



ИЗДАТЕЛЬСТВО
«НАУКА»
ВЫШЛА ИЗ ПЕЧАТИ
КНИГА:

ГИТЕЛЬЗОН И. И. Живой свет
моря. 6,6 л. 42 к.

В море можно наблюдать свечения различного цвета — зеленое, фиолетовое, голубое. Светятся бактерии, кишечнополостные, иглокожие рыбы. Интерес к этому явлению разносторонен: ученых интересуют химические вещества и ферментативные, лежащие в основе свечения организмов, превращение химической энергии в световую и т. п. На эти и многие другие вопросы отвечает книга, написанная доктором биологических наук И. И. Гительзоном.

Рассчитана на читателей, интересующихся биологией моря.

Для получения книги почтой заказы просим направлять по адресу:

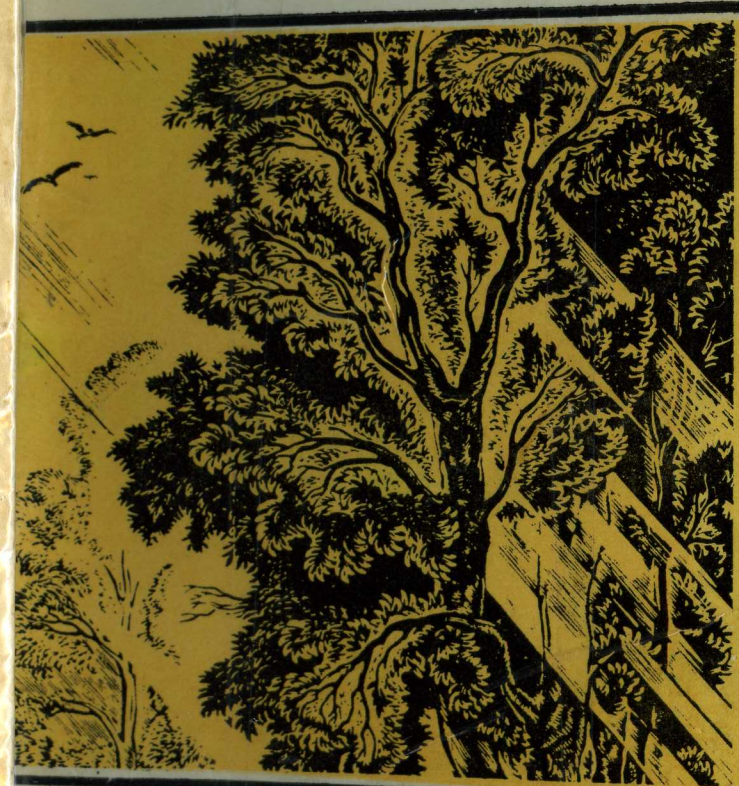
117464 МОСКВА, В-464, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»;

197110 ЛЕНИНГРАД, П-110, Петрозаводская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайшие магазины «Академкнига».

Адреса магазинов «Академкнига»:

480391 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97;
370005 Баку, ул. Джапаридзе, 13;
320005 Днепропетровск, проспект Гагарина, 24; 734001 Душанбе, проспект Ленина, 95; 664033 Иркутск, 33, ул. Лермонтова, 289; 252030 Киев, ул. Ленина, 42; 277012 Кишинев, ул. Пушкина, 31; 443002 Куйбышев, проспект Ленина, 2; 192104 Ленинград, Д-120, Литейный проспект, 57; 199164 Ленинград, Университетская наб., 5; 199004 Ленинград, 9 линия, 16; 103009 Москва, ул. Горького, 8; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630090 Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22; 630076 Новосибирск, 91, Красный проспект, 51; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137; 700029 Ташкент, ул. 50 лет Узбекистана, 11; 700329 Ташкент, Л-29, ул. Ленина, 73; 700100 Ташкент, ул. Шота Руставели, 43; 614050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 450075 Уфа, Коммунистическая ул., 48; 450075 Уфа, проспект Октября, 129; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42; 310003 Харьков, Уфимский пер., 4/6.

В. А. БАРАБОЙ
СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ



ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

Научно-популярная серия

В. А. БАРАБОЙ

СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1976

В книге рассказывается о роли Солнца и солнечного света в возникновении и развитии жизни на Земле, в процессах фотосинтеза. Анализируются физическая природа и особенности действия на организм видимого света, ультрафиолетовых и инфракрасных лучей; рассматривается влияние физических процессов, протекающих в недрах Солнца, на ритм разнообразных процессов в биосфере. Особое внимание автор уделяет изучению воздействия солнечных лучей на организм человека.

21001—046
Б 054(02)—76 1—75НП

© Издательство «Наука», 1976 г.

Солнечные лучи несут с собой солнечную массу. Свет — не бестелесный посланник Солнца, а само Солнце, часть его, долетевшая до нас в совершенной, раскрытой, в энергетическом смысле, форме, в форме света.

С. И. Вавилов ¹

Обзор физических и химических свойств жизни должен начинаться не с Земли, а с Солнца, точнее, с самого его центра. Именно здесь находится источник энергии, которую Солнце непрерывно излучает в пространство в виде света и тепла.

М. Овенден ²

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный луч — обязательная и необходимая составная часть нашего мира. Естественный и вездесущий, как сама жизнь, он встречает каждого из нас на самом пороге жизни. Геологические катаклизмы и драмы мировой истории, великие оледенения и дрейф континентов, землетрясения и извержения вулканов, всемирные потоны и образование коралловых островов, процессы химической и биологической эволюции, рост и плодоношение великого древа жизни, на котором человечество — лишь одна из бесчисленных ветвей, — все эти главы истории Земли проходят одна за другой под лучами Солнца. Но Солнце — не просто часть равнодушной природы, не пассивный фон, а активный участник событий на Земле.

В первобытной атмосфере безжизненной еще Земли излучение Солнца было одним из активных стимулов образования (из простейших молекул метана, водорода, аммиака и окиси углерода) различных органических веществ — исходного материала для возникновения первичных форм жизни. С появлением живых существ солнечный свет стал играть все более широкую и разнообразную роль в преобразовании лика Земли. Энергия солнечных

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 79.

² М. Овенден. Жизнь во Вселенной. М., «Мир», 1965, с. 17.

лучей в процессе фотосинтеза обусловила выход свободно-го кислорода в атмосферу, сделала воздух пригодным для дыхания. Под лучами Солнца кислород на больших высотах в атмосфере превратился в своеобразный озоновый шатер, оберегающий нежные ростки жизни от горячего дыхания светила.

Энергия излучения Солнца была, особенно на ранних этапах развития жизни на Земле, одним из важнейших факторов изменчивости, одной из движущих сил эволюции, так как способствовала возникновению многочисленных мутаций — исходного материала для естественного отбора.

Спектральный состав и энергетика солнечного света наложили свой непосредственный отпечаток на формирование органа зрения, стали для всего животного мира основным каналом поступления информации о среде обитания.

Использование свободной энергии солнечных лучей сделало возможным возникновение все более сложных органических соединений вплоть до биополимеров — белков и нуклеиновых кислот. Если строительные материалы, необходимые для возведения столь сложных молекулярных конструкций — атомы углерода, водорода, кислорода, азота и также фосфора, серы и некоторых других элементов, — имелись в изобилии на Земле, то энергия, необходимая для осуществления синтеза, имела в основном внеземное происхождение, поступала из неисчерпаемого источника — Солнца.

Благодаря фотосинтезу, осуществляющемуся в тканях зеленого растения, в зернах хлорофилла, на земной поверхности накопилась такая огромная масса органического вещества, что стало возможным возникновение животного мира и его наиболее высокоорганизованной формы — человека, вида *Homo sapiens*.

«Когда-то, где-то на Землю упал луч Солнца, но он упал не на бесплодную почву, он упал на зеленую былинку пшеничного ростка, или, лучше сказать, на хлорофилловое зерно. Ударяясь о него, он потух, перестал быть светом, но не исчез. Он только затратился на внутреннюю работу, он рассек, разорвал связь между частицами углерода и кислорода¹, соединенными в углекислоте. Ос-

¹ По современным представлениям энергия света расходуется на расщепление молекул воды.

вобожденный углерод, соединяясь с водой, образовал крахмал. В той или иной форме он вошел в состав хлеба, который послужил нам пищей. ...И вот теперь атомы углерода стремятся в наших организмах вновь соединиться с кислородом, который кровь разносит во все концы нашего тела. При этом луч Солнца, таившийся в них в виде химического напряжения, вновь принимает форму явной силы. Этот луч Солнца согревает нас. Он приводит нас в движение. Быть может, в эту минуту он играет в нашем мозгу»¹.

Итак, Солнце было родителем и повивальной бабкой жизни. Солнечный луч с незапамятных времен (жизнь на Земле, по подсчетам ученых, существует не менее 3—3,5 млрд. лет) и до сего дня непрерывно заряжает энергией машину жизни, стимулирует появление все новых жизненных форм, эволюцию живого против энтропии — в направлении создания более сложных и совершенных живых существ. Венец биологической эволюции на Земле — человек — сумел возвыситься над природой, стал элементом нового качества — человеческого общества, социальной формы существования и движения материи. По мере развития психики, трудовой деятельности, членораздельной речи, письменности, человек стал изменять условия своей жизни, развивать собственные возможности, знания и умения совершенно невиданными для биологической (и тем более геологической) истории Земли темпами. Опираясь на накопленные предыдущими поколениями производительные силы, на багаж научных знаний, производственное мастерство, человек все в более широких, теперь уже глобальных масштабах преобразует Землю, создает вторую, рукотворную природу — гигантские города, промышленные предприятия, плотины и водохранилища, каналы и нефтепроводы, линии электропередач и рудники.

Но и в своей преобразующей деятельности человечество использует почти исключительно энергию солнечного света, законсервированную в нефти, каменном угле, газе, древесине, в энергии ветра и падающей воды. Все в более широких масштабах оно начинает использовать и непосредственно энергию солнечного света для опреснения воды,

¹ К. А. Тимирязев. Растение как источник силы (1875 г.). Избр. соч., т. I. М., Сельхозгиз, 1948, с. 203.

СОЛНЦЕ И ЖИЗНЬ НА ЗЕМЛЕ

получения электроэнергии и т. п. Солнечные батареи обеспечивают энергией спутники Земли, космические корабли и автоматические станции, исследующие Луну, Венеру, Марс. Энергия солнечных лучей будет служить людям и при более далеких и продолжительных космических полетах, и при создании внеземных поселений. Земная жизнь, с первых своих шагов связанная с солнечным светом неразрывными узами, сохранит и преумножит эти связи и в будущем, когда, покинув свою земную колыбель, человечество в соответствии с гениальным предвидением К. Э. Циолковского приступит к планомерному завоеванию околосолнечного пространства.

Вот почему так важно и интересно узнать побольше о луче Солнца, о его физической природе, возникновении и распространении, познакомиться поближе с возможностями, скрытыми в солнечной энергии.

Автор рассчитывает, что эта книга в какой-то мере удовлетворит естественный интерес читателей к проблеме «Солнечный луч и жизнь на Земле».

Возникновение жизни на поверхности Земли — одной из планет, вращающихся вокруг Солнца, стало возможным на определенном этапе эволюции солнечной системы. В силу сочетания таких факторов, как соотношение масс Солнца и Земли, расстояние между ними, интенсивность солнечного излучения, прозрачность и состав земной атмосферы и т. п., создались условия для возникновения простейших форм жизни. Но еще задолго до этого судьба Земли была теснейшим образом связана с Солнцем, в семье которого — солнечной системе — Земля казалась с самого начала одним из обычных, ничем не примечательных отпрысков.

Прошлое, настоящее и будущее солнечной системы

Солнце — это звезда. По своим размерам, массе, температуре поверхности, световому потоку Солнце принадлежит к числу наиболее распространенных, типичных для нашей Галактики звезд. Это сравнительно холодная желтая звезда (температура поверхности Солнца «всего» около 6000°) спектрального класса G2 — заурядное светило среди миллиардов звезд. На диаграмме Герцшпрунга — Рессела (рис. 1) графически изображена связь между светимостью звезды (зависящей от ее массы, размеров, температуры и характеризующейся абсолютной звездной величиной) и спектральным составом ее излучения (спектральный класс, обусловленный температурой поверхности звезды). Солнце, обозначенное крестиком, расположено в самой середине так называемой главной последовательности — сравнительно узкой полосы, протянувшейся от левого верхнего к правому нижнему углу диаграммы.

Но в недрах этой ничем не примечательной звезды вот

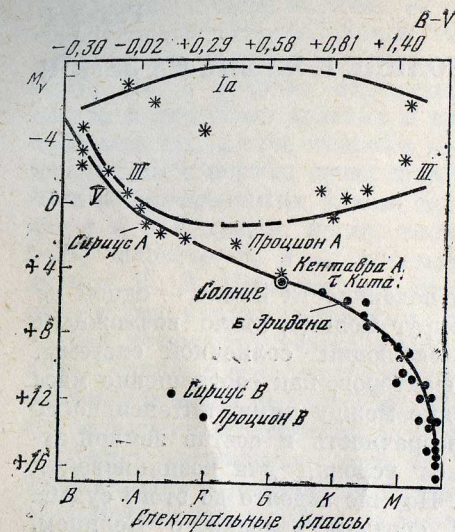


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела для ярчайших звезд неба и звезд, расположенных ближе 4 парсек к Солнцу

Указаны последовательность сверхгигантов (Ia), гигантов (III) и главная последовательность (V), в центре которой расположено Солнце. Шкала показателя цвета $B - V$ соответствует спектральным классам звезд главной последовательности. Звездочкой обозначены ярчайшие звезды неба, точкой — звезды, расположенные ближе 4 парсек к Солнцу

уже 5 млрд. лет совершается таинство освобождения и излучения в мировое пространство гигантских количеств лучистой энергии. Этот процесс и есть главнейшая предпосылка возникновения, существования и развития жизни. Эволюция Земли, возникновение и прогресс жизни на ее поверхности есть частный случай, одно из многочисленных следствий существования нашего светила, эволюции солнечной системы.

Как и другие звезды, Солнце, очевидно, возникло из газопылевого облака межзвездной материи под влиянием взаимного притяжения частиц. Силы всемирного тяготения довольно быстро (по астрономическим масштабам) превращают такое облако в относительно плотный и непрозрачный газовый шар. По мере гравитационного сжатия (а силы тяготения тем больше, чем больше масса шара) давление и температура в центральных областях будущей звезды довольно быстро растут. Газовый шар начинает светиться. Но только тогда, когда разогрев его недр запускает термоядерную топку, когда в процессе самосожжения водорода начинает освобождаться внутриядерная энергия, а светимость и температура газа резко возрастают, — газовый шар становится звездой. При этом давление и температура в ее недрах достигают величин,

препятствующих дальнейшему гравитационному сжатию. Размеры звезды становятся стабильными.

Если температура поверхности Солнца не превышает 6000°C , то в его центральных областях она достигает $15\text{--}25$ млн. градусов. Каждую секунду Солнце излучает $4 \cdot 10^{33}$ эрг световой энергии, что соответствует превращению 600 млн. т водорода в гелий. И это самосожжение продолжается с постоянной интенсивностью не менее 4,5 млрд. лет! Таковы масштабы процесса, которому мы с вами обязаны жизнью. Конечно, масса Солнца огромна, выражается поистине астрономическими цифрами: $2,00 \cdot 10^{33}$ г или $2,00 \cdot 10^{27}$ т, что соответствует 333 343 массам Земли. За миллиарды лет существования Солнца лишь доли процента этой гигантской массы улетучились в виде излучения. Но, разумеется, всему есть предел. Устойчивое свечение звезды за счет термоядерных реакций не может продолжаться бесконечно долго. То Солнце, которое мы видим и можем изучать — это только один из этапов в биографии звезды, период в ее миллиардолетней истории.

Вещество наружных слоев звезды вследствие относительно низкой температуры и слабого перемешивания с веществом ядра в термоядерных реакциях не участвует. Высокое содержание водорода (и гелия) в нем сохраняется неизменным. В центральных же областях звезды водород и гелий постепенно выгорают, выделение термоядерной энергии начинает уменьшаться и, наконец, прекращается. Одновременно нарушается устойчивое равновесие между силами тяготения и силами внутреннего давления, которое миллиарды лет поддерживало стабильное существование и свечение звезды. Противодействие силам тяготения становится недостаточным — ядро звезды начинает сжиматься и по мере уплотнения разогревается.

Термоядерные реакции продолжают в сравнительно тонком слое между горячим и плотным ядром звезды и сравнительно холодными, разреженными периферическими слоями. Дальнейшие судьбы ядра и периферии звезды различны. Размеры звезды и ее светимость постепенно возрастают: она становится красным гигантом, вступает в период неустойчивости, сравнительно быстрой эволюции. Когда термоядерные реакции исчерпывают себя, то в тонком слое, окружающем плотное ядро, звезда как бы «сбрасывает» свою наружную оболочку. Периферические слои

звезды удаляются с большей или меньшей скоростью от ядра и через несколько десятков тысяч лет рассеются в мировом пространстве. Так за стадией красного гиганта возникает планетарная туманность, а после рассеивания ее наружной оболочки остается очень горячая небольшая плотная звезда. Постепенно остывая, она превращается в белый карлик — заключительный этап эволюции звезд.

Такова общая схема. Скорости прохождения отдельных этапов зависят главным образом от первоначальной массы звезды. Те многочисленные звезды нашей Галактики, масса которых больше Солнца хотя бы на 15—20%, эволюционируют значительно быстрее Солнца. Многие из них уже достигли стадии белого карлика. А если масса звезды превышает определенную критическую величину (примерно в 1,5 раза больше солнечной), ее развитие оказывается еще более бурным. Выгорание водорода и гелия в центральных областях массивных звезд приводит к более интенсивному гравитационному сжатию и завершается грандиозной космической катастрофой. Сбрасывание оболочки такой звезды происходит в форме взрыва, во время которого светимость, яркость звезды внезапно возрастает в десятки и сотни тысяч раз. На месте скромной и малозаметной звездочки (в силу ее отдаленности от Земли) вдруг вспыхивает яркая звезда, свет которой может конкурировать даже с полной Луной. Такие звезды астрономы называют сверхновыми.

Древние китайские летописи рассказывают, что в 1049 г. произошла вспышка ярчайшей звезды. В современные телескопы удалось рассмотреть в том участке неба, где когда-то зажглась сверхновая, так называемую Крабовидную туманность. В центре ее сияет довольно яркая звезда, а оболочка (собственно, туманность) разлетается от нее с такой скоростью, что обратный расчет подтверждает: эта туманность действительно образовалась в середине XI в.

Взрыв сверхновой — это гигантский термоядерный котел, в котором рождаются тяжелые элементы (расположенные дальше в таблице Менделеева, чем железо), не образующиеся в недрах звезд в обычных условиях. Взрыв звезды разбрасывает осколки ее вещества, часть которых затем под влиянием сил тяготения вновь стягивается в одно тело и дает начало новому светилу — звезде второго поколения, масса которой существенно меньше

первоначальной. Поскольку возраст нашей Галактики — около 20 млрд. лет, некоторые ее звезды могли пройти даже два-три и более подобных периода взрывного уменьшения массы, пока она не достигла значения ниже критического. Благодаря спектральным исследованиям ученые обнаружили в составе Солнца почти все элементы таблицы Менделеева, в том числе и более тяжелые, чем железо; это позволяет думать, что наше светило — звезда второго поколения.

Расчеты ученых показывают, что по крайней мере еще 6 млрд. лет Солнце будет устойчиво и стабильно излучать энергию. Только примерно через 8 млрд. лет оно станет красным гигантом. Но еще задолго до того, как раскаленные слои красного чудовища, в которое превратится когда-то наше доброе Солнце, поглотят все окосолосолечное пространство с орбитами Меркурия, Венеры и Земли, все живое на Земле будет сожжено тысячекратно возросшим смертоносным потоком излучения. К тому времени, когда Земля перестанет быть уютным жилищем для людей, человечество, несомненно, сумеет осуществить переселение на планеты более молодых звездных систем, отыщет или создаст условия для своего дальнейшего нормального существования и развития.

История Земли и других планет солнечной системы теснейшим образом связана с эволюцией центрального светила. Разнообразные научные теории, пытающиеся объяснить возникновение Земли и планет, так или иначе связывают его с Солнцем. Одна из теорий, выдвинутая в середине XVIII в. французским ученым Ж. Бюффеном, а в XX в. развитая американскими учеными Чемберленом и Мультоном и английскими физиками Дж. Джинсом и Г. Джеффрисом, прямо предполагала, что Земля и другие планеты состоят из вещества Солнца. Чтобы объяснить, как большая масса вещества оказалась вырванной из объятий солнечного тяготения, пришлось допустить столкновение Солнца с другой звездой (Джинс и Джеффрис) или кометой (Бюффон), либо чудовищной силы взрыв на самом Солнце (Чемберлен и Мультион), либо прохождение вблизи Солнца другой звезды, вырвавшей значительную массу вещества из сферы притяжения Солнца.

Так или иначе, эта теория связывала возникновение планет с крайне редким и маловероятным событием и, следовательно, признавала исключительность солнечной

планетной системы, земной жизни. Вещество Земли и других планет, согласно этой теории, было сначала расплавленным, а затем остыло.

По мере накопления знаний о Земле и о Вселенной ошибочность этой теории становилась все более очевидной. Косвенные данные, а также прямые наблюдения убедили ученых, что планетные системы есть, по-видимому, у большинства звезд, расположенных на расстоянии 20—30 световых лет от Солнца. Значит, солнечная система — не исключение, а скорее правило. Для возникновения планет должен существовать общий и постоянно действующий механизм, не имеющий ничего общего с гипотезой столкновения.

Изучение земной коры до глубин в 5—7 км привело ученых также к убеждению, что горные породы нашей планеты скорее всего не были с самого начала расплавленными, а подверглись частичному разогреву и расплавлению вторично в результате радиоактивного распада. Значит, Земля (и, вероятно, другие планеты солнечной системы) возникла не из раскаленного солнечного вещества, а из холодной газопылевой материи, которая послужила материалом для образования самого Солнца. Это привело к возрождению некоторых старых представлений и способствовало появлению новых теорий.

Еще во второй половине XVIII в. немецкий философ Кант и французский математик Лаплас высказали мысль, что Солнце и планеты образовались из одного и того же облака газопылевой материи. По мере сжатия туманности скорость ее вращения увеличивалась, облако сплющивалось в диск. Край диска вращался настолько быстро, что отрывался от него, образуя ряд колец, расположенных приблизительно в плоскости экватора облака. В конце концов из центральной части диска сформировалось Солнце, а из колец — планеты. Эта теория отлично объясняла процесс образования звездных и планетных систем, не прибегая к помощи столкновений, взрывов и тому подобных маловероятных событий, исходя лишь из закона всемирного тяготения. Простое объяснение получил и факт расположения планетных орбит солнечной системы приблизительно в одной плоскости. Наконец, эта теория предполагает «холодное» образование Земли из того же материала, из которого возникло Солнце. Теория Канта — Лапласа была развита и усовершенствована в

XIX—XX вв., по главное ее содержание сохранилось неизменным.

Наконец, третья группа теорий, также допускающая «холодное» рождение Земли, предполагает, что Солнце в процессе движения вокруг центра Галактики благодаря силам притяжения захватывало вещество газопылевых скоплений, из которого затем формировались планеты. Впервые эту «теорию захвата» выдвинул в 1943 г. академик О. Ю. Шмидт. Американский астрофизик Г. Юри, развивая эту теорию, предположил, что образование небесных тел, подобных Луне, и их обломков происходило задолго до формирования солнечной системы, возможно, в результате взрыва звезды первого поколения — предшественницы Солнца. Под влиянием солнечного ветра и светового давления легкие атомы выталкивались на периферию. Когда началось формирование планет, ближайшие к Солнцу Меркурий, Венера, Земля и Марс оказались построенными из более тяжелого вещества, чем внешние планеты. Лишь сравнительно легкая Луна, по представлению Юри, является остатком ранней стадии формирования солнечной системы.

С точки зрения возникновения жизни на Земле теории захвата и одновременного формирования Солнца и планет равно вероятны и допускают одинаковую эволюцию условий на поверхности Земли, холодной планеты, подвергшейся затем вторичному разогреву и частичному расплавлению. Разница заключается лишь в том, что возраст Земли, согласно теории захвата, может быть и больше, и меньше возраста Солнца, тогда как теория Канта — Лапласа в ее современном варианте предполагает примерно одновременное формирование Солнца и планет.

Наша планета все еще недостаточно исследована, чтобы можно было на основании изучения земных пород четко определить ее возраст. Имеющиеся данные дают ориентировочную цифру, близкую к 4,5 млрд. лет. Наука сегодняшнего дня, очевидно, близка к признанию «холодного» рождения Земли в период, отдаленный от наших дней примерно на 5 млрд. лет. Во всяком случае, современные теории возникновения жизни на Земле исходят из этого допущения. Но и в случае рождения Земли из холодного материала роль Солнца в формировании планетной системы, в эволюции условий на поверхности Земли, необходимых для рождения жизни, огромна.

Многие сотни, а может быть, и тысячи лет ищут люди ответ на этот вопрос. И чем дальше шагает в будущее человечество, тем большую остроту он приобретает. Но конкретные пути и возможности разгадки тайны зарождения земной жизни весьма немногочисленны и очень затруднены. Ведь интересующие нас первые, простейшие, начальные формы жизни, существовавшие 3—3,5 млрд. лет назад (а может быть и ранее), давным-давно исчезли под натиском своих более сильных, более приспособленных к земным условиям потомков. И даже если бы процесс рождения жизни из неживого материала повторился на Земле в наши дни (что маловероятно), человечеству вряд ли удалось бы познакомиться с нашими возродившимися предками: простейшие живые формы неминуемо были бы уничтожены современными микроорганизмами.

В распоряжении науки остаются лишь косвенные, окольные пути. О возникновении жизни на Земле мы можем судить по разнообразным уцелевшим остаткам ее древних форм (но наиболее интересные, наиболее древние существа не оставили никаких следов!), по разрозненным данным геологии, палеонтологии, астрономии, физики, химии, генетики.

Еще 100—200 лет назад таких разрозненных данных было совершенно недостаточно, чтобы сделать даже самую первую попытку научного рассмотрения этого вопроса. Великие ученые-биологи XVIII—XIX вв. Луи Пастер, Клод Бернар, Герман Гельмгольц, отвергая идеи «сотворения» живых существ в прошлом, их самозарождения в настоящее время (что было важной победой научной биологии), в то же время не могли противопоставить им строго обоснованную материалистическую теорию возникновения жизни. Если *Omnis cellula e cellula* (каждая клетка — из клетки), то как возникла первая клетка? Ответ на этот вопрос в рамках метафизического материализма, отрицающего развитие, не мог быть получен. Да и фактов, относящихся к проблеме возникновения жизни, было тогда слишком мало. Вот почему выдающиеся биологи-материалисты XIX в. либо оставляли открытым вопрос о возникновении жизни, либо отстаивали мысль о вечности жизни: «...ничто не рождается, ничто не творится, а все продолжается. Природа не представляет нам ни

одного акта творения; она есть вечное продолжение»¹. «Пройдет еще немало времени, прежде чем мы сможем сами увидеть, как слизь, или протоплазма, или что-либо в этом роде породит живое существо... Рассуждать в настоящее время о возникновении жизни просто нелепо. С таким же успехом можно говорить о возникновении материи»².

В геологическом и тем более в астрономическом масштабе времени столетие — срок ничтожный. Однако последнее столетие принесло несравненно больше фактов, гипотез, теорий, относящихся к проблеме возникновения жизни, чем тысячелетия предшествующего развития науки. Сегодня над загадкой жизни бьются не ученые-одиночки, а целые научные коллективы, тысячи ученых. Первая подлинно научная теория происхождения жизни была создана в 1924 г. советским ученым А. И. Опаринным. Значительный вклад в эту проблему внесли и другие советские ученые: Н. Холодный, А. Г. Пасынский, А. Н. Теренин, английские исследователи Дж. Холдейн, Дж. Бернал, американцы М. Кальвин, С. Фокс, С. Миллер, К. Поппамперума, К. Саган, Г. Юри, Дж. Оро, японский ученый Ш. Акабори и другие. Из крупиц истины, отдельных опытов, предположений, сопоставлений постепенно складывается стройная картина далекого прошлого нашей планеты, картина зарождения жизни.

Начальный период возникновения жизни был, вероятно, и самым длительным. Миллиарды лет потребовались для возникновения первых, самых примитивных жизненных форм. Следующие этапы эволюции живого совершались уже быстрее. А биологическая история человека насчитывает «всего» два, максимум три миллиона лет.

С чего же начался процесс образования живого? На этот вопрос можно дать точный ответ: с образования на поверхности нашей планеты органических веществ, соединений углерода. Именно этот элемент обладает уникальной способностью образовывать длинные цепочки из десятков, сотен и даже тысяч атомов — скелет органических

¹ К. Бернар. Жизненные явления, общие животным и растениям. 1878, с. 53.

² Ч. Дарвин. Из письма к Дж. Д. Гукеру, 29 марта 1863 г.

молекул. Сложные органические соединения углерода с водородом, кислородом, азотом, фосфором и другими элементами — это строительный материал живых тел. Из таких молекул состоят и вещества жизни — нуклеиновые кислоты и белки.

Биологической эволюции, процессу развития живых организмов на Земле, очевидно, предшествовала эволюция химическая — процесс абиотического (вне организма) образования все более сложных соединений углерода. Простейшие из них — углеводороды — обнаружены во всей доступной наблюдению Вселенной: и в раскаленной атмосфере звезд (в том числе и Солнца), и в холодных газопылевых облаках межзвездной среды, и на поверхности больших планет и их спутников, и в веществе космических странниц — комет, и в упавших на Землю метеоритах. Были они, очевидно, и на древней, еще безжизненной Земле.

Чтобы понять, как совершался переход от углеводородов к более сложным соединениям углерода, нужно ясно представить себе условия на первобытной Земле, состав ее атмосферы.

Древнейшая атмосфера Земли состояла в основном из водорода с примесью гелия — самых легких элементов, наиболее распространенных во Вселенной, в том материале, из которого формировалась древняя Земля. Однако притяжение Земли оказалось недостаточным, чтобы удерживать эту легкую атмосферу. Спустя определенное время водород почти полностью улетучился в мировое пространство. На смену водородно-гелиевой пришла первичная атмосфера Земли, состоявшая из простейшего углеводорода метана, водяных паров, аммиака, а также, вероятно, сероводорода, некоторого количества углекислоты и окиси углерода. Все эти газы выделялись из горных пород по мере постепенного радиогенного разогрева Земли. В этой атмосфере и начали действовать силы, способствовавшие возникновению разнообразных и достаточно сложных соединений углерода.

Какие это силы? Это ионизирующие излучения (космические лучи и излучение радиоактивных изотопов земной коры), ультрафиолетовое излучение Солнца, атмосферные электрические разряды (молнии), извержения вулканов, удары метеоритов. Из пяти перечисленных источников энергии именно ультрафиолетовые лучи Солн-

ца — наиболее мощный, постоянно и глобально действующий фактор — сыграли самую выдающуюся роль.

Чтобы узнать, какие вещества могли возникать в первичной атмосфере Земли под влиянием названных выше источников энергии, нужны точные эксперименты, в которых бы смесь газов подвергалась воздействию одной из этих сил. Такие опыты ставились во многих странах начиная с 1950 г. Первый опыт с облучением смеси CO_2 , водяных паров, водорода (в присутствии ионов железа Fe^{++}) α -частицами с энергией 40 Мэв был поставлен в 1950 г. М. Кальвином. Ученому удалось обнаружить образование муравьиной кислоты и формальдегида.

В 1953 г. американский биохимик С. Миллер в смесь газов ввел аммиак, что сразу увеличило количество возникающих веществ. Кроме того, в установке было предусмотрено удаление из реагирующей смеси образующихся соединений. В этой смеси при электрическом разряде образуются циан, а также аминокислоты и альдегиды — достаточно сложные и важные органические соединения.

Советские ученые А. Н. Теренин, Т. А. Павловская и А. Г. Пасынский в 1955—1960 гг. использовали действие ультрафиолетовых лучей и наблюдали образование в газовой смеси, имитирующей первичную атмосферу Земли, аминокислот глицина, аланина, ряда карбоновых кислот и т. п. Американский ученый С. Фокс получил сходные результаты, пропуская смесь газов через горячую трубку.

Интересно, что набор возникающих органических соединений почти не зависит от источника энергии и определяется исключительно составом смеси газов и соотношением их элементов.

После всех описанных выше опытов стало ясно, что в атмосфере древней Земли естественным абиогенным путем возникали такие сложные органические молекулы, как аминокислоты глицин, аланин, серин, валин, пролин — составные части белков; аденин и азотистые основания — компоненты нуклеиновых кислот; формальдегид и сахара — продукты его конденсации; простейшие жирные кислоты, а также цианиды, выступающие в роли катализаторов (ускорителей) синтеза органических соединений. Таким образом, можно считать доказанным образование на древней Земле основных видов органических молекул.

Следующий этап химической эволюции — образование

полимеров, гигантских молекул, столь характерных для всех форм жизни. Этот новый этап стал возможен после того, как на Земле накопились большие количества мономеров — простых органических соединений, перечисленных выше. В месте их образования, в атмосфере, концентрация этих веществ не могла быть большой: те же факторы, которые способствовали образованию органических соединений, обуславливали их разрушение. Очевидно, молекулы образовавшихся соединений вымывались из атмосферы дождями и попадали в водоемы, в первичный древний океан. Здесь они были защищены от разрушительного действия ультрафиолетовых лучей, электрических разрядов и т. п., здесь они могли беспрепятственно накапливаться. По мнению А. И. Опарина, это происходило в мелководных заливах океана, по мысли Дж. Бернала, — в заливаемых морскими приливами устьях рек — эстуариях. Под действием теплых лучей Солнца воды первобытного моря превратились в своеобразный «питательный бульон» жизни.

Накоплению органических молекул, соединению их в длинные цепи могли способствовать их оседание и концентрация на частицах глины, кристаллах кварца, апатита, глины, особенно благоприятствовало присутствие цианидов и аммиака. Наибольшие шансы «выжить», сохраниться в этих условиях имели, конечно, вещества, склонные к аутокатализу, т. е. к химическому самовоспроизведению. Таковы, например, порфирины — активная часть столь важных органических веществ, как хлорофилл, гемоглобин, многие ферменты, — образующиеся, как показали опыты, абиогенно из веществ первичной атмосферы в присутствии ионов некоторых металлов.

В морском мелководье, на отмелях и в эстуариях древнего океана в результате накопления и взаимодействия органических веществ возникали и распадались тысячи различных соединений. Реакции совершались причудливым образом, хаотически. Количество вариантов химической структуры увеличивалось, но пока не было преемственности, не было и дальнейшего прогресса. Не было и не могло еще быть жизни.

Новый этап химической эволюции начался только после того, как сложные белковоподобные молекулы образовали первичные комплексы, выделились в виде капель (их называют коацерватными), отделились от раствора

поверхностью раздела. Это был, по представлениям А. И. Опарина, зачаток организации, первый зародыш живого организма. Коацерваты могли избирательно поглощать «нужные» им вещества из воды, усложняя свою организацию. С появлением коацерватов становится возможным отбор более устойчивых и совершенных систем, в ходе которого постепенно складывались отдельные цепи обменных реакций, отбирались белковоподобные вещества, способные ускорять эти реакции — зачатки ферментов.

Были ли коацерваты переходной формой от неживого к живому, или этот переход совершался несколько иначе — пока мы не знаем. В современных теориях возникновения жизни немало белых пятен. И самое большое из них — это вопрос о том, каким образом возник простейший механизм сохранения и наследования полезных свойств первичных организмов. Ведь без закрепления достигнутого немислимо движение вперед.

Молекулярная биология в содружестве с биохимией, биофизикой, физической химией, кибернетикой, фото- и радиобиологией добилась в последние 20—25 лет колоссальных успехов в разгадке самых сокровенных тайн жизни. Стало ясно, что жизнедеятельность клеток — от бактерий и синезеленых водорослей до клеток мозга человека — протекает по одним и тем же законам, на основе единых принципов организации.

Любой сложный организм начинает свой индивидуальный жизненный путь с одноклеточной стадии, с оплодотворенной яйцеклетки — зиготы. В этой единственной клетке-прародительнице уже заложена, закодирована вся программа развития будущего организма, закреплена «навечно» и передается от клетки к клетке, из поколения в поколение наследственная память вида — совокупность наиболее ценных и важных черт организации, накопленных за тысячелетия развития.

Хранителем и передатчиком наследственной информации является молекула дезоксирибонуклеиновой кислоты — ДНК. Наследственный «алфавит» насчитывает всего четыре «буквы» — четыре варианта азотистых оснований. Различные комбинации этих четырех исходных элементов определяют порядок чередования аминокислот в белках — основных структурных элементах клетки и главных «дирижерах» ее жизненных процессов. Молекула ДНК — единственная в своем роде органическая молеку-

ла, обладающая удивительным свойством самокопирования, самовоспроизведения. При клеточном делении каждая дочерняя клетка получает полный набор копий, отпечатков с материнской матрицы — ДНК. А в процессе жизнедеятельности клетки матрица ДНК, полученная по наследству, отдает зашифрованную в ней наследственную информацию, обеспечивает клетку набором вторичных штампов для производства всех необходимых белков.

Этот матричный принцип организации наследственного механизма присущ всем живым существам на Земле. Способ зашифровки наследственной информации в молекулах ДНК — генетический код — также идентичен, един и для плесневого грибка, и для кузнечика, и для березы, и для человека. Таким образом, внутриклеточный наследственный механизм в главных чертах одинаков у всех земных организмов. Это великое открытие нашего времени особенно надежно утверждает мысль, что все живые существа на нашей планете — более или менее близкие родственники и что этот единый наследственный механизм сложился где-то на самой заре жизни. И лишь с этого момента стало возможно закрепление достигнутого, а значит, и дальнейший прогресс живого. Проблема зарождения земной жизни лишь тогда приблизится к своему разрешению, когда будет понят и объяснен в самых общих чертах процесс возникновения этого механизма. Современные теории эту проблему еще не могут решить.

