звуки природы (шелест листьев, шум прибоя, птичьи голоса и т.д.) необходимы человеку; они успокаивают, снимают стрессы и утомляемость.

Громкость звука (звуковое давление) связана с его интенсивностью I , которая характеризует среднее значение плотности потока энергии, переносимой звуковой волной. Ухо человека способно воспринимать звук в широком диапазоне интенсивности. При частоте 1000 Гц границами этого диапазона являются $I_0 \approx 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ (порог слышимости) и $I_{\text{max}} \approx 10 \text{ Вт/м}^2$ (болевого порога). Громкость звука L как характеристика субъективного

восприятия звуковой волны приблизительно пропорциональна логарифму ее интенсивности. Громкость измеряется в децибелах (дБ):

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0},$$

где I — интенсивность звука (измеряется в Вт/м²), I_0 — порог слышимости.

Изменению интенсивности звуковой волны от I_0 до I_{max} соответствует изменение громкости звука от 0 до 130 дБ. Примерные значения L и I для некоторых звуков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Источник звука	дБ	Вт/м²
Порог слышимости	0	10—12
Тихий шепот (1 м)	20	10—10
Громкая речь (1 м)	70	10—5
Авиамотор (5 м)	120	1
Болевой порог	130	10

Допустимая граница громких звуков для человека составляет примерно 80 дБ. Звуки в 150 дБ становятся для него непереносимыми. Нормально допустимым уровнем шума считается 40—50 дБ.

Основные источники шума — автомобильный, воздушный, рельсовый транспорт, промышленные предприятия. Например, шум в горно-обогатительном или металлургическом производстве достигает 75—80 дБ, шум от взрывов и турбореактивных двигателей — 110—130 дБ, на магистралях с непрерывным движением шум достигает 85 дБ.

Шумовое загрязнение отрицательно воздействует на организм человека. Реакция на шум со стороны нервной системы, по данным Всемирной организации здравоохранения, начинается уже с уровня 40 дБ, а при уровне 70 дБ наблюдаются глубокие расстройства, вплоть до появления психических заболеваний. Шум, превышающий 80—90 дБ, влияет на гормоны гипофиза, которые контролируют деятельность эндокринной системы.

Физиолого-биохимическая адаптация к шуму невозможна. Акустические раздражения, накапливаясь в организме, все сильнее

угнетают нервную систему. Шум, являясь постоянным раздражителем центральной нервной системы, может приводить к различным клиническим заболеваниям, перенапряжению защитно-приспособительных свойств организма. Шум приводит к сокращению жизни на 8—12 лет.

Неслышимые звуки также могут оказывать вредное воздействие на здоровье человека. Так, инфразвуки вызывают резонанс во внутренних органах человека, при этом происходит трансформация механической энергии звуковых колебаний в тепловую, что приводит к резкому изменению биохимических и биоэлектрических процессов организма. Возникают болевые и неприятные симптомы: ухудшается настроение, появляются ощущения тревоги, испуга, страха, нервно-психические расстройства.

Как показали современные исследования, ультразвук также опасен для человека: субъективно он не воспринимается, но разрушительно действует на здоровье, особенно на клетки нервной системы.

Для ликвидации шумового загрязнения окружающей среды используется *шумозащита* — комплекс мероприятий по снижению шума на производстве (установка звукоизолирующих кожухов на оборудовании, глушителей в компрессорах, вентиляторах и пр.), на транспорте (глушители выбросов, создание на дорогах акустических экранов, шумозащитных зон), при гражданском и промышленном строительстве. Разрабатываются также бесшумные технологии.

В крупных городах составляются шумовые карты, чтобы иметь ясное представление об уровне шума на наиболее интенсивных магистралях и перекрестках и вести планомерную борьбу по его снижению.

Исключительной способностью задерживать и поглощать значительную часть звуковой энергии, особенно звуки высокой частоты, обладают растения, которые представляют собой в этом отношении своеобразные фильтры и экраны. Густая живая изгородь способна уменьшить шум, производимый машинами, в десять раз. Древесные породы, особенно лиственные, в данном случае более эффективны, чем кирпичная или бетонная стена. Хвойные породы отличаются более низкой звукопоглощающей способностью, но их влияние проявляется в течение всего года. Установлено, что клен

поглощает звук в два раза интенсивнее, чем ель. Тополь и липа имеют более низкий коэффициент звукопоглощения, но выше, чем у ели. Наилучшей звукопоглощающей способностью обладают насаждения, включающие как деревья, так и кустарники в виде живой изгороди.

Порядок выполнения работы

1. Установите микрофон шумомера на расстоянии 30—50 см от рабочего места.
2. Установите переключатели на передней панели прибора в следующие положения:
 - переключатель характеристик — в положение «С»;
 - переключатель уровней — в положение 120 дБ;
 - переключатель инертности — в положение «Медленно»;
 - переключатель контроля питания — в положение «Работа».
3. Включите тумблер питания, при этом загорится красная сигнальная лампочка.
4. Определите уровень звукового давления по индикаторному прибору шумомера. При измерении уровней от 85 до 55 дБ переключатель характеристик установите в положение «В», а при измерении уровней ниже 50 дБ — в положение «А». Ручкой переключателя уровней выведите стрелку индикатора правее деления «0» шкалы.
5. Проведите расчет по формуле: $L = a + b$, где L — уровень звукового давления, дБ; a — показания переключателя, дБ; b — показания индикатора, дБ.
6. Определите уровень шума в учебном кабинете, затем в коридоре, в столовой, в пустом учебном кабинете.

Обработка результатов и выводы

Полученные данные занесите в таблицу 2.

Таблица 2

Помещение	Уровень шума, дБ	
	Результаты измерения	Допустимый уровень
Учебный кабинет		40
Коридор		60
Столовая		60

Сделайте вывод о шумовой нагрузке, получаемой за день. Выясните, какой процент общей шумовой нагрузки составляет шум с улицы (используйте показатель шума в пустом учебном кабинете).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что мы называем шумом? Вибрациями?
2. Как связаны интенсивность звука и громкость? В каких единицах измеряется громкость звука? Какова норма допустимого уровня шума?
3. Назовите основные последствия негативного воздействия шумов и вибраций.
4. Какое воздействие могут оказывать на организм неслышимы звуки (инфразвук, ультразвук)?
5. Перечислите меры борьбы с шумовым загрязнением.

Практическая работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Цели работы: изучить элементы земного магнетизма; измерить опытным путем горизонтальную составляющую индукции магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, переключатель.

Краткая теория

1. Магнитное поле представляет собой особую форму материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися заряженными частицами. Важная особенность линий магнитной индукции состоит в том, что они не имеют ни начала, ни конца, они всегда замкнуты сами на себя. Такие поля называются *вихревыми*. Магнитное поле — это вихревое поле. Замкнутость линий магнитной индукции представляет собой фундаментальное свойство магнитного поля.

Так, силовые линии магнитного поля прямого проводника с током представляют собой концентрические окружности с центром на оси провода и лежат в плоскости, перпендикулярной этой оси, при этом направление силовых линий подчиняется правилу буравчика. Линии магнитного поля кругового тока также представляют собой замкнутые линии (рис. 5.1).

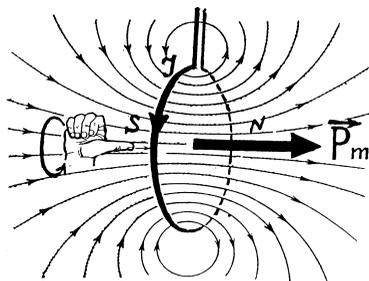


Рис. 5.1

Отметим, что поле кругового витка с током удобно характеризовать магнитным моментом (он указан на рис. 5.2), направление магнитного момента подчиняется правилу буравчика, а модуль вычисляется по формуле

$$P_m = IS,$$

где S — площадь, ограниченная витком, I — ток, текущий по витку (либо рамке).

Магнитное поле *соленоида* (длинной катушки), по виткам которого протекает ток, можно рассматривать как результат сложения магнитного поля от каждого отдельного витка; это поле внутри соленоида практически однородно, а вне соленоида совпадает с полем стержневого (полосового) магнита.

Величина индукции магнитного поля B , создаваемого током в центре витка, вычисляется на основании закона Био—Савара—Лапласа и приводит к результату:

$$B = \frac{I\mu_0}{2r}, \quad (5.1)$$

где I — ток, текущий в витке; r — радиус витка; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

2. Магнитное поле Земли — глобальный экологический фактор. Оно относится к первичным периодическим экологическим факторам, адаптация организмов к которым столь древняя, что прочно укрепились в наследственной основе.

Биотоки, возникающие в организме, являются источниками слабых магнитных полей. В медицине, например, на основании регистрации временной зависимости индукции магнитного поля сердца (биотоков сердца) создан диагностический метод — *магнитокордиография*.

В последнее время экспериментально изучается влияние магнитного поля на свойства крови, на интенсивность водного обмена, на активность многих ферментов. Клетки являются электрическими системами. Поверхностным электрическим зарядом обладают и клетки крови: эритроциты, лейкоциты и тромбоциты. Значит, кровь в движении представляет собой электромагнитную систему. В работах А.Л.Чижевского впервые было показано, что эритроциты внутри сосудистого русла перемещаются не поступательно, а катятся (эритроциты имеют форму дисков с несколько вогнутыми по направлению к оси диска стенками, при этом они сближаются своими вогнутыми сторонами, образуя кольцо). Когда эритроциты вращаются, то их электрические заряды создают конвективные электрические токи. Эти токи порождают магнитное поле. Поэтому каждый эритроцит является не только электрически заряженным диском, но еще и магнитом.

Таким образом, внешние электромагнитные поля действуют на весь организм, прежде всего через кровь, через те изменения в крови, которые происходят под их действием.

С магнитным полем Земли связано также глобальное воздействие космических факторов на земную атмосферу, а также на живое вещество биосферы. Магнитные поля оказывают ориентационное действие, которым пользуются насекомые, птицы, рыбы, млекопитающие. Процесс ориентации лежит в основе механизмов миграций животных; миграционные же процессы являются одним из важных факторов регуляции динамики популяции и устойчивости экосистемы.

Магнитное поле Земли не остается постоянным. Существуют суточные, сезонные, годовые и долгопериодические возмущения магнитного поля; живой организм откликается на эти ритмы

магнитного поля. Так, изменение ориентации земной *магнитосферы* относительно потока солнечного ветра задает суточный ритм магнитного поля Земли, а вращение Солнца (вместе с ним и межпланетного магнитного поля, имеющего характерную *секториальную* структуру) задает 27-дневный ритм вариаций магнитного поля Земли.

Во время солнечных вспышек, которые сопровождаются мощным ультрафиолетовым, рентгеновским и радиоизлучением, выбрасывается также корпускулярное излучение (солнечный ветер) — целые облака плазмы, потоки высокоэнергичных частиц, которые устремляются от Солнца вдоль силовых линий межпланетного магнитного поля. Когда на их пути оказывается Земля с ее магнитосферой, они вызывают совокупность явлений глобального масштаба: прежде всего магнитные бури, при этом меняется состояние ионосферы, нарушается или даже совсем прекращается радиосвязь, и через 2—4 суток после магнитной бури происходит заметная перестройка в тропосфере Земли.

3. Элементы земного магнетизма. Обратимся теперь к изучению структуры магнитного поля Земли.

Постоянное магнитное поле Земли (геомагнитное поле) вплоть до высот $3R_{\oplus}$, где R_{\oplus} — радиус Земли, имеет дипольный характер: оно практически совпадает с полем, которое создавал бы магнит в виде стержня, если его мысленно поместить вблизи центра

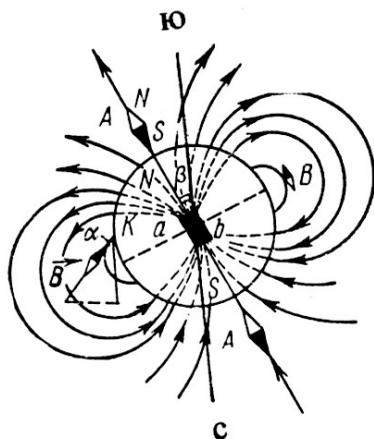


Рис. 5.2

Земли, при этом его надо расположить на 436 км от центра в сторону Тихого океана и наклонить на $11,5^\circ$ к оси вращения Земли. Силовые линии такого гигантского магнита выходят из северного магнитного полюса, расположенного в южном географическом полушарии, и входят в южный магнитный полюс в северном полушарии (рис. 5.2).

Индукция магнитного поля Земли невелика: от 0,034 мТл на экваторе до 0,066 мТл на полюсах.

Исключение составляют отдельные районы так называемых магнитных аномалий (например, Курская), где индукция может возрастать в несколько раз.

Хотя индукция магнитного поля мала, но поле это настолько обширно, что в целом энергия магнитного поля Земли весьма значительна. Чтобы создать поток магнитной индукции ($B \cdot S$), равный тому, каким обладает Земля, нужно было бы охватить Землю по экватору проводником и пропускать по этому проводнику ток величиной около 600 миллионов ампер. Дипольный магнитный момент Земли (IS) численно равен $8 \cdot 10^{22}$ Дж/Тл.

Поскольку магнитные и географические полюсы не совпадают, то магнитная стрелка указывает направление север—юг только приблизительно. Угол между направлениями магнитного и географического меридианов называют магнитным склонением, его принято обозначать греческой буквой φ , магнитное склонение изменяется от места к месту на земном шаре. С другой стороны, линии земного магнитного поля непараллельны поверхности Земли. Это означает, что магнитная индукция поля Земли не лежит в плоскости горизонта данного места, а образует с этой плоскостью некоторый угол. Этот угол называется магнитным наклоением, в разных местах Земли магнитное наклонение различно.

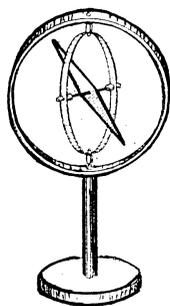


Рис. 5.3

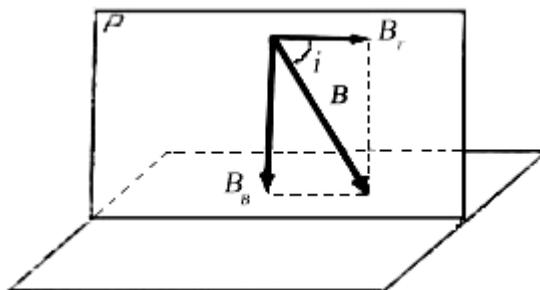


Рис. 5.4

Ясное представление о направлении магнитной индукции земного магнитного поля в данной точке можно получить, укрепив магнитную стрелку так, чтобы она могла свободно вращаться — и вокруг вертикальной, и вокруг горизонтальной осей. Это можно

осуществить, например, с помощью так называемого карданова подвеса (рис. 5.3). Стрелка устанавливается при этом по направлению магнитной индукции поля.

Если разложить вектор магнитной индукции на горизонтальную и вертикальную составляющие (рис. 5.4), то из чертежа следует, что

$$B = \frac{B_r}{\cos i}, \quad B_B = B_r \cdot \operatorname{tgi}, \quad (5.2)$$

где B_r — горизонтальная составляющая, i — угол магнитного наклонения, B_B — вертикальная составляющая магнитного поля Земли.

На практике оказывается наиболее удобным непосредственно измерять именно горизонтальную составляющую земного магнитного поля.

Таким образом, три величины — склонение, наклонение и числовое значение горизонтальной составляющей B_r — характеризуют магнитное поле Земли в данном месте.

Но откуда же взялось магнитное поле Земли? Вопрос о происхождении магнитного поля Земли до настоящего времени не имеет однозначного ответа, хотя и было выдвинуто на этот счет немало всевозможных гипотез. Согласно одним гипотезам, геомагнитное поле создается высокомагнитными породами и железом внутри Земли, согласно другим, источником магнитного поля Земли является своеобразный электромагнитный динамо-эффект, обусловленный вращением Земли. Поясним несколько подробнее последнюю гипотезу.

Земля состоит из трех оболочек: ядра, мантии и литосферы. Ядро, в свою очередь (по данным о распространении сейсмических волн), разделяется на твердую и жидкую фазы. Центральная часть Земли составляет твердое ядро радиусом порядка 1300 км. Радиус жидкого внешнего ядра равен примерно 2300 км. Ядро Земли окружает мощная оболочка — мантия, имеющая толщину более 3000 км. В рамках такой модели предполагается, что постоянное магнитное поле Земли может возникать под действием сложной системы электрических токов, сопровождающих турбулентную конвекцию в жидком внешнем ядре. Иными словами, вращающаяся Земля работает как динамо-машина, в которой

механическая энергия этой конвекционной системы генерирует электрические токи и связанный с ними магнетизм.

Симметричный дипольный характер геомагнитного поля сохраняется в пространстве вплоть до высот около трех земных радиусов, на долю этого поля приходится 99% интенсивности. А на больших высотах структура магнитного поля Земли значительно сложнее.

Как отмечалось, на структуру крупномасштабного магнитного поля Земли сильно влияет солнечный ветер. Солнечный ветер — это поток заряженных частиц (поток плазмы), идущих от Солнца; он состоит в основном из протонов и электронов. Когда солнечный ветер приближается к Земле, то на расстоянии примерно 8—10 земных радиусов он встречает ощутимое магнитное поле; столкновение частиц солнечного ветра с земным магнитным полем приводит к тому, что эти частицы изменяют направление своих потоков, искривляются и начинают обтекать поверхность, называемую границей магнитосферы. В свою очередь, и магнитные силовые линии с солнечной стороны деформируются, образуя на расстоянии 8—10 R_{\oplus} резкую границу.

Таким образом, солнечный ветер сильно искажает симметричную картину магнитных силовых линий, показанную на рис. 5.5. С освещенной (дневной) стороны линии сжимаются ветром, т.е. поле усиливается, а с темной (ночной) стороны линии как бы «сдуваются» солнечным ветром, вытягиваются, образуя геомагнитный хвост.