Предполагается, что одновременно с возникновением простейших белковоподобных соединений образовывались и полифосфаты — прообразы нуклеиновых кислот. Их образованию и усложнению способствовали кристаллическая структура частиц глины, апатитов, цианистые соединения. В процессе синтеза в числе источников энергии важная роль принадлежит ультрафиолетовому излучению Солнца.

Простейшие формы жизни постепенно использовали запасы органических веществ, накопленные на Земле за миллионы лет добиологического развития, химической эволюции. Условием их дальнейшего развития стал процесс усвоения неорганических веществ, синтеза живого из неживого при помощи живого. Новый процесс получил название фотосинтеза, потому что в нем для синтеза органических соединений используется энергия солнечного света.

Луч Солнца, долетев до Земли, перестает быть светом, но не исчезает и не расходуется впустую, не отражается полностью обратно в безжизненные пространства космоса. Поглощенный зелеными листьями растений, их хлорофилловыми зернами, солнечный луч превращается в великую силу, приводящую в движение машину жизни. В микроскопически малых органоидах клетки световой луч превращается в скрытую энергию химической связи между атомами. Он как бы сжимается в мощную пружину, которая затем, постепенно расправляясь, отдает запасенную энергию Солнца, экономно расходуя ее в ходе каждого жизненного процесса, будь то движение ресничек инфузории или трепет мысли гения, улыбка девушки или последнее усилие штангиста, блеск светлячка в ночи или балетное па Екатерины Максимовой. Чудо превращения энергии солнечного луча в движущую силу жизни совершается каждую секунду в тканях зеленого растения. И если луч Солнца мы по праву считаем первопричиной жизни (точнее, одним из важнейших компонентов причинного комплекса), то зеленый лист, зерно хлорофилла — это связующее звено между Солнцем и жизнью на Земле.

Великий русский ученый К. А. Тимирязев первый понял и оценил значение зеленого пигмента растений — хлорофилла в развитии земной жизни, его роль посредника, космическую роль зеленого растения. Эту роль с равным успехом выполняют как микроскопические одноклеточные синезеленые водоросли — быть может, наиболее древние из существующих ныне живых существ, так и гиганты растительного царства — секвойи и эвкалипты, взметнувшие свои зеленые кроны на 100—120 м над поверхностью Земли.

Зеленая масса растений Земли поглощает и усваивает всего около 0,3% энергии излучения Солнца, падающей на земную поверхность. Но и этого количества энергии достаточно, чтобы обеспечить синтез гигантской массы органического вещества биосферы, чтобы радикально изменить условия, существовавшие на безжизненной Земле.

Одним из важнейших проявлений преобразующего влияния жизни (начавшегося на самой ее заре, с появлением хлорофилла) было изменение состава земной ат-

мосферы. Древняя атмосфера Земли не содержала свободного кислорода.

Первые простейшие формы жизни, использовавшие запасы органических веществ, накопленные абиогенным путем в «первичном бульоне», не меняли заметным образом состава атмосферы. С началом процесса фотосинтеза обстановка изменилась коренным образом. Поглощенная зелеными тканями растения энергия Солнца шла теперь на расщепление молекул воды на атомы водорода и кислорода. Молекулярный кислород выделялся в атмосферу. За миллиарды лет существования зеленых растений этот процесс привел к радикальному изменению состава атмосферы Земли и условий, существующих на ее поверхности. Накопление благодаря жизнедеятельности растений органической массы, с одной стороны, и свободного молекулярного кислорода, с другой — создало условия для возникновения совершенно новых живых существ, второй великой ветви жизни — мира животных.

В организме животных (и человека в том числе) идут процессы окисления, по своей сути противоположные фотосинтезу. Углеводы, жиры и белки освобождают в теле животных скрытую энергию солнечного луча, когда-то пойманного и закованного в кандалы химических связей в «тюремных камерах» хлорофилловых зерен. Весь животный мир — постоянный потребитель огромных богатств, накапливаемых мириадами зеленых тружеников — растений.

Все люди на Земле (а их сейчас около четырех миллиардов), принимая пищу, ежегодно переваривают, используют и окисляют около 700 млн. т органических пищевых веществ; рассеивают, отдают окружающей среде около трех квадриллионов ($3 \cdot 10^{15}$) ккал тепла. Это количество тепловой энергии превышает годовую продукцию 350 электростанций, подобных Волжской ГЭС им. В. И. Ленина. А ведь потребляют солнечные «консервы» — органическую пищу — не только люди, но и весь гигантский животный мир. Однако постоянный расход органических соединений непрерывно возмещается в великом круговороте веществ и энергии благодаря процессу фотосинтеза, постоянной подзарядке жизненных батарей бесплатной энергией солнечного света.

В наше время зеленый покров Земли связывает и использует всего 0,3% падающего солнечного света. Однако

в хороших условиях растения способны усваивать 5—10% энергии лучей Солнца, а в принципе возможно повышение «коэффициента полезного действия» растений и до 25—30%. Резервы и возможности земной жизни, следовательно, далеко еще не исчерпаны.

Пройдут годы. Человек будущего — гражданин коммунистического общества, высший продукт эволюции земной жизни и подлинный, рачительный хозяин земных богатств — найдет пути разумного использования океанских просторов и обширных пустынь, горных массивов и закованных во льды пространств Арктики и Антарктики для улавливания и использования энергии Солнца.

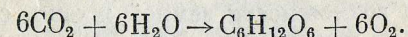
А когда станут реальностью далекие межпланетные и межзвездные экспедиции, он и на борту космического корабля создаст крохотный замкнутый мирок, в котором так же, как в большом земном мире, будет осуществляться круговорот веществ и энергии. Важнейшим и непременным звеном этой искусственной экологической системы, малой биосферы будут зеленые оранжереи. Зеленое растение войдет в просторы космоса как необходимый спутник человека, поставщик пищи и кислорода, заботливый санитар. Так, по мере развития и расцвета земной жизни изменяется, возрастает космическая роль растения, гениально понятая К. А. Тимирязевым.

Каков же этот великий и таинственный процесс, в ходе которого стремительный и неумолимый солнечный луч превращается в узника, и, гремя оковами — цепями углеродных атомов, приводит в движение гигантский маховик биосферы?

В самом общем виде фотосинтез, т. е. синтез при участии света, состоит в образовании из углекислоты воздуха и почвенной влаги сложных органических соединений углерода, кислорода и водорода. Благодаря использованию минеральных солей почвы в их состав включается также азот, фосфор, сера, железо, калий, натрий и другие элементы. В итоге возникают огромные молекулы белков, цуклеиновых кислот, углеводов, жиров, служащие, в свою очередь, строительным материалом клеток, кирпичиками здания жизни.

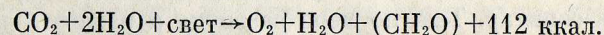
Со времен К. А. Тимирязева (70—80-е годы прошлого столетия) и почти до середины XX в. ученые были убеждены, что солнечная энергия, уловленная хлорофиллом, расходуется на расщепление молекул углекислоты: ки-

кислород выделяется в атмосферу, а углерод идет на синтез органических веществ. Суммарная формула процесса изображалась таким образом:



Формулу $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ имеют такие продукты фотосинтеза, как глюкоза, фруктоза и другие простейшие сахара. В них водород и кислород содержатся в том же соотношении 2 : 1, как в воде, поэтому эти вещества называют еще углеводами. Простейшие углеводы — моносахариды, теряя воду, могут образовывать более сложные соединения — дисахариды — сахарозу (тростниковый сахар), лактозу (молочный сахар), полисахариды — крахмал, целлюлозу и т. п.

Применение метода меченых атомов внесло в эту схему существенную поправку. Оказалось, что сила, заключенная в солнечном луче, расходуется на разложение воды, а не двуокиси углерода, и что кислород атмосферы имеет, следовательно, не углекислотное, а водное происхождение. В уточненном виде основное уравнение фотосинтеза имеет следующий вид:

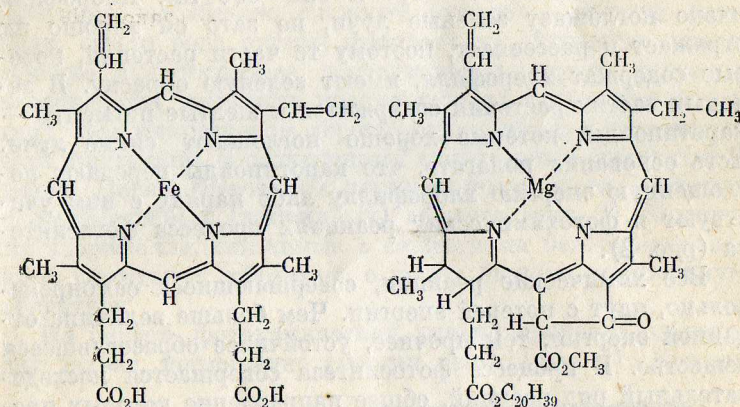


Иными словами, в органических соединениях, синтезированных из одной грамм-молекулы углекислоты, запасается 112 ккал энергии.

Фотосинтез — сложный, многоступенчатый процесс, детали которого не полностью расшифрованы поныне. Стоит он из большого количества последовательных этапов, реакций. Реакции эти можно подразделить на два типа: одни осуществляются под непосредственным влиянием поглощенного света, другие — в темноте. Непременным участником световых, фотохимических реакций являются вещества, избирательно поглощающие излучение определенной длины волны. Если фотохимическая реакция активируется видимым светом, для ее осуществления нужно красящее вещество, пигмент. В реакциях фотосинтеза эту роль выполняет хлорофилл. Важная способность фотохимических реакций: их скорость практически не зависит от температуры среды, в которой они протекают. И это естественно: поглотив порцию солнечных лучей, хлорофилл не нуждается больше в притоке энергии, чтобы начать процесс фотосинтеза.

Реакции фотосинтеза, протекающие в темноте, называют темновыми, химическими (без приставки «фото»). Эти реакции регулируются и управляются белковыми катализаторами — ферментами. Каждая последующая реакция фотосинтеза для своего осуществления нуждается в присутствии специального фермента. Скорость темновых, как и всех вообще химических реакций, зависит от температуры и при ее повышении на 10°C возрастает в два-три раза.

Процесс фотосинтеза начинается с поглощения света хлорофиллом. Это замечательное вещество, к свойствам которого мы будем еще неоднократно возвращаться. По своему составу хлорофилл очень близок к гемму — красящему веществу гемоглобина крови и переносчику кислорода. Структурной основой обоих служат порфирины —



гем

хлорофилл а

вещества, которые, как говорилось в предыдущем разделе, могут при определенных условиях образовываться абиогенно. Следовательно, фотосинтез на древней Земле мог явиться закономерным итогом естественного хода событий и, в свою очередь, открыл новую главу в эволюции земной жизни.

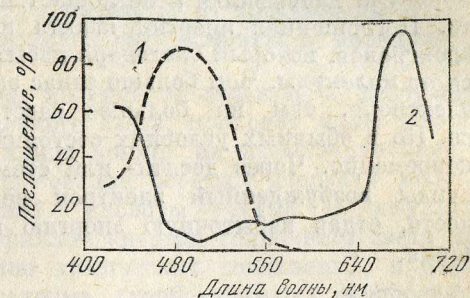
Активный центр хлорофилла (и гема) состоит из порфириновых группировок. Но если у гемоглобина в центре активной группы расположен атом железа, то в хлорофилле эту роль выполняет атом магния. Молекула хлорофилла в целом выполняет две функции: поглощает порцию

солнечной энергии и затем передает ее строго по назначению. Функцию улавливания энергии света выполняют порфириновые кольца, тогда как атом магния выступает в качестве посредника и катализатора в фотохимической реакции разложения воды на атомы водорода и кислорода. Кислород уходит в атмосферу, а атомы водорода, снабженные при освобождении запасом энергии, постепенно расходуют ее, проходя лестницу темновых реакций.

В растениях имеется несколько видов хлорофилла, из которых главные два — хлорофилл *a* и хлорофилл *b*. Поглощают хлорофиллы не все видимые глазом лучи Солнца, а главным образом красные и синие лучи. Максимумы поглощения света для хлорофилла *a* лежат в области 400—440 и 630—600 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$), для хлорофилла *b* — в области 440—470 и 620—650 нм. Хлорофилл плохо поглощает зеленые лучи, но зато он хорошо их отражает и рассеивает, поэтому те части растений, которые содержат хлорофилл, имеют зеленую окраску. В зеленых частях растения содержатся и желтые пигменты — каротиноиды, которые хорошо поглощают синие лучи. Есть основания полагать, что каротиноиды передают поглощенную энергию хлорофиллу либо наряду с ним участвуют в фотохимических реакциях процесса фотосинтеза (рис. 2).

Все химические реакции, совершающиеся самопроизвольно, идут с потерей энергии. Чем больше величина отданной энергии, тем прочнее, устойчивее образовавшееся вещество. В процессе фотосинтеза совершается последовательный ряд реакций, общее направление которых противоположно естественному сродству атомов. При помощи энергии солнечного света растение преодолевает силы связи между водородом и кислородом в молекулах воды, между кислородом и углеродом в углекислоте. Образующиеся при этом активные продукты (атомы кислорода, водорода, гидроксильные ионы и др.) стремятся, отдав избыточную энергию, вновь соединиться. Если бы реакции фотосинтеза происходили в растворе или в другой простой среде, обратные реакции сводили бы на нет результаты основного процесса. В зеленом растении этого не происходит, так как образующиеся активные продукты с момента своего возникновения пространственно разделены. Каждый из них проходит свою цепочку превращений. Водород и уг-

рис. 2. Спектры поглощения каротиноидов (1) и хлорофиллов (2)



лерод как бы движутся навстречу друг другу по ступенькам темновых реакций.

Для пространственного разделения основных активных продуктов и путей их обмена зеленое растение в ходе эволюции выработало сложный аппарат — систему мембран, своего рода органы фотосинтеза. Пигменты, участвующие в фотосинтезе, сосредоточены внутри клеток в хлоропластах, имеющих правильную пластинчатую структуру. Под микроскопом хорошо видно, что и в пластинках есть правильно чередующиеся структурные элементы — диски. Диски состоят из чередующихся слоев белковых и жироподобных (липоидных) веществ (рис. 3). Молекулы хлорофилла, связанные с веществами белково-липоидного комплекса, образуют с ними единую мембранную структуру.

На первой, фотохимической, стадии процесса происходит захват, поглощение энергии света (рис. 4). Каждая

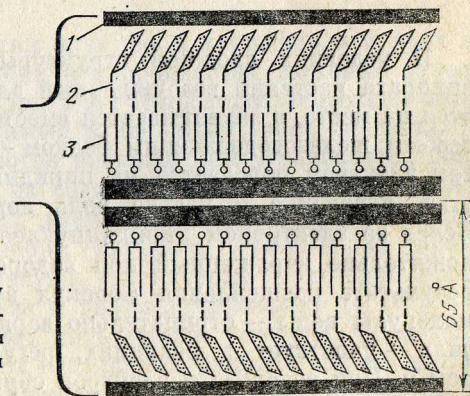


рис. 3. Схема строения грани хлоропласта. Между монослоями белка (1) лежат отдельные молекулы хлорофилла (2) и слои фосфолипидов (3)

молекула хлорофилла *a* поглощает по одному кванту света. Поглощенная энергия кванта передается одному из электронов, который благодаря избытку энергии отдалается от молекулы. Чем больше запас энергии возбужденного электрона, тем на большее расстояние он отдалается. Но в обычных условиях состояние возбуждения кратковременно. Через десяти- или стотысячную долю секунды возбужденный электрон возвращается на свое место, отдав избыточную энергию в виде кванта излучения.

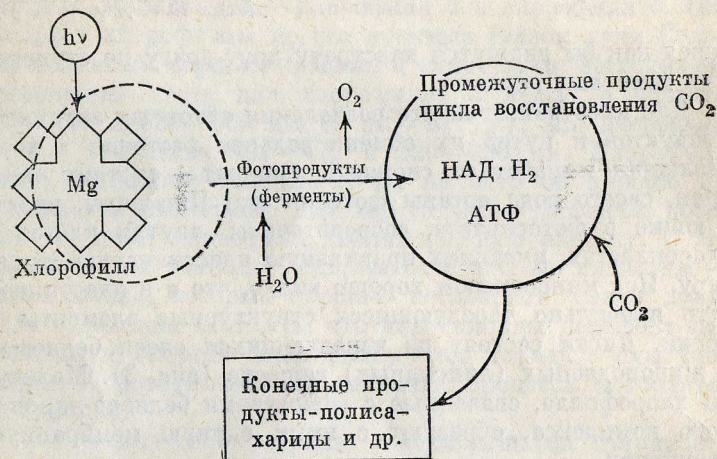


Рис. 4. Схема процесса фотосинтеза (по А. А. Красновскому)

В условиях сложной структуры фотосинтетического аппарата растений возбужденный электрон не возвращается на место, а захватывается вместе с избытком энергии особым железосодержащим белком — ферредоксином. Затем электрон передается на пиридиннуклеотиды — вещества, играющие в клетке роль переносчиков водорода. Вслед за электроном пиридиннуклеотиды принимают положительно заряженный ион водорода, образующийся в результате расщепления молекул воды. Второй осколок молекулы воды — отрицательно заряженный ион гидроксид-иона — участвует в реакциях, регулируемых хлорофиллом *b*. Ион водорода и электрон образуют атом водорода.

Пиридиннуклеотиды используют в дальнейшем водород для частичного восстановления углерода в молекуле углекислоты.

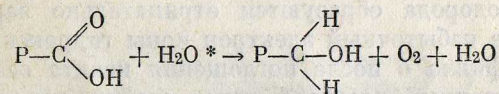
Другие электроны молекул хлорофилла *a*, возбужденные квантами солнечного света, проходят иную цепочку превращений, и в конце концов их избыточная энергия расходуется на образование богатых энергией молекул аденозинтрифосфорной кислоты — АТФ. В результате поглощенная хлорофиллом энергия солнечного света превращается в энергию химических соединений, в форму привычных для организма, «удобоваримых» переносчиков энергии и электронов, таких, как АТФ и пиридиннуклеотиды.

Дальнейшие их превращения идут уже по обычным биохимическим законам. В результате потери электронов в активных слоях хлоропластов, содержащих молекулы хлорофилла *a*, образуются электронные вакансии — дырки, которые стремятся поглотить электрон из любого источника. В процессе фотосинтеза таким источником является вода. При ее расщеплении наряду с положительными ионами водорода образуются отрицательно заряженные, несущие избыточный электрон ионы гидроксид-иона. Молекула хлорофилла *b* после поглощения кванта света передает возбужденный электрон через особую цепочку реакций молекуле хлорофилла *a*, а свою структуру восстанавливает за счет электрона гидроксид-иона. Гидроксид-ионы, потеряв избыточный электрон, взаимодействуют между собой, образуя перекись водорода, которая разлагается на воду и свободный кислород, уходящий в атмосферу.

Итак, при участии двух форм хлорофилла и двух фотохимических реакций в хлоропластах растений от воды к пиридиннуклеотидам и АТФ проходит «сквозной поток» электронов, приводимый в движение энергией света. Навстречу ему идет поток превращений углекислоты, поглощенной растением из воздуха, который целиком складывается из темновых реакций. Согласно представлениям американского ученого, лауреата Нобелевской премии М. Кальвина, молекула углекислоты присоединяется в процессе фотосинтеза к рибулезодифосфату (РДФ) — веществу, содержащему пять атомов углерода. Образующееся шестиуглеродное соединение распадается на две молекулы фосfogлицериновой кислоты, содержащие по три

атома углерода. Так, с самого начала превращений углекислота оказывается включенной в состав углеродной цепи в виде карбоксильной группы COOH .

Чтобы осуществить дальнейший синтез углеводов, белков и липоидов, необходимо частично восстановить углерод, т. е. вытеснить из карбоксильной группы атом кислорода, заместить его водородом. В этой реакции поставщиками водорода являются пиридиннуклеотиды, а снабжение энергией происходит за счет молекул АТФ. И те и другие образуются в результате фотохимических реакций расщепления воды. Так сливаются два шедших навстречу друг другу потока: превращений углекислоты, поглощаемой растениями из воздуха, и превращений воды, расщепляемой при участии солнечного света. В результате частично восстанавливается углерод, и по ходу различных цепочек превращений под влиянием специальных сложных рядов ферментов осуществляется синтез белков, углеводов и других сложных органических веществ. Суммарный результат процесса можно изобразить в таком виде:



(звездочкой обозначена молекула H_2O , находящаяся в состоянии возбуждения за счет энергии солнечного света, переданной хлорофиллом).

Чтобы завершить полный цикл фотосинтеза, на каждую молекулу углекислоты, усвоенную и включенную в сложные структуры, необходимо не менее четырех молекул восстановленных пиридиннуклеотидов и три-четыре молекулы АТФ. Поскольку для образования каждой такой молекулы нужен по крайней мере один квант энергии Солнца, на единичный цикл фотосинтеза расходуется минимум восемь квантов.

В книге «Путешествия Гулливера» Джонатан Свифт дал ядовитую сатиру на английскую Академию наук (Королевское общество), изобразив ее как сборище чудаков и умалишенных, занятых решением нелепых задач. Один из этих «чудаков» восемь лет созерцал зеленый огурец, запаянный в стеклянной банке, надеясь разрешить задачу улавливания солнечных лучей и их использования. Однако то, что 200 лет назад казалось верхом бессмыслицы,

примером бесполезной траты времени, в наше время стало одной из самых крупных и увлекательных проблем биологии.

Пройдет, вероятно, немного лет, и процесс фотосинтеза перестанет быть загадкой. Лежащие в его основе механизмы будут изучены, смоделированы и поставлены на службу человечеству. Наука вплотную приблизится к познанию одного из важнейших этапов возникновения и эволюции жизни на Земле.

За миллиарды лет существования Земли облик ее менялся непрерывно. Даже с того времени, как сформировались воздушная оболочка Земли — атмосфера, земная кора — литосфера, покрытая частично морями и океанами — гидросферой, Земля изменилась неузнаваемо. Этому способствовали с самого начала естественные процессы, развертывающиеся как в недрах Земли, так и на ее поверхности.

Движение материков и колебания уровня Мирового океана, процессы горообразования и опускания морского дна и участков суши, извержения вулканов и землетрясения, периодические наступления и отступления ледников, разрушение горных пород под влиянием ветров, колебаний температуры и работы воды — все эти постоянно и глобально действующие силы миллиарды лет преобразовывали облик нашей планеты.

По мере того как человек познает облик Земли и проникает в глубины ее истории, становится все более ясной непосредственная связь всех процессов, протекающих в земной коре, ее недрах и на поверхности, с деятельностью Солнца, с таинственной периодикой его активности. Более подробно говорится об этом в следующих разделах этой главы.

Возникшая на Земле жизнь, «питаясь» энергией солнечного света, по мере своего развития во все возрастающих масштабах изменяла, преобразовывала облик нашей планеты. Мириады живых существ в своей постоянной незаметной деятельности выступали как своего рода посредники между Солнцем и Землей, способствуя изменению лика последней.

Активная фотосинтетическая деятельность зеленых растений радикально изменила состав земной атмосферы. Углекислый газ, миллионы лет выделявшийся в атмосферу при извержениях вулканов и из трещин земной

коры, почти полностью был усвоен растениями, «связан» и использован для построения углеродных скелетов органических молекул. В настоящее время в атмосфере Земли его содержание не превышает 0,03%. Зато освобождающийся в процессе фотосинтеза молекулярный кислород стал одним из основных компонентов атмосферы — 20,9%, что послужило толчком для выхода жизни из океана на сушу, для эволюции органического мира. «В смысле создания свободной энергии, действенной энергии планеты основным является перевод лучистой энергии Солнца через живое вещество в свободный кислород, охватывающий всю поверхность планеты, дающий ей совсем особые, нигде вне ее не наблюдаемые свойства»¹.

Изменение состава атмосферы оказало громадное влияние на химический состав горных пород, на ход и направленность химических процессов в атмосфере, литосфере и гидросфере. Древняя атмосфера Земли была восстановительной благодаря присутствию в ней водорода, аммиака, метана и других простейших углеводородов. Выделение свободного кислорода наряду с потреблением растениями углекислоты, аммиака и углеводов сделало атмосферу окислительной. Взаимодействие кислорода с веществами литосферы и гидросферы привело к образованию окислов, кислот, солей, к изменению строения минералов и горных пород. В химических процессах стали доминировать окислительные реакции. Резкое изменение состава горных пород, как установлено геологами, произошло примерно 1,8—1,3 млрд. лет назад. Никакой другой причины, помимо деятельности живых существ, для столь радикального изменения облика Земли не существует.

Завоевание суши, постепенное эволюционное приспособление живых существ к экстремальным условиям, существующим на нашей планете: к гигантским давлениям в океанических безднах, к ледяному холоду Арктики и Антарктики, к вечному безмолвию горных вершин и разреженному воздуху высот — привело к формированию на Земле новой оболочки — биосферы, той области планеты, где существует живое вещество и проявляется его влияние. На суше это так называемая кора выветривания, толща осадочных пород, достигающая местами не-

¹ В. И. Вернадский. Очерки геохимии. Избранные сочинения, т. I, 1954, с. 180.

скольких километров в глубину. Это вся толща водных бассейнов Земли. Наконец, это тропосфера — приземной и приводный слой воздуха толщиной 12—18 км, в котором происходит непрерывное перемешивание воздушных масс.

Однако влияние жизни, биологических процессов можно уловить и в стратосфере, и в глубоких слоях Земли, пока недоступных для непосредственного проникновения живых существ. Так, возникновение на высоте около 30 км слоя озона было результатом накопления в атмосфере свободного кислорода за счет фотосинтеза. С другой стороны, некоторые горные породы (в том числе, видимо, и граниты) могут возникать в глубинах Земли при воздействии высоких температур и давлений на осадочные породы, содержащие остатки живых существ.

Размножение и гибель организмов на протяжении миллиардов лет обогащают постоянно формирующиеся на Земле осадочные породы, включающие продукты выветривания (частицы глины, песка, лёсса и т. п.), с остатками живых существ (скелетами, раковинами, особыми химическими соединениями). Погребенные в недрах Земли осадочные породы со временем превращаются в месторождения нефти, угля, торфа, горючих сланцев. Жизнедеятельность микроорганизмов, растений, а затем и животных (в меньшей степени) породила на поверхности суши особое образование — почву, в которой вещество литосферы подверглось сложным превращениям и вовлечено в постоянный круговорот жизни. Размножение морских колониальных организмов привело к появлению целых новых островов, атоллов, рифов и скал. Большой барьерный риф у северо-восточного побережья Австралии тянется на протяжении 2300 км и оказывает существенное влияние на направление морских течений, ветров — на весь комплекс природных условий на значительном участке земной поверхности.

Биосфера — это сложное соединение географических сред и планетарного живого вещества. В каждой географической зоне, каждом районе Земли одновременно с комплексом природных условий складывается и определенная сложная система организмов, постоянно и неразрывно связанных с неорганическими компонентами среды. В биосфере движение и взаимодействие вещества происходит не только в силу химических законов, но и под

влиянием жизнедеятельности организмов. «Несомненно, что энергия, придающая биосфере ее обычный облик... исходит от Солнца в форме лучистой энергии. Но именно живые организмы, совокупность жизни, превращают эту космическую энергию в земную, химическую и создают бесконечное разнообразие нашего мира. Это живые организмы, которые своим дыханием, своим питанием, своим метаболизмом, своей смертью и своим разложением, постоянным использованием своего вещества, а главное — длящейся сотни миллионов лет непрерывной сменой поколений, своим рождением и размножением порождают одно из грандиознейших планетных явлений, не существующих нигде, кроме биосферы. Этот великий планетарный процесс есть *миграция химических элементов в биосфере*, движение земных атомов, длящееся больше двух миллиардов лет согласно определенным законам»¹.

Человек — высший продукт эволюции биосферы. По мере роста могущества человеческого разума увеличивается численность особей вида *Homo sapiens* и в еще большей степени возрастают масштабы вмешательства человека в природу, его преобразующей деятельности. Человек вырубает и выжигает леса, на огромных пространствах наиболее плодородных земель искусственно насаждает и культивирует нужные ему растения, оберегая их от конкуренции со стороны более приспособленных диких растений — сорняков. Все большую часть суши человек занимает своими поселениями, строит шахты и открытые карьеры, электростанции, дороги и плотины, меняет русло рек, использует их воду для орошения и создания водохранилищ. Добывая из-под земли растущие количества нефти, угля, природного газа и сжигая их, он возвращает в биологический круговорот громадные количества углерода, погребенные в прошлые геологические эпохи, и в то же время в возрастающих масштабах загрязняет атмосферу, гидросферу и литосферу. Человек создает вокруг себя и для себя вторую, искусственную среду: заводы и фабрики, города, строит корабли, подводные лодки, воздушные лайнеры и космические корабли.

Пространство Земли, где так или иначе проявляется преобразующая деятельность человека, академик

¹ В. И. Вернадский. Геохимическая энергия жизни в биосфере. Избранные сочинения, т. V, 1960, с. 228.

В. И. Вернадский назвал ноосферой (от греческого слова «разум»). Но и в ноосфере человек использует в той или иной форме энергию Солнца. Все основные источники энергии, эксплуатируемые человеком (за исключением глубинного тепла Земли, которое еще почти не используется, и энергии атомного ядра, тайной которого люди овладели совсем недавно), имеют своим первоисточником энергию солнечного излучения.

Следовательно, и земная жизнь в целом, и человек как ее высшее творение используют и преобразуют солнечную энергию в процессе преобразования облика Земли, выступая в этом процессе как посредники между Солнцем и Землей.

Мы видим мир

Одно из основных свойств живых существ — способность реагировать на внешние воздействия, раздражимость. Без этого живой организм не может существовать. Не воспринимая внешние влияния, нельзя отличить врага от друга и своевременно принять меры для защиты. Живые организмы, более чувствительные к воздействию окружающей среды, имеют больше шансов выжить в ежедневной борьбе за существование. «Над каждым живым существом постоянно висит вопрос: „быть или не быть“, и сохраняет он свое право на жизнь только под условием — в каждое мгновение своего существования быть совершеннее своих соперников», — писал К. А. Тимирязев. Свойство раздражимости благодаря механизму естественного отбора закреплялось и прогрессировало в длинном ряду поколений.

Одним из самых древних, постоянных и привычных раздражителей, действующих на живые существа, являются солнечные лучи. Воспринимая влияние лучей Солнца, большинство земных организмов стремится навстречу им. Например, одноклеточные водоросли или амёбы под микроскопом собираются на освещенной половине поля зрения. Пресноводные гидры и некоторые водяные растения всегда располагаются у стенки аквариума, обращенной к окну. Зеленые растения тянутся вверх, к Солнцу. Известны и другие движения, совершаемые живыми организмами под влиянием влажности почвы, различных химических веществ, силы земного притяжения, колебаний

температуры среды и др. Такие движения организмов, совершаемые под воздействием внешнего раздражения, получили название тропизмов. Пример положительного гелиотропизма (гелиос — по-гречески Солнце) — свойство подсолнуха поворачивать свою головку вслед за Солнцем. Отрицательный гелиотропизм (фототропизм) проявляется у ночных бабочек, которые прячутся от дневного света. Комар анофелес — переносчик малярии — отрицательно реагирует на сильный свет, но положительно — на слабый.

Вернемся к явлению положительного гелиотропизма. Еще в 1693 г. английский ученый Дж. Рей предположил, что причиной выгибания стебля растения является неравномерное поступление к нему солнечных лучей. С освещенной стороны рост стебля замедляется, поэтому преобладание роста на затененной стороне приводит к повороту стебля в направлении Солнца. В 1832 г. швейцарский ботаник О. П. Декандоль сумел доказать, что в этом случае решающее значение имеет именно солнечный свет, а не тепло.

По мере эволюции животных организмов чувствительность их органов чувств становилась совершеннее. Способность организма реагировать на химические вещества (хемотропизм) помогла развитию органа обоняния — специализированных групп клеток, расположенных на пути вдыхаемого воздуха и улавливающих присутствие химических примесей — запахи. Из восприятия механических прикосновений возникла способность ощущать движения частиц воздуха — звук, сопровождающий движение дичи или приближение врага. Но с помощью этих органов чувств даже при самой высокой степени их совершенства нельзя точно определить направление, откуда доносятся звуки или запахи, расстояние до их источника. И уже совсем невозможно воспринять на расстоянии форму, величину предметов, их количество и порядок расположения. А между тем именно такая информация очень нужна организму.

Осязание, вкус и восприятие температуры должны были возникнуть раньше зрения — ведь они прямо передают информацию, важную для организма: предмет горячий или твердый, съедобный или нет. Зрительные образы нуждаются в истолковании, поэтому развитие органа зрения и функции зрения шло параллельно развитию мозга.

Решающий шаг вперед был сделан тогда, когда лучи Солнца стали восприниматься не как самостоятельные раздражители, а как рассеянные лучи, отраженные от окружающих предметов и несущие информацию о них. Зрение развилось, вероятно, из восприятия колебаний освещенности, из реакции на движущиеся по поверхности кожи тени — сигнал возможной и близкой опасности. Из простых чувствительных клеточек, лежащих на поверхности тела, путем длительной эволюции развился важнейший, наиболее связанный с мыслительной деятельностью орган чувств — глаз. «Глаз обязан бытием своим свету», говорил И. В. Гете — великий писатель и поэт, выдающийся естествоиспытатель.

По определению академика С. И. Вавилова, «глаз есть результат чрезвычайно длительного процесса «естественного отбора», итог изменений организма под действием внешней среды и борьбы за существование, за лучшую приспособленность к внешнему миру»¹. «Глаз в отношении энергии приспособлен не к самому Солнцу, а к солнечному свету, рассеянному от окружающих тел»².

Реакцию гелио- или фототропизма мы можем рассматривать как примитивную, зачаточную форму зрения, а глаз человека — как конечный этап эволюции важнейшей функции живого.

«Глаз» одноклеточного организма устроен весьма примитивно: обычно это простое глазное пятно — скопление красного или черного пигмента, окружающего чувствительный участок протоплазмы. Роль хрусталика порой играет просто-напросто зернышко крахмала. Конечно, такой простой и ничтожный по размерам аппарат не может дать отчетливого изображения. Светочувствительные органы дождевого червя, разбросанные по его поверхности, не приспособлены к восприятию изображений, а дают лишь ощущение света. При помощи зрительного углубления червь приблизительно определяет направление светящегося тела. Пигментные клетки нередко образуют углубление — «бокал», ограждающий зрительную клетку от попадания боковых лучей. Пользуясь таким зрительным аппаратом, приходится довольствоваться созерцанием лишь тех предметов, которые находятся прямо «перед

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 82.

² Там же, с. 108.

носом». Перемещение воспринимается, еслидвигающийся объект переходит из одного поля зрения в другое, последовательно раздражая зрительные клетки соседних глазков.

Зрительный орган моллюска представляет собой более совершенную конструкцию — полость с маленьким отверстием и внутренним светочувствительным слоем, от которого отходит нерв. В глазу скорпиона перед светочувствительным слоем имеется прозрачный шар. У головоногих и позвоночных наблюдается постепенный переход к человеческому глазу.

Глаза большинства рыб, выпуклые и снабженные круглым, а не уплощенным хрусталиком, воспринимают свет подобно широкоугольному объективу. Рыбы одинаково хорошо видят происходящее не только впереди, но и с боков и даже сзади. Некоторые глубоководные рыбы сами излучают свет с помощью специальных люминесцирующих органов, расположенных вблизи глаза. Такой «прожектор» очень полезен при отыскании пищи. А при опасности рыбы могут прятать его, закрывая специальными складками кожи.

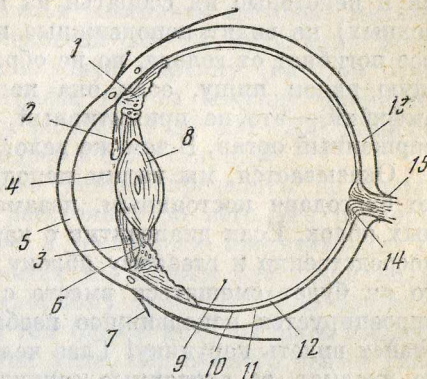
Глаз человека имеет форму почти правильного шара диаметром 24 мм. Снаружи глаз покрыт толстой белой оболочкой — склерой. Ее передняя прозрачная выпуклая часть носит название роговой оболочки, или роговицы. Позади роговицы расположена прозрачная чечевицеобразная линза — хрусталик. Между роговицей и хрусталиком, в передней камере глаза расположена непрозрачная для света радужная оболочка. Присутствие в ней пигмента придает окраску глазу. Пигмент один — меланин, а цвет глаз бывает различный — от бледно-голубого до черного. Цвет зависит как от количества пигмента, так и от места и характера его расположения. У голубоглазых людей (а также у коз, сиамских кошек) зерна темного пигмента расположены на задней стороне радужной оболочки и при отражении создают впечатление голубизны. Зерна меланина, рассеянные на передней стороне оболочки, делают глаза серыми, а по мере возрастания количества пигмента цвет глаз становится карим, а потом и черным.

Окраска радужной оболочки — наследственный признак, передача его потомкам подчиняется особым закономерностям. В центре оболочки имеется круглое отверстие — зрачок. Радужная оболочка играет роль диа-

фрагмы: она может сокращаться и расслабляться, изменяя величину просвета зрачка, т. е. диаметр попадающего внутрь глаза светового пучка. Внутренняя поверхность склеры выстлана сосудистой оболочкой, обеспечивающей питание всех частей глаза. Внутренний слой, выстилающий глаз изнутри, носит название сетчатой оболочки, сетчатки, или ретины. Он-то и воспринимает лучи света,

Рис. 5. Глаз человека в разрезе

- 1 — ресничная мышца;
- 2 — радужная оболочка;
- 3 — водянистая влага передней камеры глаза;
- 4 — зрачок;
- 5 — роговица;
- 6 — связка, поддерживающая хрусталик;
- 7 — конъюнктива;
- 8 — хрусталик;
- 9 — стекловидное тело;
- 10 — склера;
- 11 — сосудистая оболочка;
- 12 — сетчатая оболочка;
- 13 — центральная ямка;
- 14 — слезное пятно;
- 15 — зрительный нерв



проникающие внутрь глаза. Задняя камера глаза заполнена прозрачным стекловидным телом (рис. 5).

Таким образом, световой луч, попавший в глаз, проходит три прозрачные среды: роговицу, хрусталик и стекловидное тело. Все они преломляют свет, концентрируют его таким образом, что на светочувствительном слое получается четкое, а не расплывчатое изображение предмета, отражающего свет. Но ведь предметы могут находиться на различном расстоянии от глаза. Для ясного их видения необходим механизм изменения преломляющей силы глаза. Эту работу выполняет хрусталик. Посредством мускулов, расположенных вокруг хрусталика, может быть изменена его выпуклость, кривизна. Механизм, с помощью которого преломляющая сила хрусталика автоматически изменяется, обеспечивая четкое видение предметов, носит название аккомодации. Недостатки аккомодации (близорукость и дальновзоркость) можно исправить с помощью очков — стеклянных линз, дополнительно рассеивающих или концентрирующих лучи света.

Глаз полностью воспринимает только небольшой по размерам или далеко расположенный предмет, так как диаметр зрачка невелик, а на ярком свете он уменьшается еще больше. Обычно же глаз очень легко поворачивается в своей орбите, быстро обегая все точки рассматриваемого предмета, как бы «обшаривая» его. Поэтому возникающая на сетчатке картина дает представление о форме предмета, даже если он неподвижен. А вот лягушки и некоторые их собратья из класса амфибий (земноводных) не видят неподвижные предметы. Лягушка скорее погибнет от голода, но не обратит внимания на лежащую рядом пищу, если она неподвижна. А ведь глаз амфибий — это не примитивный «бокал», а довольно совершенный орган. В чем же дело?

Оказывается, мы видим неподвижные предметы только благодаря постоянным, незаметным движениям глазных яблок. Если диапозитив с картинкой прикрепить непосредственно к главному яблоку (с помощью присоски), то он будет смещаться вместе с глазом, а на сетчатку спроецируется неподвижное изображение. Человек перестанет видеть картинку! Глаз человека, рассматривающего предмет, за считанные секунды совершает миллионы внешне беспорядочных координированных движений. И в результате зрительные ощущения от отдельных участков предмета сливаются в мозгу в цельный образ.

Интересно, что в невесомости движения глазных яблок благодаря отсутствию силы тяжести совершаются гораздо легче, и острота зрения заметно возрастает. Это отмечали американские космонавты. Гордон Купер с высоты нескольких сот километров ясно видел трубы на домах в Тибете и грузовик на дороге в Мексике. Эдвард Уайт во время полета на корабле «Джемини» различал дороги, моторные лодки и даже волны, оставляемые ими. По его словам, Земля с орбиты «Джемини» видна была лучше, чем из кабины самолета, летевшего на высоте 13 км.

Слежение за движущимся предметом — автоматическое, бессознательное свойство глаза, его нельзя удерживать усилием воли. Это хорошо знают криминалисты, используя движение глазного яблока (оптокинетическую реакцию) для разоблачения мнимых слепых.

Глаз насекомого в большинстве случаев так же неподвижен, как и глаз лягушки. Однако ощущение дви-

жения в нем создается благодаря так называемому фасеточному устройству. Глаз человека представляет собой одну линзу и одну сетчатку. У насекомого глаз состоит из десятка тысяч крохотных линзочек. Под каждой — 6—8 зрительных клеток, расположенных звездочкой. Каждый из глазков воспринимает движущийся предмет отдельно, последовательно и в совокупности создается ощущение движения. Более того, фасеточное устройство повышает способность глаза различать световые мелькания. Если для глаза человека 20—24 мелькания в секунду уже сливаются в цельную картину (на этом основан принцип кинематографа, где за секунду сменяется 24 кадра), то глаз мухи различает до 300—350 отдельных, не сливающихся кадров в одну секунду!

Для организма важно уметь определять не только форму предмета, но и расстояние до него, его размеры. Получать не плоскостное, а трехмерное представление об окружающих нас предметах мы можем благодаря наличию двух глаз (бинокулярному зрению). Чем ближе к нам находится предмет, тем ближе должны быть сведены оси обоих глаз. Величина угла, образуемого осями глаз, степень конвергенции, точно характеризует расстояние до предмета.

Но так обстоит дело со зрением далеко не во всем мире животных. Только у человека и обезьяны оси обоих глаз при отсутствии конвергенции параллельны. У льва глазные оси образуют угол в 10° , у кошки $14-18^\circ$, у собаки — $30-50^\circ$, у оленя — более 100° , у жирафы — 140° , у зайца — даже 170° . Чем больше величина этого угла, тем труднее осуществить сведение осей глаз для одновременного рассмотрения предмета двумя глазами. Если глаза направлены в разные стороны так, что их поля зрения не соприкасаются, то, очевидно, трехмерное, стереоскопическое зрение невозможно. Поэтому зайцы лишены способности определять с помощью зрения расстояние до предметов, их глубину. И для собак мир в большой мере видится плоскостным, объем предметов и расстояние до них воспринимаются с трудом. В полной мере способностью к бинокулярному, трехмерному зрению обладают наряду с приматами все кошачьи, а также многие птицы — грифы, орлы, соколы и др.

Очень важное значение имеет также определение размера предмета, его величины. Один и тот же предмет по

мере удаления кажется нам все меньше и меньше. Это явление особенно легко наблюдать, глядя на уходящие вдаль телеграфные столбы. Очевидно, при оценке величины предмета мы должны невольно соотносываться с расстоянием до него. Имеет значение также наш прошлый опыт, наблюдение этого предмета вблизи. Работа по сравнению, анализу зрительных впечатлений, сопоставление с опытом прошлого осуществляется в нашем мозгу подсознательно.

Мозговые центры зрения постепенно вносят свои поправки в детали зрительных восприятий. Изображения предметов, возникающие на сетчатке наших глаз, обратны действительным, перевернуты. Ведь хрусталик, как самая настоящая линза, фокусирует и делает обратными изображения на сетчатке. Мы воспринимаем их в нормальном положении благодаря тому, что с первых месяцев жизни наш мозг, сопоставляя данные о предметах, полученные с помощью зрения и осязания, приводит зрительные образы в соответствие с их прототипами — предметами. Если с помощью специальных призматических очков еще раз перевернуть изображение мира на сетчатке, т. е. по существу вернуть его в нормальное положение, — мозг после некоторого усилия приспосабливается и к этому. Благодаря работе мозга человек, пользуясь одним глазом, может в известных пределах судить о расстоянии до предмета, получать правильное представление о его форме. Мозг, разум в сложной мозаике узоров, возникающих на сетчатке глаза, выбирает (путем анализа и синтеза, использования прошлого опыта) главное и второстепенное, изображение и фон. Глаза нуждаются в разуме, чтобы опознать предметы, локализовать их в пространстве. Но и мозг вряд ли мог бы развиваться без глаза, без информации об отдаленных предметах.

А теперь попробуем разобраться в самом сложном. Как возникает в сетчатке ощущение света? Полностью этот процесс еще не изучен, но основные принципы превращения светового раздражения в электрический импульс, бегущий по зрительному нерву в центры головного мозга, более или менее ясны.

Сетчатка глаза человека имеет десять слоев (рис. 6). Наружный слой, примыкающий непосредственно к сосудистой оболочке глаза, состоит из клеток, заполненных черным пигментом и совершенно непроницаемых для све-

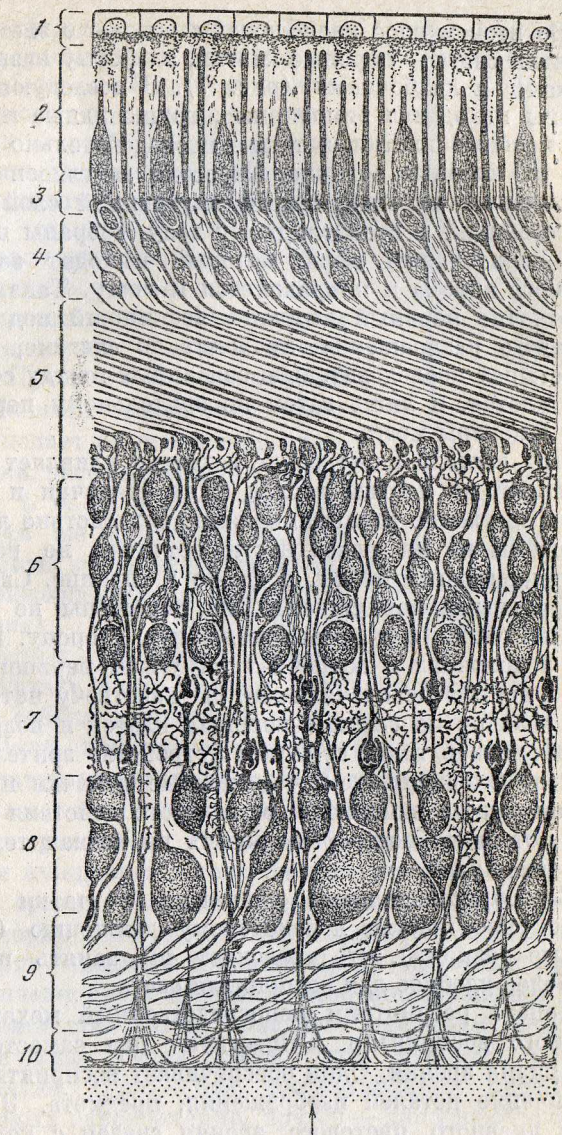


Рис. 6. Схема строения сетчатки глаза (по С. И. Вавилову)

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1 — пигментный слой; | 10 — внутренняя ограничивающая оболочка. Стрелкой |
| 2 — слой палочек и колбочков; | указано направление световых |
| 3 — 7 — зернистые слои; | лучей |
| 8 — ганглиозные клетки; | |
| 9 — слой первичных волокон; | |

та. Во втором слое расположены основные элементы восприятия света — нервные клетки, за форму названные палочками и колбочками (рис. 7). В последующих слоях сетчатки находятся биполярные, грушевидные и ганглиозные нервные клетки, а также последовательно соединяющие их нервные волокна. Отростки ганглиозных клеток, образующие десятый, самый внутренний слой сетчатки, прилегающий к стекловидному телу, собраны в один пучок — зрительный нерв, который выходит за пределы глазного яблока и направляется к мозгу. Таким образом, в сетчатке нервный импульс, возникший под влиянием светового раздражения, проходит по системе, состоящей из четырех последовательно связанных между собой нервных клеток, и лишь затем по зрительному нерву поступает в центры мозга.

При взгляде на строение сетчатки удивляет такой непонятный на первый взгляд факт. Палочки и колбочки, непосредственно воспринимающие воздействие лучей, расположены не на поверхности сетчатки, не на границе со стекловидным телом, а где-то в глубине. Своими чувствительными верхушками они обращены не навстречу лучам Солнца, а в противоположную сторону. Возникающие в палочках и колбочках импульсы нервного возбуждения двигаются сначала как бы навстречу потоку световых квантов по системе нервных клеток и волокон. Чем же объяснить такое странное устройство зрительного аппарата? Очевидно, тем, что нежные палочки и колбочки в этом случае защищены от прямого действия света, сохраняют способность реагировать на незначительное воздействие лучей.

Светочувствительные элементы сетчатки обладают также способностью к некоторому движению (ретиномоторные реакции), что позволяет им занять положение, наиболее удобное для восприятия света.

Теперь рассмотрим непосредственный механизм зрительного восприятия. Существуют два самостоятельных механизма зрения. Один обеспечивает восприятие цвета и различение деталей изображения, предмета. Этот механизм дневного, цветового, зрения связан с колбочковым аппаратом. Другой, отличающийся несравненно большей световой чувствительностью, дает только ощущение темноты и света. Он связан с палочковым аппаратом и называется сумеречным зрением.

На поверхности сетчатки более или менее равномерно расположено 130 млн. палочек. В центре сетчатки — в области так называемого желтого пятна и особенно центральной ямки (непосредственно напротив зрачка) находятся преимущественно колбочки — примерно 7 млн.

Такое распределение имеет особый смысл. Дневное зрение осуществляется в условиях поступления в глаз света сравнительно большой интенсивности. Пучок света, проходящий через суженный вследствие этого зрачок, попадает на небольшой участок сетчатки, расположенный в самом ее центре, т. е. на область желтого пятна. Здесь же находятся колбочки — элементы зрительного восприятия, приспособленные к видению в этих условиях.

У животных, лишенных способности различать цвета, желтое пятно отсутствует. Таковы кошка, собака, золотистый хомяк и многие другие животные. Лишь некоторые породы собак обнаруживают слабые зачатки цветового зрения. Колбочек в сетчатке собачьего глаза почти совсем нет. Собаки ведут свою родословную от сумеречных хищников (волков, шакалов), которые и не нуждались в совершенном аппарате дневного, цветового, зрения. Лошади, олени, овцы, свиньи различают некоторые участки спектра, например красный и зеленый, норки — желтый и синий. Среди животных лучше всего различают цвета обезьяны, особенно шимпанзе. Рыбы в большинстве также обладают цветовым зрением. В сетчатке глаза сокола, чайки, гуся, курицы — по два желтых пятна. Одно — для рассматривания предметов двумя глазами одновременно, другое — для удобства пользования одним глазом. Есть в глазу и слепое пятно, лишенное светочувствительных элементов. Это то место, где в глаз входит зрительный нерв, образующий сосок, хорошо видимый врачу-окулисту при осмотре глазного дна.

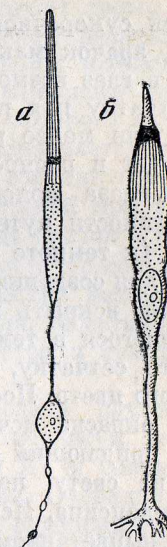


Рис. 7. Палочка (а) и колбочка (б) при увеличении в 1000 раз

При сумеречном зрении, в условиях слабой освещенности, зрачок максимально расширяется, чтобы пропустить в глаз возможно большее количество лучей. Падающая на сетчатку под различными углами, лучи освещают ее более или менее равномерно. Такой освещенности соответствует и распределение палочек по сетчатке. Способность глаза приспосабливаться к условиям различной освещенности путем изменения диаметра зрачка — адаптация (к темноте или свету) — имеет существенное значение для создания условий наилучшего видения.

Если вскрыть глаз животного, длительное время находившегося в темноте, и при слабом красном свете обнажить сетчатку, она окажется пурпурного или розового цвета. После непродолжительного пребывания на свету окраска исчезает, сетчатка обесцвечивается. Пигмент, придающий окраску сетчатке в темноте и исчезающий на свету, получил название зрительного пурпура, или родопсина. Исчезновение пигмента на свету было названо выцветанием пигмента. Зрительный пурпур, содержащийся в наружных члениках палочек, принимает самое активное участие в восприятии света.

Адаптация глаза к темноте — это прежде всего процесс восстановления зрительного пурпура, процесс, требующий для своего завершения около получаса. Спектр поглощения родопсина имеет максимум в области голубых лучей с длиной волны 5100 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Спектр поглощения родопсина совпадает со спектром светочувствительности палочек.

Родопсин — сложный белок, состоящий из собственно белка-опсина и активного центра — ретиналя. По некоторым данным, опсин — соединение белка с фосфолипидом, основной строительный элемент светочувствительных мембран, на его долю приходится 92—95% мембранных белков. Две светочувствительные мембраны образуют диск. А стопка таких дисков (иногда несколько десятков и даже сотен) образует наружный членик палочки.

Ретиналь — пигмент из группы каротиноидов — придает белку окраску. Его длинная молекула может изгибаться, приобретать разную геометрическую форму. Американский физиолог Дж. Уолд, удостоенный в 1967 г. Нобелевской премии за работу по фоторецепции, установил, что из всех возможных форм ретиналя только одна — цис-изомер — подходит к белковой части молекулы и участ-

вует в механизме восприятия света. Квант света, попавший на молекулу родопсина, вызывает распрямление изогнутого цис-ретиналя. Распрямившаяся молекула ретиналя отщепляется от опсина и запускает процесс нервного возбуждения, для развития которого свет уже не нужен. В темноте родопсин восстанавливается, но продукты его распада не могут просто соединиться вновь. Этот процесс протекает в несколько стадий при участии ферментов. По строению ретиналь очень близок к витамину А, из которого он образуется. Если с пищей в организм поступает недостаточное количество витамина А, нарушается процесс синтеза ретиналя, восстановления обесцвеченного пурпура, что проявляется в сумеречной, так называемой куриной слепоте.

Из колбочек глаза удалось выделить другой пигмент — йодопсин. Его спектральный максимум лежит в желто-зеленой области спектра (5550 \AA) и совпадает с максимумом чувствительности колбочек. Очевидно, йодопсин играет здесь ту же роль, что и родопсин в палочковом аппарате. Однако фотохимические превращения йодопсина изучены пока недостаточно.

Итак, процесс восприятия света, как установил Д. Уолд, начинается с фотохимической реакции, в ходе которой происходит изменение конформации (геометрической формы) и распад молекул зрительных пигментов, а затем возникает электрический импульс. Колебания электрического потенциала сетчатки при ее освещении удается зарегистрировать в виде характерной кривой электроретинограммы (рис. 8). Однако энергия, освобождающаяся при фотохимической реакции, недостаточна для возникновения электрического импульса и распространения волны возбуждения по нерву. Расчеты показывают, что необходимо усиление этого процесса приблизительно на 4—5 порядков.

Ученые Азербайджана во главе с Г. Б. Абдуллаевым получили данные, согласно которым в усилении фотоэлектрической реакции участвуют атомы селена. Этот «лунный» элемент, ближайший родственник серы, обладает полупроводниковыми свойствами и по своим оптическим характеристикам точно воспроизводит спектральную чувствительность глаза человека. Присутствие значительных количеств селена в сетчатке доказано. Даже однократное введение препарата этого элемента в организм значи-

тельно и длительно увеличивает световую чувствительность глаза.

Благодаря механизму цветового зрения мы воспринимаем окружающий мир во всем многообразии его цветов и окрасок. Каким же образом колбочки, имеющие примерно одинаковое гистологическое строение, могут «различать» не только интенсивность света, но и его качественные различия — цвета? Для объяснения этого явления

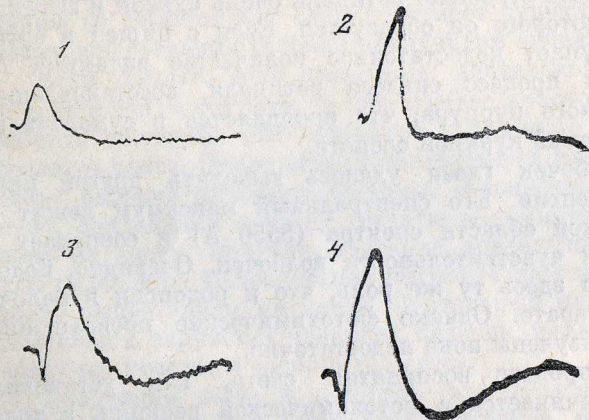


Рис. 8. Электроретинограмма при слабой (1) и сильной (2) вспышках света и на фоне введения в организм селена (3, 4)

предложено много гипотез. Великий исследователь природы М. В. Ломоносов первым высказал мысль о наличии в сетчатке разных цветочувствительных элементов. В исследованиях английского астронома Юнга и немецкого физиолога Гельмгольца эта идея приобрела форму научной теории. Ученые исходили из известного факта, что белый свет Солнца представляет собой смесь лучей разной длины волн (от 4000 до 8000 Å) и разной окраски — от красных до фиолетовых. Давно известно, что можно подобрать такие пары цветов солнечного спектра, которые при смешении дают белый цвет (например, желтый и синий, оранжевый и голубой). Такие пары цветов носят название дополнительных. Смешением двух цветов можно получить и другие промежуточные цвета. Основываясь на чисто физических представлениях, Юнг и

Гельмгольц предположили, что в сетчатке глаза имеются колбочки трех видов, обладающие максимальной чувствительностью в красной, зеленой и фиолетовой областях спектра. Каждый вид колбочек способен воспринимать лучи других длин волн, но с меньшей чувствительностью. Равномерное возбуждение всех трех видов колбочек дает ощущение белого цвета. Различные комбинации раздражений могут вызвать ощущение любого цвета солнечного спектра.

Теория Юнга — Гельмгольца при всей ее простоте и логичности долгое время не располагала прямыми доказательствами. Смелое предположение ученых подтвердили опыты, в которых удалось отвести электрические потенциалы от отдельных палочек и колбочек. С помощью электроретинографии было доказано существование трех видов колбочек, обладающих различной чувствительностью к световым лучам с разной длиной волны.

Еще одно убедительное доказательство существования трех различных видов колбочек представила медицина. Установлено, что до 8% мужчин и около 0,5% женщин страдают разными видами цветовой слепоты, называемой также дальтонизмом — по имени известного английского физика Дж. Дальтона, страдавшего наиболее распространенным дефектом цветового зрения — неспособностью различать красный и зеленый цвета. Существуют три формы дальтонизма, соответствующие выпадению функции каждого из трех видов колбочек. Описаны и комбинированные формы вплоть до полной цветовой слепоты. В каждом случае посмертно наблюдались недоразвитие либо дегенерация части или всего колбочкового аппарата.

Гены, ответственные за функцию цветового зрения, расположены в половой, так называемой X-хромосоме. У мужчин она одна. Наличие в ней дефектного гена ведет к дальтонизму. У женщин, как правило, вторая, не измененная X-хромосома маскирует дефект, и потому цветовой слепотой страдают преимущественно мужчины.

Каковы пределы чувствительности глаза к свету? Эволюция глаза шла в условиях солнечного освещения, поэтому максимальная энергия света, которую мог бы без ущерба воспринять глаз, ограничивается максимальной солнечной освещенностью: 0,01 кал/сек. Это соответствует свету лампы примерно в 200 тыс. свечей, располо-

женной на расстоянии 1 м от глаза. Таков верхний предел. А нижний палочковый аппарат столь чувствителен к свету, что размер этой чувствительности трудно даже представить. Согласно точным опытам, глаз, адаптированный к темноте, с широко раскрытым зрачком способен уловить и зарегистрировать от 5 до 14 квантов света в секунду. Таким образом, глаз по своей чувствительности превосходит все существующие оптические приборы и близок к физическому пределу чувствительности.

Спектр солнечных лучей весьма широк: он простирается от радиоволн до рентгеновских лучей, от бесконечно больших до бесконечно малых. Наиболее коротковолновые лучи — рентгеновские и почти все ультрафиолетовые — не достигают поверхности Земли. Из оставшегося диапазона солнечного спектра наши глаза способны уловить и воспринять лишь сравнительно узкий участок — от 4000 до 8000 Å. Чем же обусловлен такой выбор?

Лучи Солнца с длиной волны короче 2900—2950 Å задерживаются слоем озона в атмосфере и практически не достигают поверхности Земли. Естественно, что существование глаза, приспособленного к восприятию более коротких лучей, было бы биологически бесцельным. Более того, ультрафиолетовые лучи, способные разрушать сложные органические вещества и убивать живые клетки, в больших дозах могут вызвать ожог глаз — сильную боль, слезотечение. Сетчатка глаз человека чувствительна к лучам и короче 4000 Å, но эти лучи в нормальном глазу до сетчатки не доходят. Хрусталик играет роль предохранительного светофильтра, поглощая лучи короче 4000 Å и даже часть фиолетовых и синих лучей. Благодаря этому сетчатка глаза может работать, не подвергаясь опасности разрушения.

Таким образом, граница видимости лучей со стороны коротких волн (около 4000 Å) биологически вполне оправдана.

Все же ультрафиолетовые лучи с длиной волны до 3200 Å и даже еще короче воспринимаются глазом как лучи голубоватого оттенка. Строго говоря, они не являются, таким образом, невидимыми. Однако коротковолновая граница восприятия ультрафиолетовых лучей у разных людей различна. Видеть удастся лишь интенсивные потоки излучения, и сетчатка глаза воспринимает, собственно, не ультрафиолетовые лучи как таковые, а вызванную

ими голубоватую флуоресценцию (свечение) хрусталика. Биологического, информационного значения такое свечение не имеет. Впрочем, муравьи и пчелы видят в ультрафиолетовых лучах, и такое своеобразное зрение им, очевидно, полезно.

Перейдем к другой границе видимости солнечного света, со стороны длинных волн. Здесь за пределами видимого света (7600 Å) лежат так называемые инфракрасные лучи, излучаемые нагретыми телами. При температуре тела человека максимум излучения лежит в области 9—10 мкм; с 1 см² поверхности тела, в том числе и с внутренней поверхности глаза, излучается примерно 12 кал/сек, т. е. больше, чем попадает в глаз на прямом солнечном свете. Если бы эти лучи воспринимались сетчаткой, то «глаз внутри засветился бы миллионами свечей. По сравнению с этим внутренним светом потухло бы Солнце и все окружающее. Человек видел бы только внутренность своего глаза и ничего больше, а это равносильно слепоте»¹. Таким образом, и лучи, лежащие на длинноволновой границе видимого света, не могли бы в случае их восприятия глазом существенно обогатить наши представления о мире. Следовательно, пределы спектральной чувствительности глаза закономерны.

Однако в природе встречаются случаи восприятия инфракрасных лучей. Их видят термоскопические глаза некоторых кальмаров. Гремучие змеи отыскивают добычу в кромешной темноте по тепловому излучению. Но эти исключения лишь подтверждают правило.

Глаз приспособлен к рассеянному свету Солнца. Чувствительность его охватывает возможный диапазон интенсивности солнечных лучей. Переменная диафрагма — радужная оболочка — позволяет приспособливаться к различным условиям облучения. Линза с переменной кривизной (хрусталик) обеспечивает четкое видение предметов, лежащих на разных расстояниях от нас. Благодаря особенности строения пределы восприятия лучей глазом ограничены биологически целесообразным диапазоном. Сетчатка защищена от вредных лучей. Ее спектральная чувствительность совпадает с максимумом кривой энергии солнечного излучения. Все это — результат приспособле-

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. М., Изд-во АН СССР, 1956, с. 114.

ния глаза к солнечному свету. «Глаз нельзя понять, не зная Солнца. Наоборот, по свойствам Солнца можно в общих чертах теоретически наметить особенности глаза, какими они должны быть, не зная их наперед»¹.

Горячее дыхание светила

Древо жизни на Земле зародилось, окрепло и продолжает расти и развиваться под благодатными солнечными лучами. Познакомимся же поближе с источником этих лучей, попробуем понять секреты той щедрости, с которой Солнце освещает и обогревает наш уголок необъятного космоса.

Размеры Солнца огромны: его диаметр 1400 тыс. км, т. е. в 110 раз больше, чем у Земли. Современная наука позволяет вычислить даже такой немалый груз, как вес Солнца. Эту величину ($2 \cdot 10^{27}$ т) довольно трудно представить себе. Если бы Солнце каждую секунду теряло по 1 млрд. т своей массы, то и в этом случае половину своей массы оно потеряло бы только через 30 млрд. лет. Благодаря своей огромной массе и, следовательно, большой силе тяготения Солнце удерживает на разных расстояниях от себя девять больших планет, несколько тысяч маленьких (так называемых астероидов), множество комет и других, более мелких небесных тел, образующих единую солнечную систему.

Среди планет солнечной системы Земля имеет средние размеры: самая маленькая планета — Меркурий — в 18 раз меньше Земли, а гигант Юпитер — в 1345 раз больше. Расстояние Земли от Солнца — 149,5 млн. км. Только благодаря громадным размерам и ослепительной яркости Солнца мы видим его на небосклоне в виде сверкающего диска, а не крохотной точки. Астроном Юнг писал по этому поводу: представьте себе ребенка с такой длинной рукой, что он может коснуться Солнца. Он прикоснулся к Солнцу и обжегся, но скончался бы в глубокой старости, прежде чем почувствовал боль, так как нервное раздражение распространяется, согласно Гельмгольцу, со скоростью около 30 м в секунду.

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце, с. 127.

Если бы звук мог распространяться через межпланетное пространство, то это расстояние он преодолел бы за 14 лет; аппарат, летящий со скоростью 800 км/ч, — за 21 год. А луч света, который в это мгновение влетает в ваше окно, покинул поверхность Солнца всего 8 минут тому назад. Скорость света, достигающая 300 тыс. км/сек, — непревзойденный рекорд в материальном мире.

Если на границе земной атмосферы перпендикулярно лучам Солнца расположить площадку в 1 см^2 , то на нее каждую секунду будет падать около 2 кал солнечной энергии (более точно — 1,93 кал). Не менее половины этой энергии поглощается и рассеивается атмосферой. Солнечная энергия обуславливает испарение воды с поверхности водоемов и суши, а значит, и циркуляцию облачности, и выпадение осадков. В круговороте воды играют роль и величина поверхности водоемов, и характер почв, и рельеф суши, но главная, активная роль принадлежит, бесспорно, Солнцу.

Не менее важно влияние Солнца на циркуляцию воздушных масс в атмосфере. Нагрев поверхности суши и водоемов солнечными лучами приводит к повышению температуры и уменьшению удельного веса прилегающих к ним воздушных слоев, вызывает конвекционные токи воздуха, перемещения воздушных масс из областей высокого давления в области низкого давления. Циклоны и антициклоны, бризы, муссоны и пассаты, тропические ураганы и пустынные самумы — все это различные способы расходования энергии солнечных лучей.

На Землю поступает всего одна двухмиллиардная часть лучей Солнца. Энергии, излучаемой Солнцем за 1 сек ($3,7 \cdot 10^{26}$ дж), достаточно для того, чтобы растопить и довести до кипения слой льда вокруг Земли толщиной более 1000 км. Это ежесекундное излучение превышает то количество энергии, которое использовано человечеством за всю его историю. Каждые трое суток Солнце дарит Земле больше тепла и света, чем можно было бы получить при сжигании всех запасов угля и нефти, всех лесов планеты. И это излучение продолжается не секунду, не сутки, а на протяжении миллиардов лет.

Только один источник энергии способен поддерживать нужную температуру в солнечной печи в течение десятков миллиардов лет — это термоядерные реакции слияния

легких ядер в более тяжелые. Атомный вес водорода 1,008, а гелия 4,003. Значит, ядро гелия тяжелее ядра водорода почти в четыре раза. Если возможно слияние четырех ядер водорода в ядре гелия (а этот процесс осуществляется во время взрыва водородной бомбы), то как объяснить уменьшение массы вещества? Ведь атомный вес четырех ядер водорода — 4,032.

Свет, подобно другим видам энергии, долгое время считавшийся чем-то нематериальным, в XX в. получил, наконец, права гражданства, как особая разновидность материи, столь же фундаментальная, как вещество. Первым шагом к этому выводу стало блестящее открытие русского физика П. Н. Лебедева, установившего в 1899—1909 гг. материальность светового луча, его способность оказывать давление на тела. Затем Эйнштейн доказал, что превращение массы и энергии происходит одновременно и параллельно; для всех видов энергии справедливо соотношение $E=mc^2$, где E — количество энергии, m — масса вещества, c — скорость света.

Таким образом, кажущуюся потерю массы при слиянии ядер водорода в ядро гелия можно объяснить тем, что выделяющаяся в процессе слияния энергия «уносит» эту массу в виде квантов излучения. О том, как велика энергия, выделяющаяся в результате синтеза ядер, можно судить по таким данным: 1 г массы водорода соответствует 20 триллионам ($20 \cdot 10^{12}$) ккал тепла. Для получения такого количества энергии нужно сжечь 20 тыс. т каменного угля.

Общее количество энергии, выделяемой Солнцем, колоссально лишь потому, что размеры светила громадны. Но если подсчитать, сколько энергии выделяется на каждый килограмм его массы, то окажется, что удельная теплоотдача Солнцем (4,4 кал/кг) существенно меньше, чем теплоизлучение человеческого тела (22 кал/кг).

В глубинах гигантского термоядерного котла Солнца плотность вещества в 11,4 раза превышает плотность свинца, но оно остается газообразным. Точнее, это плазма — четвертое состояние вещества, при котором ядра атомов, лишенные электронных оболочек, упаковываются более плотно. Лучистая энергия, освобождающаяся в центральных областях Солнца, — это рентгеновское излучение, рожденное ядерными реакциями и столкновениями движущихся атомов и электронов. Бесчисленное множество

зигзагов, поглощений и новых излучений совершает пучок рентгеновских лучей, прежде чем вырваться из солнечных недр к поверхности. И хотя он распространяется со скоростью света, его путешествие по извилистому маршруту к поверхности занимает в среднем около 20 тыс. лет. На этом пути рентгеновское излучение постепенно преобразуется. После каждого зигзага длина волны излучения несколько увеличивается, пока рентгеновские лучи не превращаются почти полностью в ультрафиолетовый и видимый свет.

В результате бесчисленного количества поглощений и излучений энергия достигает, наконец, такого сравнительно разреженного слоя солнечной атмосферы, который уже не поглощает полностью идущий из глубин лучистый поток, хотя сам еще светится довольно ярко. Этот слой солнечной атмосферы, называемый фотосферой, толщиной около 300 км образует видимую глазом в телескоп блестящую поверхность Солнца, четкие контуры солнечного диска. О более высоких слоях атмосферы мы можем судить с помощью специальных приборов, либо в периоды солнечных затмений, когда яркий солнечный диск закрыт Луной. В эти краткие моменты удается обнаружить по самому краю Солнца тонкую полоску розового сияния с отходящими от нее во все стороны розовыми выступами различной формы — протуберанцами. Это так называемая хромосфера. Далее, на расстоянии иногда нескольких радиусов Солнца распространяется бледно-серебристое сияние — солнечная корона.

Вся фотосфера Солнца состоит как бы из отдельных зерен, гранул, величиной 700—2000 км, которые разделены между собой темными промежутками. Продолжительность жизни гранулы — всего 3—5 мин.

На видимой поверхности Солнца можно часто наблюдать и другие интересные образования — солнечные пятна. Двести лет назад астрономы полагали, что темные пятна — это вершины солнечных гор, возвышающиеся над океаном жидкой лавы во время отливов. На рубеже XIX в. английский астроном Уильям Гершель высказал предположение, что пятна представляют собой участки твердой холодной поверхности Солнца, видимые в просветы между сверкающими раскаленными облаками. Сейчас мы знаем, что пятна лишь относительно темны и холодны: на ярком солнечном диске они кажутся темными, так как

их температура на $1100\text{--}1200^\circ\text{K}^1$ ниже температуры фотосферы. Размеры солнечных пятен различны: в среднем их диаметр $7\text{--}15$ тыс. км, а наиболее крупные достигают в поперечнике $50\text{--}100$ и даже 230 тыс. км. Пятна размером больше 40 тыс. км видны на Солнце невооруженным глазом. Возникают пятна на уровне фотосферы. Но дно пятна, образующее тень, располагается в среднем на $1000\text{--}1400$ км глубже его краев. Таким образом, пятно представляет собой воронку, стенки которой видны как полутень. Крупные пятна более глубоки (см. рис. на вклейке). Вещество Солнца в пределах пятен находится в медленном вихревом движении, причем направление вращения в северном полушарии по часовой стрелке, в южном — против. Холодная материя поднимается в области пятна и растекается вдоль поверхности, постепенно прогреваясь.

Самое интересное в солнечных пятнах — наличие колоссальных магнитных полей ($2\text{--}5$ тыс. гаусс). Величина их в тысячи раз превышает напряженность общего магнитного поля Солнца. Силовые линии располагаются так, как будто пятно представляет собой полюс гигантского прямого магнита с осью, направленной в глубь Солнца. Чем больше пятно, тем выше напряженность его поля. Источником этих полей служат электрические токи чудовищной силы — до 10 тыс. млрд. ампер. Струи горячего ионизированного газа выносят сгоревшее ядерное топливо в наружные слои, а охлаждающийся газ переносит свежие порции горючего к центру «котла». Вследствие вращения Солнца газовые потоки закручиваются в вихри, которые отрываются, как кольца дыма, поднимаются к поверхности и, пробиваясь сквозь фотосферу, образуют пары солнечных пятен. И пятна, и сопровождающие их мощные магнитные поля — проявления гигантских термоядерных процессов, происходящих в глубинах Солнца. Газ внутри пятен движется вдоль магнитных силовых линий и охлаждается за счет расширения.

Пятна на Солнце наблюдаются главным образом по обе стороны экватора, чаще всего группами. Головное и хвостовое пятна группы обычно наиболее велики по раз-

¹ Величина 1 градуса по шкале Кельвина совпадает с величиной 1 градуса по Цельсию. Нулевая точка соответствует температуре -273°C (абсолютный нуль).

мерам и имеют противоположную полярность. В северном и южном полушарии головные пятна групп всегда имеют противоположную полярность. Количество, размеры и длительность существования пятен на Солнце подчиняются своеобразным циклическим закономерностям. Самый короткий цикл имеет продолжительность 27 суток и связан с вращением Солнца вокруг своей оси. Наибольшее значение и известность имеет 11 -летний цикл. Годы «спокойного Солнца», в течение которых пятен наблюдается очень мало, сменяются годами максимальной солнечной активности. С началом нового 11 -летнего периода полярность пятен в северном и южном полушариях Солнца меняется на противоположную. Поэтому полный цикл солнечной активности составляет 22 года. Астрономы различают и более длительные циклы солнечной активности; их продолжительность $78\text{--}80$, 190 лет и более.

С солнечными пятнами, с ритмом их образования и исчезновения связаны и другие проявления солнечной активности — протуберанцы, факелы (гигантские светящиеся облака, имеющие более высокую температуру, чем окружающая фотосфера), вспышки. Они возникают всегда в непосредственной близости от пятен, где перепады напряженности магнитных и связанных с ними электрических полей достигают максимальной величины. Во время вспышки гигантские массы солнечного вещества со скоростью $1000\text{--}3000$ км/сек и более выбрасываются из хромосферы. Вспышки возникают очень быстро — в течение $10\text{--}30$ сек; они носят характер взрыва. Яркость вспышки в момент ее максимума может быть в три-четыре раза выше яркости фотосферы; солнечный диск на ее фоне кажется темным. Температура солнечного вещества в месте вспышки достигает $10\text{--}15$ тыс. градусов, а ионизация атомов хромосферы увеличивается в 10 раз.