Фигура, которую образует магнитное поле Земли в результате взаимодействия с солнечным ветром, называется магнитосферой Земли (рис. 5.5).

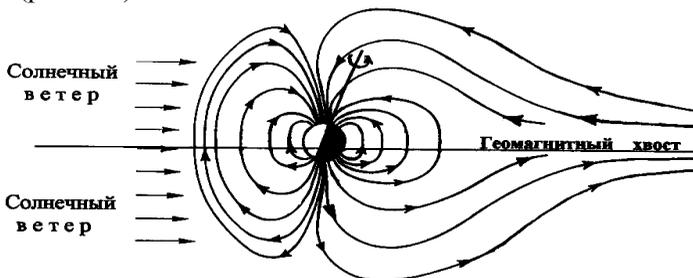


Рис. 5.5

Магнитосфера Земли с ее радиационными поясами выполняет исключительно важные защитные функции; без них жизнь на Земле не могла бы существовать (по крайней мере, жизнь высших организмов).

Поясним кратко механизм защитного действия магнитного поля Земли.

Круговые траектории. Пусть в однородном магнитном поле индукции B движется заряженная частица массой m со скоростью v , причем $v \perp B$ (рис. 5.6). Со стороны магнитного поля на частицу действует постоянная по величине сила

$$F_{\text{Л}} = qvB. \quad (5.3)$$

Магнитная сила создает центростремительное ускорение, постоянное по величине и все время перпендикулярное \vec{v} ($\vec{v} \perp \vec{F}$). Запишем второй закон Ньютона:

$$ma_{\text{ц}} = F_{\text{Л}},$$

где центростремительное ускорение следующим образом выражается через скорость и радиус траектории:

$$a_{\text{ц}} = \frac{v^2}{R}.$$

Подставляя это выражение в закон Ньютона и решая относительно R , имеем:

$$R = \frac{mv}{qB}.$$

Таким образом, заряженная частица, влетающая под прямым углом к силовым линиям однородного магнитного поля, описывает траекторию в виде *окружности*, радиус которой прямо пропорционален импульсу частицы mv и обратно пропорционален индукции поля B .

Винтообразные траектории. Если вектор скорости \vec{v} заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, образует с вектором \vec{B} угол, отличный от 90° , то траектория частицы уже не будет окружностью. Разлагаем вектор скорости \vec{v} заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, на две составляющие: перпендикулярную полю \vec{v}_\perp (ею определяется движение частицы

по окружности) и параллельную полю \vec{v}_{\parallel} (сила $F_{\parallel} = 0$, поэтому частица будет перемещаться с постоянной скоростью \vec{v}_{\parallel} вдоль линий поля).

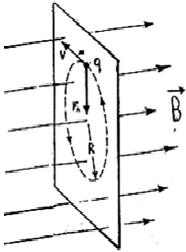


Рис. 5.6

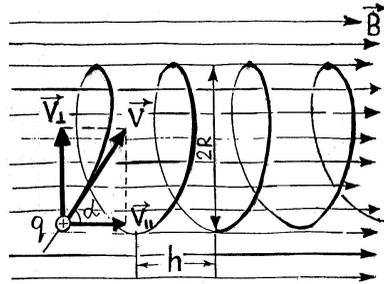


Рис. 5.7

Таким образом, полное движение частицы является комбинацией указанных движений, эта комбинация приводит к *винтообразной траектории*, ось которой совпадает с направлением магнитного поля (рис. 5.7).

Захват частиц в поле. Радиус траектории заряженной частицы, движущейся в магнитном поле, обратно пропорционален напряженности поля B ; если B возрастает, то при данной скорости радиус траектории частицы будет уменьшаться. На рис. 5.8 показано магнитное поле, индукция которого увеличивается в направлении слева направо (возрастание индукции поля обозначается сгущением силовых линий). Если у заряженной частицы, будем считать ее заряд положительным, при входе в это поле вектор скорости составляет с силовыми линиями угол меньше 90° , то она будет двигаться по винтовой траектории. В начале этого движения частица описывает траекторию в однородном магнитном поле, и радиусы витков винтовой орбиты будут одинаковы. Там же, где поле нарастает (т.е. силовые линии сгущаются), частица, «накручиваясь» на силовые линии, уменьшает скорость своего движения. В этой области вектор индукции имеет как компоненту, направленную вправо — \vec{B}_{\parallel} , так и компоненту, направленную к оси «пучка» силовых линий, т.е. перпендикулярную компоненту \vec{B}_{\perp} . Используя для вычисления силы, действующей на частицу

со стороны \vec{B}_\perp , правило правой руки, мы найдем, что эта сила всегда направлена *влево*, противоположно скорости \vec{v} , независимо от того, на каком участке винтообразной траектории находится электрон. Иначе говоря, сгущение силовых линий создает силу, которая, действуя на электрон, замедляет его движение. В некоторой точке движение полностью приостанавливается, и частица отражается в область с более слабым полем. Поведение частицы в точке возврата похоже на упругий удар шара о стенку — частица «ударяется» о магнитную «стенку» и отражается от нее. Если создать большую индукцию магнитного поля в двух различных точках (т.е. сгустить силовые линии с помощью катушек, рис. 5.9), то получится магнитная бутылка с двумя «пробками» — ловушка для заряженных частиц. Магнитное поле Земли с двумя полюсами — северным (N) и южным (S) — как раз представляет для заряженных частиц своеобразную «бутылку—ловушку» с двумя пробками.

Наша планета постоянно подвергается бомбардировке заряженными частицами высоких энергий, приходящих из космического пространства. Некоторые из этих частиц возникают за пределами Солнечной системы и в основном представляют собой протоны (примерно 85%) и α -частицы (около 14%), а также более тяжелые атомные ядра. Чтобы отметить тот факт, что эти частицы не выходят из какого-либо локального источника, им присвоили название *галактических космических лучей*. Кроме них известны также *солнечные космические лучи*; они также в основном состоят из протонов и все время выбрасываются Солнцем. Потоки этих частиц особенно обильны в периоды сильных возмущений (магнитных бурь) на поверхности Солнца.

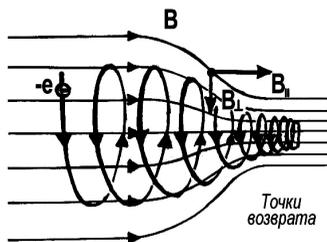


Рис. 5.8

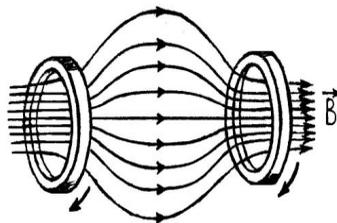


Рис. 5.9

При подходе к Земле эти частицы космического излучения попадают в зону действия земного магнитного поля. Если кинетическая энергия частицы меньше некоторого значения, то частица отклоняется полем и никогда не сможет достичь поверхности Земли, а если энергия больше пороговой, то частица может достигать земной поверхности. Траектории заряженных частиц в магнитном поле Земли показаны на рис. 5.10.

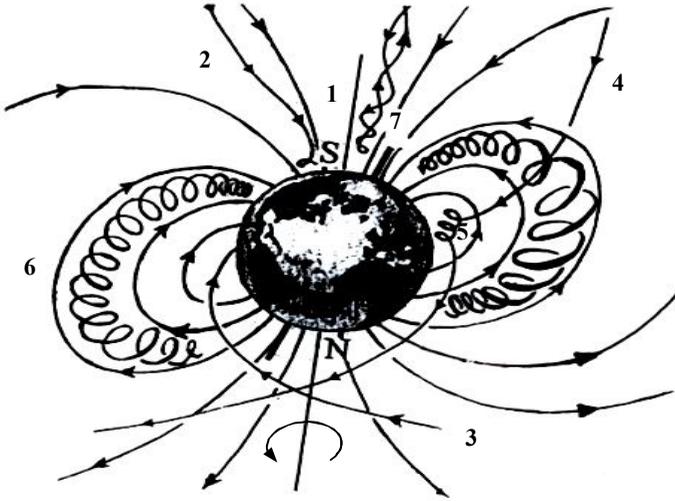


Рис. 5.10. Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли:

1 — ось вращения Земли; 2 — энергия меньше пороговой (приблизительно полярная область), частицы отклоняются магнитным полем и никогда не смогут достичь поверхности Земли; 3 — энергия больше пороговой (приблизительно полярная область), частицы (например, протоны) могут достигать земной поверхности; 4 — энергия меньше пороговой (приблизительно экваториальная область), частицы отклоняются магнитным полем Земли; 5 и 6 — захваченный электрон; 7 — магнитная ось

Полярное сияние. Интересным явлением, связанным с движением заряженных частиц в магнитном поле Земли, является *полярное сияние*. Полярные сияния разной формы и окраски возникают на высотах от 80 до 1000 км. Наиболее часто они наблюдаются в высоких северных широтах. Но изредка их можно наблюдать значительно южнее. Цветовые оттенки полярного сияния обусловлены

свечением различных газов атмосферы, в основном азота и кислорода. Различают два типа полярных сияний: электронные сияния, вызываемые потоком космических электронов, и протонные сияния, вызываемые потоком протонов. Главную роль играют электронные сияния, вклад протонных сияний в свечение неба невелик. Потоки космических электронов, спустившихся вдоль силовых линий магнитного поля Земли, на высоте около 100 км сталкиваются с атомами азота и кислорода и вызывают их возбуждение. При переходах из возбужденных состояний в основное излучаются фотоны с энергией, соответствующей зеленому свету, красному и другим. Таким образом, в результате бомбардировки потоками электронов атомов и молекул атмосферы возникает свечение полярного сияния; при этом особенно интенсивными оказываются синие линии азота и зеленые линии кислорода.

Теория метода и описание установки

Магнитная стрелка, которая может вращаться лишь около вертикальной оси, будет отклоняться в горизонтальной плоскости только под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (B_H). Это свойство магнитной стрелки используется в тангенс-гальванометре для определения B_H .

Тангенс-гальванометр представляет собой плоскую вертикальную катушку радиуса R с некоторым числом витков n . Величина радиуса катушки и число витков указаны на тангенс-гальванометре.

В центре катушки в горизонтальной плоскости расположен компас. Магнитная стрелка компаса при отсутствии тока в катушке будет расположена по магнитному меридиану Земли NS .

Поворотом катушки около вертикальной оси можно добиться совмещения плоскости катушки с плоскостью магнитного меридиана. Если после такой установки катушки по ней пропустить ток, то магнитная стрелка повернется на некоторый угол α . Объясняется это тем, что на магнитную стрелку будут теперь действовать два поля: горизонтальная составляющая индукции магнитного поля Земли B_H и созданное током магнитное поле B_1 .

На рис. 5.11 NS — направление магнитного меридиана Земли, A и D — сечения витка катушки горизонтальной плоскостью,

$N_1 S_1$ — магнитная стрелка компаса, помещенная в центре катушки, B_r — вектор горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли, B_1 — вектор индукции магнитного поля, созданного током в катушке. Обратите внимание на расположение магнитных силовых линий вокруг проводника с током; в точке А ток идет на нас (показан точкой), в точке D ток идет от нас (показан крестиком). Вектор \vec{B}_1 направлен перпендикулярно к плоскости витков.

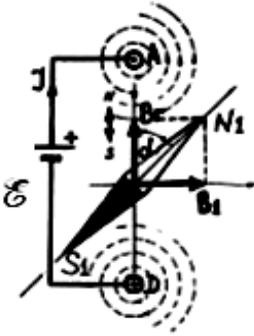


Рис. 5.11

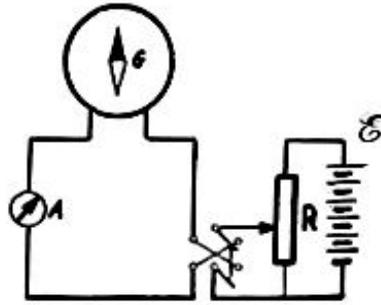


Рис. 5.12

Из рис. 5.11 видно, что $tg\alpha = \frac{B_1}{B_r}$ и, следовательно,

$$B_r = \frac{B_1}{tg\alpha}. \quad (5.4)$$

Величина индукции поля B_1 , созданного током в центре витка, вычисляется по формуле (5.1), где надо только учесть количество витков в катушке:

$$B_1 = \frac{I n}{2r} \mu_0$$

Подставляя значение B_1 в формулу (3), получим:

$$B_r = \frac{I \cdot n \cdot \mu_0}{2r \cdot tg\alpha}. \quad (5.5)$$

Этой формулой и пользуются для опытного определения B_r .

Измерения и обработка результатов измерений

Соберите электрическую цепь из тангенс-гальванометра G , амперметра A , реостата R , ключа переключателя (коммутатора) и источника тока E (рис. 5.12). Поворачивая тангенс-гальванометр и компас, установите плоскость катушки тангенс-гальванометра в плоскости магнитного меридиана так, чтобы один конец стрелки совпал с 0° .

Устанавливая движок реостата в некотором положении, включите постоянный ток и измерьте величину тока по амперметру (движок реостата должен быть установлен так, чтобы ток был около $0,5 \text{ A}$).

Как только стрелка компаса придет в равновесие, отсчитайте по круговой шкале компаса угол отклонения стрелки α_1 .

Не меняя величины тока I , измените переключателем его направление и измерьте величину отклонения стрелки — угол α_2 (берут среднее значение угла α_{cp}).

Повторите опыт 4—5 раз при различном токе. Величину тока изменяйте, меняя положение движка на реостате.

Подставляя последовательно измеренные значения $\text{tg } \alpha$ и I в формулу (5.5), найдите пять значений B_T .

Все наблюдения и результаты вычислений запишите в B_T таблицу.

№ п/п	I	α_1	α_2	α_{cp}	tg α	B_T	ΔB_T	$\frac{\Delta B_{cp}}{B_{cp}} \cdot 100\%$	$B_{ист} = B_{cp} \pm \Delta B_{cp}$
1									
2									
3									
4									
5									

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем порождается магнитное поле?
2. Какими причинами объясняется наличие магнитного поля Земли?

3. Дайте характеристику магнитного поля Земли как экологического фактора.

4. Назовите элементы земного магнетизма.

5. Как движутся заряженные частицы в однородном и неоднородном магнитных полях?

6. Как движутся заряженные частицы в магнитном поле Земли? Что такое магнитосфера, как она образуется, какую роль играет?

7. Что такое радиационные пояса, как они образуются, какую роль играют?

Практическая работа 6

АНТРОПОГЕННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ КАТАСТРОФЫ

Цель работы: изучить причины, характер развития и последствий экологических катастроф.

Оборудование: микрокалькулятор.

Краткая теория

Воздействие человека на биосферу, которое проявляется в изменении ее состава, структуры и ресурсов, в настоящее время приняло глобальный характер. На планете нет участка суши или моря, где бы не были обнаружены следы деятельности человека. Один из ярких примеров выпадение радиоактивных осадков — продуктов ядерных взрывов. В атмосфере, океане и на суше повсеместно присутствуют также продукты сгорания нефти, угля, газов, отходы химической промышленности, ядохимикаты и удобрения, сносимые с полей в процессе водной и ветровой эрозии и вовлекаемые в круговорот вещества на Земле. Результаты деятельности человека все чаще и чаще приводят к нарушению биогеохимических циклов биофильных элементов (углерода, кислорода и др.), возникновению экологических катастроф.

Экологическая катастрофа — это необратимое явление, представляющее одно из состояний природы, проявляющееся в природной аномалии. Примерами природной аномалии являются длительная засуха, наводнения и другие явления, которые нередко

возникают в результате прямого или косвенного воздействия человека на природные процессы, приводящие к остро неблагоприятным экологическим последствиям или массовой гибели населения определенного региона (например, аварии технических устройств атомной электростанции, танкера и т.д.).

Экологическую катастрофу может вызвать и ядерная зима, под которой подразумевается модельно прогнозируемое резкое и длительное общеземное похолодание, например в случае войны с применением термоядерного оружия. Ядерная зима приведет к невозможности сохранения на Земле высших форм жизни, включая человека, так как произойдет экранирование поверхности планеты от поступления солнечной энергии. Экосистемы термодинамически не замкнуты и для своего существования нуждаются во внешнем источнике энергии, которым является энергия Солнца. Поэтому отсутствие солнечной энергии приведет к уничтожению экосистем и, естественно, к гибели человечества.

Таким образом, ядерная зима классифицируется как возможная природно-антропогенная катастрофа, приводящая к уничтожению человечества.

В качестве примера экологической катастрофы можно привести Арал — один из самых удивительных водоемов планеты: («арал» в переводе на русский язык — остров), остров воды среди песков Каракумской и Кызылкумской пустынь). В Аральское море впадают две крупные азиатские реки — Амударья и Сырдарья, но в результате роста каналов для орошения плантаций хлопка и риса оказалась разобранной практически вся вода обеих рек. За последнее время объем воды в Арале сократился более чем на 60%, а зеркало — площадь моря — на одну треть. Уровень и без того мелководного Арала упал на 14 м, море продолжает необратимо высыхать и сейчас.

Катастрофа с Аралом вскрыла много недостатков в ведении хозяйства, недооценку экологических факторов на стадии планирования.

Поэтому сейчас очень важно просчитывать каждый шаг вторжения человека в природу — современная наука позволяет прогнозировать его последствия — и помнить о том, что даже локальное загрязнение может привести к глобальным экологическим проблемам.

Порядок выполнения работы

Задание 1. Оцените, какое количество нефти, разлившейся при аварии танкера, может покрыть нефтяной пленкой всю поверхность озера Байкал. Площадь озера 31500 км^2 . Толщина пленки 1 мм.

Задание 2. Оцените экологические последствия от аварии танкера, если из пробоины вытекло 10, 20, 30 или 40 тыс. т нефти.