Вспышки — источники мощного ультрафиолетового и рентгеновского излучений, радиоволн, а также больших потоков заряженных и быстро летящих частиц солнечного вещества, чаще всего протонов с энергией 100 млн. эв и больше. Протонные потоки, возникающие во время хромосферных вспышек на Солнце, представляют очень серьезную опасность для космонавтов, покидающих плотные слои земной атмосферы. Самая толстая оболочка космического корабля пока не в состоянии защитить людей от воздействия мощного излучения, от опасности лучевой

болезни. В связи с этим очень большое значение имеет прогнозирование солнечных вспышек. Работы в этом направлении уже ведутся на протяжении нескольких лет. По величине, количеству и характеру пятен, по крутизне перепадов напряженности их магнитных полей ученые предсказывают (и не без успеха) не только время появления, но и мощность предполагаемых вспышек.

Однако события, происходящие на Солнце, непосредственно касаются не только космонавтов. Вся наша Земля — не что иное, как гигантский космический корабль, летящий со скоростью 30 км/сек сквозь бездну космического пространства. И хотя воздушная оболочка — атмосфера — надежная защита земной поверхности, все же раскаты космических бурь, гигантские потрясения, охватывающие Солнце, доносятся и до нее всего за 8 минут, а солнечная корона столь широка, что, быть может, соприкасается с земной атмосферой.

Если вспомнить, каковы масштабы явлений, происходящих на Солнце в периоды максимума его активности, легко понять, что ни расстояние, ни толстая воздушная оболочка не защищают полностью Землю от воздействия солнечных вихрей. Потоки невидимых излучений, колоссальные облака солнечного газа вторгаются тогда в верхние слои атмосферы. Наши органы чувств под покровом толстого воздушного одеяла остаются в неведении о штормах, прокатывающихся по окраинам атмосферы. Но неистовство этих бурь находит отражение во множестве грозных явлений. 12 ноября 1960 г. астрономы увидели ослепительный взрыв на Солнце. Всего через шесть часов гигантское облако солнечного водорода (16 млн. км в поперечнике) столкнулось с Землей (скорость его движения в момент столкновения равнялась примерно 6,5 тыс. км в 1 сек). Вторжение посланников солнечной вспышки вызвало целую цепь сильнейших потрясений. Стрелки компасов заметались. На протяжении многих часов не действовала дальняя радиосвязь: ионизация воздуха настолько усилилась, что ионосфера перестала отражать радиоволны. Телетайпы отстукивали несусветную тарабарщину. Пилоты потеряли связь с контрольными станциями и радиомаяками. Красные сполохи полярных сияний просвечивали даже сквозь облака и были видны не только за Полярным кругом, но и в средних широтах. На севере электрические лампочки в домах мигали, как во время

неистовой пурги, хотя погода стояла ясная, безветренная. Хаос продолжался больше недели. Конечно, такие вспышки бывают не часто, но в годы максимума солнечной активности опасность нарушений связи вполне реальна.

Воздействие солнечной активности на земную жизнь не ограничивается моментами хромосферных вспышек. Циклоны, бури, смерчи нередко возникают в периоды максимумов активности Солнца. Первые упоминания о солнечных пятнах встречаются в древних китайских рукописях II—IV вв. н. э. Наши предки считали появление пятен на Солнце божьим знамением, сулившим стихийные бедствия, войны, эпидемии. В Никоновской летописи 1371 г. отмечается: «Того же лета бысть знамение на Солнце, места черны по Солнцу, аки гвозди...» Наводнения, грозы, ураганы, засухи, проливные дожди и другие сугубо «земные» явления причинно связаны с мерным пульсом жизни Солнца. В 1957 г., когда солнечная активность была высокой, согласно данным метеорологов, на Земле произошло 110 больших катастроф типа наводнений, засух и т. п. В 1961 г. Солнце было относительно спокойнее, и таких катастроф отмечено 30.

В 20-х годах нашего столетия советский ученый А. Л. Чижевский поставил перед собой цель проследить причинную связь между событиями на Солнце и земной жизнью. Он обратился к летописям, к монастырским хроникам, дневникам путешественников, запискам астрономов, к данным статистики, медицины, ботаники и других наук. Столь разнообразные источники помогли ему выявить удивительные закономерности: холера, чума, дифтерия и другие инфекционные болезни активизируются в годы, совпадающие с максимумами солнечной активности или непосредственно следующие за ними. Вмешательство человека — проведение вакцинаций, успешное лечение и изоляция больных — нарушили природную цикличность эпидемий (рис. 9). С колебаниями солнечной активности связаны также циклические изменения количества лейкоцитов в крови, содержания в ней сахара, солей калия и кальция, свертываемости крови, сдвиги электрического потенциала кожи людей, периодические колебания плодovitости коров. Даже толщина колец на срезах деревьев, характеризующая скорость нарастания их живой массы, обнаруживает 11-летнюю периодичность (см. рис. на вклейке).

С точки зрения механизмов влияния сдвигов солнечной активности на земную биосферу следует различать две группы факторов.

1. Вспышки и другие гигантские катаклизмы, характерные для периодов максимума солнечной активности, оказывают возмущающее воздействие на верхнюю атмо-

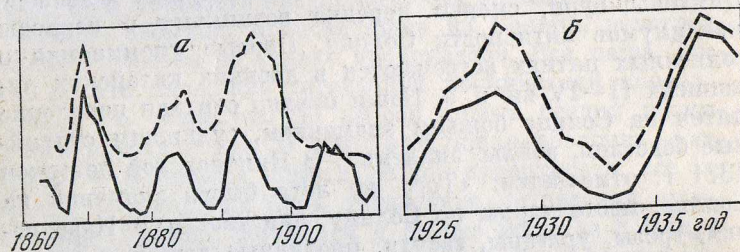


Рис. 9. Зависимость заболеваемости дифтерией (а) и острыми сердечными заболеваниями (б) от солнечной активности

Пунктирная линия — заболеваемость, сплошная — солнечная активность, вертикальная линия — начало противодифтерийных прививок

сферу Земли и в сочетании с некоторым увеличением количества излучаемой Солнцем энергии довольно существенно нарушают глобальную схему циркуляции воздушных масс и воды в атмосфере. В результате в разных районах земного шара увеличивается или, наоборот, резко уменьшается количество осадков, возрастает количество наводнений, засух и других стихийных бедствий.

Когда солнечная активность относительно мала, циклоны, несущие влагу с Атлантики, проносятся над Средиземным и Черным морями, Кавказом и Казахстаном. При этом орошаются и зеленеют степи, покрываются растительностью пустыни, наполняются водой Балхаш и Аральское море, а Каспий, питаемый на 80% Волгой, мелеет. В лесной полосе беднеют водой реки, высыхают болота. Там стоят суровые малоснежные зимы, летом жарко. На севере укрепляется вечная мерзлота. Но вот солнечная активность возросла, «дорога циклонов» сместилась к северу и прошла над Францией, Средней Россией. Сохнут степи, мелеют Балхаш и Арал, переполняются водой Волга и Каспий. Леса между Окой и Волгой заболачиваются, выпадают обильные снега, зимой часты оттепели, а лето дождливое. Солнечная активность достигает мак-

симума — и циклоны несутся над Шотландией, Скандинавией, над Белым и Карским морями. Степь превращается в полупустыню, мелеет Волга. На севере тают льды, отступает вечная мерзлота, тундровые озера мелеют.

Изменение закономерностей круговорота воды и циркуляции воздушных масс вторично вызывает разнообразные сдвиги в биосфере: интенсивность нарастания годичных колец древесины, активность размножения различных сапрофитных микроорганизмов почвы, насекомых (саранчи, клопа-черепашки), грызунов (полевых мышей, ондатры на юге, леммингов на севере), урожайность основных сельскохозяйственных культур обнаруживает более или менее четко выраженную 11-летнюю периодичность. В разных районах земного шара максимумы и минимумы кривой урожайности не совпадают. Массовое размножение грызунов приводит к развитию эпизоотий, а затем и эпидемий чумы, туляремии, безжелтушного лептоспироза, инфекционного гепатита и т. п., которые в эпоху отсутствия эффективных средств борьбы также периодически повторялись. Колебания водного режима рек, обусловленные все теми же глобальными нарушениями циркуляции, служили причиной периодического ухудшения условий водоснабжения, а с ними — и условий распространения водных эпидемий холеры, брюшного тифа, дизентерии. Тот же механизм лежит в основе периодических увеличений численности комаров, москитов, клещей и вспышек переносимых ими заболеваний — малярии, желтой лихорадки, клещевых энцефалитов и т. п.

2. Однако не все проявления реакции биосферы на колебания солнечной активности развиваются за счет периодических сдвигов в системе атмосферной циркуляции и выпадения осадков. Наряду с описанным существует и механизм более прямого, непосредственного влияния солнечных вспышек и генерируемого ими коротковолнового излучения на многие биологические процессы. Так, непосредственно после возникновения вспышки на Солнце статистически достоверно увеличивается число уличных автомобильных катастроф в крупных городах и общее число смертельных исходов, существенно возрастает число нервно-психических заболеваний, точнее, случаев их обострений, частота инфарктов миокарда и гипертонических кризов у сердечно-сосудистых больных.

По статистическим данным, полученным советскими

учеными в Свердловске, около 73% случаев инфаркта происходит именно в дни магнитных бурь. Частота инфарктов в эти периоды возрастает вдвое, а число внезапных смертей от разных причин — в 2,6 раза. Причем чем сильнее буря, тем значительнее учащение острых, внезапных заболеваний и смертельных исходов. Магнитные бури сопровождаются также резким кратковременным снижением количества лейкоцитов и протромбинового индекса (показателя свертываемости крови), электрического потенциала кожи человека и т. п. Причем все эти события развиваются даже раньше, чем потоки солнечного вещества достигают земной орбиты. Приходится допускать существование механизма непосредственного воздействия электромагнитных возмущений, возникающих в результате солнечных вспышек, на человека, на его нервную и сосудистую систему, на биосферу в целом. Такие возмущения, распространяющиеся, по-видимому, со скоростью света, могут иметь электрическую, магнитную, электромагнитную природу; это может быть радиоизлучение Солнца, изменение солнечного излучения в оптическом диапазоне, корпускулярное излучение Солнца. Под их влиянием, очевидно, возникают изменения, непериодические вариации электрического и магнитного поля Земли, низкочастотные и высокочастотные поля и т. п. Однако вся многозвенная цепь причинно-следственных связей и отношений, протянувшаяся из недр Солнца к глубинам клеток земной биосферы, еще не прослежена во всех деталях.

Бесспорно лишь, что влияние Солнца на земную жизнь еще значительнее, многообразнее и сложнее, чем можно было бы думать. Горячее дыхание светила подчиняет своему ритму жизнь на поверхности одной из его планет. Какова природа этих волн солнечной активности, воли времени, на которых покачивается хрупкая лодка жизни? Какие таинственные силы приводят в движение солнечный маятник? Поиски ответа на эти вопросы ведутся давно.

На рубеже XX столетия английский ученый Э. Браун предположил, что возникновение пятен — вихрей в солнечном веществе — связано с притяжением планет, вызывающим приливы на Солнце. Браун, в частности, отметил, что 11-летний ритм солнечной активности почти совпадает с периодом обращения Юпитера — самой массивной планеты солнечной системы, равным 11,86 года. В своем первоначальном виде эта гипотеза была недостаточно убе-

дительно: ведь приливообразующая сила Меркурия, гораздо меньшего по размерам, но расположенного значительно ближе к Солнцу, превышает влияние Юпитера в семь раз. Однако колебаний солнечной активности, соизмеримых с периодом обращения Меркурия (около трех месяцев), не обнаружено.

Существенный шаг вперед был сделан после того, как с помощью электронно-вычислительных машин рассчитали положение и движение общего центра тяжести солнечной системы в целом. Благодаря вращению планет вокруг Солнца с различной угловой скоростью этот общий центр тяжести смещивается и не совпадает с центром Солнца. Хотя общая масса планет не достигает и пятисотой доли массы Солнца, но они в силу своего положения на разных расстояниях от центрального светила влияют на положение центра тяжести. Американский астроном П. Джозе вычислил, что Солнце само вращается вокруг этого гравитационного центра с периодом 178,77 земных лет, а это соответствует длительности одного из циклов солнечной активности.

Расчеты американских математиков К. Вуда и Р. Вуда показали, что сложная орбита движения центра тяжести солнечной системы регулярно (при определенном расположении планет вокруг Солнца) претерпевает резкие сдвиги, «скачки», отделенные друг от друга уже знакомым нам интервалом в 11,08 лет! Весьма вероятно (хотя окончательно еще не доказано), что эти «рывки» влияют на движение масс вещества в недрах Солнца, а через них — и на скорость термоядерных реакций. Отсюда — уже один шаг до объяснения причин колебаний солнечной активности, происхождения пятен, вспышек, выбросов солнечного вещества и т. п. Влиянием планет, по данным этих ученых, можно объяснить и смену магнитной полярности пятен, и широту их возникновения на солнечном диске, и существование других солнечных циклов. Следовательно, не только Солнце влияет на разнообразные стороны бытия планет, но имеет место и обратное, по-видимому, также существенное влияние. Близость к нам Солнца, его роль в нашей жизни, его беспокойный характер делают необходимым постоянное внимательное наблюдение за ним. Не только подсчет ударов солнечного пульса, но и проникновение в движущие им механизмы — вот достойная задача для науки нашего времени!

Природные источники энергии — нефть, уголь, газ, торф, а также энергия рек, водопадов, ветров, используемые человеком, являются по существу концентраторами солнечных лучей.

Накопленная в течение миллиардов лет энергия Солнца расходуется во все возрастающем количестве. Пройдут сотни, а может быть, только десятки лет, и запасов земных источников энергии окажется недостаточно для удовлетворения нужд человечества. Правда, уже созданы промышленные установки, использующие энергию распада тяжелых атомных ядер; не за горами создание методов управления термоядерными процессами синтеза легких ядер, подобными тем, которые совершаются в недрах Солнца. Познавание и использование этих источников помогут разрешить энергетическую проблему на Земле.

Но есть еще один постоянный, неиссякаемый источник энергии — солнечный свет. Ежегодно Земля получает около $6 \cdot 10^{17}$ квт·ч лучистой энергии. Это в 20 тыс. раз превышает потребность человечества в энергии на сегодняшний день. На долю каждого жителя Земли в сутки приходится свыше 1 млн. квт·ч. энергии солнечного света. Это богатство практически не используется, за исключением ничтожной доли, усваиваемой растениями. Большая часть солнечных лучей, попав на Землю, отражается в мировое пространство, поглощается горными породами, поверхностными слоями морских вод, постройками городов, превращается в тепло.

Люди уже приступили к прямому освоению и использованию солнечной энергии. Из нескольких возможных направлений наиболее простым кажется использование полупроводниковых солнечных батарей, непосредственно преобразующих лучистую энергию Солнца в электрическую. Работают солнечные батареи на принципе фотоэлектрического эффекта, открытого в 1888—1889 гг. русским физиком А. Г. Столетовым: кванты излучения выбивают с поверхности некоторых металлов электроны. Когда такой фотоэлемент включен в цепь, в ней под влиянием света возникает электрический ток. Чем больше энергия квантов света, тем шире круг металлов, пригодных для получения фотоэлектрического эффекта. Основная масса лучистой энергии Солнца (около 97%) сосредоточе-

на в области длин волн 0,3—3 мкм. Превращать эту энергию в движение выбитых электронов способны фотоэлементы из кадмия, кремния, бора и некоторых других металлов высокой чистоты.

Батарей, коэффициент полезного действия которых составляет 13—15%, ныне применяются при полетах автоматических станций к Марсу, Венере, при исследовании поверхности Луны. Использование этих батарей для удовлетворения земных энергетических нужд пока невозможно: слишком уж дороги их основные элементы — металлы-полупроводники. Однако не исключено, что в дальнейшем, по мере увеличения КПД солнечных батарей до 20—25% и существенного снижения стоимости, станет возможным более широкое их использование. Чтобы этот способ использования энергии Солнца приобрел серьезное промышленное значение, необходимо будет покрывать полупроводниковыми пленками или пластинами большие пространства суши, а для выравнивания суточных колебаний выработки энергии включить в систему аккумуляторы (топливные элементы, способные переводить электроэнергию в химическую и обратно с КПД, близким к 100%). Для таких «полей» фотоэлементов требовались бы специальные защитные пластмассовые кассеты. Кроме того, они нуждались бы в постоянном квалифицированном уходе и надзоре. Это делает солнечную электростанцию такого типа нерентабельной (в ближайшем будущем).

Другой проект предполагает вынести гигантскую батарею солнечных фотоэлементов площадью 9×9 км в космос, на высоту 30 тыс. км над определенной точкой земной поверхности. На такой высоте количество лучей, проходящее на 1 см^2 поверхности, а значит, и выработка электроэнергии вдвое выше, чем на Земле. Такая электростанция не зависит от погодных условий, не нуждается, следовательно, в выравнивании суточных колебаний выработки энергии и в постоянном уходе.

Но особенности проекта создают другие трудности. Постоянный ток, отводимый от батареи, по кабелю передается на искусственный спутник Земли, где специальное устройство трансформирует его в высокочастотное излучение, удобное для транспортировки энергии на Землю без проводов. Там совершается новое ее превращение — в переменный ток удобной для потребителя частоты.

Для улавливания лучистой энергии Солнца и ее пре-

образования непосредственно в электрическую может быть использован также термоэлектрический метод. Суть этого метода в следующем: две проволоки из различных металлов или сплавов, соединенные обоими концами, образуют термопару; если один из спаев нагреть, то в цепи потечет слабый электрический ток. Чем больше разница температур спаев, тем больше сила тока. Соединив параллельно несколько отдельных термопар, получим батарею термоэлементов. Если зачернить один из спаев батареи и подставить его лучам Солнца, такая система станет вырабатывать электричество непосредственно из солнечных лучей. А если на зачерненный спай будет падать не рассеянное излучение Солнца, а пучок лучей, предварительно сконцентрированный линзой или вогнутым зеркалом — рефлектором, то разница температур спаев может быть доведена до одной-полутора тысяч градусов. Соответственно возрастет и выработка электроэнергии.

Задумываясь об энергетике будущего, о необходимости широкого использования солнечной энергии, ученые серьезно рассматривают и другие возможности, еще вчера относившиеся к области чистой фантастики. Так, академик Н. Н. Семенов полагает возможным осуществить, а затем и использовать в промышленных масштабах химическую систему, способную моделировать процесс фотосинтеза, накапливать солнечную энергию в виде энергии химической связи атомов органических соединений. Основания для такого смелого предположения Н. Н. Семенов видит в открытии ученых М. Е. Вольпина и А. Е. Шилова, осуществивших синтез аммиака и гидразина (фиксацию азота воздуха) при обычных температурах и давлении.

Промышленный способ получения аммиака протекает при высоких температурах и давлениях. В клубеньках же бобовых растений бактерии осуществляют фиксацию азота в природных условиях. Этот процесс осуществляется микробами с помощью ферментных белков. Молекулы ферментов громадны. Но непосредственно осуществляет реакцию небольшая активная группа атомов, содержащая ионы ванадия или молибдена. Вольпин и Шилов показали, что гидроокись ванадия фиксирует азот с КПД, близким к 100%. Четыре атома ванадия, переходя из двухвалентного в трехвалентное состояние, дают достаточно энергии для образования молекулы гидразина, а в несколько иных условиях — аммиака.

Однако задача решена лишь наполовину. Модель биологического процесса усвоения азота должна предусматривать и механизм восстановления ванадия в двухвалентное состояние: реакция будет идти только в этом случае. По аналогии с живым организмом для этой цели следовало бы использовать солнечную энергию. Если работы, ведущиеся в этой области, окажутся плодотворными, можно будет наладить искусственный фотосинтез в промышленных масштабах. На огромных пространствах энергетических полей будут размещены кассеты с водным раствором взаимодействующих веществ и с непрерывным выходом продуктов реакции — богатых энергией соединений азота, углерода, водорода и кислорода. Производительность таких полей может вдвое-вчетверо превысить эффективность работы природных фотосинтезирующих машин-растений. Но и это — только планы, проекты.

А каковы реальные возможности сегодняшнего дня? Они связаны в первую очередь с решением задачи сбора и концентрации солнечной энергии. Честь открытия такого способа принадлежит, очевидно, Архимеду. Древние источники сообщают, что более двух тысяч лет назад, в 212 г. до нашей эры, защищая родной город от нападения римлян, Архимед вывел население Сиракуз на стены города, вооружил их зеркалами и, сконцентрировав все их зайчики в одну точку, сжег римский флот. Так ли это было в действительности — сказать трудно, но идея сама по себе родилась в древности. Эффективность такого способа использования энергии Солнца сильно зависит от расстояния до объекта, приговоренного к сожжению. Чтобы поджечь сухое дерево на расстоянии 30 м, нужно вогнутое зеркало диаметром 3 м. Но если увеличить расстояние до 1 км, диаметр зеркала нужно увеличить до 500 м.

Вряд ли кому-нибудь придет в голову заняться таким делом в наши дни. Но американский физик Дж. Пирс считал, что чаша современного стадиона — весьма удобное место для экспериментов подобного рода и что небольшие болельщики могут попросту сжечь неудобного судью. Нужно только предварительно запастись кусками картона с наклеенной на них фольгой и потом одновременно направить все солнечные зайчики на жертву.

Но если сконцентрировать солнечный зайчик для того, чтобы плавить металлы, получится солнечная печь. Гелио-

печи, работающие во Франции, Испании, США, Индии, Алжире и других странах Африки, способны плавить металлы, кварц при $1500-2000^{\circ}$ и более. На Пиренеях сооружена гигантская установка с 10-метровым параболическим зеркалом, собранным из 3500 маленьких стеклянных зеркал. В солнечном зайчике огромного зеркала, имеющем диаметр 50 мм, температура достигает 3400°C ; это позволяет в течение 1 часа выплавлять 60 кг стали. Конечно, есть более дешевые способы плавки стали, но в солнечной печи получается особая сталь; она совершенно свободна от загрязнений и примесей, неизбежных при других методах плавки. Такой металл годен для самых ответственных специальных изделий.

Еще более крупные гелиопечи позволят в будущем довести температуру до 4700° , а количество выплавляемого металла — до нескольких тонн. Теоретический предел температуры в таких печах — 5700° : невозможно путем концентрации лучей достичь температуры, более высокой, чем температура источника — в данном случае Солнца. Чтобы достичь более высоких температур, нужно использовать искусственный источник излучения — вольтову дугу.

Большие возможности улавливания и использования энергии Солнца есть в нашей стране. В Средней Азии на 1 км^2 поверхности падает в полдень поток лучистой энергии, равный по мощности Днепрогэсу. Южные районы страны — республики Средней Азии, Казахстан, Закавказье, Крым — в основном безлесные районы. Если удовлетворить потребность населения этих мест (более 50 млн. человек) только в горячей воде для бытовых нужд за счет энергии Солнца, то удалось бы сэкономить ежегодно более 3 млн. т угля. Но реальна ли эта задача?

Определенный ответ на этот вопрос дают исследования ученых Физико-технического института Академии наук Узбекской ССР, где работает крупный отдел гелиофизики. Разработанные там проекты уже вошли или входят в жизнь. Вот некоторые из них. Крыша-котел позволяет получать воду с температурой $60-70^{\circ}$, а в случае нужды и более высокой (для бытовых нужд, обогрева дома) и даже аккумулировать тепло для использования ночью и в пасмурную погоду. Плоские водонагреватели конструкции узбекских гелиофизиков словно черепицей покрывают крыши дома. Изготовлены они из зачерненного сна-

ружи рифленого металла, покрытого стеклом для получения «парникового эффекта», «горячего ящика». (Поглощая энергию видимого света, Земля, металл и т. п. частично излучают в более длинноволновой инфракрасной области. Стекло, задерживая это излучение, препятствует отдаче поглощенного тепла.) Внутри водонагревателей циркулирует вода. Если прибегнуть к двойному остеклению, удастся поднять температуру воды выше 70°C . Та же система летом может быть использована для охлаждения жилых помещений.

Складная солнечная кухня-зонт пришлась по вкусу чабанам, геологам, изыскателям, строителям газо- и нефтепроводов. Кухня легко превращается в зонт со стулом, а ночью — в палатку, стоит лишь пристегнуть брезент.

Конструкция бытового солнечного холодильника позволяет без затраты электроэнергии поддерживать температуру порядка $+2, +4^{\circ}\text{C}$. Зачерненная поверхность генератора нагревается (благодаря двойному остеклению) до $100-110^{\circ}\text{C}$, и в нем из поглотителя (хлористого кальция) выделяются пары аммиака. Под давлением в 18—20 атмосфер они поступают в концентратор и в сжиженном виде накапливаются в промежуточном резервуаре — ресивере. Ночью генератор охлаждается, давление паров в нем падает. Аммиак из ресивера испаряется и охлаждает внутренность холодильника, а надежная термоизоляция помогает сохранить низкую температуру и днем.

В солнечной сушилке воздух, прогоняемый между разогретыми Солнцем зачерненными листами металла, нагревается до $60-80^{\circ}\text{C}$, а затем поступает в камеру, куда закладываются для сушки фрукты. Сухой горячий воздух отнимает у них влагу и выходит наружу. Трудно представить себе более простую конструкцию. А между тем она обладает очень важными преимуществами. В отличие от сушки на воздухе процесс в солнечной сушилке идет несравненно быстрее, и качество сушеных фруктов оказывается выше. Кроме того солнечный метод позволяет избежать загрязнения фруктов копильным дымом.

На принципе «горячего ящика» работают и простейшие опреснительные установки. Конденсируясь на внутренней поверхности стекла, влага стекает в специальные резервуары. В южных районах нашей страны с помощью таких установок можно с 1 м^2 остекленной поверхности получать 4—5 литров дистиллированной воды в сутки.

Отличный способ улавливания и накопления солнечной энергии — соляные бассейны. С глубиной в них увеличивается концентрация солей. Одновременно возрастает плотность воды, ее удельный вес (что препятствует перемешиванию слоев) и поглощение солнечных лучей. Поэтому самый глубокий, самый соленый и плотный слой воды оказывается и самым горячим. При глубине соляного бассейна около 1 м температура придонного слоя может достигать $90-95^{\circ}\text{C}$. Накопленную энергию можно извлекать, превращая ее в пар низкого давления или отводя нагретую соленую воду в теплообменник. В последнем случае нижний горячий слой воды во избежание перемешивания следует отделить прозрачной пленкой. Устройство бассейна на берегу моря делает этот способ накопления солнечной энергии чрезвычайно простым и дешевым. Небольшие соляные бассейны могут круглосуточно обеспечивать жилища горячей водой. Более крупные и глубокие бассейны могут аккумулировать тепло, необходимое в прохладное время года. Использование вместо соленой воды жидкого натрия позволит увеличить аккумуляцию энергии Солнца на 30—35%.

Непосредственное использование энергии Солнца для нужд человека в наше время находится еще в зачаточном состоянии. Однако стремительное развитие энергетики, гелиофизики и полупроводниковой техники дает основание рассчитывать, что эра широкого использования чистой солнечной энергии не за горами, что человек научится экономно, по-хозяйски использовать это великое богатство — неиссякаемый поток солнечного света.

О природе света

Все, что говорится в этом разделе, имеет прямое отношение не только к видимому свету, но и к его невидимым соседям по спектру электромагнитных волн — законы геометрической и физической оптики одинаковы для всего спектра.

Первые, самые простые представления о свете возникли у людей в результате наблюдения. Любой источник света — пламя костра, свечи или свет фонаря — дает тень. Чем ближе к источнику света непрозрачный предмет, тем больше размер его тени, очертания которой всегда совпадают с контуром предмета. Такого рода наблюдения позволили сформулировать закон прямолинейного распространения света в однородной сфере (в данном случае — в воздухе).

Находя блестящие кристаллы минералов, научившись полировать металлы, люди обратили внимание на отражение света, образование так называемых солнечных «зайчиков». В III в. до н. э. великий геометр Древней Греции Эвклид в своей книге «Оптика» так описал закон отражения света: независимо от характера отражающей поверхности, природы и силы света, угол, под которым луч отражается от зеркала, равен углу падения луча.

Если на пути луча оказывается предмет с плоской гладкой поверхностью, то отраженный луч, изменив направление, останется тем же пучком света. Если поверхность, с которой встретился поток лучей, сферическая вогнутая (т. е. близкая к внутренней поверхности шара), то отраженные от нее лучи соберутся в одной точке, соответствующей центру шара, — фокусе. Наоборот, если поверхность предмета близка к наружной поверхности шара, то отраженные от нее лучи будут двигаться расходящимся пучком (как если бы они исходили опять-таки

из центра шара). Во всех этих случаях мы имели дело с отражением. Но если освещенный Солнцем предмет имеет неправильную, шероховатую поверхность (что и бывает чаще всего), то к каждой точке этой поверхности падающие лучи подойдут под разным углом. Соответственно и отразятся эти лучи под такими же углами. Этот вид отражения света носит название рассеяния.

Какая-то часть рассеянных лучей попадет в наш глаз, и это будет означать, что мы увидели предмет, от поверхности которого эти лучи отразились. Правда, каждый из нас неоднократно видел своими глазами даже не отраженный, а падающий мимо луч света. Солнечный луч, прошедший сквозь окно, или луч киноаппарата в темном зале виден потому, что он проходит не через идеальную среду, а сквозь воздух. Мириады пылинок, танцующих в нем, рассеивают часть света, и какая-то доля рассеянных лучей попадает в наш глаз и дает нам право утверждать, что мы видим проходящий мимо луч. Но если пучок света проходит через прозрачную камеру, воздух которой освобожден от пылинок, то мы увидим его только перед входением в камеру и после выхода. Внутри же он невидим.

Наблюдая прохождение солнечных лучей из воздуха в спокойную и прозрачную воду, рассматривая предметы в воздухе и под водой, люди познакомились с явлением преломления света на границе двух прозрачных сред. Опустите в стакан с водой чайную ложку. Вам покажется, что ложка сломана, искривлена и что излом совпадает с поверхностью воды. Когда же ложка вынута из воды, вы убедитесь в своей ошибке. Видимость излома на границе двух сред объясняется тем, что лучи, отраженные от подводной части предмета, выходя в воздух, изменяют свое направление, преломляются, а лучи, отраженные от надводной части, не испытывают такого преломления.

Луч Солнца, входящий в комнату через оконное стекло, изменяет свое первоначальное направление дважды. Сначала он преломляется на границе воздух — стекло, в толще стекла идет под углом к своей прежней траектории и, наконец, на границе стекло — воздух подвергается обратному преломлению. В итоге этого двойного поворота луч лишь несколько смещается (разумеется, если стекло не слишком толстое, и обе грани, поверхности его параллельны), не меняя первоначального направ-

ления. Поэтому сквозь стекло мы видим предметы там, где они находятся на самом деле.

Зато попытка оценить на глаз глубину реки или озера, расстояние до дна обычно дает ошибочные результаты. Толщина прозрачного слоя здесь несравненно больше, и соответственно больше кажущееся смещение предметов, расположенных на дне. Для глаза, смотрящего прямо вниз, ошибка составляет примерно четверть действительного расстояния: дно кажется нам ближе, чем в действительности.

В силу преломления солнечных лучей в атмосфере мы видим восход светила несколько раньше, а заход — чуть позже, чем это имеет место в действительности. Когда мы видим, что нижний край Солнца коснулся горизонта, на самом деле оно уже зашло.

Первое упоминание о свойстве преломления света на границе двух прозрачных сред содержится в трудах древнегреческого философа Аристотеля (IV век до н. э.). Птолемей (II век н. э.), изучая преломление света небесных светил на границе атмосферы, пришел к неправильному выводу о пропорциональности угла преломления углу падения. Закон преломления света математически был сформулирован в 1630 г. французским физиком и философом Р. Декартом: соотношение углов преломления и падения зависит от состава сред, образующих границу раздела, и определяется формулой $\sin \alpha / \sin \beta = n$, где α — угол падения луча; β — угол преломления; n — постоянная величина, характеризующая преломляющие свойства граничащих сред, — показатель преломления.

Законы распространения, отражения и преломления света, составляющие сущность так называемой геометрической оптики, были выведены на основании наблюдений и простых опытов. Но эти законы по существу ничего не говорят о физической природе света, его происхождении, источниках получения.

Зрительные образы характеризуются прежде всего яркостью и цветом. Насыщенность окраски, цвета зависит от примеси белого цвета, который как бы «разбавляет» основной цвет. Но и яркость, и цвет — понятия субъективные. Физический смысл яркости света, если отвлечься от субъективности восприятия, обусловлен интенсивностью излучения энергии светящимся телом, источником — плотностью светового потока, исходящего из единицы по-

верхности источника. Распространяясь во все стороны, световые лучи попадают на другие поверхности, лишённые собственного излучения, и освещают их. Освещённость поверхности — ещё одна объективная физическая характеристика — зависит как от яркости источника света, так и от расстояния до него. Поскольку лучи от источника распространяются по всем направлениям прямолинейно, на поверхность падает тем больше лучей, чем ближе к источнику она располагается. Расчёты и измерения показали, что освещённость поверхности обратно пропорциональна квадрату расстояния до источника.

Что касается цвета, то И. Ньютон в 1665—1666 гг. впервые перевёл субъективные качества цвета на объективный, точный язык меры, числа, физического закона. Пропустив через отверстие в ставне окна пучок солнечных лучей на трехгранную стеклянную призму, он получил на экране разноцветное, радужное изображение отверстия. Подобные опыты ставились и до Ньютона. Но величие гения в том и состоит, что он умеет по-новому взглянуть на старые, известные многим факты, дать им более глубокое истолкование. Ньютон пришел к выводу, что стеклянная призма разлагает белый солнечный свет на простые составные цвета. Как проверить это предположение? Может быть, выделить у радужного веера призмы один простой луч, например красный, и снова пропустить его через другую призму? Опыт был поставлен, и оказалось, что нового разложения цветов не произошло. Следовательно, выделенные призмой из белого цвета отдельные лучи действительно простые. После смешения разделенных призмой лучей можно снова получить исходный белый цвет. Свой вывод Ньютон сформулировал так: «Белизна и все серые цвета, между белым и черным, могут быть составлены из цветов, и белый солнечный цвет составлен из всех первичных цветов, смешанных в должной пропорции»¹.

Пока все цветные лучи распространяются одним общим пучком, мы их не различаем, воспринимаем как белый цвет, который кажется нам простым. Но когда они преломляются в стеклянной призме, или в капельках вла-

ги после дождя в атмосфере, или в луже около автомобильной стоянки, покрытой радужной пленкой бензина, каждый цветной луч преломляется по-своему, сильнее или слабее. Призма как бы разворачивает компоненты белого луча в виде цветного веера. Это явление в оптике носит название дисперсии.

В веере лучей, выходящих из стеклянной призмы, порядок цветов тот же, что в радуге: красный цвет сменяет оранжевый, желтый, зеленый, далее идет голубой, синий и фиолетовый цвета. Мнемоническая фраза «Каждый охотник желает знать, где сидит фазан» помогает запомнить этот порядок. Из лучей, входящих в состав солнечного света, зеленые, синие и фиолетовые преломляются сильнее, чем красные, оранжевые и желтые. Поэтому первый луч Солнца при восходе зеленый или синий, так же как и последний, прощальный луч заходящего Солнца. Однако зеленый луч виден только при очень чистом и спокойном однородном воздухе, когда вплоть до горизонта отсутствуют конвекционные восходящие токи в атмосфере. Поэтому лучше всего наблюдать зеленый луч, когда Солнце встает из спокойного моря.

Пространственное разделение простых цветов дало в руки ученых первый объективный признак, лежащий в основе восприятия цвета. Другой классический опыт Ньютона раскрыл еще более удивительные свойства света. Когда ученый на стеклянную пластинку помещал линзу с очень небольшой выпуклостью, а затем освещал ее белым светом, вокруг точки соприкосновения линзы с пластинкой появлялось несколько концентрических радужных колец. Еще более удивительную картину он обнаружил после того, как осветил линзу одним из простых лучей (красным, синим и др.). В этом случае вокруг точки соприкосновения линзы со стеклом образовались концентрические светлые (красные, синие) и черные кольца. Чем дальше от центра, тем теснее прилегали кольца друг к другу. Измерив радиусы черных колец, Ньютон установил, что они относятся друг к другу, как квадратные корни из целых четных чисел: 2, 4, 6, 8 и т. д.

В этом опыте удивительным и необъяснимым было наличие черных колец, несмотря на равномерное освещение линзы падающим светом, что давало основание предположить существование какой-то скрытой периодичности свойств светового потока. Необходимым условием появле-

¹ И. Ньютон. Лекции по оптике. Цит. по: С. И. Вавилов. Исаак Ньютон. М., Изд-во АН СССР, 1961, с. 84.

ния обнаруженных Ньютоном колец было наличие тонкого зазора между стеклом и линзой. Ньютон рассчитал, что отношение толщин зазора для светлых (красных, синих и др.) и темных (черных) колец соответствует последовательным целым числам (1, 2, 3, 4 и т. д.). Для разных простых лучей ширина колец, так же как и ширина зазора, различна. Последняя может служить лучшей количественной оценкой простого цвета, чем показатель преломления, величина которого зависит от преломляющей среды. Величина, соответствующая ширине первого зазора между стеклом и линзой, получила позднее название длины волны данного простого луча λ . Волны лучей видимого света имеют очень малую длину — миллионные доли миллиметра и меньше. Наименьшая она у фиолетовых лучей, наибольшая — у красных. Но об этом подробнее — в специальном разделе, посвященном цвету.

Современник Ньютона астроном Рёмер определил другую характеристику света — его скорость. Согласно расчетам, скорость света в вакууме составляет 300 тыс. км/сек. Самые последние измерения дали для этой важнейшей физической константы значение $299.792.456,2 \pm 1,1$ м/сек. В космическом пространстве и в пустоте скорость света одинакова для лучей всех длин волн. В веществе скорость света, наоборот, зависит от длины волны. Именно поэтому происходит разложение света Солнца при прохождении через стеклянную призму. Скорость света обратно пропорциональна показателю преломления среды, т. е. в известной степени зависит и от свойств среды.

Есть еще одна важная характеристика света, на которую свойства вещества не влияют. Это так называемая частота колебаний. Чем меньше длина волны, тем больше ее частота, т. е. количество колебаний в единицу времени. Частота световых колебаний $\nu = c/\lambda$, где c — скорость света; λ — длина волны. Для оранжевого цвета, например, с длиной волны 6000 Å имеем: $\nu = 0,5 \cdot 10^{15}$ гц. Очевидно, именно частота в наибольшей степени характеризует то качество лучей, которое воспринимается человеком как ощущение цвета.

Воззрения на природу света развивались по мере прогресса науки. Первое общее представление о свете пытался сформулировать Декарт. Описывая общую механическую картину мира, Декарт предположил, что свет представляет собою мгновенную передачу давления от ис-

точника света через эфир — среду тонкого строения, заполняющую все мировое пространство. В отличие от Декарта голландский ученый Х. Гюйгенс представлял себе распространение света как процесс упругих колебаний мирового эфира, без быстрого перемещения его частиц. Однако волновая теория света Гюйгенса была недостаточно разработана. Ее дальнейшему развитию помешала популярность выдвинутой Ньютоном теории корпускулярной природы света.

Ньютон предполагал, что в процессе излучения света нагретое тело отдает часть своего вещества, частицы которого (корпускулы) несутся прямолинейно во все стороны с огромной скоростью, вызывая попеременные разрежения и сжатия эфира. Этим он пытался объяснить образование описанных выше колец. Ньютон не противопоставлял свою теорию волновой, но его последователи и ученики превратили корпускулярную теорию в антипод волновой. На протяжении почти 200 лет в науке господствовала корпускулярная теория света. Однако к концу XIX в. в физике накопилось немало фактов, объяснить и понять которые можно было только исходя из признания волновой природы света.

Прежде всего это относится к явлению дифракции света. Встречающиеся в природе волны способны при определенных условиях огибать препятствие, заходить в область тени. При этом, чем меньше размер препятствия, тем легче огибает его волна. Когда длина волны и размер препятствия становятся соизмеримыми, волна как бы «не замечает» преграды. Способность волн огибать препятствия и получила название дифракции волн. Отсутствие дифракции света в обыденных наблюдениях может иметь следующее объяснение: либо свет — процесс не волновой, а корпускулярный (частицы, как известно, движутся прямолинейно), либо длина волны света столь мала, что наблюдаемые предметы неизмеримо велики по сравнению с нею.

Эту проблему можно решить лишь опытным путем. Глаз человека перестает различать предметы, если величина их меньше десятых долей миллиметра. Лупа, а затем микроскоп в десятки, сотни раз повысили возможность глаза различать предметы. Однако увеличение больше, чем в 1—1,5 тыс. раз, уже не повышает разрешающую способность глаза. Наличие предела разрешения —

это и есть искомое нами доказательство дифракции света и, следовательно, его волновых свойств.

Другое доказательство волновой природы света связано с опытом Ньютона — образованием радужных колец. Если от двух источников колебаний бегут волны, то частицы колеблющегося тела участвуют в обоих колебательных процессах. Если частота колебаний и, следовательно, длина волны одинаковы, происходит странное на первый взгляд явление: на поверхности среды, например воды, в некоторых местах частицы колеблются особенно сильно. Между этими местами волнение частиц ослаблено или совершенно отсутствует. Это явление, получившее название интерференции, происходит в результате наложения волн друг на друга. В точках встречи волн в одинаковых фазах (например, двух гребней или двух впадин) они взаимно усиливают друг друга, дают максимум эффекта. Между областями максимумов, где сталкиваются волны, находящиеся в противоположных фазах (например, гребень и впадина), из-за взаимного уничтожения волн образуются минимумы эффекта. Кольца Ньютона, радужная окраска пленок бензина или масла, мыльных пузырей — все это частные случаи интерференции световых волн.

В начале XIX в. английский физик Т. Юнг и французский физик О. Френель в своих работах доказали волновую природу света. Юнг истолковал явление цветных пленок с позиций интерференции, высказав мысль о том, что свет представляет собой поперечные колебания. Френель разъяснил сущность дифракции. Учитывая явления дифракции и интерференции, ученые сумели точно вычислить длину волн лучей разного цвета, их частоту и дать строго математическую и физическую характеристику цвета.

Волновая природа света проявляет себя еще в одном интереснейшем физическом явлении. Его в отличие от других свойств света невозможно непосредственно увидеть или измерить. Узнали о его существовании, изучая прохождение света через прозрачные кристаллы некоторых минералов. Это свойство — поляризация света.

В 1678 г. Гюйгенс писал: «Из Исландии... был привезен кристалл или прозрачный камень, весьма замечательный по своей форме и другим качествам, — но более всего

по своим странным преломляющим свойствам»¹. Гюйгенс поразило, что, за исключением особых случаев, каждый луч, входящий в кристалл, разделяется на два луча, которые внутри кристалла распространяются по разным направлениям. По выходе из кристалла лучи принимают прежнее направление, но остаются двумя самостоятельными лучами, идущими параллельно друг другу. Если через кристалл шпата взглянуть на точку или букву, видны две точки или буквы (рис. на вклейке). Гюйгенс установил, что при вращении кристалла исландского шпата одно из изображений остается на месте, а второе вращается вокруг первого; его положение зависит от формы и положения кристалла. Иначе говоря, один луч ведет себя нормально, следуя законам преломления. Второй — необычно: его преломление зависит от положения кристалла, т. е., очевидно, скорость распространения этого луча в веществе кристалла различна в разных направлениях.

Явление поляризации света нашло полное и убедительное объяснение с позиций представления о свете как поперечных колебаниях эфира. В каждом конкретном случае, в каждом элементарном акте излучения колебание распространяется в одной определенной плоскости. Но в обычном потоке излучения плоскости колебаний не совпадают, а распределяются хаотически. Так происходит потому, что в нагретом теле отдельные элементарные акты излучения совершаются независимо друг от друга. Свет таких источников не поляризован. В поляризованном же свете плоскости колебаний лучей совпадают или близки.

Наиболее близкую аналогию явлению поляризации представляет распространение колебаний по шнуру, один конец которого закреплен, а другой — в руке. Встряхивая шнур, можно имитировать поперечные колебания в любой плоскости. Если два колышка забить близко друг к другу таким образом, что шнур окажется между ними, то условия для распространения волн в разных плоскостях, проходящих через шнур, станут неодинаковыми. В плоскости, параллельной колышкам, колебания смогут распространяться по-прежнему беспрепятственно. В направлениях, значительно отличающихся от этого, волны распространяются лишь до колышков, а далее гасятся.

¹ Цит. по: У. Брэгг. Мир света. Мир звука. М., «Наука», 1967, с. 131.

Нечто подобное происходит в кристаллах исландского шпата и некоторых других минералов. Оптические свойства этих кристаллов неодинаковы в разных направлениях. Это явление называется оптической анизотропией. Кристаллическая решетка их атомов, подобно колышкам в нашей модели, пропускает лучи, электромагнитные колебания, распространяющиеся лишь в определенных плоскостях. В кристалле исландского шпата гасятся все световые колебания, кроме распространяющихся перпендикулярно его оси, — это так называемый обыкновенный луч. Световые колебания, плоскость которых перпендикулярна плоскости обыкновенного луча, образуют второй луч, отличающийся некоторыми особенностями. Оба луча оказываются поляризованными.

Свет поляризуется не только при прохождении через анизотропные прозрачные кристаллы, но и при отражении от поверхности прозрачных тел. Лучше всего отражается свет, колебания которого параллельны поверхности стекла.

Глаз человека не в состоянии отличить поляризованный свет от неполяризованного. Однако свойства поляризованного света нашли довольно широкое и разнообразное применение в технике. При пропускании поляризованного света через прозрачные (например, пластмассовые) модели промышленных изделий удается обнаружить распределение в них напряжений: при механическом сжатии или растяжении изменяются условия и скорость распространения волн, и поляризованный свет позволяет обнаружить участки, подвергающиеся наибольшей деформации, и оценить заранее поведение изделия, внести, если нужно, поправки в технологию.

Поляризованный свет находит также применение в архитектуре, стереокино и т. п.

Поляроидные очки, пропускающие лишь световые колебания, распространяющиеся в одной плоскости, гасят блики — отражения от разнообразных прозрачных и блестящих поверхностей, что бывает весьма важно и для водителей автотранспорта, и для работающих на производстве.

Представление о волновом характере распространения света не могло обойти вопрос о природе колеблющейся среды. Гипотеза о мировом эфире — тончайшей материальной среде, заполняющей мировое пространство, ос-

тавалась недоказанным предположением. Ведь если эфир материален, его неизбежно должна увлекать Земля во время ее стремительного движения по орбите (со скоростью 30 км/сек); на противоположных точках земного шара скорость распространения света должна быть несколько различной. Однако даже самые точные опыты не выявили таких различий. Сомнения в существовании эфира и в реальности опирающейся на него волновой теории света высказывал еще И. Ньютон: «Что такое эфир? Я не могу ни видеть, ни чувствовать, ни осязать, ни нюхать его. Остается ли он неподвижным или «дует», подобно ветру? Обладает ли он трением? Если обладает, то что удерживает Землю и другие планеты, вращающиеся и движущиеся в нем, от замедления, наподобие вращающегося волчка?»¹

Через 200 лет, в 1865 г. шотландский физик и математик Дж. Максвелл, развивая идеи М. Фарадея, создал учение об электромагнитном поле, объяснив природу света электромагнитным волновым процессом. Электромагнитные волны представляют собой поперечные колебания, они могут распространяться и в пустоте. Представление о мировом эфире было отброшено. В конце XIX в. работами П. Н. Лебедева, Г. Герца, А. С. Попова и других ученых было доказано, что свет обладает всеми свойствами электромагнитных волн. Видимый свет представляет собой ничтожный по величине участок спектра электромагнитных колебаний, расположенный где-то в его середине.

Однако волновая теория света недолго праздновала свою победу. Не прошло и пяти лет со времени открытия радиосвязи (1895), как выяснилось, что свет поглощается молекулами вещества отдельными порциями. На рубеже XX в. немецкий физик М. Планк, анализируя спектры излучения и поглощения атомов и молекул, пришел к выводу, что в этих процессах свет выступает как прерывная, дискретная реальность, как поток отдельных сгустков энергии, которые он назвал квантами. Сам Планк считал гипотезу квантов не более чем удобным допущением. Но последующее развитие физики показало ее реальный смысл.

¹ Цит. по: А. Меркулов. За пределами зримого. М., «Машиностроение», 1971, с. 13.

Наиболее существенный вклад в развитие квантовой теории света был внесен А. Эйнштейном. По его предложению, кванты света получили название фотонов. Величина и энергия фотона возрастают при увеличении частоты и уменьшении длины волны света

$$E = h\nu,$$

где E — энергия кванта; h — коэффициент, так называемая постоянная Планка, имеющая значение $6,6 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек; ν — частота световых колебаний.

Лучи света, падая на поверхность некоторых металлов, выбивают из нее электроны (фотоэлектрический эффект). Количество выбитых электронов уменьшается по мере ослабления интенсивности падающего света. Но одни лучи при любой интенсивности света дают фотоэффект, другие, более длинноволновые, не дают его даже в том случае, если мощность их потока увеличена во много раз. Объяснить эти явления волновая теория не могла. Зато представление о свете как о потоке корпускул оказалось очень удобным для объяснения: одни частицы света достаточно велики для того, чтобы вызвать фотоэлектрический эффект, другие, меньшие по размерам, не могут выбить из атома электрон. Реакция, как установил Эйнштейн, идет по такому типу: одна световая частица — один выбитый электрон; при изменении интенсивности света изменяется количество элементарных реакций. Когда же величина корпускулы недостаточна для выбивания электрона, этот «недостаток» света нельзя восполнить увеличением его интенсивности.

Чтобы примирить «новорожденную» квантовую теорию с явлениями дифракции и интерференции света, находившими дотоле чисто волновое объяснение, Эйнштейн предположил, что световые волны очень слабы («волны-призраки»). Роль их сводится к переносу и распределению фотонов в пространстве, что и отражается в явлениях дифракции и интерференции света. Эта гипотеза в дальнейшем (1923—1924 гг. и 1951—1952 гг.) была развита французским физиком Луи де Бройлем и существует поныне как один из вариантов объяснения единства волновой и корпускулярной (квантовой) природы света. Согласно этой гипотезе, световая волна очень малой амплитуды ведет и направляет частицу, или квант, представ-

ляющую собой область волны с высокой концентрацией энергии.

Другое, статистическое объяснение единства волновых и корпускулярных свойств света, выдвинутое немецким физиком Максом Борном и развитое датчанином Нильсом Бором, немецким физиком Вернером Гайзенбергом, пользуется в наши дни большим признанием. Это направление начало свое триумфальное развитие с создания Н. Бором в 1913 г. теории строения атома.

Лучи, исходящие от раскаленных твердых и жидких тел или от газов под высоким давлением, образуют непрерывный спектр в виде сплошной полосы, в котором лучи с волнами различной длины непрерывно переходят один в другой. Иной вид имеют спектры светящихся газов. Они состоят из отдельных резких линий, отделенных друг от друга широкими темными промежутками. Эти спектры, называемые линейчатыми, образуются при излучении света отдельными атомами. Очевидно, атомы каждого элемента излучают свет лишь некоторых частот, т. е. кванты определенной величины.

Если в пламя газовой горелки внести крупинку вещества, то в результате сгорания, испарения, нагрева оно даст свой характерный линейчатый спектр. В широких масштабах опыты такого рода впервые были проведены немецкими учеными Р. Бунзеном и Г. Кирхгофом. Они установили, что каждый химический элемент при излучении дает свой, индивидуальный, набор спектральных линий.

Следовательно, по характеру спектра неизвестного вещества можно определить его химический элементарный состав. Для этого достаточно сфотографировать исследуемый спектр и сравнить его со спектрами известных химических элементов. Если же вещество содержит в своем спектре линии, не похожие на линии известных элементов, это означает, что с помощью метода спектрального анализа открыт новый, дотоле неизвестный науке химический элемент. Именно таким способом Кирхгоф и Бунзен открыли легкие металлы рубидий и цезий, а другие ученые — таллий, индий, галлий.

С развитием квантовой механики спектроскопия приобрела прочную теоретическую базу. Спектральный анализ стал точным и наиболее совершенным методом исследования качественного состава и строения вещества.

Нет таких областей в современной науке, где не на-

шел бы себе применения этот изящный, глубокий и бесконечно содержательный канал связи с микромиром, уводящий нас в самые глубины материи и в бесконечные холодные бездны Вселенной. Мощь современных спектральных приборов такова, что астрофизик с их помощью улавливает, раскладывает в миниатюрную радугу и фотографирует излучение невидимых простым глазом, невообразимо далеких от нас звезд. Пространствував по космическим далям многие тысячи и миллионы лет, этот свет доносит до нас правдивую и точную информацию о далеких, но близких нам по своей природе звездах, о бесконечно разнообразных мирах. Частокол светлых и темных линий, запечатленных в спектре-негативе, рассказывает о химическом составе атмосферы звезды — стоит лишь сопоставить его с атласом спектров — энциклопедией спектроскопии. Сегодня мы знаем, что какими бы необъятными пространствами Вселенной ни был отделен от нас этот далекий мир, состоит он из тех же атомов, из таких же химических элементов, как и наша Земля. Материальное единство мира доказывается методом спектрального анализа просто, логично и убедительно. Степень почернения линий спектра безмолвно говорит опытному глазу о температуре звезды, а ничтожное смещение спектральных линий к красному концу (так называемое доплеровское смещение) — о скоростях разлетающихся галактик.

В геологии спектральный анализ помогает по мельчайшим, ничтожным примесям к горным породам находить кратчайший путь к месторождениям ценнейших ископаемых, облегчает всестороннее исследование геологических проб, доставленных в лабораторию.

В медицине микроскопически малые пробы крови и тканей на языке спектров рассказывают о едва уловимых, но очень многозначительных сдвигах в содержании меди или кобальта, кальция или марганца, цинка или магния, развивающихся под влиянием болезней и помогающих разобраться в картине болезни, в ее причинах. Спектральный анализ взят на вооружение и криминалистикой, и судебной медициной. Много других, больших и малых проблем науки и практической деятельности человека решается с помощью этого незаменимого и универсального метода.

Немецкий физик Й. Фраунгофер, наблюдая с помощью спектроскопа сплошной спектр Солнца, обнаружил на нем

большое количество темных линий. Фраунгофер доказал, что эти линии, названные впоследствии его именем, по случайны: они расположены в спектре Солнца всегда на одних и тех же, строго определенных местах. Происхождение линий Фраунгофера установил Кирхгоф. Пропуская свет лампы накаливания через сосуд с парами натрия (спираль лампы дает сплошной спектр), он заметил, что спектр перерезан двумя узкими черными линиями, расположенными на тех же местах, где обычно находятся хорошо известные желтые линии паров натрия. То, что натрий поглощает лучи из непрерывного сплошного спектра только в своей области излучения, позволило Кирхгофу сформулировать закон: линии поглощения атомов точно соответствуют линиям их испускания.

Следовательно, линии Фраунгофера представляют собой не что иное, как спектры поглощения элементов, которые в виде газов и паров содержатся в атмосфере Солнца и звезд над излучающей поверхностью. Линии же гелия впервые были обнаружены в спектрах хромосферы и короны Солнца (отсюда «солнечное» имя этого элемента: в переводе с греческого гелиос — значит Солнце). Позже гелий был найден на Земле, в частности в атмосферном воздухе.

Итак, стало ясно, что атомы разных элементов испускают и поглощают энергию сообразно законам, одинаковым для всех условий. Линии атомных спектров дали возможность установить существование определенной закономерной зависимости между ними.

На рис. 10 показана серия спектральных линий самого простого химического элемента — водорода (так называемая серия Бальмера), относящихся к видимой области спектра. Расположение отдельных линий таково, что даже без математического анализа дает основание предположить существование какой-то скрытой закономерности. Анализ этой, а также других серий водорода (Лаймана и Пашена), расположенных соответственно в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, позволил вывести общую формулу частоты спектральных линий

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

где R — постоянный коэффициент; n и m — последовательные целые числа, имеющие значение $m \geq n+1$; для

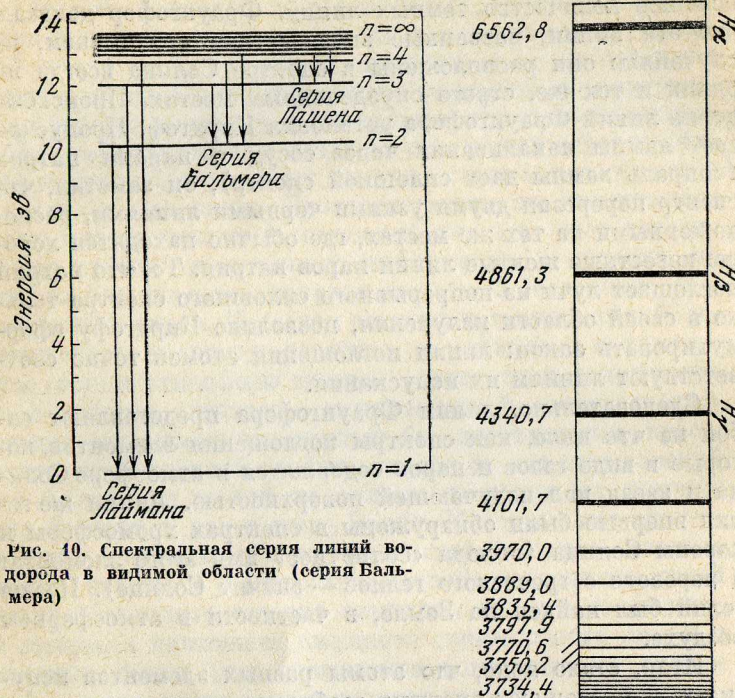


Рис. 10. Спектральная серия линий водорода в видимой области (серия Бальмера)

Рис. 11. Схема энергетических уровней атома водорода, иллюстрирующая образование спектральных серий ($n=1$ — основной стабильный уровень электрона)

серии Лаймана $n=1$, для серии Бальмера $n=2$ и для серии Пашена $n=3$.

Спектры других элементов труднее поддавались анализу, но и для них были установлены соответствующие закономерности. Объяснить законы излучения и поглощения света веществом с помощью волновой теории не представлялось возможным. Зато в рамках квантовой теории эти явления получили естественное объяснение и их открытие способствовало торжеству квантовомеханических представлений.

Атомы каждого элемента могут иметь только опреде-

ленные энергетические состояния, квантовые уровни, переходы между которыми совершаются благодаря излучению и поглощению энергии строго определенными порциями — квантами. Из многих квантов света, падающих на данный атом, поглощаются только те, которые по величине своей энергии соответствуют разности энергий его квантовых уровней. Поглотив такой квант, атом переходит на высший энергетический уровень. Но в этом состоянии он неустойчив, поэтому мгновенно совершается обратный процесс — высвечивание поглощенного кванта энергии и возвращение атома в исходное, невозбужденное, состояние. Перейти на более высокий энергетический уровень атом может также в результате нагрева. Высвечивание и в этом случае происходит по описанному выше закону. Низшее энергетическое состояние атомов, в котором газ не светится, является наиболее устойчивым, основным (рис. 11).

Что же это за гипотетические уровни энергии? Существуют ли они только в нашем представлении или внутри атомов действительно есть какие-то энергетические ступеньки?

Чем ближе к ядру расположен электрон, тем ниже его собственная энергия и тем больше нужно приложить усилий, чтобы выбить его или перевести на более далекую орбиту. Превращения, происходящие с внешними электронами атома, требуют меньшего количества энергии, т. е. квантов меньших энергий. Испускание же рентгеновских лучей связано с внутренними электронными оболочками атомов.

В ходе развития атомной физики гипотеза энергетических квантовых уровней, как и гипотеза существования квантов, нашла полное подтверждение. Новейшие открытия позволили проникнуть во многие сокровенные тайны строения вещества, раскрыли физическую природу света. Волновая теория отлично объясняет явления дифракции и интерференции. Возрожденная корпускулярная теория дает объяснение законам испускания и поглощения света. Выходит, как это ни удивительно, что свету присущи и волновые, и корпускулярные свойства. Природа вещества, состоящего из атомов, которые, в свою очередь, построены из протонов, нейтронов и электронов, казалась более понятной, чем двойственная природа света, соединяющего в себе свойства волны и материальной частицы.

Фотоны обладают удивительными свойствами. В сильном электрическом и гравитационном поле атомных ядер квант света может распадаться на две элементарные частицы, несущие противоположные заряды — электрон и позитрон. А при других условиях возможен и обратный процесс. Ученые сумели получить мощные потоки быстро летящих элементарных частиц (электронов, протонов) и установили, что при встрече с небольшими преградами или отверстиями частицы вещества дают такую же дифракционную картину, как и свет, т. е. они обладают волновыми свойствами.

Свет исходит из вещества, рождается в нем и, поглощаясь, исчезает в веществе. Их встреча всегда приводит к взаимодействию. С одной стороны, вещество отражает, преломляет, поглощает свет. С другой стороны, свет, встречаясь с веществом, может оказывать на него разнообразное действие. Фотоны — снаряды солнечной артиллерии — давят на материальные тела. Механическое давление света Солнца на перпендикулярно поставленную и абсолютно поглощающую поверхность составляет около $0,5 \text{ мт/м}^2$. Лучистая энергия может вызывать химические изменения в веществе: процесс фотосинтеза, почернение фотографической пластинки, ощущение света в сетчатке глаза, образование загара. Под действием излучения происходит фотоэлектрический эффект. Нередко при прохождении светового потока через вещество последнее начинает светиться (явление фотолюминесценции). Наконец, поглощаясь веществом, свет нагревает его.

Выявленное в ходе развития физики и оптики противоречие волновых и корпускулярных свойств световых явлений — проявление реально существующего единства противоположностей. С точки зрения классической физики представления о непрерывных волнах и прерывных частицах исключали друг друга. Физика XX в. для объяснения наблюдаемых фактов берет на вооружение диалектико-материалистическое представление о материи как о единстве прерывного и непрерывного, вещества и света, массы и поля, волн и частиц, рассматривая эти свойства как взаимно дополнительные.

Величина механического давления света на вещество настолько мала, что оно сказывается лишь на поведении мельчайших частиц космической пыли и газа, попадающих в сферу влияния Солнца, например на хвосты комет, приближающихся к Солнцу. Кометные хвосты состоят преимущественно из паров и газов, образующихся при испарении вещества ядра кометы. Пройдя точку наибольшего приближения к Солнцу, комета начинает удаляться от него. Хвост кометы и при приближении к светилу, и при удалении от него направлен радиально в сторону от Солнца. Есть все основания предполагать, что образование хвостов комет происходит в результате механического давления света на частицы паров, газов и пылинки кометного вещества.

Казалось бы, эффект светового давления не имеет и не может иметь значения для развития жизни на Земле. Однако по представлениям новой науки — экзобиологии, изучающей жизнь вне пределов Земли, существенную роль в переносе микроорганизмов может играть световое давление.

Выдающийся шведский ученый С. Аррениус почти 100 лет назад высказал мысль, что, возможно, простейшие живые организмы, возникшие на одной из планет, токами воздуха могут заноситься в очень высокие слои атмосферы, а затем переноситься на другие планеты. Предположение о населенности космического пространства живыми организмами, получившее название теории панспермии, подверглось суровой критике со стороны биологов-материалистов. Одни видели в ней попытку косвенно опровергнуть теорию возникновения жизни на Земле в ходе органической эволюции. Другие утверждали, что в космосе отсутствуют элементарные условия, необходимые для существования самых простых организмов: температура, близкая к абсолютному нулю (-273°C), космический вакуум, мощные потоки излучений мало благоприятствуют существованию даже простейших форм жизни. Кроме того, трудно представить, каким образом одноклеточные живые организмы могут преодолеть гигантские космические пространства, отделяющие одну планету от другой. Теория Аррениуса, не давшая ясных ответов на эти вопросы, постепенно потеряла значение.

Сейчас на новой научной основе вновь возникло предположение о принципиальной возможности переноса некоторых форм жизни через пространства космоса. В самом деле, споры некоторых грибов и бактерий, живущих в верхних слоях земной атмосферы, имеют достаточно толстую оболочку из веществ, поглощающих ультрафиолетовые лучи, и обладают удивительной устойчивостью к действию ионизирующей радиации в огромных дозах. Многие споры хорошо переносят отсутствие кислорода и температуру, близкую к абсолютному нулю, самые большие разрежения (до 10^{-10} — 10^{-11} мм рт. ст.), создаваемые в земных лабораториях.

Таким образом, существуют формы жизни, способные переносить воздействие факторов космического пространства, сохраняя жизнеспособность. Благодаря очень малым размерам споры грибов и бактерий могут заноситься восходящими токами воздуха в высокие слои атмосферы, а преодолеть притяжение планеты и просторы космоса им помогут кванты солнечного света. Солнечный ветер — поток протонов, выбрасываемых Солнцем, постоянно дующий сквозь орбиты планет — может, по расчетам американского астрофизика К. Сагана и некоторых других современных ученых, также способствовать переносу простейших форм жизни из внутренних областей солнечной системы к внешним.

В научной печати последних лет появились сообщения о том, что в некоторых падающих на Землю метеоритах (углистых хондритах) найдены образования, весьма напоминающие микроорганизмы. Неопровержимых доказательств космического, а не земного происхождения этих организмов пока нет. Если они будут получены, значит, существует еще один путь переноса живых существ через космическое пространство. Возможно, что, ступив на почву одной из ближайших к нам планет (например, Марса), человек найдет там некоторые знакомые формы жизни.

Принципиальная возможность путешествия некоторых живых существ с одних небесных тел на другие, по-видимому, обоснована. В реализации этой возможности не последнюю роль играет солнечное давление.

Сила светового давления в наши дни перекочевала из книг фантастов на страницы серьезных научных проектов. Нельзя ли использовать эту силу для разгона космических кораблей вместо ракетных двигателей? Оказалось,

можно! Уже разрабатываются конструкции космических яхт с гигантскими парусами-отражателями. Их наполняет солнечный ветер. И гонимые этой неощутимой, но постоянно создающей ускорение силой, отважные космонавты полетят к Юпитеру, Сатурну, навстречу неведомому.

Что такое цвет

Свойство тел вызывать определенные ощущения в зависимости от спектрального состава отраженного или испускаемого телами света называется цветом. Ощущение цвета возникает в сетчатке глаза под влиянием световых волн, подобно тому, как ощущение звука возникает во внутреннем ухе под влиянием звуковых колебаний определенной частоты.

Наблюдаемые в природе и видимые глазом цвета разделяются на две группы: ахроматические и хроматические. К ахроматическим относятся белый, серый и черный цвета. Они различаются лишь количеством отраженного света — коэффициентом отражения. Средний человеческий глаз различает в гамме ахроматических цветов около 300 оттенков. Хроматические цвета — это цвета и оттенки, различаемые нами в спектре.

Границы видимого глазом спектра, так же как и границы отдельных цветов, люди воспринимают по-разному. Советский ученый Пинегин установил, что в определенных условиях глаз человека способен различать световое излучение в диапазоне от 3020 до 9500 Å. Но все же на основании обследований сотен людей удалось установить, что ощущению каждого цвета соответствуют волны определенной длины. Изменение цвета при изменении длины волны происходит неравномерно (табл. 1). Наиболее узкий спектральный пучок образуют желтые лучи.

Все хроматические лучи характеризуются тремя основными параметрами: цветовым тоном, насыщенностью и яркостью. Тон определяется длиной волны (обозначается греческой буквой λ). Количество оттенков хроматического цвета, различаемых глазом, достигает 1000—1500. По длине волны в спектре видимого цвета выделяют три участка: длинноволновый (красный и оранжевый цвета), средневолновый (желтый и зеленый цвета) и коротковолновый (голубой, синий, фиолетовый цвета).

Таблица 1
Спектральные пределы видимых глазом цветов

Цвет	Длина волны, Å	Ширина участка, Å
Фиолетовый	3900—4500	600
Синий	4500—4800	300
Голубой	4800—5100	300
Зеленый	5100—5500	400
Желтый	5150—5850	100
Оранжевый	5850—6200	350
Красный	6200—8000	1800

Насыщенность, или чистота света (P) зависит от степени «разбавдения» спектрального цвета белым. Наконец, яркость хроматического цвета (B) связана с интенсивностью падающего на окрашенный объект общего светового потока.

Обычно в наш глаз поступает лучистый поток смешанного состава, содержащий лучи различной длины волн, разных цветов спектра. Глаз воспринимает смесь лучей как некий новый цвет, отличающийся от лучей, входящих в его состав. В этом состоит принципиальное отличие зрения от слуха: в сложном аккорде, состоящем из нескольких звуков разной высоты, отчетливо слышится каждый звук, и опытный музыкант точно назовет все ноты, прозвучавшие одновременно. Для глаза все волны видимой части спектра сливаются в единый цвет (белый), в котором не выделяются отдельные слагающие его цвета. Выделить их можно лишь с помощью призмы, развертывающей пучок белого солнечного света в разноцветную радужную полосу — спектр.

Смешение двух простых цветов может дать разные результаты. В одних случаях образуется белый цвет (при смешении оранжевого и голубого, желтого и синего); такие пары цветов называются дополнительными. В других случаях при смешении возникает третий простой цвет (например, зеленый из смеси голубого и желтого). Возможно появление также цвета, отсутствующего в спектре (например, пурпурного при смешении красного и фиолетового). Таким образом, с точки зрения различения лучей

глаз — весьма несовершенное орудие познания окружающего нас мира, уступающее по своим способностям органу слуха и даже обоняния.

Лучи видимого света, дающие ощущение различных цветов, могут возникать и в процессе так называемого холодного свечения, или люминесценции. Но главным источником излучения служат нагретые тела.

Законы испускания света разработаны применительно к излучающему телу, полностью поглощающему лучи. В природе не существует абсолютно черного тела. Но представление о нем позволило математически осмыслить закономерности излучения света.

Согласно первому закону излучения (закону Стефана — Больцмана), мощность потока лучей, испускаемых абсолютно черной поверхностью,

$$E_{\Sigma} = \sigma T^4,$$

где T — температура поверхности в градусах Кельвина; σ — постоянная Стефана — Больцмана, равная $5,7 \cdot 10^{-5}$ эрг·см⁻²/град⁻⁴.

Таким образом, нагретое тело как бы «испаряет» световые кванты тем энергичнее, чем выше его температура. Количество излучаемых квантов пропорционально четвертой степени температуры тела.

Второй закон излучения (закон смещения Вина) характеризует спектральный состав излучения при изменении температуры излучающего тела. При повышении температуры высвечивание усиливается на всех длинах волн. Максимум излучения перемещается в сторону более коротких волн (рис. 12). Закон Вина гласит: произведение длины волны, лежащей в области максимумов излучения $\lambda_{\text{макс}}$, и температуры тела T есть величина постоянная, т. е.

$$\lambda_{\text{макс}} T = A.$$

Представим себе, что в кузнечном горне мы раскаляем кусок металла. Пока температура его не превысит 1000° С, максимум излучения лежит в далекой инфракрасной области. С повышением температуры в спектре последовательно появляются красные, оранжевые, желтые, зеленые лучи; максимум приближается к красной границе спектра. При 2000° С светится весь видимый спектр, а излучение приобретает белый цвет (белое каление). По ме-

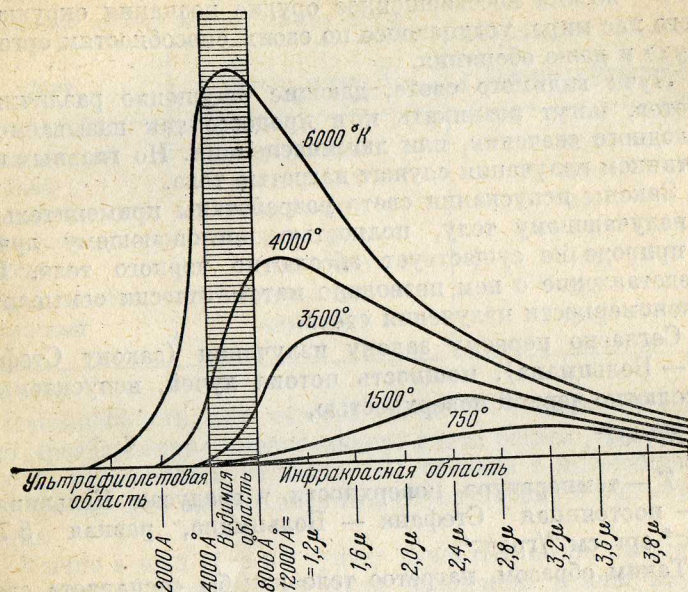


Рис. 12. Положение спектрального максимума излучения при различной температуре излучающего тела

ре достижения температуры 3500—7500° С максимум интенсивности излучения проходит через всю видимую часть спектра, удаляясь в ультрафиолетовую область.

Таким образом, экономически наиболее выгодным был бы источник видимого света с температурой 6000—7000° С. Современная техника пока не в состоянии создать такой источник. Но в природе он существует — это Солнце. Глаз человека приспособился к восприятию определенного диапазона электромагнитных колебаний не случайно, а в силу того, что он лежит в зоне максимума солнечного излучения.

Спектр излучения Солнца воспринимается глазом как белый свет. Но окружающие нас предметы не кажутся нам однотонными. Значит, в природе действуют какие-то еще не рассмотренные нами факторы, которые в ясный солнечный день придают зеленую окраску листьям деревьев, желтую — головкам подсолнухов, красную — макам, хотя они собственного видимого света не излучают.

Чем же объяснить существование столь разнообразной окраски у окружающих нас предметов? Вероятно, здесь существенное значение имеет состав света, освещающего предметы. При вечернем освещении синий цвет кажется черным, а желтый и зеленый выглядят более тусклыми, чем днем. Почему?

Если перед щелью, через которую на призму падает пучок белого света, поставить красное стекло, то красный участок спектра не усилится: зато все остальные цвета спектра, кроме красного, исчезнут. Таким образом, красное стекло лишь выделяет, сохраняет красный участок спектра, поглощая все другие лучи видимого света, а не превращает в красный остальные цвета спектра. Если вместо красного стекла поставить желтое, спектр почти не меняется; на месте остаются все лучи, за исключением крайнего синего и фиолетового участка. Керосиновая лампа и лампа накаливания дают желтоватый свет, в котором, как мы теперь знаем, практически отсутствуют синие и фиолетовые лучи: температура источника света слишком низка, чтобы излучать в этой коротковолновой области. Синее сукно на солнечном свете кажется синим потому, что поглощает все лучи, кроме синих; они-то и попадают в наш глаз, давая соответствующее ощущение. Свет же искусственных источников, лишенных синих лучей, сукно поглотит полностью и будет казаться поэтому черным. Желтых и зеленых лучей в спектре ламп накаливания также относительно меньше, чем в солнечном свете. Не удивительно, что соответствующие тона при вечернем освещении кажутся более тусклыми, чем днем.

Чтобы «дополнить» свет искусственных источников недостающим коротковолновым излучением, используют ртутные лампы, ультрафиолетовое излучение которых превращают в видимое с помощью смеси светящихся веществ — люминофоров. Так устроены, в частности, лампы дневного света, спектр которых почти повторяет солнечный.

Однако не только состав падающего света влияет на восприятие цвета глазами. Подавляющее большинство окружающих нас предметов собственного света не излучает. Лучи, которые достигают глаз и информируют нас о форме, величине, цвете предметов, расстоянии до них, — это отраженные лучи. Они возникли в источнике света, до-

стигли предмета, отразились от него и попали на сетчатку глаза. Представим себе, что рассматриваемый нами предмет — абсолютно черное тело, что он полностью поглощает все падающие на него лучи. Очевидно, при этом ни один квант света не отразится от предмета и не попадет в глаз. Такое абсолютно черное тело мы попросту не увидим, оно будет казаться нам чем-то вроде черного провала в потоке света.