1 тыс. т нефти покрывает площадь $A=20 \text{ км}^2$ / тыс. т.

1 кг нефти закрывает доступ кислорода к $V=40 \text{ м}^3$ /кг морской воды.

Пример выполнения задания. Представим, что в результате аварии танкера в море вылилось 10 тыс. т нефти.

1. Рассчитаем площадь морской поверхности, покрытой нефтяной пленкой. Приблизительно она может быть определена по формуле

$$S = t A,$$

в нашем случае $S = 10 \text{ тыс.т} \cdot 20 \text{ км}^2 / \text{тыс.т} = 200 \text{ км}^2$.

2. Определим количество морской воды, лишенной кислорода, по формуле

$$V_{\text{воды}} = m \cdot V,$$

в нашем случае $V_{\text{воды}} = 10 \cdot 10^6 \text{ кг} \cdot 40 \text{ м}^3 / \text{кг} = 4 \cdot 10^8 \text{ м}^3 = 0,4 \text{ км}^3$.

Ответ. В результате аварии 200 км^2 площади моря будет покрыто нефтяной пленкой толщиной в несколько миллиметров, при этом $0,4 \text{ км}^3$ морской воды будет лишено кислорода, что приведет к массовой гибели морских живых организмов, попавших в зону нефтяного пятна.

Задание 3. Феномен ядерной зимы в случае войны с применением термоядерного оружия заключается в экранировании частицами пыли поверхности планеты от поступления солнечной энергии. В результате может наступить длительное общеземное похолодание.

Рассчитайте, сколько времени необходимо для того, чтобы частицы пыли осели на поверхность Земли, открыв доступ солнечным лучам, иными словами оцените продолжительность ядерной зимы.



Среднюю высоту слоя пыли вокруг Земли взять равной ≈ 10 км, размеры мельчайших частиц пыли — 1—10 мкм (мелкодисперсная пыль), средних размеров ~ 200 мкм и крупных размеров $\sim 0,1$ — $0,5$ мм (крупнодисперсная пыль).

Пример выполнения задания. Каждая частица пыли, которую будем рассматривать в форме шарика радиуса R , будет испытывать удары со стороны молекул воздуха. Частица может находиться на заданной высоте сколько угодно долго, участвуя в броуновском движении.

Чем массивнее частица пыли, тем труднее молекулам воздуха отбросить ее, следовательно, с ростом массы роль броуновского движения будет уменьшаться, а роль земного притяжения возрастать. Когда радиус частицы становится больше одного микрометра, ее движение перестает быть броуновским, частица начинает падать под действием силы тяжести (учтем также формально действие силы Архимеда). Но как только частица начинает падать, одновременно возникает действующая на частицу сила сопротивления воздуха, эта сила направлена противоположно движению, т.е. вверх (как и сила Архимеда) и пропорциональна скорости движения частицы (формула Стокса).

$$F_c = 6\pi\eta\nu R,$$

где η — вязкость среды, в данном случае воздуха, R — радиус частицы, ν — скорость ее движения.

Таким образом, падение частицы пыли будет происходить в соответствии со вторым законом Ньютона под действием результирующей трех сил (рис. 6.1).

$$m\vec{a} = m\vec{g} - (\vec{F}_A + \vec{F}_C).$$

Когда сумма сил Архимеда и Стокса сравнивается по величине с силой тяжести, результирующая обратится в ноль, ускорение $a = 0$ и дальнейшее увеличение скорости прекратится, частица будет падать равномерно. Запишем условие равновесия сил:

$$(\rho - \rho_0)(4/3)\pi R^3 g = 6\pi\eta\nu R,$$

где ρ — плотность вещества частиц пыли, возьмем усредненную плотность $\rho \approx 2,9 \cdot 10^3$ кг/м³, плотность воздуха — $\rho_0 \approx 1,2$ кг/м³.

Отсюда видно, что действием силы Архимеда можно пренебречь. Таким образом, скорость равномерного падения частицы определится из условия:

$$\rho(4/3)\pi R^3 g = 6\pi\eta vR.$$

Зная скорость падения и высоту, можно оценить время падения:

$$t = \frac{h}{v} = \frac{9h\eta}{2\rho g R^2}.$$

Подставляя числовые данные, вычислим результат:

$$t = \frac{9 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 2,9 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot (10^{-6})^2} = 2,4 \cdot 10^7 \text{ с}.$$

Если учесть, что 1 год = $3,156 \cdot 10^7 \text{ с}$, то продолжительность ядерной зимы 0,76 года, т.е. 278 дней. *Это большой промежуток времени. Живые организмы не смогут выдержать похолодания столь длительное время.*

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите причины резкого изменения окружающей среды на Земле, охарактеризуйте их влияние на эволюционное развитие.
2. Что такое экологическая катастрофа и в чем она проявляется?
3. Приведите примеры экологических катастроф на Земле.
4. Какие последствия могут быть на Земле в случае ядерной войны?
5. Что такое деградация природы? Какова роль в этом антропогенного фактора?

Практическая работа 7

ИЗУЧЕНИЕ РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ШКОЛЫ, В МИКРОРАЙОНАХ ГОРОДА

Цели работы: изучить закономерности радиоактивного распада, дозиметрические величины и единицы их измерения; изучить устройство и принцип работы дозиметров-радиометров, измерить радиационный фон.

Приборы и принадлежности: дозиметр-радиометр ДРГБ-01, ИРД-02Б1, «ЭКО-1» или др., микрокалькулятор.

Краткая теория

1. Важнейшими характеристиками ядра являются его заряд Z и масса M . Заряд ядра определяется количеством протонов, масса ядра складывается из массы протонов и нейтронов, ее принято измерять в атомных единицах массы (а.е.м.). За атомную единицу массы принята $1/12$ часть массы атома углерода $^{12}_6\text{C}$:

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6603 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

В настоящее время массы атомов и частиц измерены с большой точностью; при этих измерениях были обнаружены *изотопы* — разновидности атомов данного химического элемента, обладающие одинаковым зарядом, но отличающиеся массой. Исходя из протонно-нейтронной модели ядра, можно сказать, что **изотопы данного элемента обладают одинаковым количеством протонов, но различным количеством нейтронов в ядре** (в таблице Менделеева, естественно, изотопы занимают одну клетку). Изотопы химических элементов называют также *нуклидами*. Радиоактивные изотопы называются *радионуклидами*.

Радиоактивность представляет собой самопроизвольное превращение одних ядер в другие, сопровождаемое испусканием трех видов излучения: α -, β -, γ -лучей. Радиоактивный распад не может быть остановлен или ускорен каким-либо способом.

Природу радиоактивных излучений установил английский ученый Э.Резерфорд. Оказалось, что α -излучение — это поток положительно заряженных частиц (ядер атомов гелия), движущихся со скоростью около 20 000 км/с.

Бета-излучение — поток отрицательно заряженных частиц (электронов) или положительно заряженных частиц (позитронов). Их скорость приближается к скорости света.

Гамма-излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение. По свойствам оно близко к рентгеновскому, но обладает значительно большей проникающей способностью и энергией. Оно распространяется со скоростью света.

Для каждого радиоактивного изотопа существует определенный интервал времени, называемый периодом полураспада.

Период полураспада T — это то время, в течение которого распадается половина наличного числа радиоактивных атомов.

Математическая форма закона радиоактивного распада проста:

$$N_{(t)} = N_0 \cdot 2^{-t/T} \text{ либо } N_{(t)} = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7.1)$$

где $N_{(t)}$ — число не распавшихся к моменту времени t ядер радиоактивного препарата, T — период полураспада, число e — основание натурального логарифма, λ — постоянная радиоактивного распада, она связана с периодом полураспада T очевидным соотношением:

$$\lambda = \ln 2 / T.$$

Период полураспада — основная величина, определяющая скорость радиоактивного распада. Чем меньше период полураспада, тем меньше времени живут атомы, тем быстрее происходит распад.

Активностью радиоактивного источника (радионуклида) называется число распадов в единицу времени:

$$A = \Delta N / \Delta t. \quad (7.2)$$

За единицу активности в Международной системе единиц принята активность препарата, в котором за 1 с происходит 1 распад. Эту единицу назвали беккерель (Бк): 1 Бк = 1 расп/с. Внесистемная единица активности — кюри (Ки):

$$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп/с.}$$

Распадающееся при радиоактивном распаде ядро ${}^A_Z X$ называется *материнским*, а ядро продукта распада ${}^A_Z Y$ — *дочерним*.

Изотопы существуют у всех химических элементов, при этом некоторые элементы имеют только нестабильные (т.е. радиоактивные) изотопы, у многих элементов число изотопов достигает более десятка.

У водорода существуют три изотопа. Изотоп с относительной массой 2 а.е.м. называется *дейтерием* (обозначается ${}^2_1 H$ либо D). Дейтерий стабилен (т.е. нерадиоактивен) и входит в качестве небольшой примеси (1 : 5500) в природный водород. При соединении дейтерия с кислородом образуется так называемая *тяжелая вода*: D_2O . Ее физические свойства заметно отличаются от свойств обычной воды. При нормальном атмосферном давлении

она кипит при 101,2 °С и замерзает при 3,8 °С. В естественной воде по числу атомов содержится примерно 0,015% дейтерия. Это означает, что в 18 г воды содержится $Na \cdot 0,00015 \approx 9 \cdot 10^{18}$ дейтерия.

Изотоп водорода с атомной массой 3 а.е.м. называется *тритием* (обозначается 3_1H либо *T*). Этот изотоп β -радиоактивен с периодом полураспада 12,3 года.

Среди тяжелых радионуклидов подчеркнем важность радиоактивных семейств: урана-238, урана-235 и тория-232. Получившееся в результате радиоактивного распада дочернее ядро в этих семействах, как правило, само является радиоактивным. Его дочернее ядро, уже «внучатое» по отношению к исходному, также может быть радиоактивным и т.д. Так возникает цепочка радиоактивных превращений. Конечными продуктами цепочки радиоактивных распадов этих семейств являются стабильные изотопы. Периоды полураспада у них, соответственно, равны: уран-238 — 4,5 млрд. лет, уран-235 — 700 млн. лет и торий-232 — около 14 млрд. лет.

Радиоактивные семейства урана и тория имели значительное влияние на эволюцию нашей планеты, на формирование ее нынешнего состояния. По мнению многих ученых, Земля была вначале холодным небесным телом. В связи с адиабатным гравитационным сжатием и нагревом, от распада радиоактивных изотопов произошло быстрое повышение температуры. В результате этого образовалась большая область расплавленного вещества: внешнее ядро и часть примыкающей к внешнему ядру мантии.

За время существования нашей планеты генерация тепла от распада радиоактивных элементов значительно изменялась — на начальных стадиях развития Земли она получала намного больше радиогенного тепла, чем в современную эпоху.

Однако роль радионуклидов в эволюции Земли не сводилась только к радиогенному нагреву. Мощные источники радиации в ранней Солнечной системе вызывали ионизацию окружающей среды, возбуждая многие химические реакции, в том числе синтез органических соединений.

2. В настоящее время радиоактивный фон планеты складывается из естественного фона и искусственного, связанного с деятельностью человека. Принято разделять облучение на внешнее

(от внешних источников) и внутреннее (от радиоактивных источников, попавших внутрь организма). Следует подчеркнуть, что значительную дозу облучения человек может получать с вдыхаемым воздухом, находясь длительное время в непроветриваемом помещении. Наибольший вклад здесь вносит радиоактивный газ — радон.

В таблице 1 приводятся данные относительного вклада различных источников естественного облучения, создающего радиационный фон Земли.

Таблица 1

№ п/п	Источник естественного радиационного фона	Доля вклада в %
1	Космическое излучение	13,7
2	Внешнее γ - и β -облучение	15,9
3	Внутреннее γ - и β -облучение	15,5
4	Радон и продукты его распада	54,3

Таким образом, более 50% естественного радиационного фона Земли приходится на радон и продукты его распада.

Радон — инертный газ, не имеющий вкуса и запаха, один из наиболее весомых естественных источников радиации, он является продуктом радиоактивного превращения урана и тория. Среди изотопов радона известны радон-222 с периодом полураспада 3,8 дней, радон-220 с периодом полураспада 54,5 с и радон-219 с периодом полураспада 3,9 с. Наиболее опасным является α -активный радон-222.

Согласно расчетам Британского бюро защиты от радиации, в Великобритании ежегодно погибают 2500 человек от рака легких, вызванного радиоактивным газом радоном. В США ежегодно около 20 тысяч онкологических заболеваний инициируется радоном и продуктами его распада. Сейчас считают, что радон вызывает у человека одышку, сердцебиение, мигрень, бессонницу, состояние тревоги. В некоторых случаях развиваются злокачественные заболевания легких, кровеносных органов.

Жертвы губительного воздействия радона были известны еще в средние века, за четыре столетия до его открытия. В поселках рудокопов в горах Южной Германии мужчины часто умирали от загадочной болезни — «горняцкой чахотки». В забоях при отсутствии вентиляции горняки испытывали одышку, теряли сознание

и умирали. Считалось, что людей губят потревоженные горные духи. В 1937 г. врач Людвиг Телеки установил, что эта загадочная болезнь — разновидность рака легких, характерная для тех рудников Южной Германии, где высока концентрация радона.

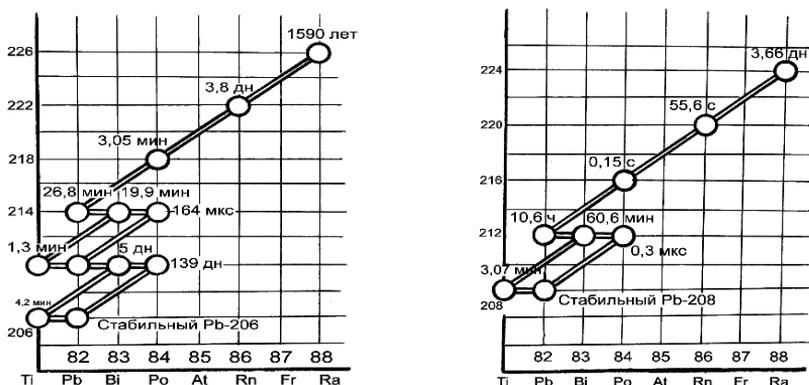


Рис. 7.1. Схемы распада от радия до свинца для уранового (а) и ториевого (б) семейств естественных радионуклидов

В процессе распада радон продуцирует семейство других α -излучателей, которые именуются *дочерними продуктами распада* (ДПР). Причем в отличие от радона ДПР представляют собой не газы, а твердые вещества — нестабильные изотопы свинца (Pb-212, Pb-214), висмута (Bi-210, Bi-212), полония (Po-210, Po-212, Po-214, Po-216, Po-218), таллия (Tl-208, Tl-210), которые, в свою очередь, являются источниками α -излучения (рис. 7.1).

Радон высвобождается из земной коры повсеместно, но концентрации его в разных точках земного шара различны. Известны регионы в Бразилии, Индии и Иране с высоким уровнем земной радиации радона.

Радон хорошо растворяется в воде, поэтому он содержится во всех природных водах, причем в глубинных грунтовых водах его, как правило, заметно больше, чем в поверхностных водостоках и водоёмах. Например, в подземных водах его концентрация может изменяться от 4—5 Бк/л до 3—4 МБк/л, т.е. в миллион раз. В водах озер и рек концентрация радона редко превышает 0,5 Бк/л, а в водах морей и океанов она составляет не более 0,05 Бк/л.

При оценках радонового риска всегда надо помнить, что вклад собственно радона в облучение относительно невелик; при радиоактивном равновесии между радонам и его дочерними продуктами распада этот вклад не превышает 2%. Опасность для здоровья населения представляют дочерние продукты распада радона — радиоактивные изотопы висмута, свинца и полония.

Радон попадает в атмосферу помещений различными путями: а) проникает из грунта, на котором стоит здание; б) выделяется из строительных материалов (цемент, щебень, кирпич), из которых построено здание; в) привносится с водопроводной водой, бытовым газом и другими продуктами жизнеобеспечения.

Эффективным средством уменьшения концентрации радона, просачивающегося через пол, являются вентиляционные установки в подвалах. Выделение радона из стен уменьшается при покрытии их тремя слоями масляной краски или слоем обоев, а также при облицовке их пластиковыми материалами. Необходимо ежедневно проветривать помещения.

3. Для измерения уровня радиационного фона и радиоактивной загрязненности поверхностей используются приборы дозиметры-радиометры, например, «Белла», «Эко», ИРД-02Б1, ДРГБ-01 и др.

Дозиметр — прибор, предназначенный в основном для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения.

Радиометр — прибор, предназначенный для измерения активности радионуклида или плотности потока частиц. Обычно указанные приборы имеют два режима работы:

1) оценка радиационного фона по величине мощности эквивалентной дозы γ -излучения (мкЗв/ч), а также загрязненности по γ -излучению проб воды, почвы, пищи, продуктов растениеводства, животноводства и т.д.;

2) оценка степени загрязненности β - и γ -излучающими радионуклидами поверхностей и проб почвы, пищи и др. (частиц/мин·см² или кВт/кг).

Напомним,

$$1 \text{ Гр} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 100 \text{ рад} = 113,6 \text{ Р}. \quad (7.3)$$

Эквивалентной дозой поглощенного излучения (дозой биологической) называют величину, равную произведению поглощенной дозы на коэффициент биологической эффективности.

$$Дб = H = КОБЭ \cdot D. \quad (7.4)$$

В СИ за единицу эквивалентной дозы принят 1 зиверт (Зв).

$$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}; 1 \text{ бэр} = \text{КОБЭ} \cdot 1 \text{ рад}.$$

Для рентгеновского или γ -излучения 1 бэр = 1 рад, 1 Зв = 100 рад = 113,6 Р.