Рассмотрим противоположный случай. Предмет, попавший под лучи Солнца, не поглощает их. В этом случае, если предмет совершенно прозрачен, лучи проследуют своим путем, а предмет окажется невидимым для глаза (таковы воздух, вода, стекло в относительно тонких слоях). Когда же предмет окажется непрозрачным для лучей, но и не будет поглощать их, он полностью отразит лучи в окружающее пространство.

В реальной природе нет ни абсолютно черных, ни абсолютно прозрачных тел. Подавляющее большинство предметов на Земле одновременно и поглощает, и отражает, и рассеивает, и пропускает свет. По отношению к лучам с различными длинами волн одно и то же тело ведет себя по-разному. Зеленый лист, например, поглощает свет в красной и синей областях спектра, а в зеленой отражает. Отраженные лучи, попадая на сетчатку глаз, и дают ощущение зеленого цвета.

Предметы, особенно их поверхностные слои, избирательно поглощают из падающего лучистого потока определенные лучи, остальные отражают и рассеивают. Именно отраженные и рассеянные лучи в совокупности и дают ощущение цвета предмета. При этом вовсе не обязательно, чтобы отражался какой-то один чистый спектральный цвет. Ведь сочетание двух, трех и больше цветов дает ощущение одного цвета, которое мы и воспринимаем как цвет данного предмета. Если же предмет кажется нам белым или серым, значит, он отражает лучи разных длин волн более или менее равномерно.

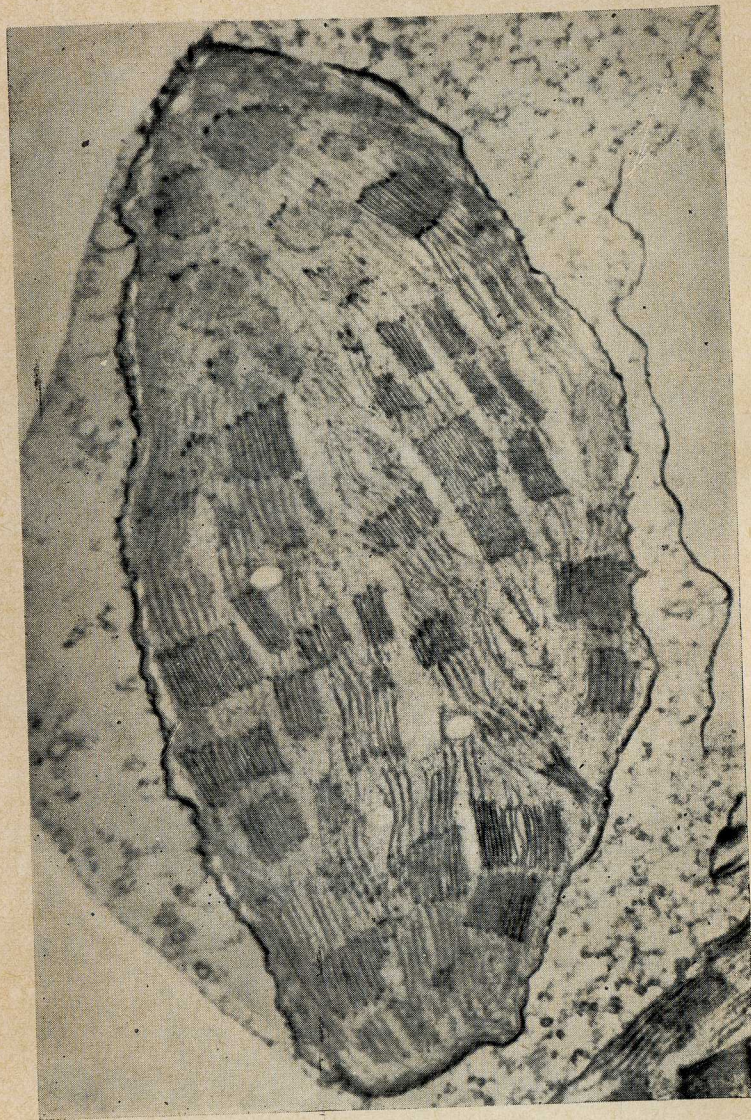
Таким образом, состав вещества или во всяком случае состав поверхностных слоев предметов, обуславливая избирательное поглощение, отражение и рассеяние падающих на него лучей, оказывает значительное, нередко решающее влияние на цвет предмета. Предметам живой и неживой природы придают окраску, цвет особые химические вещества, обладающие свойством избирательного по-



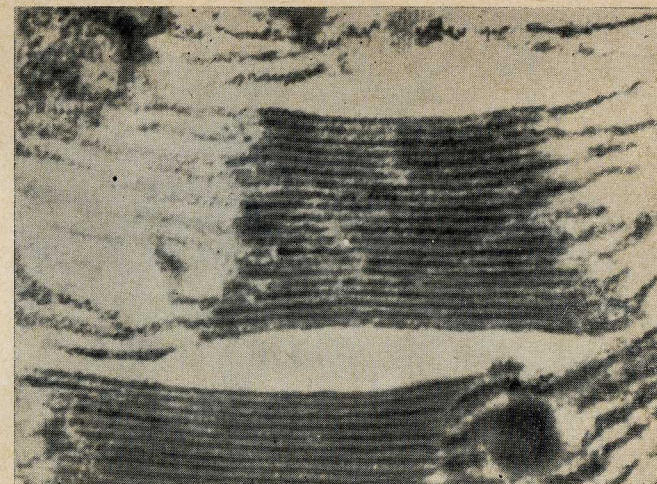
Пятна на Солнце. Видны детали структуры



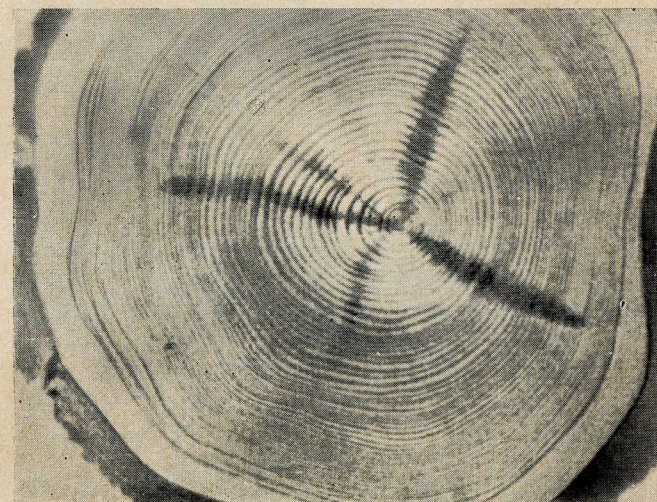
Поляризация света. Двойное лучепреломление в кристалле исландского шпата



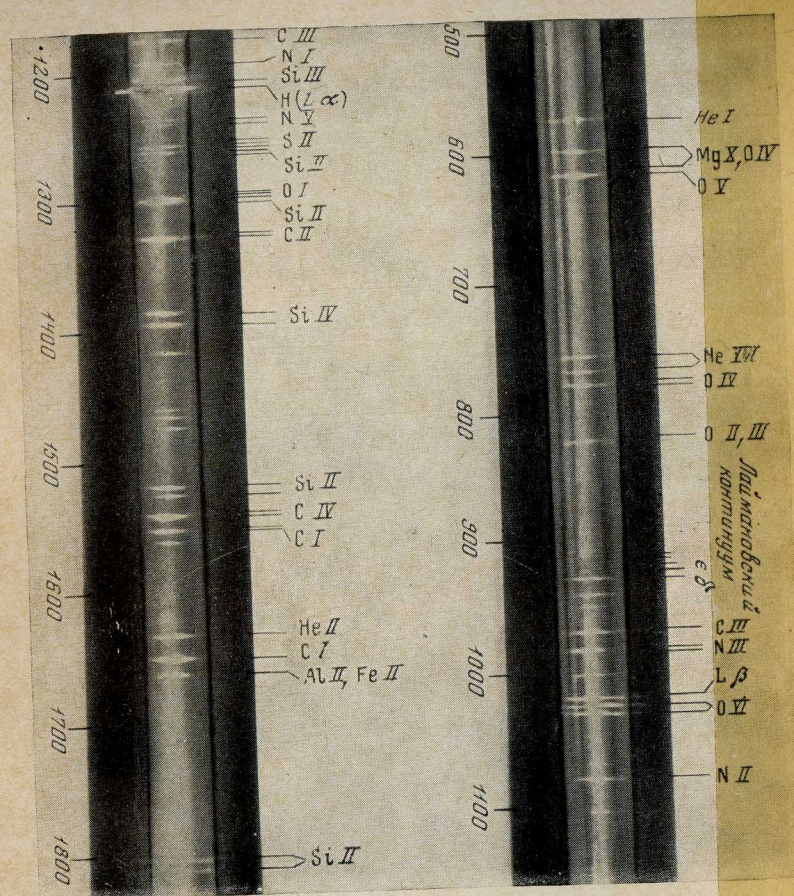
Строение хлоропласта под электронным микроскопом (увеличение в 40 тыс. раз)



Деталь грани хлоропласта под электронным микроскопом



Срез дерева. Видны периодические изменения ширины годовых колец



Линейчатый спектр излучения Солнца в коротковолновой ультрафиолетовой области, снятый на высоте 148—200 км над поверхностью Земли. Видны линии излучения отдельных химических элементов фотосферы Солнца

глощения лучей, называемые красящими веществами — красителями, или пигментами. Таковы хлорофилл — пигмент, действующий в процессе фотосинтеза, родопсин и йодопсин — зрительные пигменты.

Наконец, остановимся на роли рассеяния света. В древние времена люди считали небо действительно существующим голубым куполом, опирающимся на плечи титана Атланта. Небесный свод фигурировал в качестве библейской «тверди» и «небесных сфер» в древних геоцентрических системах мира. Средневековые схоласты спорили о характере материала, из которого он изготовлен. Одни из них склонялись мыслью к стеклу и хрусталу, другие — к драгоценным камням синего цвета (сапфиру и др.).

Правильное представление о небе было дано великим ученым эпохи Возрождения Леонардо да Винчи: «Синева неба происходит благодаря толще освещенных частиц воздуха, которая расположена между Землей и находящейся наверху темнотой». Сейчас гениальное предвидение философа подтверждено экспериментально. Космонавты, пройдя плотные слои атмосферы, видели над собой абсолютно черное небо, на котором одновременно сияли Солнце, Луна и звезды.

Научное объяснение голубого цвета неба было дано в работах английского физика лорда Рэля (Дж. У. Стретта) в 1871 г. Оказалось, что молекулы газов воздуха, точнее их конгломераты, рассеивают лучи Солнца. Чем короче волны лучей, тем сильнее они рассеиваются. Синие и фиолетовые лучи рассеиваются вдвое интенсивнее, чем красные. Поэтому, когда мы смотрим на небо, мы видим рассеянные лучи, среди которых преобладают голубые, синие и фиолетовые. Зато диск Солнца по мере приближения к закату становится все более красным: чем длиннее путь света в атмосфере, тем относительно больше в его составе красных и оранжевых лучей.

Чем выше поднимается человек над поверхностью Земли, тем гуще, синее становится окраска неба. Крупные частицы вещества (пылинки, капельки воды) рассеивают все лучи одинаково. В случае, когда этих частиц много, синий цвет неба становится бледным. Поэтому интенсивность окраски небесного свода может быть мерилom чистоты воздуха. Благодаря рассеянию солнечного света воздухом смена дня и ночи происходит не мгновенно, а посте-

пенно. В пасмурные дни освещение создается рассеянной радиацией. Ее существование обеспечивает поступление света к растениям, находящимся в тени. Это явление играет немалую роль в жизни на Земле.

Цвет в живой природе

В жизни организмов цвет играет огромную роль: помогает им находить пищу, прятаться от врагов, сохранять потомство. Яркая окраска ягод и плодов, так же как их сладкий вкус, привлекает к себе птиц и животных, которые затем распространяют со своим пометом семена растений. Очень яркая, пестрая окраска некоторых растений и животных служит как бы сигналом их несъедобности, поэтому ее называют отпугивающей. Но есть и совершенно безвредные животные и растения, которые могут приобретать окраску, очень похожую на отпугивающую. Весьма распространена в природе и так называемая покровительственная окраска, благодаря которой животное сливается по цвету с окружающим ландшафтом. Такую окраску имеют, например, гусеницы, кузнечики, заяц, лев, тигр и другие животные.

Умение слиться с землей, растительностью, корой дерева, исчезнуть, раствориться в окружающем, чтобы избежать встречи с хищником или, наоборот, напасть на жертву неожиданно, — важнейшая потребность, необходимое качество многих животных. Законы светотени, цветового контраста играют в этом первостепенную роль. Чтобы сделать собственную тень менее заметной, бабочки столь точно ориентируются по Солнцу, что тень от их крыльев в полете превращается в незаметную линию. «Противотеневая» окраска характерна для рыб, ящериц, змей, многих птиц. В условиях господствующего направления солнечных лучей сверху вниз верхняя, освещенная поверхность тела равномерно окрашенных животных может контрастировать с нижней, остающейся в тени. Если же нижняя часть тела окрашена светлее, то тень как бы выравнивает окраску и делает животное менее заметным. Особенно эффективно в этом смысле сочетание противотеневой окраски с расцветкой, которая приближается к цвету фона (земли, листвы и т. п.).

Однако однотонная окраска все же не очень надежна: фон редко бывает совершенно одноцветным, да и живот-

ные, двигаясь, попадают в несколько различные условия освещения, расцветки, яркости. Поэтому надежная маскировка может быть обеспечена лишь при каком-то разнообразии в окраске тела, если оптически расчленить его на несколько участков. Вот почему на шкуре жирафа, леопардов, в оперении многих птиц, на коже хамелеонов и других пресмыкающихся имеется контрастный неправильный рисунок — пятнистый, сетчатый, полосатый. Отдельные части общего рисунка настолько привлекают внимание, что истинные контуры животного теряются.

Именно таким образом исчезают из поля зрения наблюдателя огромные тела жирафа. Пятна, полосы, рисунки особенно часто используются в мире животных для маскировки глаз.

Наконец, умение изменять окраску кожи применительно к фону, характерное для хамелеонов и многих других пресмыкающихся, а также насекомых, амфибий, рыб, моллюсков, объясняется наличием в коже особых пигментных клеток — хроматофоров. Пигмент в них либо распределяется по всей площади, либо собирается в одной точке. В зависимости от этого кожа светлеет или темнеет. Тело кальмаров и осьминогов, например, способно чернеть или бледнеть прямо на глазах, почти мгновенно. А камбалы в бассейне с дном из чередующихся белых и черных плиток превращаются в настоящие живые шахматные доски.

Все великолепное разнообразие окрасок, цветов и расцветок, которым щеголяют многие представители животного мира, создается не только за счет присутствия в их коже, шерсти, перьях или чешуе красящих веществ. Цветовые эффекты в животном мире очень часто основаны на законах отражения, поглощения, спектрального разложения белого солнечного света, на явлениях интерференции и дифракции. Богатство окраски крохотных колибри основано на присутствии в их оперении всего одного-двух пигментов. Все остальное — это игра света в крохотных капельках жидкости, расположенных между бородками оперения и играющих роль бесчисленных призмочек. Разнообразие и яркость цветов оперения павлинов, петухов и некоторых других птиц создается в определенной мере за счет дифракции и интерференции света на волокнах-бородках перьев и за счет взаимного отражения двух по-разному окрашенных поверхностей, прилегающих

друг к другу. Богатство оттенков, возникающих при этом, практически неисчерпаемо.

Еще одним источником разнообразия цветов и оттенков в живой природе, воспринимаемых нашим глазом, служит явление цветового контраста. На цветовом фоне белый или слабоокрашенный предмет приобретает окраску, дополнительную по отношению к окраске фона. Дело в том, что однородный цветовой фон утомляет глаз. Одновременно повышается чувствительность колбочек к дополнительному цвету. И если соответствующие лучи содержатся в свете, отраженном от интересующего нас предмета, глаз выделит их, как бы подчеркнет дополнительную окраску.

Если идти лугом или зеленым редколесьем при ясном небе и высоко стоящем Солнце, тропинка и стволы деревьев кажутся красноватыми. Серый дом кажется красноватым, если смотреть на него через зеленую штору. Ночью глаз после оранжевого пламени костра или пожара воспринимает свет Луны как голубоватый. Зеленый цвет морских волн подчеркивает пурпурный оттенок тени. Все эти наблюдения были сделаны еще И. В. Гете в его «Учении о цветах». Большое количество примеров цветового контраста приведено также в книге М. Миннарта «Свет и цвет в природе» (1956).

Цвет в деятельности человека

В практике человека, например в военном деле, иногда приходится прибегать к маскировке, т. е. искусственно менять цвет военных объектов, чтобы они полностью терялись в окружающем ландшафте. Самая совершенная маскировка создается подбором окраски, которая обеспечивает такое же отражение для всех длин волн, как и окружающий фон. Практически добиться этого в полной мере очень трудно. Обычно ограничиваются подбором цветов, у которых величина коэффициента отражения близка лишь для области лучей, главным образом лежащих в желто-зеленой части спектра, — к ним глаз особенно чувствителен. Но на фотопластинку наиболее сильно действуют не желто-зеленые, а фиолетовые и ультрафиолетовые лучи. При различной величине коэффициента отражения объекта и фона фотопластинка выявит дефект маскировки, а глаз — нет.

Специальным подбором цветов, освещенностей, окрасок можно добиться неожиданных эффектов. На сцене, например, путем сочетания цветных декораций, белого и многоцветного освещения можно показать голубое небо, темные горы, синие моря, зеленые леса. Освещая ярким красным светом колеблющуюся ткань или другой материал, декораторы создают иллюзию пламени. Благодаря темноте в зрительном зале с помощью источника небольшой освещенности легко создать на сцене впечатление яркого солнечного дня. И наоборот, используя на сцене в качестве фона черный занавес, в «театрах иллюзий» демонстрируют всевозможные «чудеса».

Цвет — важнейшее изобразительное средство во всех видах искусства; даже в музыке цветовые аналогии почти неизбежны при восприятии и анализе самых глубоких и сложных программных симфонических произведений. Но, разумеется, в живописи роль цвета переоценить невозможно. Роль эта всегда была выдающейся, но она, как и живопись в целом, прошла немалый исторический путь, хотя восприятие цвета человеческим глазом за последние 100 тыс. лет практически не изменилось (в физическом и физиологическом смысле).

Родилось изобразительное искусство где-то далеко в палеолите (древнекаменном веке), десятки тысяч лет назад, началось с контурных наскальных рисунков, лишенных цвета. Лишь постепенно первобытные художники овладевали цветовой гаммой, медленно обогащая свою палитру. Многочисленные данные палеонтологии, археологии, этнографии свидетельствуют, что порядок освоения цветов в истории человечества не был случайным. Выдающийся советский ученый академик А. Е. Ферсман писал: «Исторические исследования привели к выводу, что освоение цветов человечеством шло в такой последовательности: желтый, красный, зеленый и синий. Первыми цветами, которые осваиваются ребенком и малокультурными народами, являются желтый и красный. Синий цвет воспринимается значительно позднее». По свидетельству Н. Н. Миклухо-Маклая, у папуасов Новой Гвинеи, живущих в гуще зеленых джунглей, отсутствует способность различать зеленый цвет. Специалисты, проанализировавшие гомеровский эпос древней Эллады, не нашли в нем прилагательного «синий» даже в применении к морю. Но уже в VI—V вв. до н. э. греческие скульпторы ис-

пользовали синий краситель для раскрашивания своих статуй. В последующие столетия цвет все шире используется живописцами, скульпторами, архитекторами. Но рельефные, пластические возможности цвета долго остаются неиспользованными.

Лишь в эпоху Возрождения такие титаны науки и мастера живописи, как Леонардо да Винчи, Альбрехт Дюрер, Леон Альберти, приоткрыли тайну связи цвета и перспективы. Игра светотени, мастерское использование оттенков цвета бесконечно обогатили палитру живописцев, сделали возможной передачу объема, глубины, перспективы. Это нашло свое практическое воплощение в полотнах Тициана, Веронезе, Тинторетто. Мастерам Возрождения были уже известны и эффекты многократного взаимного отражения. Так, Леонардо да Винчи в своем «Трактате о живописи» утверждал: «Отраженные цвета имеют гораздо большую красоту, чем природный цвет этих тел, как это видно на открывающихся складках золотых тканей..., когда одна поверхность отражается в другой, стоящей напротив, а эта в ней, и так последовательно до бесконечности».

Использование цветового контраста позволяет «подчеркивать» или, наоборот, изменять оттенок цвета благодаря нанесению по соседству мазков другой окраски. Импрессионисты в 60—70-х годах XIX в. начали широко использовать дополнительные цвета. Переход к «пленеру» — живописи на открытом воздухе — обогатил палитру, сделал цветовую гамму картин более разнообразной и в то же время более естественной. Знание законов восприятия цветов позволило заменить смешивание красок на палитре нанесением разноцветных точек непосредственно на полотно. (Это направление получило название пуантилизма.)

Большое значение для полного и правильного восприятия картины имеют особенности ее освещения. Любой искусственный источник света вносит в это восприятие определенные искажения. Очевидно, в идеале картина должна освещаться светом той же интенсивности и того же состава, что в момент ее написания.

В художественной литературе цвет присутствует как одно из важнейших выразительных средств, несет даже тройную нагрузку: смысловую (характеризуя, например, достоинство бумажных денег или болезненное состояние

персонажа), описательную (обеспечивая образность, «картинность» происходящего) и эмоциональную. Писатели нередко используют цветовые эпитеты для характеристики настроения и состояния своих героев. Для рассказов и повестей А. Грина характерны яркие, чистые, насыщенные цветовые гаммы, выражающие солнечно-ясные мысли и чувства его сказочных героев и возбуждающие такие же яркие и светлые эмоции у читателя.

Широкое использование цветовых эпитетов характерно для тех писателей и произведений, которые преимущественно рисуют события, процессы, предметы внешнего мира. Писатели же и произведения, раскрывающие бездны мира внутреннего, отличаются экономным использованием цвета. В творчестве некоторых писателей (Л. Н. Толстого, А. С. Пушкина) можно проследить процесс постепенного вытеснения цвета по мере перехода к зрелому творчеству.

У некоторых деятелей искусства отмечается пристрастие, почти болезненное, к отдельным цветам. Так, у Ф. И. Достоевского, очень редко пользующегося цветом, сравнительно много желтого: желтые обои, желтые цветы, желтая мебель... Тот же желтый цвет на полотнах Ван Гога играет совершенно особую, необычайно выразительную роль, приобретает поистине колдовскую силу.

Велико значение цвета и в трудовой деятельности человека. Бесспорно, что в подавляющем большинстве случаев оптимальным решением было бы использование естественного, солнечного освещения. Но как впустить Солнце в громады современных цехов, как осветить его лучами каждое рабочее место, каждый станок? Возможно ли это? Обычное решение состоит в том, что в потолочных перекрытиях длинных и широких заводских цехов делают стеклянные фонари. Они, конечно, пропускают свет Солнца. Но конструкция перекрытия удорожается и усложняется. Наклонные стекла фонарей покрываются пылью и грязью, а мыть их очень неудобно. А главное, — хорошего освещения фонари не создают. Яркие блики отражаются от металлических поверхностей, слепят. Летом прямые лучи Солнца вынуждают забеливать фонари, но при этом теряется до 60% света.

Принципиально новая идея была предложена за рубежом. Вместо дорогостоящих, неудобных и неэффективных фонарей в потолке особые призматические стекла уста-

навливаются вертикально в наружных стенах. Одна сторона их гладкая, вторая — пилообразная, зубчатая. Такие стены как бы объединяют, собирают и направляют внутрь цеха солнечные лучи. Но призматические стекла не только преломляют лучи, но и разлагают их, превращая внутренность цехов в радужную какофонию цвета. Предложение московского инженера А. Мотулевича позволяет устранить этот недостаток: нужно лишь превратить зубчатую поверхность стеклянной стены в волнистую. При этом разделенные спектральные цвета вновь смешиваются, проходя через волнистую внутреннюю поверхность, давая внутри цеха белый цвет. Применение волнистых стекол увеличивает глубину проникновения солнечного света в цеха в 1,5—2 раза.

Недостаточная освещенность предъявляет повышенные требования к органу зрения, вынуждает глазные мышцы напрягаться и влечет за собой раннее переутомление, а в определенных условиях труда может повлечь и аварию, несчастный случай. Гладкие металлические поверхности, отражая свет, дают блики, оказывают более или менее выраженное слепящее действие и также влекут за собой утомление глаза. Поэтому наряду с обеспечением достаточной освещенности все отражающие поверхности следует делать матовыми, рассеивающими свет.

Совершенно необходимо также, чтобы источник света находился вне поля зрения. Монотонная окраска предметов, окружающих рабочее место, особенно серая или черная, утомляет глаз, лишенный светового и цветового контраста. Поэтому важно в разумных пределах разнообразить окраску машин, станков, оборудования, выделить цветом детали разного функционального назначения. Это не только дает необходимый отдых глазу, но и облегчает сознательную и автоматическую ориентировку при выполнении привычной последовательности трудовых операций. В конечном счете это выражается в повышении производительности труда.

Монотонная окраска машин, отсутствие цветового контраста до сих пор остается одной из наиболее важных причин несчастных случаев на производстве. Рабочий не замечает движущегося крана, автопогрузчика и т. п., окрашенных, как и станки, стены, перекрытия цеха, в монотонный серый цвет и не несущих сигнальных огней и сигнальной окраски. А крановщик, водитель автокара,

погрузчика может не заметить человека, если его спецодежда серого цвета и не контрастирует с фоном.

Вот почему столь важное значение приобретает окраска кранов, автокаров, лобовой части автомобилей, железнодорожных локомотивов, стрел экскаваторов и подъемников в яркие сигнальные цвета (красный, оранжевый, желтый), использование цветной сигнальной спецодежды путевыми рабочими (оранжевые жилеты), ремонтниками, верхолазами, монтажниками и т. п., а в последнее время — космонавтами (что облегчает задачу их отыскания после приземления). По-видимому, целесообразно введение цветной спецодежды и для некоторых групп сельскохозяйственных рабочих, сигнальной окраски — для многих сельхозмашин. Статистика утверждает, что автомашины желтого цвета гораздо реже оказываются замешанными во всякого рода дорожных происшествиях.

Совершенно неожиданное применение нашел оранжевый цвет в авиации. Птицы и летучие мыши — одна из причин аварий самолетов при взлете и посадке. Их привлекает к аэродромам яркий свет прожекторов. Австралийские специалисты-экологи установили, что оранжевый цвет влечет насекомых (а значит, и охотящихся на них птиц и летучих мышей) гораздо меньше, чем белый. После установки оранжевых светофильтров на прожекторах количество птиц в окрестностях аэродрома сократилось на 30—40%.

Окраска стен и перекрытий в заводских цехах в яркие и теплые цвета — желтый, оранжевый, бежевый, желто-зеленый — субъективно создает ощущение большого пространства. На тех производствах, где рабочие имеют дело с окрашенной продукцией (производство красителей, тканей, окрашенных деталей, машин), окраска стен в дополнительный цвет дает желанный цветовой контраст и отодвигает наступление утомления. На одном из шотландских предприятий перекраска стен, ранее черных, в зеленый (нижняя часть стен), желтый (верхняя часть стен) и светло-желтый (потолки) цвета создала впечатление пространства и света; резко уменьшилось число случаев головной боли, ссор между работниками, улучшилась дисциплина и техника безопасности. Производительность труда выросла.

Перекраска рабочих столов и машин на обувных фабриках в светлые тона, создав заметный контраст с темной

обувью, обеспечила повышение производительности труда на 14%. По данным, полученным учеными ГДР, рациональная окраска рабочих мест, наряду с разнообразием цветовой гаммы производственных помещений, обеспечивает увеличение производительности труда до 25—30% и снижение потерь рабочего времени на 32%.

Больше утомляют глаз цвета, относящиеся к крайним областям спектра, — красные и сине-фиолетовые. Желтый и зеленый цвета, расположенные в середине спектра, утомляют значительно меньше. Зеленая окраска зелени, стен, предметов дает глазу желанный отдых, способствует снижению внутриглазного давления. Устойчивость цвето-различения и контрастная чувствительность глаза наиболее высоки при использовании желтого, зеленого или белого цвета в качестве фона; красный и синий фон дает обратные результаты.

Быстро развивающаяся молодая наука — техническая эстетика — разрабатывает на основе данных физики, физиологии и психологии зрения, производственного опыта рекомендации, инструкции, технические указания для предприятий разных отраслей промышленности. Некоторые из рекомендаций по использованию цвета на производстве, особенно в целях техники безопасности, принимают форму ГОСТ'ов (государственных общесоюзных стандартов) — своего рода промышленных законов.

Сигнальные цвета, принятые на разных производствах и на транспорте, разделяются на основные и вспомогательные. Основные сигнальные цвета — красный, желтый и зеленый. Красный цвет, действующий возбуждающе, повышает артериальное давление и ассоциируется рефлекторно с огнем и кровью. Он используется как сигнал непосредственной опасности, требующий немедленной реакции. Желтый цвет, не вызывающий столь сильной эмоциональной реакции, обозначает возможную опасность. Зеленый цвет снижает давление, ассоциируется с зеленью и покоем и всегда используется как сигнал безопасности.

Огромное значение играет окраска стен, потолков, полов, парт и классных досок в школах. Использование черного, темно-коричневого и серого цветов как наименее марких — чрезвычайно распространено. Между тем опыт передовых школ, в которых контролировалась связь меж-

ду цветом и успеваемостью, поведением, аппетитом и состоянием здоровья школьников, недвусмысленно свидетельствует против этих цветов. Переход к светлой окраске стен не только не увеличил опасности их загрязнения, но, наоборот, повысил внимание и аккуратность школьников. Улучшение освещенности в светлоокрашенных классах благоприятно сказывается на напряжении глаз, уменьшает процент близорукости среди учащихся, улучшает аппетит и существенно повышает успеваемость.

Освещение классов должно быть достаточным, рассеянным и хорошо распределенным. Светлая окраска стен увеличивает долю рассеянного освещения, повышает общую освещенность и делает ее более равномерной. Белый цвет нежелателен, так как может вызвать неприятный блеск. Черный и коричневый цвета поглощают много света и угнетают настроение детей. Красный цвет слишком возбуждает и потому также утомляет. Стены, окрашенные в желтый и бледно-зеленый цвета, создают хорошее настроение для работы, улучшают процесс обучения, не слишком возбуждая детей. В то же время желтый цвет стен, по многочисленным наблюдениям, в меньшей степени вызывает у школьников желание пачкать стены, рисовать на них, чем другие цвета. Для учебных помещений и классов рекомендуются также бежевый, кремовый, светло-желтый цвета. Для приемных, актовых и спортивных залов — более холодные — голубой, зеленый цвета. Потолки рекомендуются оставлять белыми. Доску и парты рекомендуются окрашивать в зеленый цвет, доску — несколько более насыщенным цветом. Писать на такой доске лучше желтым или оранжевым мелком.

Специальные исследования показали, что дети предпочитают писать на белой бумаге при дневном свете. Свет же ламп накаливания заставляет их предпочесть светло-голубую, а также светло-зеленую бумагу. При решении контрольной работы по арифметике количество верных ответов на зеленой бумаге было на 21,3% выше, а на красной — на 19% ниже, чем на белой.

Проблема цвета играет сегодня все более значительную роль при оформлении интерьеров гостиниц, ресторанов, музеев, общежитий, жилых квартир, салонов самолетов, автобусов, теплоходов и т. п. Специальные службы американских авиационных компаний установили, напри-

Таблица 2

Отражательная способность стен в зависимости от их окраски и цвета обоев

Цвет	Процент отражения	Цвет	Процент отражения
Стены		Материалы и краски	
Белые	65—80	Цинковые белила	76
Кремовые	55—70	Белая бумага	68
Соломенно-желтые	55—70	Известь	66,5
Желтые	45—60	Известь и светло-желтый хром	66,5
Старого золота	35—40	Известь и светлая охра	66,5
Темно-зеленые	10—30	Известь и зеленая краска	66,5
Светло-голубые	20—50	Известь и темно-желтый хром	64,5
Голубые	10—25	Известь и светло-красная краска	63,5
Темно-голубые	5—15	Известь и светло-голубая краска	60,3
Черные	3—10	Известь и темно-зеленая краска	57
Обои		Белый мрамор	80
Очень светлые (белые, кремовые, соломенного цвета)	65—85	Цемент с белым асбестом	40
Светлые (светло-серые, песочные, розовые, бледно-голубые)	45—65	Желтый кирпич	45
Темные	45	Красный кирпич	20
		Неполированный кирпич	70—90
		Черепица	10—15
		Асфальт	8—15

мер, что на фоне коричневой и желтой окраски стен в салоне самолета у пассажиров чаще возникает тошнота; зеленый и синий цвета ее предупреждают. Разумеется, причиной тошноты цвет не может быть. Но психофизиологическое действие света, его влияние на настроение, эмоциональную сферу человека бесспорно.

Исследования показали, что при свете обычных ламп накаливания в гостиных, ресторанах и т. п. можно ис-

пользовать зеленый и голубой цвета для окраски стен. Люминесцентное освещение в помещениях с такой окраской делает лица людей бледными, нездоровыми, пищу — мало аппетитной. При люминесцентном освещении следует предпочитать желтый, оранжевый, розовый цвета стен.

При оформлении интерьеров жилых комнат рекомендуется при ориентации окон на юг и хорошем освещении использовать для окраски стен холодные цвета (голубой, зеленоватый), а при северной ориентации — более теплые (желтый, оранжевый). Нет возражений и против модного «биколоризма» — окраски стен комнаты двумя цветами, со сменой окраски по вертикали (верхняя и нижняя часть стен) или по горизонтали (две стены окрашивают в один цвет, две другие — в иной). Следует избегать лишь крайностей, дурного вкуса и плохо совместимых цветов. Единых рецептов здесь, разумеется, быть не может. В кухне используются преимущественно белый и серебристый тона. В гостиной рекомендуется избегать больших белых поверхностей (за исключением потолка), использовать светлые тона, гармонирующие с мебелью. В спальне рекомендуется чередовать голубовато-серые или бледно-зеленые поверхности с оранжевыми или розовыми декоративными элементами. Яркие, веселые тона (желтый, кремовый, розовый и др.) можно использовать в холлах, комнатах игр, детских.

В больницах целесообразно использование ярких цветов при входе, в залах ожидания и свиданий. Коридоры следует окрашивать в светлые тона, палаты — более веселыми и менее монотонными расцветками (используя персиковый, светло-желтый, телесный, кремовый, слоновой кости и т. п. цвета). В операционных рекомендуется от белого перейти к мягким, не слишком светлым цветам, что облегчает сосредоточенность.

Итак, цвет — могучее и еще не вполне освоенное и изученное средство воздействия на психику и эмоциональную сферу человека, а через них — на производительность труда, настроение, аппетит, самочувствие и здоровье. Здесь еще непочатый край для поисков, раздумий, рекомендаций.

О красителях и фотосенсибилизаторах

В подавляющем большинстве случаев окраска предметов — результат поглощения некоторых цветов из смеси, какой является свет Солнца или ламп накаливания. Эту задачу выполняют красители — вещества органической или неорганической природы, избирательно поглощающие лучи видимого света (рис. 13). Но свет есть энергия, следовательно, красители в мастерской природы служат мощными приемниками энергии света, превращающими ее в иные формы. Сама возможность жизни на Земле связана с поглощением и использованием энергии Солнца природными красителями, в первую очередь хлорофиллом.

Смесь органического или минерального красителя со связующим веществом — олифой, клеем, лаками называется краской. Соответственно различают масляные, эмалевые, клеевые краски и т. п. Окрашенные вещества, не растворимые в воде или органических растворителях, но применяемые для крашения, называются пигментами. Минеральные пигменты — главным образом соединения металлов переменной валентности — в качестве краски несравненно более стойки, чем органические красители. Благодаря их стойкости мы имеем возможность любоваться искусством великих художников древности, эпохи Возрождения. Свежесть и сочность красок древних мастеров вызывают удивление. К сожалению, много секретов приготовления минеральных красок ныне утеряно.

Принято считать, что крашение изобретено в Индии и Китае, где этот способ обработки тканей начали применять 4 тыс. лет назад. В Египте и Финикии, судя по раскопкам, красильни для тканей существовали примерно 3,5 тыс. лет назад. Для изготовления красок применяли только естественные органические красители. Тайна их получения и технологии приготовления была государственной или частной монополией и строго охранялась.

Один из самых распространенных и поныне естественных красителей — синий индиго получают из листьев тропических растений. В XVI—XVII вв. индиго очень высоко ценился на европейском рынке. Индиго не растворим в воде — в этом причина его стойкости. Но для окраски тканей индиго подвергают специальной обработке, вводя в его молекулу по два атома водорода, после чего краситель приобретает растворимость. Одновременно

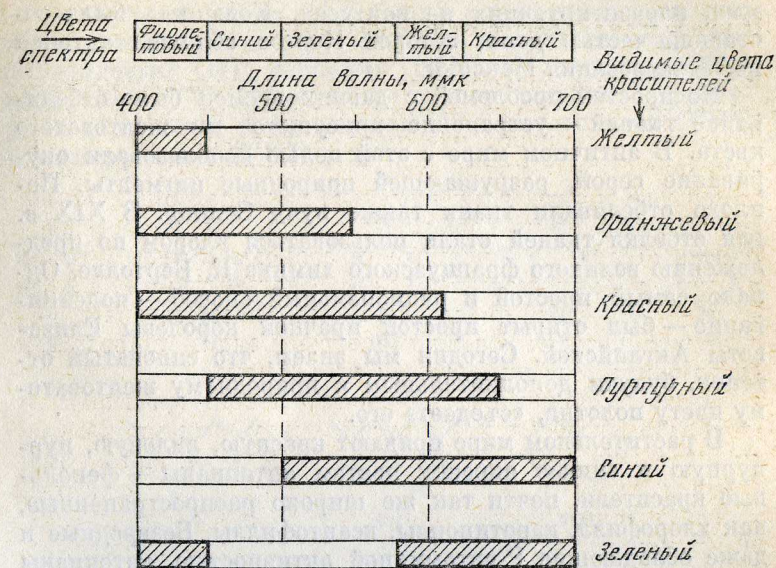


Рис. 13. Зависимость цвета красителя от поглощения лучей спектра (заштрихована часть спектра, поглощенная красителем)

резонансные свойства молекул изменяются так, что краситель обесцвечивается. После пропитки ткани индиго на воздухе постепенно теряет водород; одновременно возвращается окраска, но уже фиксированная на волокнах ткани.