Мощность дозы (поглощенной, экспозиционной или эквивалентной) — это отношение приращения дозы за определенный интервал времени к величине этого временного интервала:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}, \quad \dot{X} = \frac{dX}{dt}, \quad \dot{H} = \frac{dH}{dt}, \quad (7.5)$$

где \dot{D} — мощность поглощенной дозы, Гр/с; \dot{X} — мощность экспозиционной дозы, Р/с; \dot{H} — мощность эквивалентной дозы, Зв/с. При этом 1 Зв/с = 113,6 Р/с = 100 бэр/с.

Порядок выполнения работы

1. Изучите по паспорту устройство и принцип работы ДРГБ-01.
2. Установите переключатель режима работы в положение «мкЗв/ч».
3. Включите прибор, для чего установите переключатель в правое крайнее положение. Примерно через 60 секунд после включения прибор готов к работе.
4. Поместите прибор в то место, где нужно определить мощность эквивалентной дозы γ -излучения. Через 20 секунд значение на цифровом табло будет соответствовать величине мощности дозы γ -излучения в данном месте, выраженной в микрозивертах в час (мкЗв/ч) или микрорентгенах в час (мкР/ч).
5. Для более точной оценки необходимо брать среднее значение из пяти—шести последовательных показаний.

Обработка результатов и выводы

Показания прибора занесите во второй столбец таблицы, после чего заполните остальные столбцы. Например, если показание прибора 0,15, то это означает, что мощность дозы излучения составляет 0,15 мкЗв/ч или 17,04 мкР/ч.

Сделайте выводы об уровне радиационной безопасности на основании полученных экспериментальных данных.

№ опыта	Показания прибора	Мощность дозы,		Среднее значение,	
		мкЗв/ч	мкР/ч	мкЗв/ч	мкР/ч
1					
2					
3					
4					
5					
6					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите естественные радиоактивные семейства. Чему равен период полураспада каждого семейства? Что называется активностью радионуклида? В каких единицах измеряется активность?

2. Какова роль радиоактивных семейств в эволюции Земли и биосферы?

3. Откуда берется радон? Какие изотопы радона вы знаете? В каком поколении они возникают в радиоактивных семействах?

4. В чем заключается радоновая опасность? Каковы меры радоновой безопасности?

5. Что называется поглощенной дозой излучения? Экспозиционной дозой излучения? Эквивалентной дозой поглощенного излучения? В каких единицах измеряются поглощенная доза, экспозиционная доза и эквивалентная доза излучения?

6. Что называется мощностью поглощенной дозы, экспозиционной дозы и эквивалентной дозы излучения? В каких единицах измеряются соответствующие мощности?

ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

Δ1. Мальчик хочет переплыть реку, ширина которой 52 м, так, чтобы его снесло течением на 30 м. В каком направлении он должен держать курс, чтобы плыть при этом с наименьшей скоростью? Скорость течения реки $V_p = 2$ м/с.

Δ2. Почему тыквы не растут на деревьях?

Хорошо известно, что семена или плоды на высоких деревьях (дубы, буки) меньше, чем на низкорослых (яблони, сливы). Но почему, собственно, на мощном дубе не может расти тыква?

Пусть плод имеет форму шара радиуса R , плотность его составляет $2,0$ г/см³. Плод висит на черешке, который должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать вес плода.

Проанализируйте, как зависит радиус r цилиндрического черешка от радиуса плода R ? Постройте график этой зависимости. Предел прочности материала черешка можно взять 21 кПа. Почему тыквы не растут на деревьях?

Δ3. Чему равна напряженность гравитационного поля внутри Земли и вне ее?

Δ4. Рассмотрите космический корабль, состоящий из двух отсеков, соединенных переходом длиной $l = 20$ м. Сколько оборотов в секунду должен совершать такой корабль для поддержания у пассажиров нормального веса?

5. Какой продолжительности должны были бы быть сутки на Земле, чтобы тела на экваторе не имели веса?

6. Радиус орбиты Нептуна в 30 раз больше радиуса орбиты Земли. Какова продолжительность года на Нептуне?

7. Допустим, что яблоко стало искусственным спутником Земли. Радиус его орбиты равен радиусу лунной орбиты. Во сколько раз ускорение свободного падения Луны больше (меньше) ускорения свободного падения яблока в поле тяжести Земли?

8. Рассчитайте, сколько времени понадобится для того, чтобы частицы пыли, поднятой в атмосферу в результате ядерной войны, осели на поверхность Земли, открыв доступ солнечным лучам. Иными словами, оцените продолжительность ядерной зимы.

Δ9. Предположим, что удалось прорыть сквозной туннель через центр Земли вдоль оси вращения (рис. 9) и бросить в этот туннель

тело массой m . Сколько времени понадобится ему, чтобы достичь противоположной точки Земли? Плотность Земли будем считать постоянной, а сопротивлением воздуха можно пренебречь. Какой будет скорость тела в момент, когда оно пролетает центр Земли? Что произойдет дальше? Вычислите время, за которое тело вернется в исходную точку.



Рис. 9

10. Если волка увеличить до размеров слона, то диаметр слоновых ног все равно будет больше, чем волчьих. Почему?

11. Рыба может оставаться на глубине без расхода энергии посредством регулирования содержимого пористых костей или воздушного пузыря, устанавливая собственную плотность равной плотности воды. Рыба может иметь плотность $1,07 \text{ г/см}^3$ при сжатом воздушном пузыре. Какая часть объема тела должна быть занята пузырем, чтобы уравнять плотность тела и воды?

12. Температура воздуха равна 20°C , точка росы — 10°C . Определите относительную влажность воздуха.

13. Оцените, сколько энергии содержится в шаровой молнии. Для оценки взять идеализированную модель, по которой молния рассматривается как шар, состоящий из идеального многоатомного газа с температурой $T = 873 \text{ К}$. Радиус шара $r = 20 \text{ см}$.

14. Сколько понадобится нефти, чтобы покрыть всю водную поверхность Земли? Толщина пленки h равна 20 молекулярным слоям, плотность нефти $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$. Радиус Земли $R_\oplus = 6400 \text{ км}$, океаны занимают $2/3$ площади поверхности Земли. Для простоты считать, что молекулы нефти имеют форму кубиков, размер ребра которого $d = 4,7 \text{ нм}$.

15. В стакане находится водный раствор соли. Когда вода испаряется, соль выпадает в виде кристаллов, которые собираются на дне стакана. Кристаллы соли представляют собой высокоупорядоченное состояние по сравнению с ионами соли в растворе, которые двигались там совершенно хаотически. Объясните, сохраняет ли в этом случае свою силу закон возрастания энтропии?

Δ16. Гейзеры могут рассматриваться как большие подземные резервуары, наполненные грунтовой водой и прогреваемые земным теплом (рис. 16, а). Выход из них на поверхность Земли осуществляется через узкий канал, который в «спокойный» период практически полностью заполнен водой. «Активный» период наступает, когда закипает вода в подземном резервуаре; во время извержения канал заполнен только паром, который выбрасывается наружу. Оцените, какую часть воды теряет резервуар гейзера во время одного извержения. Глубина канала $H = 90$ м. Зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры показана на рис. 16 (б).

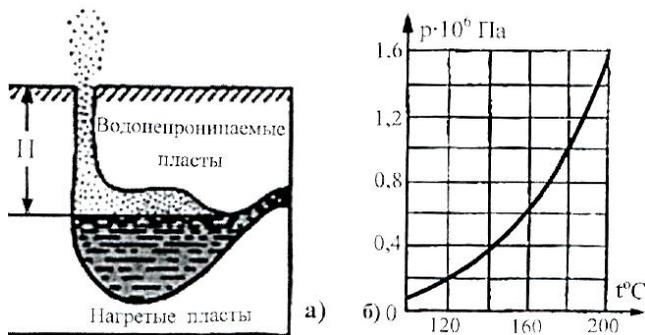


Рис. 16

Δ17. Любое членистоногое, касающееся воды окончаниями своих придатков, покрытых водоотталкивающими волосками, вызывает деформацию ее поверхности с образованием вогнутого мениска (рис. к задаче в решении). Равнодействующая сил поверхностного натяжения направлена вверх и представляет собой несущую силу F_{\perp} , равную $F_{\perp} = \sigma l \cos \alpha$, где σ — поверхностное натяжение, l — периметр органа, соприкасающегося с водой, α — угол соединения мениска с горизонтальной поверхностью ($90^{\circ} < \alpha < 180^{\circ}$). Чему равна масса животного, если $l = 0,18$ мм, $\sigma = 73$ мН/м, $\alpha = 150^{\circ}$? (Отметим, что в случае смачиваемого водой тела α составляет от 0 до 90° , несущая сила направлена вниз, и предмет должен погружаться в воду).

18. В пустыне некоторые растения и животные приспособились пить влагу из росы. Так, африканский жук скарабей живет в местах, где почти не бывает дождя. Но когда над местностью проходит туман, то роса выпадает на теле жука. Он пьет ее, опрокидываясь так, чтобы капли стекали с тела в рот.



Рис. 18

Попробуйте оценить массу воды, выпавшей в виде росы из 1 м^3 воздуха при его охлаждении до 20°C , если вначале в воздухе насыщенный водяной пар содержался при 40°C .

19. Почему атмосфера Земли состоит преимущественно из «тяжелых» газов (азота, кислорода, углекислого газа, паров воды) и содержит лишь следы (ничтожные количества) «легких» газов (водорода, гелия)?

Δ20. Одним из механизмов, посредством которого жидкости могут подниматься в растениях, является капиллярность. Однако нетрудно установить, что для высоких растений, таких как деревья, капиллярное поднятие жидкости не является основным. Подсчитайте, например, высоту капиллярного поднятия воды в трубке диаметром $0,028 \text{ мм}$.

На самом деле вода перемещается вверх из-за отрицательного давления, развиваемого на вершине растения (так называемого *осмотического давления*). Какое отрицательное давление необходимо для поднятия воды на вершину стометровой секвойи?

Δ21. Для определения температуры верхних слоев атмосферы нельзя пользоваться термометром, так как вследствие малой плотности атмосферного газа термометр не придет в тепловое равновесие с окружающей средой. Для этой цели пускают ракету с гранатами, взрывающимися при достижении определенной высоты. Найти температуру на высоте 20 км от поверхности Земли, если известно, что звук от взрыва, произведенного на 21 км , пришел позже на $6,75 \text{ с}$ звука от взрыва, произведенного на высоте 19 км .

22. Кусок льда массой $m = 500$ г, взятый при температуре $t = 0^\circ\text{C}$, был расплавлен. Определить изменение энтропии ΔS в ходе этого процесса.

23. Небольшое облако с зарядом $Q = 20$ Кл находится на высоте $h = 1$ км над поверхностью Земли. Считая Землю проводником, определите напряженность поля, создаваемую этим зарядом на расстоянии $L = 3$ км от места, над которым находится облако. Кривизной поверхности Земли пренебречь.

24. Рыбы, дающие электрические разряды (скаты, угри, сомы), используют для этого специальные электрические органы: электроциты, которые собраны в столбики, наподобие вольтовых. Благодаря этому, например, электрический угорь может создавать напряжение до $800\text{—}900$ В. Однако задача электрического органа состоит не в том, чтобы создать возможно большую ЭДС, а в том, чтобы создать наибольшую силу разрядного тока в наружной среде. Природа сумела отобрать такие оптимальные варианты электрического органа в процессе эволюции.

На основе законов Ома установите соотношение между числом электроцитов в столбе и числом параллельных столбов в электрическом органе рыб, обеспечивающее наибольшую силу тока во внешней среде.

25. Мембрана клетки человеческого тела имеет объем около 10^{-15} м³, а площадь поверхности около $5 \cdot 10^{-12}$ м². Чему равна емкость мембраны, рассматривая ее как плоский конденсатор? Каков заряд на мембране, если разность потенциалов на ней $U = 80$ мВ.

26. Оцените энергию, выделяющуюся при разряде молнии, полагая, что электрическое поле между земной поверхностью и нижней границей тучи является однородным, т.е. подобно полю плоского конденсатора. Горизонтальные размеры тучи — 4×4 км, расстояние от тучи до земли — 1 км, разность потенциалов между тучей и землей — 1 млрд. В (10^9 В).

27. Магнитное поле Земли на небольших расстояниях имеет дипольный характер; дипольный магнитный момент Земли равен $p_m = 8 \cdot 10^{22}$ Дж/Тл. Какой величины электрический ток следовало бы пропускать по проводнику, опоясывающему Землю по экватору, чтобы создавать такое же магнитное поле, как у Земли?

28. Оцените время, которое потребуется частице (например, протону), дрейфующей в магнитном поле Земли, чтобы, отразившись у северного магнитного полюса, достичь южного полюса (рис. 28). Для оценки взять скорость протона $v = 1,5 \cdot 10^7$ м/с, угол $\alpha = 60^\circ$, а среднюю длину дуги $L = 42\ 000$ км.

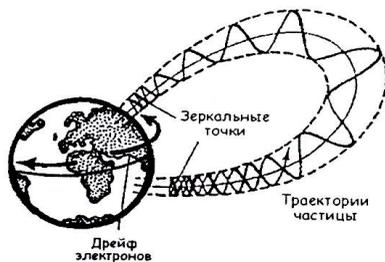


Рис. 28

29. Амплитуда звуковой волны в 1000 раз превышает порог слышимости. Какова интенсивность этой волны в децибелах?

Δ30. Цунами — одно из грозных явлений в природе — представляют собой громадные волны на воде океанов и морей. Возникают они вследствие землетрясения или взрыва подводного вулкана. Возникшая в конце декабря 2004 года вблизи северной оконечности острова Суматра цунами была, пожалуй, самой разрушительной в истории человечества. Определите время, за которое волна, возникнув в эпицентре, достигла ближайших берегов острова Шри-Ланка (расстояние принять равным примерно 1700 км). Найдите также время, за которое цунами может обогнуть земной шар.

Δ31. Согласно кинетической теории тепла, любая частица или тело (например, барабанная перепонка) из-за соударений с молекулами обладает при комнатной температуре кинетической энергией порядка $6 \cdot 10^{-21}$ Дж. Какой становится кинетическая энергия барабанной перепонки под действием звуковой волны на пороге слышимости? Сравните это значение с тепловой энергией. Скорость звука 330 м/с, а плотность воздуха $\rho = 1,3$ кг/м³. Массу барабанной перепонки m можно считать равной 0,1 г.

32. Пусть при одной и той же толщине барабанной перепонки ее площадь у кролика в 10 раз больше, чем у человека. Будем также считать, что на пороге слышимости кинетическая энергия барабанной перепонки у них одинакова. Какой интенсивности в децибелах соответствует порог слышимости у кролика?

33. Определите, во сколько раз уровень шума на дискотеке, который может достигать 160 дБ, больше гигиенической нормы, которая составляет 40 дБ? Чему равна интенсивность шума, соответствующая громкости 160 дБ?

Δ34. Наблюдатель видит радугу в результате попадания в его глаз лучей света, которые испытывают двукратное преломление и одно отражение в дождевой капле (рис. 34). Прицельным параметром луча называется отношение $\eta = r / R$, где R — радиус капли, r — расстояние от данного луча до параллельной ему прямой, проходящей через центр капли. Найдите максимальное значение угла между падающим на каплю и выходящим из нее лучами. При каком прицельном параметре реализуется этот угол? Показатель преломления принять равным $4/3$ (желтые лучи).

Δ35. Солнечные лучи в течение года приносят на Землю $5,4 \cdot 10^{24}$ Дж энергии. На сколько возросла бы температура Земли за 100 лет, если бы она эту энергию не излучала в пространство?

36. Существует ли красная граница для фотохимических реакций распада молекул под действием света? Укажите красную границу распада молекул родопсина в сетчатке нашего глаза.

Δ37. В верхнем слое морской воды толщиной 100 м концентрация светящихся бактерий достигает $5 \cdot 10^4$ 1/л. Каждая бактерия испускает каждую секунду 10^4 фотонов; длина волны испускаемого света — 0,5 мкм. Какова суммарная световая мощность, испускаемая бактериями, находящимися в слое воды, имеющем площадь 1 км^2 и толщину 100 м?

Δ38. В человеческом организме 0,36% массы приходится на калий. Радиоактивный изотоп калия ${}_{19}^{40}\text{K}$ составляет 0,012% от общей массы калия. Какова активность K-40 , если масса человека 75 кг? Период полураспада K-40 $T = 1,24 \cdot 10^9$ лет.

Δ39. Определите возраст древних деревянных предметов, если известно, что удельная активность изотопа ${}_{6}^{14}\text{C}$ у них составляет $3/5$ удельной активности этого изотопа в только что срубленных деревьях. Период полураспада ядер ${}_{6}^{14}\text{C}$ равен 5770 лет.

Δ40. В кровь человека ввели небольшое количество раствора, содержащего радиоизотоп Na-24 активностью $A = 2,0 \cdot 10^3$ расп./с. Активность 1 см³ крови, взятой через $t = 5$ часов, оказалась $A_1 = 16$ (расп./мин·см³). Период полураспада радиоизотопа $T = 15$ часов. Найдите объем крови человека.

41. Энергия разрыва связи в молекуле O_3 составляет 405 кДж/моль. Рассчитайте, какая длина волны должна быть у фотонов,

чтобы они поглощались озоном. Велика ли относительная энергия таких фотонов?

42. Почему до сих пор на Земле не распались все радиоактивные ядра? Почему не убывает количество короткоживущих радиоактивных изотопов в атмосферном воздухе, в земной коре? Какая связь существует между естественной радиоактивностью и геологическими процессами на Земле?

43. Ультрафиолетовое излучение губительно для белков и нуклеиновых кислот, особенно для ДНК. Однако первые живые организмы на Земле существовали в условиях, когда озоновый слой еще не был сформирован. Каким образом, по вашему мнению, осуществлялась защита жизни в ту пору?

44. Фотодиссоциация воды играла большую роль в образовании кислородной атмосферы на ранних этапах истории Земли. Объясните, каким образом это происходило.

45. Можно ли употреблять в пищу молоко, если в 1 л его содержится 0,04 мг свинца, 0,6 мг меди и 4,5 мг цинка? Для молока ПДК свинца — 0,05 мг/л, меди — 1 мг/л, цинка — 5 мг/л.

46. Будет ли оказывать вредное воздействие на организм человека питьевая вода, если в 1 м³ воды содержится 0,15 г железа, 0,01 г никеля, 0,01 г хрома? Для питьевой воды ПДК железа — 0,2 г/м³, никеля — 0,1 г/м³, хрома — 0,05 г/м³.

47. Человек получил всем телом 0,08 Дж/кг γ -излучения, тогда как другой, выпив по ошибке радиоактивное вещество, получил дозу 700 мрад α -частиц. Какой из них получит больше биологических повреждений?

48. После аварии на Чернобыльской АЭС в некоторых местах до сих пор регистрируется γ -излучение с мощностью экспозиционной дозы 160 микрорентген в час. Определите, во сколько раз это превосходит ПДД для населения. Экспозиционной дозе 1 Р соответствует поглощенная доза 8,8 мГр.

49. В одном мл морской воды содержится 10^{-15} г радона $^{222}_{86}\text{Rn}$. Какое количество воды имеет активность, равную 1 мКи?

50. Скорость выведения радионуклидов из организма принято выражать *эффективным периодом полувыведения*. Рассчитайте эффективный период полувыведения радионуклида $^{210}_{84}\text{Po}$ из мышц зараженного организма после аварии на Чернобыльской АЭС, если период биологического полувыведения $T_6 = 50$ сут.

ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ

1. Экологический фактор — это фактор среды:
 - a) положительно действующий на организм
 - b) отрицательно действующий на организм
 - c) безразлично относящийся к существованию организма
 - d) элементы среды необходимые организму или отрицательно на него воздействующие
 - e) климат
2. Виды, имеющие широкие диапазоны устойчивости к действию экологического фактора:
 - a) эврибионты
 - b) доминанты
 - c) стенобионты
 - d) эдификаторы
 - e) ремекты
3. Связь климатических факторов с периодическими процессами, происходящими в жизни живых организмов, изучает наука:
 - a) зоология
 - b) ботаника
 - c) экология
 - d) биология
 - e) фенология
4. Закон физики, определяющий рассеивание энергии в экосистеме:
 - a) первый закон термодинамики
 - b) второй закон термодинамики
 - c) закон сохранения вещества
 - d) закон сохранения энергии
 - e) законы энтропии
5. Принцип конкурентного исключения (вытеснения) сформулировал:
 - a) В.Шелфорд
 - b) Ю.Либах
 - c) Г.Гаузе
 - d) В.Вернадский

- e) А.Тенсли
6. Обмен химических элементов между живыми организмами и неорганической средой, различные стадии которого происходят внутри экосистемы называют:
- a) пищевой цепью
 - b) биологическим круговоротом
 - c) ресурсным циклом
 - d) потоком энергии
 - e) пищевой сетью
7. Наиболее мощный естественный процесс, вовлекающий в круговорот огромные массы вещества биосферы и определяющий ее высокий природный потенциал:
- a) брожение
 - b) анаэробное дыхание
 - c) фотосинтез
 - d) аэробное дыхание
 - e) гетеротрофность
8. Магнитное поле Земли:
- a) намагничивает железные и другие высокомагнитные руды
 - b) защищает живые организмы биосферы от космических лучей
 - c) влияет на потоки заряженных частиц
 - d) создает магнитосферу
 - e) взаимодействует с космосом через магнитосферу
9. Рост численности популяции в геометрической прогрессии в не изменяющихся условиях называется:
- a) S-образная кривая роста
 - b) осцилляция
 - c) флуктуация
 - d) логистическая кривая роста
 - e) экспоненциальная кривая роста
10. Основное свойство экосистемы:
- a) саморегуляция
 - b) способность противостоять изменениям абиотических факторов

- c) разнообразие видов
 - d) способность противостоять изменениям абиотических факторов
 - e) способность противостоять изменениям биотических факторов
11. Пирамида энергии отражает:
- a) прохождение массы пищи через пищевую цепь
 - b) круговорот веществ в экосистеме
 - c) структурную организацию в экосистеме
 - d) закономерности превращения энергии в экосистеме
 - e) численность организмов на разных уровнях пищевой цепи
12. Энергия поглощенная продуцентами:
- a) полностью используется на дыхание организмов
 - b) постепенно теряется
 - c) полностью используется на построение органического вещества
 - d) осуществляет круговорот
 - e) используется на построение органического вещества, большая часть рассеивается в пространстве
13. Динамику экосистем характеризует:
- a) гомеостаз
 - b) разнообразие видов
 - c) эмерджентность
 - d) стабильность
 - e) циклические и поступательные изменения
14. Термин «биосфера» впервые ввел в науку:
- a) Э.Геккель
 - b) Э.Зюсс
 - c) Ю.Либих
 - d) Н.Вавилов
 - e) В.Вернадский
15. Самая существенная особенность биосферы:
- a) наличие оды в биосфере
 - b) наличие живого вещества
 - c) биогенная миграция атомов химических элементов

- d) наличие биогенного вещества
 - e) наличие потока, энергии
16. Оболочка Земли, содержащая всю совокупность живых организмов и ту часть вещества планеты, которая находится в непрерывном обмене с этими организмами:
- a) экосистема
 - b) гидросфера
 - c) литосфера
 - d) биосфера
 - e) педосфера
17. Найдите соответствие между объектом окружающего мира и его линейным размером в метрах:
- | | |
|----------------------|---------------|
| 1) атом | a) 10^{20} |
| 2) атомное ядро | b) 10^{-10} |
| 3) вирус | c) 10^{-7} |
| 4) средняя звезда | d) 10^9 |
| 5) обычная галактика | e) 10^{-15} |
18. Какой закон термодинамики лежит в основе гипотезы «тепловой смерти» Вселенной?
- a) первый закон
 - b) второй закон
 - c) третий закон
19. Источником энергии на Солнце и звездах являются:
- a) гравитационное сжатие
 - b) энергия химических реакций, протекающих в недрах звезд
 - c) радиоактивный распад
 - d) термоядерные реакции, протекающие в центре звезд
 - e) аннигиляция частиц
20. Основателем науки гелиобиологии является:
- a) А.Л.Чижевский
 - b) В.И.Вернадский
 - c) К.Э.Циолковский
 - d) А.И.Опарин
 - e) М.Миланкович

21. Хлорфторуглероды вызывают:
- a) деградацию растительности
 - b) процессы опустынивания
 - c) истощение озонового слоя
 - d) тепличный эффект
 - e) фотохимический смог
22. Укажите компоненты, вызывающие тепличный эффект:
- a) кислород, углерод
 - b) азот, углерод
 - c) оксид углерода, метана, оксид азота
 - d) аэрозоли, пыль
 - e) сажа
23. Реакции организмов на чередование и продолжительность светлых и темных периодов суток называются:
- a) фотопериодизм
 - b) покой
 - c) сезонная периодичность
 - d) биологические ритмы
 - e) циркадные ритмы
24. Если собрать весь озон атмосферы в единый слой при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 200°C, то его толщина составила бы:
- a) 1—2 м
 - b) 5 см
 - c) 2,5—3 мм
 - d) 2,5—3 см
 - e) 20—30 см
25. Кто был основателем и президентом Международной организации «Римский клуб»?
- a) Дж.Форрестер
 - b) Д.Межоуз
 - c) А.Печчени
 - d) Т. Шарден
 - e) Б. Коммонер

26. Какой из законов (правил) отражает нарушение равновесия при изменении энергетики природной системы?
- a) закон Либиха
 - b) закон Шелфорда
 - c) закон Линдемана (10%)
 - d) закон (правило) 1%
 - e) закон (правило) Алена
27. Коротковолновое электромагнитное излучение называют:
- a) α -излучение
 - b) β -излучение
 - c) γ -излучение
 - d) спонтанное деления тяжелых ядер
 - e) кластерный распад
28. В каком году прошел Всемирный форум в Рио-де-Жанейро, на котором была принята «Повестка дня на XX век»?
- a) 1992
 - b) 1993
 - c) 1968
 - d) 1972
 - e) 2000
29. В каком году прошла в Стокгольме Первая международная конференция по окружающей среде?
- a) 1968
 - b) 1970
 - c) 1984
 - d) 1972
30. Кем из современных ученых введено понятие «экологический императив»?
- a) Н.Моисеев
 - b) Н.Реймерс
 - c) С.Шварц
 - d) М.Будыко
 - e) Ю.Одум

ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

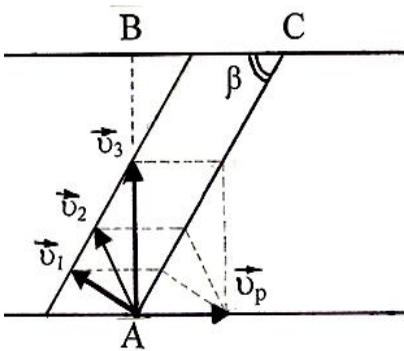


Рис. 1

Δ1. Решение. Сделаем рисунок согласно условию задачи. Пусть мальчик находится в точке А. Он хочет переплыть реку, чтобы его снесло по течению реки на 30 м — на рисунке точка С. При этом он должен плыть с наименьшей скоростью v_{min} . Обычно учащийся говорит, что достаточно взять курс перпендикулярно берегу, т.е. плыть в направлении АВ.

Но из рисунка видно, что при этом скорость мальчика v_3 отнюдь не является минимальной:

$$v_3 = v_p \cdot \operatorname{tg} \beta = 2 \frac{AB}{BC} = 3,47 \text{ м/с.}$$

В этой формуле v_p — скорость течения реки, β — угол между вектором результирующей скорости и скорости течения реки.

Если же плыть в направлении, перпендикулярном линии АС, то скорость пловца (мы ее обозначили v_1), будет являться минимальной (среди всех возможных направлений). Из чертежа видно:

$$v_1 = v_{min} = v_p \cdot \sin \beta,$$

$$\text{где } \sin \beta = \frac{AB}{AC} = \frac{AB}{\sqrt{AB^2 + BC^2}} = \frac{52}{\sqrt{52^2 + 30^2}} = \frac{52}{60} = 0,866.$$

Подставляя найденное значение $\sin \beta$, получим: $v_1 = 2 \cdot 0,866 = 1,732 \text{ м/с.}$

Δ2. Решение. В иллюстрациях к знаменитой книге Дж.Свифта «Путешествия Гулливера» есть примечательный рисунок, на котором Гулливер изображен стоящим на ладони великана, причем великан оказывается такой же стройный, как и маленький Гулливер. Но как показал Галилей, с точки зрения законов механики такая ситуация невозможна. Например, при увеличении размеров

тела в 4 раза ($x = 4$) объем его, а, следовательно, и масса возрастают в $x^3 = 64$ раза. Нагрузка на кости ног также увеличится в 64 раза. И если прочность костей остается прежней, то их поперечные размеры (площадь сечения) должны возрасти не в 16, как того требует простая геометрическая пропорция, а в 64 раза. Но это и означает нарушение пропорций: такой «человекоподобный» великан должен выглядеть чрезвычайно толстым и неповоротливым, а следовательно, подобный вид «человека разумного» обречен на вымирание. Когда-то на Земле обитали исполинские пресмыкающиеся — динозавры, но они оказались нежизнеспособными и в конечном счете погибли.

Аналогичные рассуждения справедливы и для растительного мира. Чрезмерно высокие деревья не в состоянии выдержать собственной тяжести, поэтому и плоды на них не могут быть произвольно крупными.

Для численного анализа в нашей задаче сделаем чертеж (рис. 2 а). Под воздействием веса плода в черешке возникает деформация. В любом сечении деформированного черешка действуют силы упругости, препятствующие разрыву его на части. Разрыв наступает после того, как механическое напряжение в черешке достигает максимального значения σ_{np} , называемого пределом прочности. Таким образом, максимальная сила упругости в черешке будет равна: $F_1 = \sigma_{np} S = \sigma_{np} \pi r^2$.

Сила тяжести плода (вес):

$$F_2 = mg = \rho \frac{4\pi}{3} R^3 g.$$

Приравнивая эти две силы, получим:

$$\sigma_{np} \pi r^2 = \rho 4\pi R^3 g / 3,$$

$$\frac{mv^2}{R} = N - mg \cos \beta .$$

$$mgH = \frac{mv^2}{2} + mgh,$$

где $\cos \beta = x / R = (R - h) / R$, $h = R(1 - \cos \beta)$, откуда:

$$r = 2R \sqrt{\frac{g \rho R}{3 \sigma_{np}}}.$$

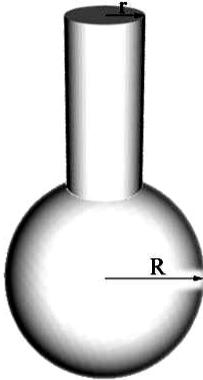


Рис. 2 а

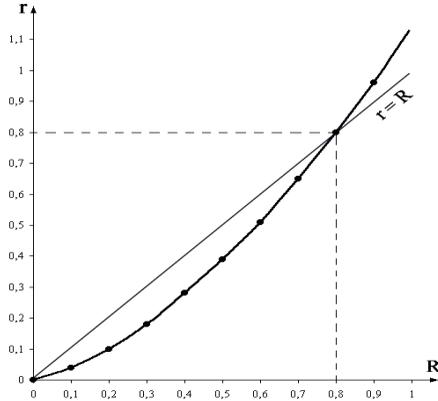


Рис. 2 б

График зависимости r от R показан на рис. 2 б. Из графика видно, что равенство радиусов r (черешка) и R (плода) наступает при размерах плода $R = 0,8$ м, а далее радиус черешка уже превосходит радиус плода.

Δ3. Решение. Напряженность — это силовая характеристика гравитационного поля. Если на пробное тело (малых размеров) массой m действует со стороны гравитационного поля Земли сила тяготения $\vec{F} = m \vec{g}$, то напряженность гравитационного поля определится формулой

$$\vec{g} = \vec{F} / m, \quad (1)$$

т.е. напряженностью гравитационного поля является ускорение свободного падения. Для точечной массы M на основании закона всемирного тяготения из (1) получим формулу:

$$g(r) = \frac{GM}{r^2}, \quad (2)$$

т.е. напряженность гравитационного поля вне земного шара убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от центра Земли до пробного тела.

На поверхности Земли будем иметь:

$$g(r) = \frac{GM}{r^2} = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,977 \cdot 10^{24}}{(6,37 \cdot 10^3)^2} = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

А есть ли гравитационное поле внутри Земли? Конечно, есть (некоторые учащиеся утверждают, что оно равно нулю, другие, что оно остается равным $9,81 \text{ м/с}^2$).

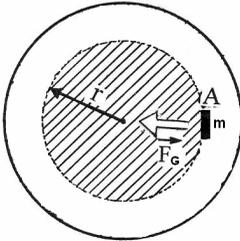


Рис. 3 а

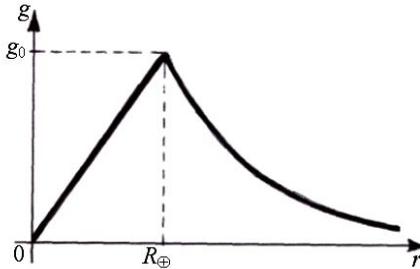


Рис. 3 б

Чтобы найти ускорение свободного падения $g(r)$ внутри Земли, воспользуемся формулой (1). Здесь надо учесть, что на тело массы m , помещенное (мысленно) внутри Земли (см. рис 3 а) будет оказывать воздействие только та часть Земли, которая является внутренней по отношению к массе m , а внешняя часть Земли (мы ее не заштриховали) гравитационного воздействия на массу m не оказывает. Отсюда следует, что если бы у нас была полая сфера, в которой масса M распределена только по поверхности, в такой сфере гравитационное поле отсутствовало бы в любой точке внутри сферы.

Итак, согласно закону всемирного тяготения:

$$F_G = \frac{GM(r) \cdot m}{r^2}, \quad (3)$$

где $M(r)$ — часть массы Земли, заключенная внутри шара радиуса r . Считая Землю однородным телом и зная среднюю плотность ρ вещества, найдем массу $M(r)$:

$$M(r) = \rho \cdot V = \rho \cdot (4\pi r^3) / 3. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), получим

$$F_G = \frac{G\rho 4\pi r^3 \cdot m}{3r^2} = \frac{G\rho 4\pi r \cdot m}{3} = mg. \quad (5)$$

$$\text{Следовательно, } g(r) = \frac{G\rho 4\pi}{3} r. \quad (6)$$

Мы получили линейную зависимость величины g от r . В центре Земли ($r = 0$) $g = 0$. На поверхности Земли ($r = R$)

$$g(R_{\oplus}) = \frac{G\rho 4\pi}{3} R_{\oplus} = \frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} = g_0 = 9,81 \text{ м/с}^2.$$

Отразим полученные результаты на графике (см. рис. 3 б).

Таким образом, напряженность гравитационного поля однородного тела (шара), внутри него изменяется линейно, а вне шара падает в соответствии с законом всемирного тяготения.