Другой знаменитый краситель древних греков и римлян — пурпур — добывался из улитки багрянки. Из десяти тысяч улиток можно получить всего около 1 г красителя. Не удивительно, что ценился он в то время дороже золота. В Древнем Риме только император и его семья имели право носить багрянцу — ткань, окрашенную пурпуром.

Красный краситель крапп получают из корня растения марены. Красящим веществом марены является ализарин, который дает красную окраску только после протравы солями алюминия. В древности для этой цели применялись алюминиевые квасцы. С солями железа ализарин дает фиолетовую окраску, с солями хрома — коричневую. Красный краситель кошениль добывают из насеко-

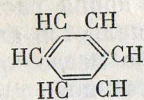
мых, паразитирующих на кактусах. Кошениль была составной частью дани, которой Кортес обложил ацтеков после завоевания Мексики.

Не простой проблемой с давних времен было отбеливание тканей — устранение присущего им желтоватого цвета. В античном мире с этой целью использовали окунание серой, разрушающей природные пигменты. Неплохо отбеливали ткани также лучи Солнца. В XIX в. для отбели тканей стали пользоваться хлором по предложению великого французского химика К. Бертолле. Однако самый простой и рациональный способ — подсинивание — был открыт простой прачкой королевы Елизаветы Английской. Сегодня мы знаем, что синеватый оттенок, будучи дополнительным к природному желтоватому цвету полотна, «съедает» его.

В растительном мире придают красную, лиловую, пурпурную и синюю окраску цветам антоцианы — фенольные красители, почти так же широко распространенные, как хлорофилл, каротиноиды, ксантофиллы. Безвредные и даже обладающие Р-витаминной активностью, антоцианы ныне используются в качестве пищевых красителей. Для окраски тканей они не используются из-за нестойкости.

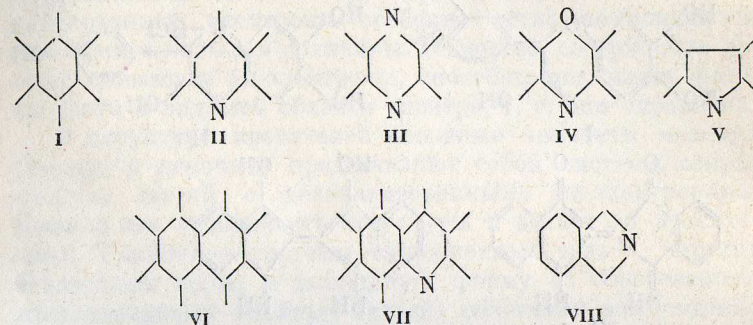
С увеличением производства тканей обеспечить их крашение старыми способами стало невозможно. Начались поиски заменителей естественных красителей. В 1856 г. английский химик Перкин в результате окисления анилина получил первый синтетический краситель. Через несколько лет были изготовлены различные анилиновые краски. Но получение красителей с заранее заданными свойствами стало возможным после того, как трудами выдающегося русского химика А. М. Бутлерова была создана теория строения химических соединений.

В настоящее время существует много тысяч синтетических красителей. Основным структурным элементом большинства красителей является шестичленное бензольное кольцо:



(Ниже структурные элементы красителей будут показаны условно в виде «скелетов» — без обозначения двойных связей и атомов углерода и водорода.)

Бензольное кольцо (I) обычно повторяется в скелете красителя несколько раз, сочетаясь с другими кольцами: пиридиновым (II), азиновым (III), оксазиновым (IV), пиррольным (V). Встречаются и более сложные структуры из двух колец: нафталиновая (VI), хинолиновая (VII), бензопиррольная (VIII) и др.:

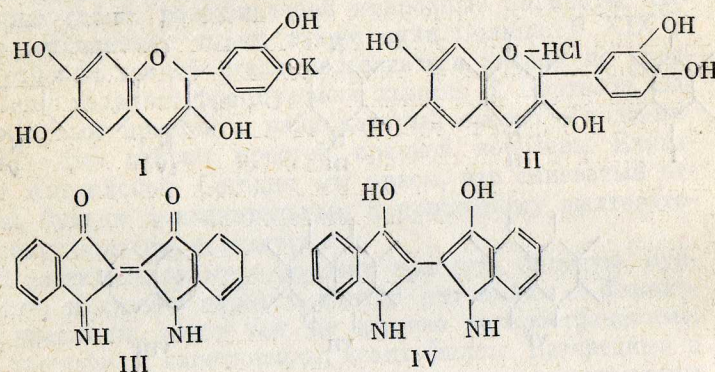


Циклические структуры в молекуле красителя связаны между собой с помощью центрального атома или цепочки, например, азогруппы $-\text{N}=\text{N}-$, полиметиновой цепочки $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$ и т. д. В результате замещения атомов водорода в кольцах группами CH_3- , $-\text{C}_2\text{H}_5-$, атомами хлора, брома, йода, аминогруппами $-\text{NH}_2$, сульфогруппами $-\text{SO}_3\text{H}$ получено огромное количество разнообразных красителей.

Наиболее известные синтетические красители представляют собой солеобразные соединения, т. е. это заряженные молекулярные ионы. Приобретению молекулой заряда способствуют так называемые ауксохромные группы: $-\text{NH}_2$ (аминогруппа) и $-\text{OH}$ (гидроксильная). Включение этих групп в молекулу выявляет или усиливает цвет исходного соединения, способствует проявлению его красящих свойств.

Все сказанное о структуре относится не только к синтетическим, но и к естественным красителям, в частности к антоцианам, основным элементом которых являются все те же бензольные кольца, а введение гидроксильных групп, кислотных или основных группировок изменяет цвет красителя. Калиевая соль антоциана, обладаю-

щая щелочными свойствами, придает синий цвет василькам (I). В результате присоединения кислотной группы к основному антоциану образуется краситель, придающий красный цвет розам (II). Молекула индиго (III) после присоединения двух атомов водорода становится бесцветной, но приобретает растворимость (IV).



Для соединения атомов углерода и водорода, кислорода, азота, серы, из которых построены молекулы красителей, типична ковалентная связь, которая осуществляется парой электронов, общих для обоих связанных атомов. В качестве грубой схемы можно представить себе, что каждый электрон описывает вокруг обоих атомов сложную орбиту — восьмерку. Чтобы возбудить образующие такую связь сигма-электроны, нужна очень большая энергия. Соединения, содержащие одинарные, насыщенные связи, способны поглощать только большие фотоны коротковолновых ультрафиолетовых лучей. Как красители они не пригодны: они поглощают свет в области, далекой от видимой области спектра.

Иное дело — молекулы ненасыщенных соединений, содержащие двойную связь. Электроны, образующие вторую связь ($\text{>C}=\text{C}<$; $\text{>C}=\text{N}-$; $-\text{N}=\text{N}-$), легко возбуждаются. Для перехода на более высокий энергетический уровень таким электронам (их называют π -электронами) требуется гораздо меньше энергии. Но и вещества с двойными связями поглощают только ультрафиолетовые лучи, а потому они не окрашены. Особенно подвижны π -

электроны в соединениях с сопряженными, правильно чередующимися двойными связями. Таковы, например, полиметиновые и азометиновые цепи атомов, а также замкнутые, главным образом шестичленные кольца и их агрегаты. Во всех этих структурах π -электроны настолько слабо связаны со своими двумя атомами, что свободно перемещаются по всей структуре молекулы. Такие делокализованные электроны особенно легко возбуждаются квантами небольшой величины. Вещества, содержащие делокализованные π -электроны, способны поглощать фотоны света в видимой области спектра, т. е. они окрашены.

В структуре красителей основные элементы молекул (кольца и цепочки) представляют собой системы сопряженных связей с делокализованными π -электронами. Именно эта особенность структуры и делает их красителями. Удлинение системы сопряженных связей, переход бензольных колец в хиноидную форму (с образованием дополнительных двойных связей) облегчают возбуждение и сдвигают максимум поглощения света в сторону более длинных волн.

Аналогично действует включение в молекулу красителя ауксохромных групп ($-\text{NH}_2$; $-\text{OH}$), увеличивающих заряд и поляризацию молекулы.

Процесс поглощения энергии молекулами красителя очень важен для живых организмов, в теле которых большую роль играют красящие вещества — пигменты. Важен он и для практической деятельности человека, будь то крашение тканей, применение красителей в качестве лекарственных препаратов или добавок к пищевым продуктам.

Молекула, поглотившая фотон света, не может долго оставаться в возбужденном состоянии. В течение стомиллионных долей секунды она отдает свою избыточную энергию, а возбужденный электрон скачком возвращается на место. Отдача электронной энергии возбуждения происходит несколькими путями.

Первый путь носит название резонансного излучения. Знакомство с ним помогает глубже понять механизм возникновения цветов. Поставим рядом на стол два камертона, настроенных на одинаковую частоту, на одну и ту же ноту. Если один из камертонов заставить звучать с помощью смычка или молоточка, а затем остановить пальцем, то станет слышно звучание второго камертона, хотя мы к нему не прикасались. Но если изменить частоту

колебаний второго камертона, прилепив к нему кусочек пластилина, резонанса не будет.

Нечто аналогичное происходит в радиоприемнике. Из огромной массы разнообразных радиоволн он улавливает и поглощает только одну. Если каждая радиостанция излучает в эфир волны своей частоты — своего «цвета», то радиоприемник, подобно красителю, поглощает один из этих цветов. Вращением тумблера мы плавно изменяем частоту электрических колебаний в его конденсаторах и катушках до тех пор, пока она не совпадет с частотой волн передающей станции. Следовательно, в этом случае можно изменять «краску» до поглощения нужного нам «цвета». Радиоприемник поглощает радиоволны, а краситель — более короткие световые волны.

Но камертон не только поглощает волны определенной частоты, но и излучает их вновь — резонирует. То же происходит и с красителем. Его молекулы, подобно крошечным камертонам, поглощая световые колебания определенной частоты, начинают резонировать, т. е. излучать свет той же частоты. Но каждый такой крохотный резонатор посылает волны света во всех направлениях. В прежнем же направлении, по которому распространялся свет от источника, колебания резонансной частоты будут распространяться во много раз слабее, чем без встречи с резонатором-красителем. Это явление мы и воспринимаем как поглощение света определенных частот — как появление окраски.

Циклические молекулы, в которых правильно чередуются одинарные и двойные связи между атомами углерода, и являются идеальными резонаторами, легко поглощающими и излучающими лучи видимой части спектра. Они-то и придают окраску окружающему нас земному миру, его живым обитателям и неживым предметам.

Нарисованная нами картина — это идеальный случай, который, как и все идеалы, воплощается в жизнь обычно не полностью ввиду вмешательства побочных факторов. Важнейший из этих факторов в данном случае — потеря части световой энергии при ее поглощении молекулами, при возбуждении пи-электронов и последующей отдаче поглощенной энергии излучением. Один из важнейших законов физики — второе начало термодинамики — утверждает, что при всякого рода энергетических переходах какая-то часть энергии переходит в тепловую, т. е.

в энергию беспорядочного колебания и вращения молекул.

Это второй путь превращения энергии электронного возбуждения, вызванного поглощением кванта лучистой энергии. Обычно в тепловую энергию превращается лишь часть поглощенной энергии света. Мощный поток видимых лучей вызывает значительный нагрев кожи человека, повышение температуры кожи и как реакцию на это прилив крови к коже, покраснение ее и усиление потоотделения. Однако действие такого лучистого тепла на организм непродолжительно и поверхностно.

Избыточная энергия может быть отдана атомом или молекулой в том же виде, в каком она была поглощена, — в виде кванта излучения. Этот третий путь отличается от идеального — резонансного тем, что за короткое время существования возбужденного состояния часть энергии электрона успевает превратиться в тепловую, и величина излучаемого кванта меньше поглощенного, а свет флуоресценции (вторичного излучения) более длинноволновый, чем поглощенный.

Таково правило Стокса, применимое ко всем красителям. Спектр испускания красителей всегда несколько сдвинут в длинноволновую сторону по сравнению со спектром поглощения.

Спектр поглощения любого красителя имеет максимум, соответствующий определенной длине волны света. В обе стороны от максимума поглощение уменьшается. Интересно, что спектр флуоресценции — вторичного излучения красителя — также представляет собой кривую — зеркальное отражение кривой поглощения (рис. 14). Это правило зеркальной симметрии было опытным путем установлено советским физиком-оптиком В. Л. Левшиным. Третье правило флуоресценции состоит в том, что монохроматический свет любой длины волны (в пределах спектра поглощения данного красителя) вызывает вторичное свечение во всей полосе флуоресценции, причем распределение интенсивностей в полосе свечения точно такое же, как в том случае, когда краситель облучается белым светом.

Как показано на рис. 14, кривые поглощения и свечения каждого красителя частично пересекаются. Поэтому можно выбрать свет, длина волны которого лежит на этом рисунке правее оси симметрии (изображенной

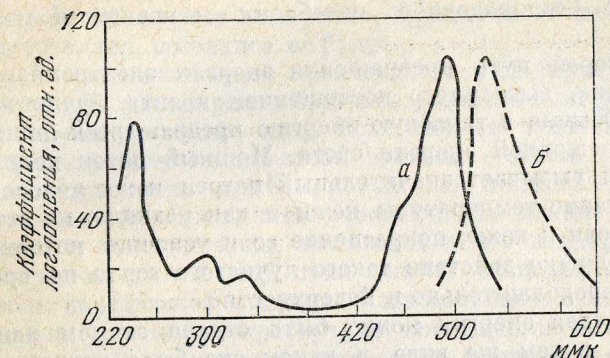


Рис. 14. Спектры поглощения (а) и флуоресценции (б) красителя флуоресценна. Кривая люминесценции, сдвинутая в сторону более длинных волн, зеркально воспроизводит кривую поглощения

вертикальной штриховой линией), но еще в пределах области поглощения (кривая а). Если светом такой длины волны осветить краситель, то флуоресцировать он будет, как обычно, в пределах всей полосы высвечивания (кривая б). При этом часть излучения флуоресценции окажется более коротковолновой, чем свет поглощенный. Эта так называемая антистоксова флуоресценция — исключение из первого правила вторичного высвечивания — не противоречит закону сохранения энергии. Хотя антистоксово излучение отличается квантами большей энергии, чем поглощенный свет, но общий энергетический выход флуоресценции несколько меньше, чем поглощенная энергия света (за счет перехода части ее в тепло).

Наконец, четвертый путь превращения лучистой энергии, поглощенной красителем, — переход в энергию химического взаимодействия молекул. Наличие избыточной энергии делает возбужденную молекулу более активной. Она вступает в такие химические реакции, в которые в невозбужденном состоянии вступать не может. Энергия активации большинства химических реакций лежит в пределах 20—100 ккал/моль. Как видно из данных табл. 3, энергии квантов видимого света достаточно для возбуждения реакций. Благодаря участию энергии квантов поглощенного света такие реакции называются фотохимическими.

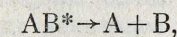
Таблица 3

Длина волны и энергия квантов света

Длина волны, Å	Вид излучения	Энергия кванта, ккал	Длина волны, Å	Вид излучения	Энергия кванта, ккал
10000	Короткие инфракрасные лучи	28,4	4200	Фиолетовые лучи	67,7
			4000	Граница видимого света	71,7
8000	Граница видимого света	35,5	3000	Ультрафиолетовые лучи	94,8
7000	Красные лучи	40,7	2000	Короткие ультрафиолетовые лучи	142,3
5800	Желтые лучи	49,0			
5300	Зеленые лучи	53,9			

Круг возможных реакций увеличивается по мере приближения к фиолетовому концу спектра. Основные типы фотохимических реакций рассмотрены ниже.

Фотораспад осуществляется преимущественно под влиянием ультрафиолетовых лучей. Некоторые наиболее легко возбудимые молекулы способны распадаться и под влиянием видимого света, главным образом фиолетового. Схематически реакция может быть изображена так:

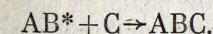


где AB^* — фотовозбужденная сложная молекула.

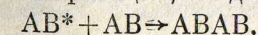
Фотоперегруппировка. В этом случае часть энергии электронного возбуждения расходуется на изменение геометрической конфигурации молекулы, на перенос атомов или связей внутри молекулы. Реакции этого типа также чаще наблюдаются под влиянием ультрафиолетовых (иногда даже фиолетовых) лучей. Схема реакции



Фотоприсоединение. За счет избыточной энергии молекула способна соединяться с такими группировками, которые в невозбужденном состоянии она присоединить не может



Частным случаем этой реакции является фотодимеризация, или полимеризация, соединение двух одинаковых молекул



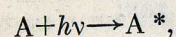
Весьма важный вид реакции фотоприсоединения — реакция присоединения кислорода — имеет большое биологическое значение.

Фотоперенос электрона. Эта реакция, как и предыдущие, осуществляется главным образом под влиянием ультрафиолетовых лучей. Проявляется эффект в увеличении проводимости или в появлении окраски, свойственной положительному иону красителя.

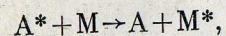
Фотосенсибилизация. Если молекулы красителя в растворенном или адсорбированном, твердом состоянии, перемешаны с молекулами вещества, не поглощающего свет, они могут быть своеобразными переносчиками энергии лучей — фотосенсибилизаторами. Такую функцию в растениях выполняет хлорофилл. Поглотив световой фотон и перейдя в возбужденное состояние, молекула красителя может затем вступить во взаимодействие с молекулой неокрашенного вещества таким образом, что состояние возбуждения передается второй молекуле.

После этого частица красителя возвращается в нормальное, невозбужденное, состояние и способна поглотить новый фотон.

Схематически два основных этапа реакции фотосенсибилизации можно изобразить так:



где A — молекула красителя; A^* — та же молекула в возбужденном состоянии; $h\nu$ — энергия кванта света;



где M — молекула неокрашенного соединения; M^* — та же молекула в возбужденном состоянии. Именно этот второй этап и есть, собственно, реакция фотосенсибилизации. Обе реакции фотохимические, так как состоят в поглощении фотона, поэтому они почти не зависят от температуры среды.

Молекула M^* , обогащенная энергией, может вступать в такие реакции, которые недоступны ей в обычном состоянии. В живом организме это в основном реакции окисления. В каждой живой клетке обязательно присутствует растворенный кислород. Значит, реакции окисления возникают в живом теле очень легко, как только появляются пригодные для них молекулы.

Третий этап процесса фотосенсибилизации, начатого с поглощения фотона молекулой фотосенсибилизатора A , можно изобразить в следующем виде: $M^* + O_2 + M \rightarrow MO_2M$, или $M^* + O_2 \rightarrow MO_2$.

В этом случае в процессе окисления между двумя молекулами вещества M образуется мостик, своего рода «сшивка», или окисляется сама возбужденная молекула. В обоих случаях процесс необратим, и окисленные молекулы выходят из строя, перестают выполнять свою функцию в клетке. Молекула — переносчик энергии света в процессе фотосенсибилизации не пострадала. Она одна может окислить большое количество молекул вещества M и нанести организму большой ущерб.

Свойства фотосенсибилизации присущи многим красителям (эозину, эритрозину, бенгальскому розовому, риванолу, метиленовому синему, акридину, флуоресцеину и др.), а также каменноугольной смоле, дегтю, в больших дозах некоторым медикаментам (йоду, хинину, сульфаниламидам), канцерогенным веществам (химическим веществам, вызывающим при длительном воздействии образование опухолей).

Реакцию фотосенсибилизации легче всего наблюдать в крови. Фотосенсибилизатор проникает внутрь красных кровяных телец — эритроцитов — и передает поглощенную энергию света белковым молекулам их оболочки. Проходит некоторое время, и оболочка начинает разрушаться, красящее вещество крови — гемоглобин — выходит в плазму. В организме, которому ввели большую дозу фотосенсибилизатора и на который падает мощный поток света эффективной длины волны, процесс разрушения эритроцитов (гемолиз) идет быстро, развивается малокровие — анемия, почечные каналы переполняются вышедшим в плазму гемоглобином и перестают выделять мочу. В более тяжелых случаях наступает смерть.

При некоторых болезнях печени и желудочно-кишечного тракта из-за недостатка витаминов группы В иногда нарушается процесс образования гемоглобина, в организме накапливается известное количество фотосенсибилизатора гематопорфирина. Это заболевание называется порфирией. После пребывания на свету у больных эритроциты частично разрушаются. Но солнечные лучи не проникают в тело человека глубоко. Поэтому у людей, страдающих гематопорфирией, при освещении наибольшей

опасности подвергаются клетки кожи: образуются плохо заживающие сильные ожоги, воспаления, язвы. Поскольку гематопорфирин поглощает главным образом лучи с длиной волны 3500—4200 Å, т. е. фиолетовые и ближние ультрафиолетовые, то особенно опасен прямой солнечный свет, содержащий ультрафиолетовые лучи. Свет Солнца, прошедший через оконное стекло, так же, как и свет ламп накаливания, не опасен для больного.

По роду своих занятий человек соприкасается с тысячами красящих веществ, и многие из них он изготавливает своими руками. Не могут ли они вызвать одну из описанных выше реакций в организме, которые объединяются названием «фотодинамический эффект»? Такая опасность действительно существует. Если краситель длительное время всасывается через кожу, то при несоблюдении мер предосторожности под лучами Солнца на коже образуются долго незаживающие язвы, экземы, воспаления. Так действуют, например, применяемое в парфюмерии бергамотовое масло, которое добывают из кожуры цитрусовых, зеленое мыло, некоторые синтетические продукты. Из числа естественных красителей фотодинамическое действие оказывают растительные соединения — фурукумарины псорален, ангелицин, бергаптен, ксантотоксин и др.

Все канцерогенные вещества обладают свойствами фотосенсибилизаторов. Поэтому не исключено, что их способность поглощать и передавать лучистую энергию благоприятствует злокачественному перерождению клеток.

Некоторые болезни домашних животных вызываются попавшими в организм фотосенсибилизаторами растительного происхождения. Такова, например, болезнь овец, проявляющаяся в сильном возбуждении, беге, судорогах (в народе она называется вертячкой), когда растительный корм овец содержит фотосенсибилизатор гиперицин. В Южной Африке у больных овец появляются желтуха, отек кожи на голове. Виновником заболевания оказывается продукт частичного разрушения хлорофилла — филлоэритрин, образующийся в кишечнике овец. При нормальном состоянии он всасывается в кровь и затем выводится с желчью. Но если отток желчи нарушен, филлоэритрин, накапливаясь в организме, вызывает болезнь.

Таким образом, некоторые красители в результате фотодинамического эффекта могут оказывать вредные воздействия на организм. Но иногда с их помощью удается

получить и полезный, даже лечебный эффект. Например, гематопорфирин в малом количестве, в виде препарата гемофирина, успешно применяется при пониженном кровяном давлении, угнетенном состоянии, депрессии, некоторых психических заболеваниях. Он повышает жизненный тонус, улучшает настроение, работоспособность.

Существует также кожное заболевание витилиго, при котором отдельные участки кожи лишены пигмента, не загорают и выделяются на фоне пигментированных участков. Длительная (в течение 1—2 месяцев) обработка этих участков растворами фурукумаринов и псоралена в ряде случаев дает хороший эффект, обеспечивает пигментацию кожи.

Фотосенсибилизация — это только один из типов фотохимических реакций, в которых участвуют молекулы красителей, поглотившие свет. Важнейшее значение ее состоит в том, что с помощью особых веществ — фотосенсибилизаторов — организм получает возможность утилизировать энергию фотонов видимого света, которая сама по себе слишком мала, чтобы вызвать значительный фотохимический эффект. «Посредническая» роль в этом процессе красителей-фотосенсибилизаторов, и в первую очередь хлорофилла, весьма велика.

Послесвечение и свечение

Одним из естественных путей отдачи энергии света, поглощенной красителями, является излучение. Возбужденный электрон скачком возвращается на свое место в атоме, а избыточная энергия высвечивается в виде кванта излучения. Вторичное излучение, называемое флуоресценцией, — одна из разновидностей послесвечения. Как ни мала длительность возбуждения электрона (10^{-7} — 10^{-9} сек), часть электронной энергии успевает за это время рассеяться в виде энергии вибрации молекул. Поэтому излученный квант обычно немного меньше поглощенного, а длина волны излучаемого света — несколько больше (правило Стокса).

При некоторых обстоятельствах длительность послесвечения составляет десятки доли секунды и даже целые секунды. Это явление было названо фосфоресценцией, так как оно казалось похожим на свечение фосфора. В действительности же фосфор светится по совершенно дру-

гим причинам. Что же касается флюоресценции, то физическую природу этого явления раскрыл выдающийся советский физик С. И. Вавилов. Он обратил внимание на то, что флюоресценция лучше выражена при низких температурах или в жестких, стеклообразных средах, т. е. в условиях, когда подвижность молекул ограничена. Чтобы понять природу процесса флюоресценции, рассмотрим более подробно схему возбужденного состояния атома.

Когда электрон возвращается с высокого энергетического уровня на исходный, иногда происходит «заливка». Если до разрядки электрон успевает растратить значительную часть своей энергии, он оказывается на промежуточном уровне. Вернуться на исходную, основную орбиту электрон теперь не может. Чтобы выбраться из «ям», электрон должен приобрести растерянную им часть энергии, подняться на уровень возбуждения, а затем скачком вернуться в исходное состояние. Такой сложный путь требует времени для выполнения, поэтому метастабильное возбужденное состояние сохраняется значительно дольше обычного. При высокой температуре раствора недостающая для разрядки метастабильного состояния энергия может быть легко получена за счет теплового движения молекул. Но при низкой температуре или стеклообразном состоянии раствора разрядка затруднена, поэтому метастабильное состояние и флюоресценция сохраняются особенно долго.

Рассмотренные нами виды послесвечения имеют различную физическую природу, но внешне сходны. В отличие от рассмотренного в одном из предыдущих разделов этой главы температурного свечения, спектральный состав которого зависит от температуры источника и с ростом ее изменяется в соответствии с законом Вина, флюоресценция и флюоресценция должны быть отнесены к холодному свечению, или люминесценции¹, и носят общее название фотолюминесценции, ибо причиной их возникновения является поток фотонов — свет.

Фотолюминесценция широко используется на практике. Улицы наших городов, многие общественные здания и учреждения освещаются лампами дневного света, рабо-

¹ Люминесценция (от греческого «люмен» — свет) — это всякого рода надбавка над температурным свечением источника.

тающими по принципу фотолюминесценции. Находящиеся в электрическом поле пары ртути испускают главным образом ультрафиолетовые лучи. Если на внутреннюю поверхность стеклянной трубки предварительно нанесен слой люминофора — вещества, превращающего кванты ультрафиолета в меньшие по величине фотоны видимого света в соответствии с правилом Стокса, такая лампа при одинаковой мощности потребляемого тока дает в 3—4 раза больше света, чем обычная лампа накаливания. Путем подбора люминофоров ученые добиваются приближения спектра излучения люминесцентных ламп к спектральному составу дневного света.

В нашей стране выпускают в настоящее время люминесцентные лампы четырех типов: дневного света (ДС), холодно-белого света (ХБС), белого (БС) и тепло-белого света (ТБС). Во всех лампах возбуждает люминесценцию резонансная линия паров ртути с длиной волны 2537 Å. Стеклянная трубка лампы изнутри покрывается тонким слоем люминофора — галофосфата кальция, активированного сурьмой или марганцем. Изменяя соотношение компонентов, получают 4 названных типа ламп. Излучение ламп дневного света голубовато-белое, соответствует тепловому излучению источника с температурой 6500°C; свет ламп холодно-белого света — 4200°C, белого — 3500°C, тепло-белого (белого с розовато-оранжевым оттенком) — 2700°C. Сейчас более половины светового потока, создаваемого искусственными источниками света, производится люминесцентными лампами. Наряду с высокой экономичностью им присущи малая яркость и слепимость, а также другие ценные качества. Один из недостатков — так называемый стробоскопический эффект — обусловлен тем, что свечение люминесцентных ламп — это по существу ряд вспышек, следующих друг за другом каждую сотую долю секунды, т. е. соответствующих половине периода переменного тока, питающего лампу. При малейшем падении напряжения (а они неизбежны при питании переменным током) лампа гаснет. Спираль лампы накаливания за сотую долю секунды не успевает остыть, а свечение люминесцентной лампы успевает исчезнуть и вновь зажегся. Поэтому движущиеся предметы в свете таких ламп мы видим не плавно перемещающимися, а мелькающими. Устраняют эффект соединением нескольких ламп в одном светильнике.

Явление послесвечения органически связано с процессом поглощения световых квантов. Но существуют и другие виды холодного свечения.

Катодолуминесценция — свечение газов, порошков, кристаллов под влиянием быстро движущихся электронов, разгоняемых электрическим полем. Таковы, например, полярные сияния, возникающие при вторжении в атмосферу электронов солнечного ветра, солнечных вспышек.

Под словом электролюминесценция понимают свечение разреженных газов в электрическом поле дугового или тлеющего разряда. Причиной свечения является возбуждение частиц газа электронами, которые под влиянием разности потенциалов приобретают большую скорость и энергию. В отличие от катодолуминесценции в данном случае электроны не вводятся извне, а вырываются силами электрического поля из атомов самого светящегося газа. На этом принципе работают все газосветные лампы: и те, которые используются для световых реклам (в них светятся инертные газы неон, аргон, криптон и др.), и ртутно-кварцевые лампы, дающие ультрафиолетовые лучи, и другие лампы, применяемые в физиотерапии, и водородные лампы с непрерывным спектром излучения. Неоновые трубки дают оранжевое свечение, гелиевые — желтое, аргонные со ртутью — синее, аргонные со ртутью в желтых трубках — зеленое. Белесоватое свечение дают пары ртути и углекислый газ. Газовый разряд в парах ртути при низком давлении дает линейчатое излучение в основном с длинами волн 1849 и 2537 Å. Кварцевые трубки пропускают вторую линию. Такие лампы называются бактерицидными, так как ультрафиолетовые лучи в области 2500—2650 Å губительны для микроорганизмов. При увеличении давления паров ртути и использовании трубок из увиолевого стекла получают длинноволновое ультрафиолетовое излучение (2804 и 3130 Å). Такие лампы называются эритемными — они вызывают покраснение кожи и загар.

Сернистый цинк, особенно при добавке серебра, меди или марганца, светится под влиянием приложенного переменного электрического поля. Это явление используется для создания больших светящихся поверхностей, для сигнализаций, в целях рекламы и т. п.

Явления катодо- и электролюминесценции находят широкое применение в технике. Электронный луч в кине-

скопах — электронно-лучевых трубках телевизоров скользит по экрану, покрытому люминофором, перемещаясь по горизонтали и вертикали под влиянием магнитных и электрических полей (рис. 15), давая изображение.

Сходную физическую природу имеет свечение, возникающее под влиянием процессов радиоактивного распада и рентгеновского излучения (радиолуминесценция). Возникающие при распаде ядер частицы (протоны, α -частицы, электроны и др.) непосредственно ведут к возбуждению и ионизации атомов некоторых веществ. Свечение

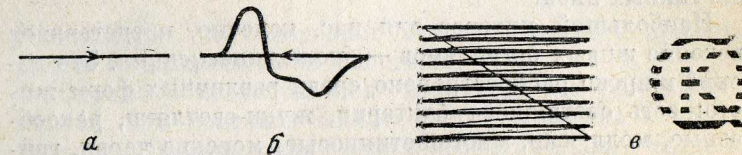


Рис. 15. Развертка изображения кинескопа

а — горизонтальная; б — вертикальная; в — растровая

вызывают также выбитые ими и рентгеновскими квантами электроны. Каждая ионизирующая частица вызывает самостоятельную вспышку света. Поэтому специальными кристаллами, светящимися под влиянием таких частиц, пользуются для измерения количества распадов, дозы излучения. Счетчики излучения с такими кристаллами называются сцинтилляционными (от латинского слова сцинтилла — искра, вспышка). Рентгеновские люминесцирующие экраны делают видимым невидимое изображение, создаваемое рентгеновскими лучами, прошедшими через тело больного, позволяют сразу видеть больной орган. Одновременно они защищают врача от облучения.

Светящиеся составы, содержащие в качестве источников радиолуминесценции ничтожное количество радия или тория, используют для изготовления светящихся циферблатов часов. Благодаря длительности процесса распада радия подобное свечение сохраняется без изменений сотни лет.

Свечение, возникающее при трении некоторых веществ, например при раскалывании кусков рафинада, — **триболюминесценция** — и при раздавливании некоторых кристаллов — **кристаллолюминесценция** — является резуль-

татом возникновения статических электрических полей на трущихся поверхностях или в местах разлома. При разряде статического электричества возникает ультрафиолетовое излучение, которое и есть непосредственная причина люминесценции.

Источником энергии для свечения могут служить разнообразные химические реакции, главным образом реакции окисления. Примерами такого свечения — *хемилюминесценции* — являются окисление фосфора (изделия из фосфорита длительное время светятся и в темноте), свечение гнилых пней.

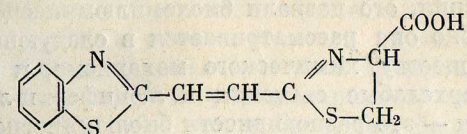
Наибольший интерес для нас, конечно, представляет свечение живых организмов — *биололюминесценция*. Это явление широко распространено среди различных форм живого: есть светящиеся бактерии, жуки-светляки, ракообразные, моллюски, многощетинковые, морские черви, грибы, простейшие, рыбы.

Всего насчитывается 245 светящихся видов животных, в том числе 20 видов простейших, 51 — кишечнополостных, 47 — моллюсков, 19 — кольчатых червей, 40 — членистоногих, 60 — хордовых. Таким образом, светящиеся виды встречаются на всех уровнях организации животного мира, от одноклеточных до рыб. Свечение животные используют для отыскания особей другого пола. Жуки-светляки, приближаясь, сигнализируют на расстоянии в сотни метров вспышками с ритмом в 1 минуту.

Морские черви, обитающие у Багамских островов, всплывают для размножения после заката Солнца, но до восхода полной Луны, и отыскивают друг друга по свечению. Эти огоньки были приняты Колумбом в октябре 1492 г. за огни на берегу. Вспышки живого света — отличное средство защиты, отпугивания врагов. От света уплывают даже змеи. И индейцы, привязывая светляков к пальцам ног, успешно используют это свойство живого света. Наконец, освещение весьма полезно при отыскании добычи. Однако у многих видов свечение, очевидно, никак не связано с физиологическими функциями.

Несмотря на различие светящихся организмов и веществ, участвующих в окислении, механизм свечения в большинстве случаев сходен. Восстановленное, богатое водородом органическое соединение — люциферин (от греческого слова «люцифер» — светоносный) — соединяется с кислородом при участии фермента люциферазы.

Люцифераза в 100 раз повышает скорость окисления люциферина и в 100 тыс. раз — выход люминесценции. Люциферин — производное бензотиазола, горючее процесса люминесценции, имеющее такую структуру:



Люцифераза же определяет суть, специфику процесса, делает его биологически значимым.

Однако у медуз свечение возникает без участия ферментов, при контакте особого белка экварина с ионами кальция. Нередко для возникновения живого свечения нужен еще один компонент, кроме люциферина, люциферазы и кислорода (свободного или связанного). Это АТФ (аденозинтрифосфат) — основное звено энергетики живого. Достаточно присутствия 10^{-9} г АТФ, чтобы в растворе люциферина — люциферазы возникла вспышка свечения. Такой «космический фонарик» может быть использован для обнаружения жизни на других планетах, ведь АТФ — неперенная деталь механизма жизни в земном понимании. В процессе быстрого окисления молекулы люциферина приходят в возбужденное состояние и отдают избыточную энергию в виде света с длиной волны 4600—5600 Å (сине-зеленая область спектра). Иногда излучение находится в желтой и даже в красной области спектра. Такое свечение — разновидность хемилюминесценции.

До сих пор мы рассматривали только живое свечение в видимой области спектра, да и то настолько интенсивное, что оно улавливается простым глазом. Но если снять оба этих ограничения, то оказывается, что все живые ткани, у всех живых существ, от медузы до человека, являются источником свечения. Оно настолько слабо, что обнаружить его удастся только с помощью очень чувствительных электронных приборов. Советский ученый Ю. А. Владимиров дал этому свечению заслуженное название «сверхслабое».

Сверхслабые свечения обнаруживаются и в видимой, и в ультрафиолетовой, и в инфракрасной областях спек-

ра. Все они, по-видимому, возникают за счет энергии окисления органических соединений. Следовательно, это тоже разновидность хемилюминесценции.

Чтобы отличить сверхслабое свечение от люциферин-люциферазной реакции, его назвали биохемилюминесценцией. Более подробно она рассматривается в следующей главе. Но и по существу химического механизма, и по происхождению сверхслабые свечения и люциферин-люциферазная реакция — это разновидности биолюминесценции — свечения живых тканей.

О происхождении биолюминесценции современная наука выдвигает смелое предположение. В период зарождения жизни на Земле господствовали восстановительные условия. Кислород в атмосфере появился позже благодаря процессу фотосинтеза. Следовательно, первые живые организмы на Земле не только не нуждались в кислороде, они в нем не размножались. (И сейчас немало есть микроорганизмов, живущих в бескислородных условиях; присутствие кислорода в среде, где они живут, останавливает развитие и размножение таких микроорганизмов.) С появлением зеленых растений в атмосфере начал накапливаться свободный кислород. Из организмов, приспособленных к бескислородным условиям существования, выжили те, которые вырабатывали какие-то способы удаления кислорода из своего тела. Связывание кислорода специально накопленными органическими соединениями, высвечивавшими затем свою избыточную энергию (явление биолюминесценции), способствовало выживанию организмов в новых условиях жизни. Таким образом, четвертая, а по времени возникновения и по универсальности распространения первая функция биолюминесценции — сброс избыточной энергии возбуждения и нейтрализация свободного кислорода. Свечение различных представителей животного мира — это своего рода рудиментарный признак, который лишь на более поздних этапах эволюции нашел новое применение.