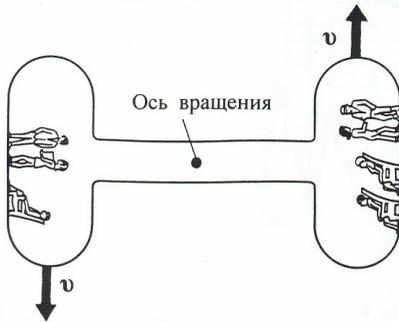


Рис. 4. Во вращающемся космическом корабле для пассажиров создается искусственная тяжесть. Их кажущийся вес такой же, как и на Земле

Δ4. Решение. Кажущийся вес — это сила, с которой пассажир давит на кресло. В соответствии с третьим законом Ньютона она совпадает по величине с центростремительной силой $F_{ц}$, но противоположна ей по направлению. Следовательно, кажущийся вес пассажира в космическом корабле (по условию задачи равный mg , т.е. нормальный вес) должен равняться $F_{ц}$: $mg = F_{ц}$. Центростремительная сила на основании второго закона Ньютона равна $F_{ц} = ma_n = \frac{mv^2}{R}$, где v — линейная скорость космонавтов, находящихся на корабле (см. рис. 4); $R = \frac{l}{2}$ — радиус вращения отсеков корабля. Линейная скорость v связана с числом оборотов соотношением: $v = \omega R = 2\pi nR$.

Таким образом, получаем $mg = m \cdot 4\pi^2 n^2 R$, откуда

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9,81}{10}} = 0,16 \text{ об/с.}$$

Таким образом, пассажиры космического корабля, вращающегося с частотой 9,5 об/мин, находясь на расстоянии 10 м от оси вращения, будут чувствовать себя, как на Земле.

5. Ответ: $T = 1 \text{ ч } 24,5 \text{ мин.}$

6. Ответ: $T_2 = T_1 \sqrt{(r_2/r_1)^3} = 164,3 \text{ лет.}$

8. Ответ: $T = 0,76 \text{ года} = 278 \text{ дней.}$

Δ9. Решение. На тело внутри туннеля действует только сила тяготения, равная mg . Нам надо знать, чему равно g внутри земного шара (как правило, студенты дают на поставленный вопрос неправильный ответ — $9,81 \text{ м/с}^2$). На основании теоремы Гаусса в произвольной точке внутри шара поле определяется только той частью вещества, которая охвачена сферой радиуса r (рис. 9). Отсюда



Рис. 9

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2} = \frac{G\rho 4\pi r^3}{3r^2} = \frac{4\pi G\rho}{3} r. \quad (1)$$

Итак, внутри однородного шара ускорение свободного падения зависит линейно от расстояния, в центре шара ($r = 0$) $g = 0$. За шаром (внешнее поле)

$$g(r) = \frac{GM_{\oplus}}{r^2} \quad (R_{\oplus} \leq r < \infty).$$

Теперь, применяя второй закон Ньютона для тела внутри туннеля, запишем:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = -m \frac{4\pi G\rho}{3} r \quad (2)$$

$$\text{или } \frac{d^2 r}{dt^2} + \frac{4\pi G\rho}{3} r = 0. \quad (3)$$

Отрицательный знак в правой части уравнения (2) появляется из-за того, что действие силы F_G противоположно направлению движения. Мы пришли к стандартной форме дифференциального уравнения, описывающего гармонические колебания:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} + \omega_0^2 r = 0, \text{ где } \omega_0^2 = \frac{4\pi G\rho}{3}.$$

Отсюда:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{4\pi G \rho}{3}}; T = 2\pi \sqrt{\frac{3}{4\pi G \rho}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_{\oplus}^3}{GM_{\oplus}}}; \Delta t = \frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{3}{4\pi G \rho}}.$$

Подставляя числовые данные, получим: $T = 84,46$ мин, $\Delta t = 42,23$ мин.

Таким образом, тело, стартовав в точке А (с нулевой скоростью), достигает противоположной стороны Земли (точка В) за время Δt .

Закон гармонических колебаний можно записать в форме: $r(t) = R_{\oplus} \cos \omega_0 t$. Скорость тела определяется формулой:

$$v = dr/dt = -R_{\oplus} \omega_0 \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

Максимальная скорость тела будет в момент прохождения телом центра Земли (положение равновесия, $t = T/4$). Из формулы (4):

$$v_{\max} = R_{\oplus} \omega_0 = R_{\oplus} \sqrt{\frac{4\pi G \rho}{3}} = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}} = 7,9 \text{ км/с.}$$

Интересно решить и такую задачу: если одновременно в точке А стартует (запускается) искусственный спутник на околоземной орбите, то встретятся ли два тела на противоположной стороне (точка В)? Иными словами, чему равен период движения в этом случае?

Сила тяготения теперь играет роль центростремительной силы, сообщая спутнику центростремительное ускорение. На основании второго закона Ньютона запишем: $ma_{ц} = m \frac{v^2}{R_{\oplus}} = \frac{GmM_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$,

откуда $v = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{R_{\oplus}}}$ — это формула для первой космической скорости.

Зная скорость v , можно найти период обращения на околоземной орбите $T = \frac{2\pi R_{\oplus}}{v} = 2\pi \sqrt{\frac{R_{\oplus}^3}{GM_{\oplus}}}$. Таким образом, формулы

для периода T совпадают как при движении вдоль туннеля, прорытого по диаметру, так и при движении на околоземной орбите. Участники нашего эксперимента, стартовав одновременно в точке А, всякий раз будут встречаться в этой точке через время, равное T (в точке В они будут встречаться через время $T/2$).

11. Ответ: $\frac{V_1}{V_2} = 0,05 = 5\%$.

12. Ответ: 52%.

Δ13. Решение. Внутреннюю энергию шаровой молнии вычислим по формуле

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT. \quad (1)$$

где i — число степеней свободы молекул газа, в нашем случае $i = 6$. С другой стороны, на основании уравнения Клапейрона—Менделеева:

$PV = \frac{m}{M} RT$, формулу (1) можно записать:

$$U = \frac{i}{2} PV = 3PV, \quad (2)$$

где P — давление внутри молнии, но оно равно давлению окружающего воздуха $P_0 = 1$ атм.

Таким образом,

$$U = 3 \cdot P_0 \cdot \frac{4\pi}{3} r^3. \quad (3)$$

Подставляя числовые данные, вычислим результат:

$$U = 1 \cdot 10^5 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot (0,2)^3 = 0,1 \cdot 10^5 \text{ Дж} = 10 \text{ кДж}.$$

14. Решение. Массу нефти можно определить, зная плотность, по формуле: $m = \rho V$, (1) где ρ — плотность нефти; V — объем, занимаемый пленкой нефти, этот объем определим по формуле: $V = S h$ (2), где $h = 20$ d — толщина пленки; $S = (2/3) 4\pi R_\oplus^2$ — площадь пленки. Подставляя (2) в (1), получим: $m = \rho 20 d (2/3) 4\pi R_\oplus^2$. (3) Подставляя числовые данные в (3), получим результат: $M = 25,76$ Мт.

Δ16. Решение. В спокойный период вода находится при давлении $P = P_0 + \rho g H = (1 + 9) \cdot 10^5 = 10^6$ Па. При таком давлении температура кипения согласно графику (см. рис. 16 б) $t_{\text{кип}} = 180^\circ\text{C}$ (453 К). При достижении этой температуры начинается бурное кипение (извержение). «Активный» период заканчивается, когда за счет расхода тепла на испарение температура воды падает до точки кипения при нормальном давлении, т.е. $t_2 = 100^\circ\text{C}$ (373 К).

Таким образом, $\Delta t = \Delta T = 80$. На основании уравнения теплового баланса $c \cdot m \cdot \Delta T = r \cdot \Delta m$ (1) можно найти часть воды, теряемой из резервуара гейзера во время одного извержения:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{c \cdot \Delta T}{r}.$$

Подставляя числовые данные, вычислим результат:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{4,2 \cdot 10^3 \cdot 80}{2,3 \cdot 10^6} = 0,146.$$

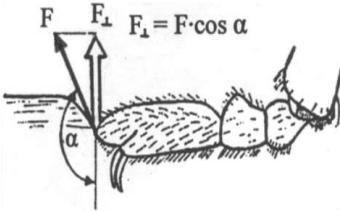


Рис. 17

Δ17. Решение. У водомерки количество лапок $N = 6$. На рисунке указаны силы поверхностного натяжения, действующие на одну из лапок. Тогда при условии равновесия (водомерка не тонет) сила тяжести mg , действующая на водомерку, уравнивается равнодействующей сил поверхностного натяжения всех шести лапок:

$$mg = NF_{\perp},$$

где $F_{\perp} = \sigma \cos \alpha$ — вертикальная составляющая силы поверхностного натяжения одной лапки. Таким образом,

$$m = \frac{N \sigma \ell \cos \alpha}{g}.$$

Из справочных таблиц находим, что коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 73$ мН/м. Подставляя числовые данные, получим:

$$m = \frac{6 \cdot 73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,18 \cdot 10^{-3} \sqrt{3}}{9,81 \cdot 2} = 6,95 \cdot 10^{-6} \text{ кг}.$$

Можно убедиться, что для массы m из расчетной формулы единица измерения получается килограмм:

$$[m] = \frac{H \cdot m}{\frac{m \cdot m}{c^2}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot c^2}{\text{м} \cdot c^2} = \text{кг}.$$

18. Ответ: $\Delta \rho = 33,9 \text{ г/м}^3$.

Δ20. Решение. Жидкость в капилляре поднимается на такую высоту, при которой сила тяжести mg , действующая на весь поднятый столб жидкости, уравнивает силу поверхностного натяжения жидкости:

$$\sigma 2\pi r = mg, \quad (1)$$

$$m = \rho V = \rho \pi r^2 h, \quad (2)$$

где m — масса столба жидкости высотой h .

Подставляя (2) в (1), можно получить формулу для h и вычислить ее числовое значение:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} = \frac{2 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 14 \cdot 10^{-6}} = 1,063 \text{ м.}$$

Таким образом, высота подъема жидкости в капиллярах растений обычно не превышает одного—двух метров. С другой стороны, пленки капилляров растительного и животного происхождения представляют собой обычно полупроницаемые перегородки (мембраны). В таком растительном капилляре молекулы растворителя (воды) могут проникать через перегородку, а молекулы растворенного вещества — нет. Явление проникновения растворителя через полупроницаемую перегородку называется *осмосом*. Разность давлений, которая возникает между областями, занятыми чистым растворителем и раствором, разделенным полупроницаемой перегородкой, называется *осмотическим давлением*. Можно считать, что для достаточно разбавленных растворов осмотическое давление равно давлению разреженного газа, состоящего из молекул растворенного вещества, оно рассчитывается по формуле для идеальных газов:

$$P = (m / M)RT / V. \quad (3)$$

Однако для ответа на поставленный в задаче вопрос применение формулы (3) нам не понадобится. Будем исходить из того, что на любой высоте разность давления Δp численно равна весу столба жидкости высотой Δh , отнесенному к единице площади:

$$\Delta p = \rho g \Delta h.$$

Взяв $\Delta h = 100$ м, получим:

$$\Delta p = 1 \cdot 10^3 \cdot 9,81 \cdot 100 = 9,81 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Таким образом, для поднятия жидкости и минеральных веществ в секвойе на 100 метров осмотическое давление должно составить около 10 атмосфер.

Δ21. Решение. Скорость распространения звука в газах определяется формулой:

$$v_{зв} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}, \quad (1)$$

где $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ — показатель адиабаты, C_p — теплоемкость газа при постоянном давлении, C_v — теплоемкость газа при постоянном объеме, R — универсальная газовая постоянная, T — постоянная температура.

Температура на высотах 21 км и 19 км не будет сильно отличаться, а найденная из (1) средняя температура и будет характеризовать температуру на высоте 20 км. Будем полагать, что взрывы происходят практически одновременно.

Найдем время, необходимое звуку, чтобы преодолеть путь $h_1 = 21 \text{ км}$: $t_1 = h_1 / v_{зв}$ и $h_2 = 19 \text{ км}$: $t_2 = h_2 / v_{зв}$. Отсюда

$$\Delta t = \Delta h / v_{зв}, \quad (2)$$

где $\Delta t = t_1 - t_2$, $\Delta h = h_1 - h_2$. Из формулы (2) выразим скорость звука:

$$v_{зв} = \Delta p / \Delta t. \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (3) найдем температуру T :

$$T = \frac{M \cdot \Delta h^2}{\gamma \cdot R \cdot \Delta t^2}. \quad (4)$$

Показатель адиабаты для идеального газа определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i} = \frac{5+2}{5} = \frac{7}{5},$$

где i — число степеней свободы молекул газа, для двухатомных молекул $i = 5$.

Подставляя числовые данные в формулу (4), получим

$$T = \frac{29 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 10^3)^2 \cdot 5}{7 \cdot 8,31 \cdot (6,75)^2} = 219 \text{ K} \text{ или } t = -54^\circ \text{ C}.$$

22. Решение. Для плавления льда затрачивается энергия, равная скрытой теплоте плавления (или теплоте фазового перехода): $Q = \lambda m$ (1), где λ — удельная теплота плавления, m — масса вещества. Изменение энтропии при фазовых переходах определяется

формулой: $\Delta S = Q / T$ (2), где T — температура фазового перехода. Таким образом, на основании (1) получаем: $\Delta S = \lambda m / T$ (3). Из таблиц находим $\lambda = 333 \text{ кДж/кг}$, температура $T = t + 273$. Подставляя числовые данные в (3), получим

$$\Delta S = \frac{333 \cdot 10^3 \cdot 0,5}{273} = 610 \text{ Дж/К}.$$

23. Ответ: $E = 32,4 \text{ кН/Кл}$.

24. Решение. Обозначим число электроцитов в столбе через n , а число параллельных столбов — через m . При этом произведение $n \cdot m = N$ дает нам полное число электроцитов в электрической батарее. Сила тока, создаваемого электрическим органом текущего через воду, по закону Ома для полной цепи будет определяться формулой

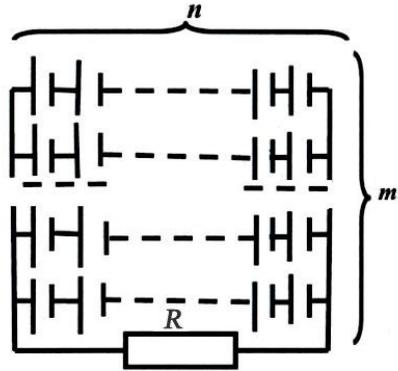


Рис. 24

$$I = \frac{E_{\delta}}{R + r_{\delta}}, \quad (1)$$

где ЭДС батареи $E_{\delta} = n \cdot E_2$, (2)

а полное внутреннее сопротивление батареи $r_{\delta} = \frac{n^2 r_1}{N}$, (3)

при этом E_1 и r_1 — ЭДС и внутреннее сопротивление одного электроцита (миниатюрного гальванического элемента).

Подставляя (2) и (3) в (1), получим формулу для тока

$$I_{(n)} = \frac{G_1 \cdot N \cdot n}{R \cdot N + r_1 \cdot n}. \quad (4)$$

Теперь, чтобы ответить на вопрос о том, при каком n сила тока в цепи будет максимальной, надо воспользоваться алгоритмом анализа функции на максимум: продифференцировать формулу (4) по аргументу n и приравнять производную нулю:

$$dI / dn = 0. \quad (5)$$

В результате получим: $n^2 = R \cdot N / r_1$. (6)

Подставляя (6) в (3), получим: $r_{\delta} = R$.

Таким образом, если $n = \sqrt{R \cdot N / r_1}$, то сопротивление батареи оказывается равным внешнему, а разрядный ток будет максимальным: $I_{\max} = E_0 / 2R = E_0 / 2 r_0$. (7)

Этот ток соответствует максимальной полезной мощности в цепи.

25. Ответ: $C = 22 \cdot 10^{-20}$ Ф; $q = 1,77 \cdot 10^{-20}$ Кл.

26. Решение. Энергия заряженного конденсатора определяется формулой

$$W_{\text{эл}} = \frac{1}{2} CU^2, \quad (1)$$

где $C = E_0 S / d$ — емкость конденсатора, S — площадь пластин (туч), d — расстояние между пластинами (тучей и Земли).

Подставляя числовые данные в формулу (1), получим:

$$W_{\text{эл}} = \frac{1}{2} \frac{E_0 S U^2}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4^2 \cdot (10^3)^2 \cdot 10^{18}}{2 \cdot 1 \cdot 10^3} = 70,8 \cdot 10^9 \text{ Дж} = 70,8 \text{ ГДж}$$

27. Ответ: $I = \frac{8 \cdot 10^{22}}{3,14 \cdot 6,36^2 \cdot 10^{12}} = 628 \cdot 10^6 \text{ А} = 0,628 \text{ ГА}$.

28. Ответ: $\Delta t \approx 56 \text{ с}$.

29. Ответ: 60 дБ.

230. Решение. Длина волн цунами обычно составляет десятки и даже сотни километров, во много раз превышая глубину океана. Поэтому для волн цунами все моря и океаны являются мелкой водой. При таких волнах в движение приходит вся вода под волной вплоть до океанского дна, скорость распространения волн цунами приближается к скорости воздушного лайнера. Полагая среднюю глубину океана $H_0 = 5$ км, оценим эту скорость.

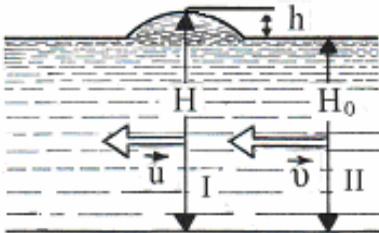


Рис. 30

При распространении цунами вода приводится в движение и приобретает импульс у переднего фронта волны и затем теряет этот импульс, когда ее обгоняет задний фронт волны. На рис. 30 показаны сечения I (проходящее через гребень) и II (проходящее в невозмущенной воде). Если производить расчеты в

системе координат, движущейся со скоростью \vec{v} волны, то невозмущенная вода перед и за цунами движется со скоростью $-\vec{v}$.

Из условия несжимаемости воды следует, что через сечения I и II проходят одинаковые объемы воды:

$$H \cdot u \cdot \Delta t = H_0 \cdot v \cdot \Delta t, \text{ откуда } u = v \cdot H_0 / H. \quad (1)$$

Приравнявая изменение импульса воды $\Delta m(v - u)$ импульсу внешних сил $(F_1 - F_2) \cdot \Delta t$, действующих на границах слоя I—II, и учитывая, что $H = H_0 + h \sim H_0$ (высота волны мала по сравнению с глубиной океана), можно получить соотношение

$$v^2 = g H \sim g H_0, \quad (2)$$

откуда $v = \sqrt{g H_0} = \sqrt{10 \cdot 5000} = 224 \text{ м/с} = 804 \text{ км/ч}$.

Зная расстояние от очага зарождения волны цунами до линии берега и скорость, можно найти время:

$$t_1 = s / v = 1700 / 804 = 2,1 \text{ ч.}$$

Найдем еще время, за которое цунами может оббежать земной шар:

$$t_2 = 2\pi R / v = 50 \text{ ч.}$$

431. Решение. Будем для простоты исходить из того, что барабанная перепонка совершает в воздухе свободные колебания, тогда она будет иметь ту же скорость простого гармонического движения, что и воздух. Отсюда средняя кинетическая энергия, передаваемая перепонке, равна

$$W_k = \frac{1}{2} m v_{cp}^2; \quad v_{cp}^2 = \omega^2 x_0^2 (\sin^2 \omega t)_{cp} = \frac{1}{2} \omega^2 x_0^2.$$

Таким образом, $W_k = \frac{m \omega^2 x_0^2}{4}$. Интенсивность звуковой волны

определяется формулой $I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 x_0^2$, $\omega^2 x_0^2 = \frac{2I}{\rho v}$.

Окончательно получаем:

$$W_k = \frac{m I}{2 \rho v} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 1,3 \cdot 330} = 1,165 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

А отношение $W_k / W_1 = 19$. Как видим, W_k ненамного превосходит предельно возможную энергию с точки зрения физических законов: биологическая эффективность человеческого уха близка к максимально возможной с точки зрения физики.

32. Ответ: $L_{крол} = -10 \text{ дБ}$.

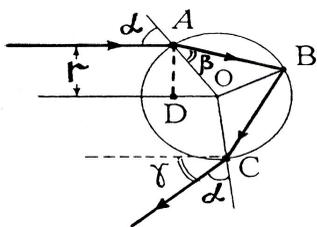


Рис. 34

334. Решение. На основании закона синусов получим: $\sin \alpha = n \sin \beta$. С другой стороны, из треугольника ADO: $\sin \alpha = r / R = \eta$. Таким образом, $\eta = n \sin \beta$. Далее можно установить соотношения между углами: $\gamma + 2\alpha = 4\beta$, откуда $\gamma = 4\beta - 2\alpha$. Угол $\beta = \arcsin(\eta/n)$, угол $\alpha = \arcsin \eta$.

Тогда $\gamma = 4\arcsin(\eta/n) - 2\arcsin \eta$.

Возьмем производную от γ по параметру η :

$$\frac{d\gamma}{d\eta} = \frac{4}{n\sqrt{1-(\eta/n)^2}} - \frac{2}{\sqrt{1-\eta^2}}.$$

Приравняв производную нулю $\frac{d\gamma}{d\eta} = 0$, получаем значение

параметра $\eta = \sqrt{\frac{4-n^2}{3}} = 0,861$ — именно при таком значении η угол γ будет максимальным:

$$\gamma_{\max} = 4\arcsin\left(\frac{1}{n}\sqrt{\frac{4-n^2}{3}}\right) - 2\arcsin\sqrt{\frac{4-n^2}{3}}.$$

При $n = \frac{4}{3}$ получим $\gamma_{\max} = 42^\circ 02'$.

335. Решение. Основным источником тепла, нагревающим земную поверхность и атмосферу, служит Солнце. Вся совокупность лучистой энергии Солнца называется *солнечной радиацией*. Распределение лучистой энергии связано с годичным и суточным движением Земли, а также зависит от многих других факторов и весьма неодинаково на земной поверхности. Поэтому мы будем пользоваться усредненными характеристиками. Солнечные лучи, проходя через прозрачные тела, нагревают их очень слабо, поэтому прямые солнечные лучи почти не нагревают воздух атмосферы, а нагревают поверхность Земли, от которой прилегающим слоям воздуха передается тепло. По этой причине мы будем учитывать нагревание земной суши и вод Мирового океана. Таким образом:

$$Q = c_1 \cdot m_1 \cdot \Delta T + c_2 \cdot m_2 \cdot \Delta T, \quad (1)$$

где c_1 — удельная теплоемкость воды, m_1 — масса воды Мирового океана, c_2 — удельная теплоемкость материалов верхней части земной коры (песок, глина, известняки, базальты, граниты), m_2 — масса земной суши.

Из приведенной оценочной формулы можно найти ΔT :

$$\Delta T = \frac{Q}{c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2}. \quad (2)$$

Массу воды Мирового океана и массу прогреваемой земной суши можно вычислить, зная соответствующие плотности и объемы. При этом объем суши можно взять равным 1/10 от объема Мирового океана:

$$m_1 = \rho_1 \cdot V_1 = 1 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 10^{17} = 1,4 \cdot 10^{21} \text{ кг};$$

$$m_2 = \rho_2 \cdot V_2 = 2 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \cdot 10^{17} = 0,28 \cdot 10^{21} \text{ кг}.$$

Подставляя числовые данные в формулу (2), найдем:

$$\Delta T = \frac{5,42 \cdot 10^{24}}{4,2 \cdot 10^3 \cdot 1,4 \cdot 10^{21} + 1,2 \cdot 10^3 \cdot 0,28 \cdot 10^{21}} = 0,87 \text{ К}.$$

Таким образом, если бы Земля не излучала солнечную энергию в пространство, то за 100 лет температура на Земле повысилась бы на 87°C и условия для развития жизни на Земле (по крайней мере, высших ее форм) стали бы невозможными. Однако больше половины солнечной энергии отражается Землей, а та часть, которая поглощается, в тепловую не превращается, а используется зелеными растениями для фотосинтеза, более 2/3 затрачивается на испарение влаги и генерацию турбулентных потоков в атмосфере и океане.

Д37. Решение. Число бактерий в верхнем слое морской воды толщиной H будет равно $N = nV = nSH$, где S — площадь выбранного участка ($S = 1 \text{ км}^2$). Энергия, излучаемая одной бактерией $w = \chi h\nu = \chi hc / \lambda$. Световая мощность $P = Nw = nSHhc / \lambda = 0,2 \text{ Дж}$.

Д38. Решение. Активность препарата зависит от времени и определяется формулой

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

В начальный момент времени $t=0$ $A_0 = |\lambda N_0|$, где $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$ — постоянная распада, N_0 — число ядер данного радиоизотопа

в начальный момент времени, оно определяется на основе формулы из молекулярной физики

$$\frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}, \text{ откуда } N = \frac{m}{M} N_A.$$

Согласно условию задачи, масса радиоактивного изотопа $m_2 = m_1 \frac{M_2 \cdot T_2}{M_1 \cdot T_1} (1 - e^{-\lambda_2 t}) = 10^{-7}$ г в человеческом организме составит:

$$m = 0,36 \cdot 10^{-2} \cdot 0,012 \cdot 10^{-2} \cdot M_1 \text{ где } M_1 = 75 \text{ кг.}$$

Таким образом, для активности A_0 имеем окончательное выражение

$$A_0 = \frac{\ln 2 \cdot m \cdot N_A}{T \cdot M} = \frac{0,693 \cdot 0,36 \cdot 0,012 \cdot 10^{-4} \cdot 75 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{1,42 \cdot 10^8 \cdot 3,154 \cdot 10^7 \cdot 40 \cdot 10^{-3}} = 75,5 \cdot 10^3 \text{ Бк.}$$

Д39. Ответ: $t = T \ln(5/3) / 0,693 = 4250$ лет.

Д40. Решение. С течением времени активность радиоизотопа падает по закону

$$A_{(t)} = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где $A_0 = \lambda N_0$ — активность радиоизотопа в начальный момент времени $t = 0$. Согласно условию задачи,

$$A_0 = \lambda N_0 = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{расп}}{\text{с}} = 2 \cdot 10^3 \text{ Бк.}$$

По истечении времени $t = 5$ часов активность будет равна:

$$A_2 = V \cdot A_1 = A_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где $A_1 = 16 \frac{\text{расп}}{\text{мин} \cdot \text{см}^3} = \frac{16}{60} \frac{\text{Бк}}{\text{см}^3}$. Из формулы (2) получим:

$$V = \frac{A_0}{A_1} e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) численные значения, получим:

$$V = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot 60}{16} \cdot \exp\left(-\frac{0,693 \cdot 5}{15}\right) = 6 \cdot 10^3 \text{ см}^3 = 6 \text{ л.}$$

41. Ответ: $\lambda = 1,14$ мкм.

42. Ответ: нельзя.

Δ45. Решение. При решении подобных задач учащиеся часто допускают ошибку, сравнивая концентрации вредных веществ с соответствующими нормами ПДК. Действительно, сопоставим ПДК и содержание вредных веществ в нашей задаче:

содержание вредного вещества	ПДК
0,04 мг/л — свинец	0,05 мг/л
0,6 мг/л — медь	1 мг/л
4,5 мг/л — цинк	5 мг/л

Как видим, содержание ни одного из вредных веществ не превышает соответствующей нормы ПДК. Следовательно, делается неверный вывод: «Молоко в пищу употреблять можно».

Дело в том, что различные химические загрязнители могут оказывать сходное неблагоприятное воздействие (обладают свойством синергизма). В таких случаях надо учитывать их суммарное содержание в продуктах. Если суммарное количество загрязнителей превышает ПДК любого из них, то это значит следующее: несмотря на то, что в отдельности каждый из них относительно безопасен, совместное их воздействие является опасным.

В нашем случае медь и цинк обладают свойством синергизма, суммарное содержание в молоке этих веществ равно: $0,6 + 4,5 = 5,1$ мг/л, что превышает ПДК для цинка. Следовательно, молоко употреблять в пищу нельзя.

46. Ответ: будет.

Δ47. Решение. Эквивалентной дозой поглощенного излучения — дозой биологической — называют величину, равную произведению поглощенной дозы на *коэффициент биологической эффективности (КОБЭ)*:

$$H = \text{КОБЭ} \cdot D,$$

где КОБЭ равен 1 для β -частиц, рентгеновского и γ -излучения, а для α -частиц он равен 20. Таким образом, эквивалентная доза облучения первого человека равна:

$$H_1 = 1 \cdot 0,08 = 0,08 \text{ зВ} = 8 \text{ бэр},$$

а второго — $H_2 = 20 \cdot 0,7 = 0,14 \text{ зВ} = 14 \text{ бэр}$.

Отношение $H_2 / H_1 = 14 / 8 = 1,75$, т.е. второй получает больше биологических повреждений.

48. Ответ: 2,5 раза.

449. Решение. Активность радионуклида

$$A = \lambda \cdot N_0 = \frac{\ln 2}{T} N_0, \quad (1)$$

где T — период полураспада, N_0 — число ядер в рассматриваемый момент времени (условно берем $t = 0$). Это число можно выразить по формуле

$$N_0 = \frac{m}{M} \cdot N_A, \quad (2)$$

где m — масса радона, M — его молярная масса, N_A — число Авогадро.

Из формул (1) и (2) получим: $m = \frac{A \cdot T \cdot M}{\ln 2 \cdot N_A},$ (3)

а из условия задачи $m = \frac{m_1}{V_1} V,$ (4)

где m_1 — масса радона в объеме $V_1 = 10^{-6} \text{ м}^3$.

Для объема V получаем выражение:

$$V = \frac{V_1 \cdot A \cdot T \cdot M}{\ln 2 \cdot m_1 \cdot N_A}. \quad (5)$$

Подставим данные в формулу (5) и вычислим результат:

$$V = \frac{10^{-6} \cdot 10^{-3} \cdot 3,7 \cdot 10^{10} \cdot 3,8 \cdot 2,4 \cdot 6,0 \cdot 6,0 \cdot 2,22 \cdot 10^{-3}}{0,693 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-15} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}} = 6,46 \text{ м}^3.$$

Ответ: 6,5 м³.

450. Решение. Время, в течение которого организм освобождается от половины накопленного в нем радионуклида за счет биологического выведения, называется *периодом биологического полувыведения* T_B .

На основании закона радиоактивного распада можно записать

$$N_{(t)} = N_{OB} \cdot 2^{-t/T}, \quad (1)$$

где T — это период полураспада радионуклида, N_{OB} — количество радионуклидов в начальный момент времени, эта величина является переменной, она может меняться в силу биологических

механизмов выведения радионуклидов. Согласно определению величины T_B , можно записать

$$N_{O6} = N_0 \cdot 2^{-t/T_6}. \quad (2)$$

Таким образом, имеем:

$$N_{(t)} = N_0 \cdot 2^{-t\left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_B}\right)}. \quad (3)$$

Можно также записать:

$N_{(t)} = N_0 \cdot 2^{-t/T_{\text{эф}}}$, откуда легко получить формулу

$$T_{\text{эф}} = \frac{T \cdot T_B}{T + T_B}. \quad (4)$$

Подставляя числовые данные в формулу (4) (согласно таблице 21 $T = 138,4$ сут.), получим:

$$T_{\text{эф}} = \frac{138,4 \cdot 50}{138,4 + 50} = 36,73 \text{ сут.}$$

Ответ: 36,73 сут.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

1. «Физика» человека (тепловые параметры)

Нормальная температура тела, °С	36,7
Температура отдельных участков тела, °С:	
лба	33,4
ладони рук.....	32,8
подошвы ног	30,2
Температура замерзания (плавления) крови, °С..... от –0,56 до –0,58	
Удельная теплоемкость крови, кДж/(кг·К).....	3,9
Удельная теплоемкость крови, кал/(г·°С)	0,93
Масса воды, испаряющаяся с поверхности кожи и легких в сутки, кг	0,8—2,0
Наиболее благоприятная для жизни человека относительная влажность, %.....	40—60
Поверхностное натяжение крови, мН/м.....	60

2. Капиллярность

В таблице приведены некоторые данные, характеризующие явление капиллярности: капиллярность также является абиотическим фактором.

1. Высота подъема воды в зависимости от размеров частиц, образующих капилляры в почве:

Диаметр частиц, мм	Высота капиллярного подъема воды, см	Диаметр частиц, мм	Высота капиллярного подъема воды, см
3—4	3—4	0,2	45
0,5	24,4	0,06—0,08	91

Капиллярная вода с растворенными в ней солями является главным источником снабжения растений влагой. В зависимости от размеров частиц, образующих капилляры в почве, высота капиллярного подъема воды в почве колеблется от нескольких сантиметров до нескольких метров. Глинистые и суглинистые почвы имеют более узкие капиллярные промежутки, песчаные и супесчаные — более широкие.

2. Высоту подъема (опускания) жидкости в стеклянном капилляре можно определить по формуле $h = A/d$, где d — диаметр капилляра, мм, A — постоянная данной жидкости, мм². Числовые значения постоянной A для стеклянных капилляров приведены в таблице:

Жидкость	вода	спирт	ртуть
A , мм ²	30	10	10

3. Скорость поднятия воды по капиллярам стебля банана — 100 см/ч. Скорость поднятия воды по капиллярам стебля подсолнечника — 70 см/ч.

3. ПДК веществ, загрязняющих воду

Неорганические вещества	ПДК, г/м ³
Сульфаты, хлориды, соли кальция и магния	20
Нитраты, фосфаты, фосфор	0,5—10
Железо, алюминий, марганец	0,2—0,5
Нитриты	0,1
Цинк, никель, висмут, свинец, вольфрам, хром, цианиды	0,01—0,1
Ртуть, мышьяк, медь, селен	0,01
Органические вещества	ПДК, г/м ³
Органический азот, органический углерод	1,0
Этилен, метанол, ацетон, нитрит и др.	0,1—0,9
Нефть и нефтепродукты	0,05—0,09
Формальдегид, бутиловый спирт, ацетон	0,006—0,04
Пестициды, фенолы	0,005

4. Радиоактивные семейства ядер

Название	Исходное ядро	Массовое число	Начальное число n	Конечное число n	Период полураспада стабильного ядра (годы)	Конечное стабильное ядро
Ториевое	$^{232}_{90}Th$	4n	58	52	$1,4 \cdot 10^{10}$	$^{208}_{82}Pb$
Нептуниевое	$^{237}_{93}Np$	4n+1	59	52	$2,2 \cdot 10^6$	$^{209}_{83}Bi$
Уран-радиевое	$^{238}_{92}U$	4n+2	59	51	$4,5 \cdot 10^9$	$^{206}_{82}Pb$
Актиниевое	$^{235}_{92}U$	4n+3	58	51	$7,1 \cdot 10^8$	$^{207}_{82}Pb$

5. Соотношение фонового облучения с допустимыми и опасными уровнями облучения человека

100 мбэр	Фоновое облучение за год
500 мбэр	Допустимое облучение населения в нормальных условиях в год
3 бэр	Облучение при рентгенографии зубов
5 бэр	Допустимое облучение персонала в нормальных условиях в год
10 бэр	Допустимое аварийное облучение населения (разовое)
25 бэр	Допустимое аварийное облучение персонала (разовое)
30 бэр	Облучение при рентгеноскопии желудка (местное)
75 бэр	Кратковременные незначительные изменения состава крови
100 бэр	Нижний уровень развития легкой степени лучевой болезни
450 бэр	Тяжелая степень лучевой болезни (погибает 50% облученных)

6. Периоды полураспада радиоизотопов

Z	Изотоп	Тип распада	Период полураспада
6	Углерод C ¹⁴		5770 лет
12	Магний Mg ²⁷	β	10 мин
19	Калий K ⁴⁰	β	$1,25 \cdot 10^9$ лет
27	Кобальт Co ⁶⁰	β	5,2 года
37	Рубидий Rb ⁸⁷	β	$6,2 \cdot 10^{12}$ лет
38	Стронций Sr ⁹⁰	β	28 лет
53	Йод I ¹³¹	β	8 дней
55	Цезий Cs ¹³⁷	β	30 лет
58	Церий Ce ¹⁴²	α	$5 \cdot 10^{15}$ лет
62	Самарий Sm ¹⁴⁷	α	$12 \cdot 10^{10}$ лет
84	Полоний Po ²¹⁰	α	138 дней
86	Радон Rn ²²²	α	3,8 дня
88	Радий Ra ²²⁶	α	1620 лет
90	Торий Th	α	$13,9 \cdot 10^9$ лет
92	Уран U ²³⁸	α	$4,5 \cdot 10^9$ лет
92	Уран U ²³⁵	α	$7,1 \cdot 10^8$ лет
93	Нептуний Np ²³⁷	α	$2,2 \cdot 10^6$ лет

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Нижевартовский государственный гуманитарный университет»

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой
дополнительного образования
_____ Н.Д.Наумов

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по
дополнительному образованию
_____ В.Коричко

ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КОМПЕТЕНТНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ

Образовательная программа курсов повышения квалификации
(интегративный курс)

АВТОР: к.п.н.,
доцент кафедры математики и МПМ,
Борискин А.Ф.

Нижевартовск
2009

Учебный план

Цель: повышение квалификации учителей экологии и физики.

Категория слушателей: учителя первой и высшей категорий.

Срок обучения (час, неделя, месяц): 72 часа, 2 недели.

Режим занятий (час, день): 6 часов в день.

Модули: Теоретико-методологический — 52;

Технологический — 20.

№ п/п	Наименование разделов и дисциплин	Всего часов	В том числе		Формы контроля
			Лекц.	Практ.	
1.	Основы механики, экологические вопросы	14	10	4	Контрольная работа, тесты
2.	Основы МКТ. Термодинамические законы физических систем и открытых экосистем	14	10	4	Контрольная работа, тесты
3.	Экологические вопросы в разделе электромагнитных и световых явлений	12	10	2	Контрольная работа, тесты
4.	Экологические вопросы в курсе атомной и ядерной физики	19	12	7	Контрольная работа, тесты
5.	Физические основы экологического мониторинга	13	10	3	Тесты
	Итого:	72	52	20	

Учебно-тематический план

Направление: естественнонаучное.

Цель: повышение квалификации учителей физики и экологии.

Категория слушателей: учителя первой и высшей категории.

Место проведения: НГГУ.

Лекционных групп: 1.

Практических групп: 1.

Форма обучения: очная.

Режим работы: 6x12 дней = 72 ч.

№ п/п	Темы и содержание курса	Всего часов	В том числе		Формы контроля
			Лекц.	Практ.	
1	Основы механики				
1.1	Законы сохранения — фундаментальные законы природы.	8	6	2	Контрольная работа, тест
1.2	Математические модели устойчивости движения. Устойчивое развитие экосистем.	6	4	2	
2	Основы МКТ и термодинамики. Термодинамические законы физических систем и открытых экосистем.	14	10	4	Контрольная работа, тест
3	Экологические вопросы в разделе электромагнитных и световых явлений.				
3.1	Воздействие постоянных электрических и магнитных полей на живой организм и экосистемы.	4	4	—	Контрольная работа, тест
3.2	Электромагнитное излучение, его роль в развитии биосферы.	8	6	2	

4	Экологические вопросы в курсе атомной и ядерной физики.				
4.1	Естественная и искусственная радиоактивность. Изотопы. Деление ядер. Атомная энергетика: за и против.	6	4	2	Контрольная работа, тест
4.2	Управляемые термоядерные реакции. Традиционные и альтернативные виды энергии.	6	4	2	
4.3	Основные понятия радиэкологии. Искусственные источники радиации. Проблемы радиационной безопасности.	7	4	3	
5	Физические основы экологического мониторинга.				
5.1	Физические методы наблюдения за параметрами окружающей среды.	7	4	3	Контрольная работа, тест
5.2	Аэрокосмический мониторинг.	2	2	—	
5.3	Физические основы действия очистных сооружений, аппаратов и методов переработки вторичного сырья и отходов.	4	4	—	
	Итого:	72	52	20	

**Учебная программа
курса «Формирование экологической компетентности
учащихся при изучении школьного курса физики»
(интегративный курс)**

1. Введение

Содержание физики, как лидирующего предмета в естествознании, открывает широкие возможности в реализации непрерывного экологического образования. Главная задача экологизации курса физики, как нам представляется, состоит в том, чтобы сформировать у школьников основы единой научной картины мира, целостного представления о живой и неживой материи, что в свою очередь, будет способствовать их экологической компетентности. Курс предназначен для учителей физики и экологии средней школы, колледжей, лицеев и гимназий, ориентированных на естественнонаучное направление. Он поможет им вести факультативные курсы по данной теме с наиболее подготовленными учениками.

2. Содержание

1. Основы механики.

Взаимодействие тел. Силы в природе, законы динамики. Сила тяжести. Свободное падение тел; применение отстойников.

Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Космические полеты. Загрязнение окружающей среды (выброс газов, нагревание, шум). Проблемы загрязнения космоса.

Закон сохранения и превращения энергии. Перспективы развития возобновляемых источников энергии (гидроэнергетика, геотермоэнергетика, ветровая, приливная и волновая виды энергий)

Вращательное движение. Закон сохранения момента импульса.

Динамика равновесия (статика). Условия равновесия тел. Устойчивое, неустойчивое и безразличное равновесия.

Устойчивость движения. Вводные понятия. Устойчивость в аэро- и гидродинамике (ламинарное и турбулентное течения). Гироперическая устойчивость.

Математические модели устойчивости движения. Устойчивое развитие экосистем. Аттракторы и бифуркации.

2. Основы МКТ и термодинамики. Термодинамические законы открытых систем (экосистем).

Броуновское движение. Диффузия. Распространение загрязняющих веществ в атмосфере и гидросфере путем диффузии. Насыщенный и ненасыщенный пар. Влажность воздуха. Значение влажности и ее влияние на биологические системы. Свойства поверхности жидкости. Коэффициент поверхностного натяжения жидкости как экологический параметр (абиотический фактор).

Понятие внутренней энергии термодинамической системы. Первый закон термодинамики. Тепловой баланс Земли и влияние его на климат. Энергетические потоки в биосфере.

Температура как экологический фактор. Диапазон температур в природе, влияние температуры на биосферу.

Тепловые машины. Тепловые процессы и установки — источники загрязнения окружающей среды (выбросы отходов, перегрев окружающей среды).

Обратимые и необратимые процессы. Второй закон термодинамики. Энтропия — мера упорядоченности системы. Закон возрастания энтропии. Биологический объект как тепловая машина.

Принцип минимума диссипации (рассеивания) энергии и принцип максимизации энергии.

Устойчивость экосистем. Принцип ле Шателье-Брауна.

3. Экологические вопросы в разделе электромагнитных и световых явлений.

Электрическая активность живых организмов. Биопотенциалы. Примеры воздействия статического электричества.

Магнитное поле и живой организм. Биологическое действие постоянных магнитов.

Электрический ток в различных средах. Ионизация атмосферного воздуха, биологическое действие легких и тяжелых ионов. Экологически чистые преобразователи энергии: МГД-генераторы.

Электромагнитное излучение. Основные свойства электромагнитных волн. Шкала электромагнитных волн.

Экологически опасные факторы электромагнитных излучений.

4. Экологические вопросы в курсе атомной и ядерной физики.

Основы атомной физики. Ядерная модель атома. Излучение атомов. Лазеры. Рентгеновские лучи.

Радиоактивный распад. Естественная радиоактивность. Изотопы. Искусственная радиоактивность. Деление ядер. Ядерные реакторы. Атомная энергетика. Экологические проблемы.

Термоядерные реакции. Управляемые термоядерные реакции. Энергетика будущего.

Биологическое действие ионизирующих излучений. Основные понятия радиоэкологии. Активность радионуклида. Поглощенная доза облучения. Экспозиционная доза облучения. Эквивалентная доза облучения. Радиационный фон планеты. Искусственные источники радиации. Проблемы радиационной безопасности.

5. Физические основы экологического мониторинга.

Физические методы наблюдения за параметрами окружающей среды.

Аэрокосмический мониторинг.

Физические основы действия очистных сооружений, аппаратов и методов переработки вторичного сырья и отходов.

3. Методические рекомендации

Методологической основой реализации программы являются следующие принципы:

- принцип единства живой и неживой материи: окружающий человека мир составляет макросистему, в которой природа, общество, человек и его культура представляют интегрированную развивающуюся целостность;
- принцип единства обучения, воспитания и развития личности в процессе обучения;
- интегрированный характер экологии: экология является комплексной интегративной наукой, включающей естественнонаучные знания по биологии, физике, химии, географии и др.;
- интеграционный характер самой физики: фундаментальные законы физики являются основой естественнонаучных и технических наук.

Большое значение при изучении естественных наук имеет приобретение экспериментальных навыков. В этой связи в программу включены некоторые практические работы по определению ряда основных физических параметров природной среды, представляющих собой экологические абиотические факторы.

Предлагается также список вопросов и задач по физике экологического содержания.

Реализация программы может быть осуществлена как за счет базисного, так и регионального компонентов учебного плана — в тех школах, где имеются соответствующие условия. Исполнение ее рассчитано на два года (10 и 11 классы) количество часов может варьироваться.

4. Контрольные задания

Перечень практических работ

Практическая работа 1. Изучение абиотических факторов среды.

Практическая работа 2. Изучение круговорота и потоков энергии в экосистемах.

Практическая работа 3. Влияние теплового загрязнения на микроклимат города.

Практическая работа 4. Определение уровня шума на рабочем месте.

Практическая работа 5. Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.

Практическая работа 6. Антропогенные экологические катастрофы.

Практическая работа 7. Изучение радоновой безопасности в разных помещениях школы, в микрорайонах города.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев С.В. Экология: Учеб. пособие для 9, 10, 11 кл. средней шк. СПб., 1997.
2. Борискин А.Ф., Иванова Н.А. Радиационная экология: Лабораторный практикум, задачи. 2-е изд. Нижневартовск, 2007.
3. Борискин А.Ф., Иванова Н.А. Экология в школьном курсе физики. Нижневартовск, 1999.
4. Борискин А.Ф. Физика природных явлений и процессов: В 2 ч. Екатеринбург, 2001. Ч. 1; 2002. Ч. 2.
5. Борискин А.Ф. Физические основы экологии: Практикум для средней школы. Екатеринбург, 2002.
6. Вернадский В.И. Биосфера. М., 1975.
7. Зверев А.Т. Экология. Практикум, 10—11 кл. М., 2004.
8. Кабардин О.Ф. и др. Физика: Учеб. пособие для 10, 11 кл. / Под ред. А.А.Пинского. М., 1996; 1998.
9. Куклев Ю.И. Физическая экология. М., 2001.
10. Мамедов Н.М., Суравегина И.Т. Экология. Учебное пособие для школы. М., 1996.
11. Мизун Ю.Г. Космос и здоровье. М., 1997.
12. Миркин Б.М., Наумова Л.Г. Основы общей экологии. М., 2005.
13. Моисеев Н.Н. Человек и ноосфера. М., 1990.
14. Петросова Р.А. и др. Естествознание и основы экологии. М., 1996.
15. Практикум по экологии / Под ред. С.В.Алексеева. М., 1996.
16. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. М., 1994.
17. Реймерс Н.Ф. Экология (теории, законы, правила, принципы и гипотезы). М., 1994.
18. Рыженков А.П. Физика и экология. М., 1989.
19. Старков В.Д., Мигунов В.И. Радиационная экология. Тюмень, 2003.
20. Тарасов Л.В. Физика в природе. М., 1988.
21. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М., 1976.
22. Экология ХМАО / Под ред. В.В.Плотникова. Тюмень, 1997.
23. Яворский Б.М., Пинский А.А. Основы физики: В 2 т. М., 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ БАЗОВЫХ ЗНАНИЙ КУРСА	
ГЛАВА 1. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ	5
§ 1.1. Взаимодействие тел. Силы в природе, законы динамики	5
§ 1.2. Закон сохранения импульса. Реактивное движение. Космические полеты	14
§ 1.3. Закон сохранения и превращения энергии. Перспективы развития возобновляемых источников энергии	16
§ 1.4. Вращательное движение. Закон сохранения момента импульса	24
§ 1.5. Движение жидкости. Уравнение Бернулли	29
§ 1.6. Устойчивость механических систем. Математические модели устойчивости движения. Устойчивое развитие экосистем	33
ГЛАВА 2. ОСНОВЫ МКТ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАКОНЫ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОТКРЫТЫХ ЭКОСИСТЕМ	46
§ 2.1. Вещество. Строение и качество вещества	46
§ 2.2. Термодинамическая система. Первый закон термодинамики	50
§ 2.3. Тепловые машины и стрела времени. Второй принцип термодинамики	56
§ 2.4. Принцип Ле Шателье—Брауна и его современное нарушение в рамках биосферы	63
§ 2.5. Принцип минимума диссипации (рассеивания) энергии и принцип максимизации энергии и информации	65
§ 2.6. Реальные газы. Жидкости. Уравнение Ван-дер-Ваальса	66
§ 2.7. Температура и тепловые факторы загрязнения	76
ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ	79
§ 3.1. Электрическая активность живых организмов. Биопотенциалы	79
§ 3.2. Примеры воздействия статического электричества	86
§ 3.3. Магнитное поле и живой организм. Биологическое действие постоянных магнитных полей	87
§ 3.4. Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция	91

§ 3.5. Действие магнитного поля на живой организм	95
§ 3.6. Постоянный и переменный ток. Действие электрического тока на живой организм.....	97
§ 3.7. Электромагнитное излучение. Основные свойства электромагнитных волн	100
§ 3.8. Шкала электромагнитных волн.....	101
§ 3.9. Воздействие электромагнитных излучений на живой организм	104
ГЛАВА 4. МЕХАНИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ. АКУСТИКА. ДЕЙСТВИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ.....	
§ 4.1. Гармонические колебания. Превращение энергии при колебаниях	106
§ 4.2. Звук. Характеристики звука. Инфразвук. Ультразвук.....	111
§ 4.3. Волны на воде и в атмосфере.....	116
ГЛАВА 5. ОПТИКА. СВЕТОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ.....	
§ 5.1. Волновые свойства света	123
§ 5.2. Оптическая активность веществ	133
§ 5.3. Элементы теории относительности	135
§ 5.4. Основы квантовой оптики.....	137
§ 5.5. Фотохимическое действие света	143
§ 5.6. Экологически опасные световые факторы.....	144
ГЛАВА 6. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ В КУРСЕ АТОМНОЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ.....	
§ 6.1. Основы атомной физики. Постулаты Бора. Квантование энергии.....	149
§ 6.2. Лазеры	153
§ 6.3. Рентгеновское излучение	154
§ 6.4. Радиоактивный распад. Естественная радиоактивность. Изотопы	156
§ 6.5. Искусственная радиоактивность. Деление ядер	160
§ 6.6. Атомная энергетика	163
§ 6.7. Термоядерные реакции. Управляемые термоядерные реакции. Энергетика будущего.....	166
§ 6.8. Применение радиоактивных изотопов. Биологическое действие ионизирующих излучений	169
§ 6.9. Дозиметрические величины и единицы их измерения.....	172

ГЛАВА 7. ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ЛИТОСФЕРЫ. КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫЕ ФАКТОРЫ	177
§ 7.1. Состав и строение атмосферы. Антропогенное воздействие на атмосферу	177
§ 7.2. Источники загрязнения атмосферы	179
§ 7.3. Гидросфера. Антропогенные воздействия на гидросферу	181
§ 7.4. Литосфера. Экологические проблемы литосферы.....	184
§ 7.5. Комплексные экологически опасные факторы	186
§ 7.6. Физические методы наблюдения за параметрами окружающей среды	193
ГЛОССАРИЙ.....	200

ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ. ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ

<i>Практическая работа 1.</i> Изучение абиотических факторов среды	216
<i>Практическая работа 2.</i> Изучение круговорота веществ и потоков энергии в экосистемах.....	225
<i>Практическая работа 3.</i> Влияние теплового загрязнения на микроклимат города.....	236
<i>Практическая работа 4.</i> Определение уровня шума на рабочем месте	239
<i>Практическая работа 5.</i> Определение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля земли	243
<i>Практическая работа 6.</i> Антропогенные экологические катастрофы.....	257
<i>Практическая работа 7.</i> Изучение радоновой безопасности в различных помещениях школы, в микрорайонах города	261
Задачи и вопросы	270
ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ	278
ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ.....	284
ПРИЛОЖЕНИЕ А	304
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	307
ЛИТЕРАТУРА	315

Учебное издание

Борискин Анатолий Федорович

**ФОРМИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
КОМПЕТЕНТНОСТИ УЧАЩИХСЯ ПРИ ИЗУЧЕНИИ
ШКОЛЬНОГО КУРСА ФИЗИКИ**

ИНТЕГРАТИВНЫЙ КУРС

Учебно-методическое пособие

Редактор *Л.В.Алексеева*

Художник обложки *Л.П.Павлова*

Компьютерная верстка *Е.С.Борзова*

Изд. лиц. ЛР № 020742. Подписано в печать 28.12.2009

Формат 60×84/16. Бумага для множительных аппаратов

Гарнитура Times. Усл. печ. листов 20

Тираж 500 экз. Заказ 967

Отпечатано в Издательстве

Нижевартовского государственного гуманитарного университета

628615, Тюменская область, г.Нижевартовск, ул.Дзержинского, 11

Тел./факс: (3466) 43-75-73, E-mail: izdatelstvo@nggu.ru