Использование явления люминесценции дало ценные результаты в разных областях науки и практической деятельности людей. Люминесцентный анализ состава и чистоты веществ, природы примесей и включений широко применяется в химии, биохимии, биологии, медицине, геологии и т. п. По чувствительности, удобству использования и скорости получения результатов он не имеет себе равных. Люминесцентный анализ позволяет обнаруживать примесь в концентрации 10^{-10} г в 1 г вещества, если эта примесь люминесцирует. Но такой способностью обладают практически все органические соединения, особенно с ароматической структурой. Простейший тип анализа позволяет фиксировать неоднородность пробы, присутствие примеси (например, фальсификацию пищевого продукта, смешение разных сортов продуктов, определение границ распространения кожных заболеваний и т. п.). Качественный люминесцентный анализ состоит в сопоставлении полученного спектра свечения (после освещения пробы ультрафиолетовой лампой с отфильтрованным видимым свечением) со спектрами веществ-эталонов и в установлении природы (идентификации) анализируемого вещества. Количественный люминесцентный анализ более сложен, требует учета количества возбуждающего света, учета присутствия тушащих примесей и т. п.

В промышленности люминесцентный анализ применяется для контроля сырья, чистоты конечных продуктов химического синтеза, выплавляемого металла, в производстве полупроводников. В медицине — для определения присутствия канцерогенных веществ (например, 3,4-бензпирена) в пищевых продуктах, воздухе, воде. С помощью люминесцирующих красителей (флуорохромов) удается прижизненно наблюдать состояние ядра, хромосом, ядрышка и других деталей в клетках, отличать в ткани живые клетки от погибших. В геологии флуорохромы применяют для обнаружения залегания урановых и вольфрамовых руд, обладающих сильной люминесценцией, для выявления алмазов в породе (люминесцирующих в невидимых рентгеновских лучах), для распознавания следов нефти, битумов и изучения их состава и т. п.

Применение дневных люминесцентных красок дало хорошие результаты при оформлении различных сигнальных знаков (дорожных), витрин магазинов, рекламных объявлений, лобовой части локомотивов, автобусов, фюзеляжей самолетов и т. п. Их необычайная яркость объясняется тем, что они не только отражают часть видимых лучей (подобно обычным красителям), но и превращают в видимый свет часть поглощенных коротковолновых лучей Солнца. Поэтому люминесцентные краски некоторое время светятся в темноте. При использовании ультрафиолетовой подсветки, невидимой глазом, люминесцентные краски дают необычайно яркие и контрастные изображения (костров и пожаров, звезд на черном небе и т. п.), позволяют, меняя освещение, превращать зимний пейзаж в летний и т. п.

С помощью стекол, активированных уранилом или церием, очень удобно выявлять наличие невидимого ультрафиолетового излучения (свечения). Возбужденные люминофоры гасятся инфракрасными лучами и также их обнаруживают.

Мы рассмотрели немало сложных вопросов: какова природа света, как он возникает, распространяется, отражается, преломляется, поглощается, к каким результатам приводит взаимодействие света с веществом. Ознакомившись с особенностями видимого света, со строением красителей и пигментов, мы немало узнали о том, какое место занимает свет в возникновении и развитии жизни на Земле, в практической деятельности человека.

Однако солнечный луч, луч жизни — это не только дневной свет, не только полоска видимого глазом спектра. В обе стороны от него простираются невидимые излучения, которые, так же как и видимый свет, оказывают на органический мир разностороннее влияние. Об этих «соседях» видимого света мы и продолжим свой рассказ.

Загадки невидимого света

Спектр лучей, видимых глазом человека, не имеет резких, четко определенных границ. Со стороны фиолетового цвета одни исследователи относили границу к 4000 Å, другие — к 3800, третьи сдвигали ее до 3500 и даже 3200 Å. Очевидно, это объясняется различной световой чувствительностью глаз и свидетельствует о наличии области лучей, не видимых глазом человека.

Когда чувствительный термометр помещен в область спектра видимых лучей, он показывает значительное повышение температуры. Что же произойдет, если передвинуть термометр (или термопару) за пределы видимого спектра? Такие опыты были поставлены в начале XIX в. английским астрономом У. Гершелем. После многократно проведенных исследований он обнаружил, что за границей красного цвета термометр показывает повышение температуры с определенным максимумом. Это послужило для ученого доказательством существования новых лучей, названных впоследствии инфракрасными.

А что происходит за фиолетовой, коротковолновой границей спектра? И здесь под влиянием невидимых лучей обнаружено повышение температуры. Правда, выражено оно значительно слабее, чем за красной границей спектра, и скептики пытались подвергнуть сомнению существование таких лучей.

Когда же в качестве чувствительного приемника света немецкий физик И. Риттер и английский ученый У. Уолластон использовали в 1801 г. фотопластинку, реальность новых лучей, названных ультрафиолетовыми, стала неоспоримой. За фиолетовой границей спектра фотографическая пластинка чернеет даже быстрее, чем под влиянием видимых лучей. Поскольку почернение фотопластинки происходит в результате фотохимической реакции, ученые

пришли к выводу, что ультрафиолетовые лучи весьма активны.

Дальнейшие исследования обнаружили любопытный факт: спектр ультрафиолетовых лучей Солнца очень узок — от 4000 (граница видимого света) до 2900—3000 Å; дальше он резко обрывается. От искусственных же источников света удается получать гораздо более широкий ультрафиолетовый спектр. В чем же дело? Может быть, Солнце не излучает свет с длиной волны короче 2900 Å? С физической точки зрения такая граница была бы необъяснима.

Ответ на поставленный вопрос дал французский ученый А. Корню. Он установил, что озон поглощает ультрафиолетовые лучи короче 2950 Å. Молекулы кислорода в атмосфере состоят из двух атомов; в молекуле озона их три. Если предположить, что Солнце излучает и коротковолновые ультрафиолетовые лучи, то под их воздействием молекулы кислорода должны распадаться на отдельные атомы, которые, присоединяясь к другим его молекулам, будут образовывать частицы озона. В верхних слоях атмосферы озон должен покрывать всю Землю своеобразным защитным экраном. Гипотеза Корню получила подтверждение тогда, когда люди проникли в высокие слои атмосферы. На высоте 25—30 км действительно был обнаружен слой озона.

Количество ультрафиолетовых лучей, достигающих земной поверхности, зависит от высоты стояния Солнца. С ее уменьшением от 60 до 15° над горизонтом общее количество солнечной радиации снижается всего на одну пятую, тогда как количество ультрафиолетовых лучей падает в 20 раз. При этом граница излучения сдвигается в сторону длинных волн. Когда Солнце стоит в зените (в экваториальной области), поверхности Земли достигают лучи длиной 2900 и даже 2890 Å. В средних широтах коротковолновая граница заканчивается на уровне примерно 2970 Å, и то лишь в полдень в летние месяцы. При более низком стоянии Солнца граница сдвигается до 3000 Å и больше. За Полярным кругом Солнце даже летом стоит так низко, что земной поверхности достигают только самые длинноволновые ультрафиолетовые лучи.

При стоянии Солнца в зените его лучи преодолевают толщу атмосферы кратчайшим путем; с уменьшением высоты Солнца над горизонтом путь их в атмосфере стано-

вится длиннее. При этом больше всего рассеиваются ультрафиолетовые лучи, хотя рассеяние синих, голубых, желтых и зеленых лучей также велико.

Интенсивное рассеяние ультрафиолетовых лучей в атмосфере дает возможность сделать два важных вывода. Во-первых, при увеличении высоты над Землей количество этих лучей должно возрастать, а граница пропускания их должна смещаться в сторону более коротких волн. Специальные опыты подтвердили, что при подъеме в гору на каждые 100 м интенсивность ультрафиолетовой радиации возрастает на 3—4%. В горах на большой высоте в составе солнечного света обнаружены лучи с длиной волны 2900 и даже 2850 Å. Во-вторых, доля рассеянных лучей в общем количестве ультрафиолетовых лучей, достигающих земной поверхности, очень велика. На долю рассеянного ультрафиолета в летний полдень приходится от 46 до 70% суммарной ультрафиолетовой радиации, в течение летних месяцев — 35—56%. В остальные месяцы года рассеянная радиация также составляет значительную часть суммарной радиации. В пасмурные дни, когда диск Солнца закрыт тучами, поверхности Земли достигает главным образом рассеянная радиация. Поэтому хорошо загореть можно не только под прямыми лучами Солнца, но и в тени, и в пасмурные дни.

Полеты на высоту в несколько десятков, сотен и даже тысяч километров над Землей позволили изучить особенности солнечного спектра вне экранирующего влияния земной атмосферы. Непрерывный спектр излучения Солнца, пересеченный линиями Фраунгофера, сохраняя полностью свой обычный характер, продолжается до волн длиной 2100 Å. Еще дальше в направлении коротких волн интенсивность непрерывного спектра снижается, и на его фоне появляются уже не темные линии Фраунгофера, а яркие полосы излучения (см. рис. VI на вклейке).

Наиболее яркая линия излучения в этой области — линия водорода 1216 Å (первая линия спектральной серии Лаймана). Другая очень яркая линия (с длиной волны 303,8 Å) принадлежит ионизированному гелию. В интервале от 1000 до 84 Å обнаружены многочисленные спектральные линии ионов гелия, кислорода, азота, углерода, кремния и других элементов, а также все линии серии Лаймана до 919 Å.

В активных участках фотосферы Солнца, особенно во

время хромосферных вспышек, интенсивность ультрафиолетового излучения резко возрастает. В области линии 1216 Å она увеличивается в два с лишним раза, более коротковолновое излучение возрастает значительно сильнее, а рентгеновское излучение (с длиной волны короче 20 Å) усиливается в 10—100 раз. Даже небольшая хромосферная вспышка создает иногда более интенсивный поток ультрафиолетового излучения, чем обычно дает все Солнце.

Ультрафиолетовые лучи, охватывающие огромный диапазон излучений, от 4000 до 20 Å, граничат с видимым светом и рентгеновскими лучами. В земных условиях ультрафиолетовая радиация Солнца ограничена озоновым порогом (2900—2950 Å). Но с помощью искусственных источников ультрафиолетовых лучей (ртутно-кварцевых, водородных, дуговых ламп и др.), дающих как линейчатый, так и непрерывный спектр, можно получить ультрафиолетовые лучи с длиной волны до 1800 Å. Первый вакуумный спектрограф, сконструированный немецким оптиком В. Шуманном, позволил открыть область далекого ультрафиолетового излучения, простирающуюся от 1800 до 1270 Å. Эта область излучения получила название вакуумной, или шуманновской радиации. Пользуясь вогнутой дифракционной решеткой, Лайман получил в 1914 г. линию водорода с длиной волны 1216 Å. В дальнейшем он исследовал область лучей до 500 Å.

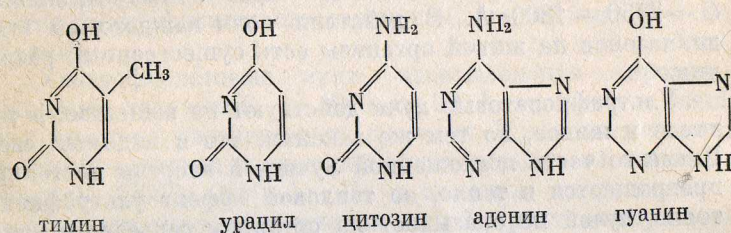
Какое значение для жизни на Земле имеют волны ультрафиолетового спектра? Вся наиболее коротковолновая область спектра, начиная с вакуумной радиации, легко поглощается молекулами воздуха, воды, стекла, кварца и не достигает биосферы. В диапазоне 4000—1800 Å роль лучей различных участков спектра не одинакова. Наиболее богатые энергией коротковолновые лучи сыграли, как мы знаем, существенную роль в образовании первых сложных органических соединений на Земле. Однако эти лучи способствуют не только образованию, но и распаду сложных веществ. Поэтому значительный прогресс форм жизни на Земле наступил лишь после того, как благодаря деятельности зеленых растений наша атмосфера обогатилась кислородом и образовала защитный озоновый шатер. Под его сводами и развернулась эволюция живого, в которой определенную роль играют наиболее длинноволновые ультрафиолетовые лучи (4000—2950 Å).

Итак, если иметь в виду не только излучение Солнца, но и земные источники ультрафиолетовых лучей, то интерес и важность для нас представляет лишь диапазон 4000—1800 Å. В 1932 г. по рекомендации Второго международного конгресса по физиотерапии и фотобиологии внутри этого диапазона выделено три области: область *A* — 4000—3200 Å, область *B* — 3200—2750 Å, область *C* — 2750—1800 Å. В действии волн каждого из этих диапазонов на живой организм есть существенные различия.

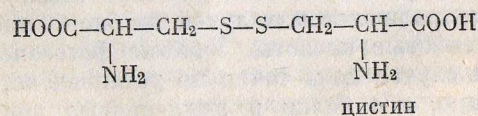
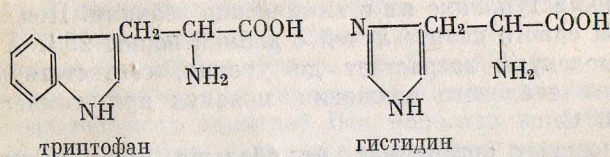
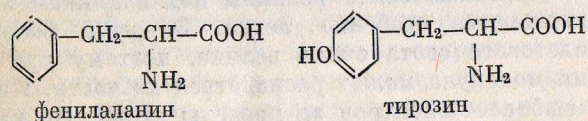
Ультрафиолетовые лучи действуют на вещество, в том числе и живое, по тем же законам, что и видимый свет. Какая-то часть поглощенной лучистой энергии постоянно превращается в тепло, но тепловой эффект ультрафиолетовых лучей не оказывает на организм серьезного влияния. Более распространенный и важный путь отдачи поглощенной энергии ультрафиолетовых лучей — люминесценция. Фотохимические реакции под влиянием этих лучей совершаются особенно легко. Энергия фотонов ультрафиолетового света очень велика, поэтому при их поглощении молекула может распадаться на части. Иногда фотон выбивает электрон за пределы атома. Но чаще всего происходит возбуждение атомов и молекул, облегчающее вступление их в химические реакции. При поглощении одного кванта лучей с длиной волны 2537 Å энергия молекулы возрастает до уровня, соответствующего энергии теплового движения молекул при температуре 38 000° С.

В живых организмах нас больше всего интересует влияние ультрафиолетовых лучей на биополимеры — белки и нуклеиновые кислоты. Участие фотосенсибилизаторов в этом случае пока точно не установлено. Вероятно, оно невелико, ибо белки и нуклеиновые кислоты сами интенсивно поглощают ультрафиолетовые лучи. Очень хорошо поглощают свет молекулы, в которых атомы углерода и азота образуют кольцевые структуры. Такие кольца имеются и в молекулах биополимеров. В нуклеиновых кислотах — это азотистые основания, в первую очередь пиримидиновые (тимин, урацил, цитозин) и пуриновые (аденин, гуанин), поглощающие в основном лучи с длиной волны 2600—2650 Å. В белках циклические аминокислоты триптофан, тирозин, фенилаланин, гистидин хорошо поглощают лучи длиной 2800 Å.

Группировки атомов $\text{F}-\overset{\text{O}}{\parallel}\text{C}-\text{NH}-$, образующие пептидные связи между аминокислотами, поглощают более коротковолновые лучи (1800—2300 Å), а дисульфидные мостики цистина — лучи промежуточной энергии — 2537 Å.



Азотистые основания



Аминокислоты

Поглощенная энергия может мигрировать (перемещаться) по цепи атомов, образующих данную молекулу, без существенной потери, пока не достигнет слабых связей между атомами. Мигрирующая энергия расходуется на разрыв слабых связей. При разрыве пептидных и дисульфидных связей размеры молекулы белка уменьшаются. В ходе данного процесса, называемого фотолизом,

образуются осколки молекул, оказывающие сильное действие на организм. Так, из аминокислоты гистидина после отделения группировки $-\text{COO}-$ образуется гистамин — вещество, расширяющее кровеносные капилляры и увеличивающее их проницаемость. Образование гистамина, по-видимому, играет важную роль в действии ультрафиолетовых лучей на организм.

Кроме фотолиза в биополимерах под действием ультрафиолетовых лучей происходят и другие изменения. Обычно молекулы белка имеют одинаковый электрический заряд. При облучении заряд молекул уменьшается, они легко слипаются, выпадают в осадок, теряют свою активность — ферментную, гормональную, антигенную и др. Все эти сдвиги, вместе взятые, носят название денатурации.

Процессы фотолиза и денатурации белков идут параллельно и независимо друг от друга. Они вызываются ультрафиолетовыми лучами разной длины волны: лучи 2800—3020 Å вызывают главным образом фотолиз, лучи 2500—2650 Å — преимущественно денатурацию. Различное сочетание этих процессов определяет картину действия на организм ультрафиолетовых лучей.

Самая чувствительная к действию ультрафиолетовых лучей функция клетки — деление. Лучи в дозе 10 эрг/мм² уже вызывают остановку деления примерно 90% бактериальных клеток. Но рост и жизнедеятельность клеток при этом не прекращаются. Со временем восстанавливается и деление. Чтобы вызвать гибель 90% клеток, подавление синтеза нуклеиновых кислот и белков, образование мутаций, нужно довести дозу излучения до 100 эрг/мм².

На рис. 16 видно, что кривые бактерицидного и генетического действия ультрафиолетовых лучей, их влияния на рост и деление клеток очень сходны между собой и почти совпадают с кривой поглощения лучей нуклеиновыми кислотами. Значит, ультрафиолетовые лучи вызывают в нуклеиновых кислотах изменения, которые влияют и на рост, и на деление, и на наследственность клеток, и на их существование, т. е. на основные проявления жизнедеятельности клеток. Как известно, действуют на организм, клетку, вещество только то излучение, только те фотоны света, которые поглощаются этим веществом (клеткой, организмом). А нуклеиновые кислоты погло-

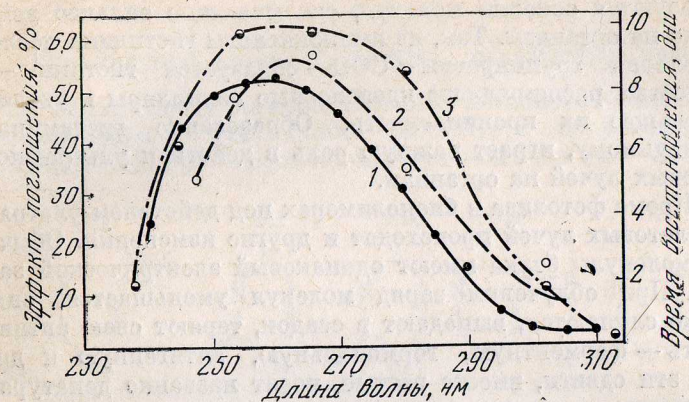


Рис. 16. Кривые поглощения ультрафиолетовых лучей нуклеиновыми кислотами (1), торможения клеточного деления (2) и мутагенного действия ультрафиолетовых лучей (3)

щают кванты невидимого ультрафиолетового излучения гораздо сильнее, чем белки, даже в области максимума адсорбции света белками (около 2800 Å). Не удивительно, что именно в нуклеиновых кислотах происходят наиболее важные процессы, характеризующие биологическое действие ультрафиолетовых лучей.

Значение нуклеинового компонента в механизме действия этих лучей на организм объясняется особой ролью нуклеиновых кислот в клетке. Если любой белок присутствует в клетке в виде десятков и сотен совершенно одинаковых молекул, то каждая молекула ДНК (дезоксирибонуклеиновой кислоты) уникальна. ДНК — это наследственная память клетки. В структуре ее молекул зашифрована информация о строении и свойствах всех клеточных белков, а значит — об устройстве клетки в целом, о характере и направлении процессов обмена веществ в ней. Понятно, что нарушения структуры молекул ДНК особенно важны, особенно опасны, выход из строя любого участка «наследственной» молекулы может оказаться непоправимым или привести к серьезному нарушению жизнедеятельности.

Итак, повреждение ДНК — главное в механизме действия ультрафиолетовых лучей. Но какова природа этих изменений? Мы уже знаем, что поглощают ультрафиолет

циклические структуры азотистых оснований, входящих в состав ДНК. Если основную цепочку — нить этой молекулы, самой большой в органическом мире (молекулярный вес ДНК достигает 12—30 млн.), образуют чередующиеся группировки сахара-дезоксирибозы и фосфорной кислоты, то азотистые основания присоединены к каждому звену этой цепи, образуя как бы ступеньки лестницы. Молекула ДНК состоит из двух нитей, спирально закрученных друг возле друга. Лестница, таким образом, витая. А ступеньки ее — это пары азотистых оснований. Они-то и связывают нити ДНК непрочными, но зато многочисленными водородными связями. При самоудвоении ДНК (а именно с него начинается деление клетки) водородные связи разрываются, и каждая из двух нитей ДНК достраивает недостающую часть.

Квант ультрафиолетового излучения приносит с собой столь значительный запас энергии, что прежняя структура азотистого основания становится «тесной» для него. Обычно избыток энергии расходуется на разрыв двойной связи в наиболее слабом месте молекулы — между 5 и 6 атомами углерода в тимине. В результате образуются две свободные валентности, которые нуждаются в заполнении. Чаще всего разорванная двойная связь восстанавливается. Но если разрыв произойдет одновременно в двух расположенных по соседству азотистых основаниях — валентные связи могут замкнуться не внутри оснований, а между ними. И тогда возникает димер тимина — основной фотопродукт облучения ДНК. Если уподобить двойную спираль ДНК застёжке-молнии, то каждый димер будет соответствовать слившимся зубцам застёжки, препятствующим расхождению нитей. В результате нарушается процесс удвоения ДНК, а затем и деление клеток. С увеличением дозы облучения растет количество димеров, а с ним и нарушения жизнедеятельности, которые на определенном уровне становятся несовместимыми с жизнью. Наряду с образованием димеров определенное значение имеет и окислительное разрушение, дезаминирование азотистых оснований, например превращение аденина в гипоксантин под влиянием ультрафиолета, что также искажает смысл наследственной информации.

В отличие от других физических и химических агентов ультрафиолетовые лучи даже в больших дозах не убивают облученную клетку сразу. Обычно клетка на

Схема фотообразования димеров тимина

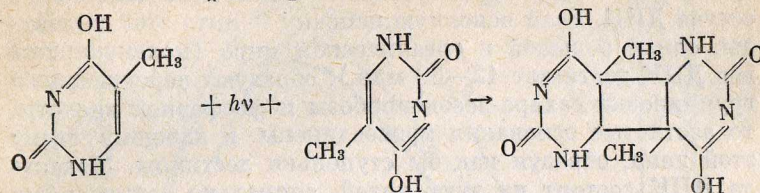
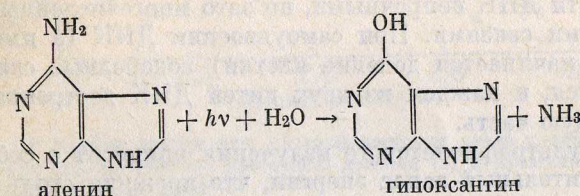


Схема фотоокисления аденина



некоторое время (на 1—2 суток) теряет способность к делению. Затем наступает мнимое выздоровление, и клетка успевает 2—4 раза разделиться, прежде чем наступает окончательная гибель.

Процесс образования димеров (тимина, а также цитозина, димеров тимин-цитозин) лежит в основе не только задержки роста и деления, не только гибели клеток, но и мутагенного, генетического действия. Возникновение прочных валентных связей между азотистыми основаниями нарушает генетический код, искажает смысл наследственной информации. Ведь наследственный язык клетки — четырехбуквенный, именно азотистые основания — его буквы. Точнее, тройка (триплет) азотистых оснований — простейшая единица генетического кода. Если прочная связь возникает (благодаря энергии ультрафиолета) между соседними тиминами в пределах одной нити ДНК, то процесс самоудвоения ДНК и деления клетки не нарушается. Зато дочерние клетки получают по наследству шифровку с опечатками — их жизненная программа будет запутана, опасные абракадабры могут послужить и причиной смерти где-то через 2—3 поколения, либо жизнедеятельность клетки окажется серьезно нарушенной. Так атомно-молекулярные перегрушировки, ставшие возможными благодаря избыточной энергии квантов ультрафио-

летовых лучей, сами становятся причиной нарушения жизни клеток, тканей, органов, всего организма.

Процесс, начавшийся с поглощения фотонов ультрафиолетовых лучей биополимерами, по мере своего развития приводит к таким знакомым всем сдвигам в организме, как покраснение кожи (эритема), ее потемнение (загар, пигментация), антирахитическое, обеззараживающее действие и др.

Действие ультрафиолетовых лучей на кожу

Жаркий летний день, яркое Солнце, безоблачное синее небо, берег реки. Вы лежите, подставив Солнцу свое тело. Проходят минуты блаженного полубытья; ласкающие прикосновения солнечных лучей расслабляют мышцы, снимают ощущение усталости. Нагретые Солнцем участки кожи становятся розоватыми, горячими на ощупь. Это покраснение (калорическая эритема) появляется в результате нагрева кожи видимыми и инфракрасными лучами Солнца и прилива к ней крови. Оно исчезает почти сразу же после прекращения солнечной ванны.

Однако через 2—8 ч снова появляется покраснение кожи вместе с ощущением жжения. Это уже ультрафиолетовая эритема, отличающаяся от калорической некоторыми особенностями. Появляется она после скрытого периода, в пределах облученного участка кожи и сменяется загаром и шелушением. Длительность такой эритемы — от 10—12 ч до 3—4 дней. Покрасневшая кожа горяча на ощупь, чуть болезненна и кажется набухшей, слегка отекающей.

По существу эритема представляет собой воспалительную реакцию, ожог кожи. Но это воспаление особое — безмикробное, асептическое. Если доза лучей слишком велика или кожа особенно чувствительна к ним, отекающая жидкость, накапливаясь, отслаивает местами наружный покров кожи (эпидермис), образует пузыри. В тяжелых случаях появляются участки омертвения, некроза эпидермиса. Через несколько дней после исчезновения эритемы кожа темнеет и начинает шелушиться. По мере шелушения слущивается часть клеток, содержащих пигмент, загар бледнеет. Однако полностью он не исчезает через несколько недель и даже месяцев. Такова картина ультра-

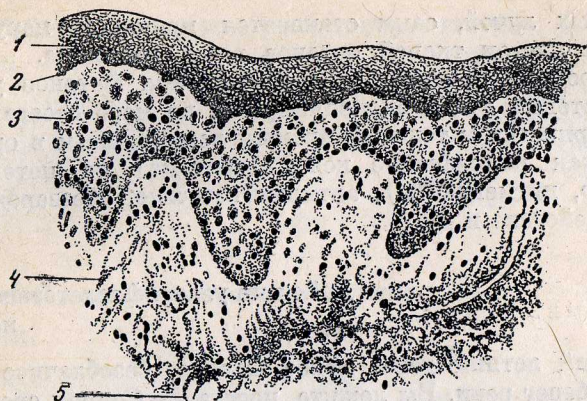


Рис. 17. Поперечный разрез кожи человека под микроскопом

- 1 — роговой слой эпидермиса;
- 2 — зернистый слой;
- 3 — шиповидный слой эпидермиса;
- 4 — сосочковый слой дермы;
- 5 — сетчатый слой дермы

фиолетовой эритемы, если ее наблюдать простым глазом. А если заглянуть внутрь кожных покровов с помощью микроскопа?

Кожный покров, или эпидермис человека, состоит из большого количества клеточных слоев и имеет толщину 0,5 мм (рис. 17). Его назначение — защищать организм от повреждений, колебаний температуры, давления, служить барьером на пути инфекции. Наиболее глубокий зародышевый слой эпидермиса прилегает к собственно коже (дерме), в которой проходят кровеносные сосуды и нервы. В зародышевом слое идет непрерывный процесс размножения клеток; более старые оттесняются наружу молодыми клетками и отмирают. Пласты мертвых и умирающих клеток образуют наружный роговой слой эпидермиса толщиной 0,3 мм, который все время слущивается снаружи и восстанавливается изнутри.

Если падающие на кожу лучи поглощаются мертвыми клетками рогового слоя, они, естественно, не оказывают на организм никакого влияния. Эффект облучения зависит от проникающей способности лучей и от толщины рогового слоя. Чем короче волна ультрафиолетовых лучей, тем меньше их проникающая способность. Лучи короче

3400 Å не проникают глубже эпидермиса. Более длинноволновые лучи достигают сосочкового слоя дермы, в котором проходят кровеносные сосуды. Значит, взаимодействие ультрафиолетовых лучей с веществом происходит исключительно в коже, главным образом в эпидермисе. Именно здесь начинается сложная цепь биохимических и физиологических сдвигов в организме, вызываемых ультрафиолетовой радиацией.

Самые большие изменения происходят в зародышевом слое эпидермиса, где поглощается основное количество ультрафиолетовых лучей. Процессы фотоллиза и денатурации биополимеров приводят к гибели шиповидных клеток зародышевого слоя. Активные продукты фотоллиза белков (гистамин, гистаминоподобные вещества, ацетилхолин и др.) вызывают расширение сосудов, отек кожи, выход лейкоцитов и другие типичные признаки эритемы. Продукты фотоллиза, распространяясь по кровеносному руслу, раздражают также нервные окончания кожи и через центральную нервную систему рефлекторно воздействуют на все органы. Установлено, что в нерве, отходящем от облученного участка кожи, частота электрических импульсов повышается.

От состояния нервной системы зависит степень выраженности эритемы и даже возможность ее образования. Советские ученые (С. А. Бруштейн, А. Е. Щербак, А. Р. Киричинский, Г. С. Варшавер и др.) установили, что при ранениях, перерезках нервов, их воспалениях, при обморожениях эритема на соответствующих участках кожи либо вовсе не появляется, либо выражена очень слабо, несмотря на действие ультрафиолетовых лучей. Сон, наркоз, алкогольное опьянение, физическое и умственное утомление, заболевания угнетают образование эритемы. Поэтому эритема рассматривается как сложный рефлекс, в возникновении которого участвуют активные продукты фотоллиза.

Первое научное описание эритемы дал в 1889 г. русский ученый А. Н. Маклаков, который изучил также действие ультрафиолетовых лучей на глаз (фотоофтальмию) и установил, что в основе их лежат общие причины. Слизистая оболочка глаза — конъюнктива — не имеет защитного рогового слоя, поэтому она более чувствительна к облучению, чем кожа. Резь в глазу, краснота, слезотечение, частичная слепота появляются в результате деге-

нерации и гибели клеток конъюнктивы и роговицы. Клетки при этом становятся непрозрачными. Длинноволновые ультрафиолетовые лучи, достигая хрусталика, в больших дозах могут вызвать его помутнение — катаракту.

В 1899 г. датский ученый Н. Финзен впервые применил ультрафиолетовые лучи для лечения некоторых болезней. Позже были подробно изучены и другие проявления действия этих лучей на организм, особенности эффекта, вызываемого разными участками ультрафиолетового спектра. Оказывается, эритему можно вызвать лучами двух разных спектральных областей. Из ультрафиолетовых лучей, содержащихся в солнечном свете, эритему вызывают лучи с длиной волны 2970 Å. К лучам с меньшей и большей длиной волны эритемная чувствительность кожи снижается. Но с помощью искусственных источников излучения эритему удалось вызвать также лучами в 2500—2550 Å. Лучи с длиной волны 2537 Å дает резонансная линия излучения паров ртути, используемых в ртутно-кварцевых лампах.

Таким образом, кривая эритемной чувствительности кожи имеет двугорбый вид. Седловина между двумя максимумами не случайна — она образовалась за счет экранирующего, поглощающего действия рогового слоя кожи. Если удалить (осторожно срезать) отмершие слои ороговевших клеток, то лучи с длиной волны 2700—2800 Å также вызывают в этом участке кожи покраснение, повышение температуры, легкую болезненность, отечность и другие признаки эритемы.

Одно из средств защиты организма от перегревания — прилив крови к коже, расширение кожных сосудов. При этом увеличивается температура кожи и теплоотдача путем излучения (в инфракрасной области спектра), а также путем конвекции (нагрева прилегающего к коже слоя воздуха). Но если воздух и окружающие предметы сами имеют высокую температуру, вступает в действие еще один механизм отдачи тепла — испарение за счет потоотделения.

Все эти механизмы терморегуляции предназначены для защиты исключительно от видимых и инфракрасных лучей Солнца. Но большое количество ультрафиолета также опасно, и потому у человека одновременно с потоотделением включается и механизм защиты от ультрафиолетовых лучей. Пот, оказывается, содержит урокановую

кислоту — вещество, хорошо поглощающее эти лучи благодаря наличию в его молекулах бензольного кольца.

В естественных условиях солнечного освещения вслед за эритемой развивается пигментация кожи, загар. Спектральный максимум пигментации (3400 Å) не совпадает ни с одним из пиков эритемной чувствительности. Подбирая источник излучения, можно вызвать пигментацию без эритемы и наоборот.

Эритема и пигментация не являются стадиями одного процесса, хотя они и следуют одна за другой. Это проявления разных, связанных друг с другом процессов. Кожный пигмент меланин образуется в клетках самого нижнего слоя эпидермиса — меланобластах. Исходным материалом для образования меланина служат аминокислоты тирозин, диоксифенилаланин, а также продукты распада адреналина. Ультрафиолетовые лучи ускоряют образование и накопление меланина.

Каков смысл загара, накопления меланина, если исходить из интересов организма? Он защищает клетки дермы, расположенные в ней сосуды и нервы от длинноволновых ультрафиолетовых, а также от видимых и инфракрасных лучей, вызывающих перегрев и тепловой удар.

Для защиты от ультрафиолетовых лучей большое значение имеет утолщение рогового слоя эпидермиса. Через один — три дня после образования эритемы в зародышевом слое эпидермиса начинается усиленное деление клеток. Эпидермис утолщается, количество слоев клеток увеличивается; через такой барьер ультрафиолетовым лучам проникнуть труднее. Если облучение повторяется, роговой слой продолжает утолщаться. Вот почему загоревшая кожа груба и шершава на ощупь.

Природа использовала энергию ультрафиолетовых лучей для того, чтобы вызвать в организме защитную реакцию не только против этих лучей, но и против других лучей, входящих в состав солнечного спектра, — видимых и инфракрасных.

Ближние инфракрасные лучи и видимый свет, особенно его длинноволновая, красная часть, проникают в ткани гораздо глубже, чем ультрафиолетовые лучи, — на глубину до 3—4 мм. Не пропустить эти лучи в глубь тела, защитить от перегрева нежные и привыкшие к постоянству температуры внутренние органы — вот одна из задач, с которыми великолепно справляется меланин. Гранулы

темно-коричневого, почти черного пигмента поглощают в широкой области спектра.

Меланин — основной пигмент тела человека. Он придает окраску не только загоревшей коже, но и волосам, ресницам, радужной оболочке глаз. Меланин содержится и в пигментном слое сетчатки глаза, участвует в восприятии света.

Исходный продукт для образования меланина — аминокислота тирозин, которая под влиянием фермента тирозиназы окисляется в диоксифенилаланин. Присутствие фермента совершенно необходимо для образования меланина. Генетический дефект, сопровождающийся нарушением продукции тирозиназы, проявляется в отсутствие пигментации. Люди с таким дефектом имеют белые волосы, ресницы и розовые глаза (через радужную оболочку, лишенную пигмента, просвечивают кровеносные сосуды), носят название альбиносов. Отсутствие меланина не слишком беспокоит их. Однако против солнечных лучей они беззащитны. Пребывание под прямыми лучами Солнца означает для них ожоги, волдыри и даже некрозы.

Но меланин — не просто пигмент, не пассивный защитный экран, отгораживающий ткани и внутренние органы от не в меру горячих лучей Солнца. Меланин — необыкновенное вещество, защитные функции которого в организме значительно шире и сложнее. Когда кванты ультрафиолетовых лучей поглощаются молекулами белков, нуклеиновых кислот и других органических соединений, один из вероятных результатов такой встречи — распад и расщепление молекул. Осколки разрушенных молекул, обладающие высокой биохимической активностью, носят название ионов, если они несут электрический заряд, и свободных радикалов, если они обладают неспаренным электроном, свободной валентностью. Свободные радикалы реагируют с молекулами белков и нуклеиновых кислот, дополняя и усиливая их непосредственное повреждение, порождают лавинообразно нарастающий процесс, подобный цепной реакции распада ядер урана, возбуждаемый потоком нейтронов. Остановить эту цепную реакцию — значит ослабить повреждающее действие излучения, предотвратить его опасные для здоровья последствия.

И с этой задачей меланин справляется великолепно. Молекулы меланина, образующиеся в результате окислительной конденсации тирозина, диоксифенилаланина, пи-

рокатехина — это огромные полимерные молекулы с сетчатой структурой. В процессе окисления предшественников меланина также образуются свободные радикалы, так называемые семихиноны. Большинство из них, соединяясь, взаимно нейтрализуется, но часть сохраняет неспаренные электроны и в составе молекулы меланина. На вооружении современной науки состоит метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), позволяющий обнаруживать присутствие свободных радикалов. С помощью этого метода удалось показать, что гигантские сетчатые молекулы меланина обладают свойствами стабильных свободных радикалов. Более того, в звеньях этой сети легко «застревают», связываются, нейтрализуются другие свободные радикалы.

Подобно чудесному защитному покрову, сетчатые молекулы меланина задерживают и обезвреживают активные, сильнодействующие осколки разрушенных ультрафиолетом молекул, не пропуская их в кровь, во внутренние среды организма. И эта защитная функция меланина не менее важна, чем поглощение тепловых лучей. Статистика бесстрастно утверждает, что рак кожи у лиц с сильно пигментированной кожей при равных условиях освещения Солнцем развивается примерно в 10 раз реже, чем у белых. Заслуга меланина здесь несомненна.

В природе существуют излучения, гораздо более высокоэнергетичные и сильнодействующие, чем ультрафиолетовое, — это рентгеновские и гамма-лучи. При их взаимодействии с живыми тканями свободные радикалы и ионы образуются значительно чаще и в больших количествах, чем при освещении кожи Солнцем. К тому же гамма-лучи проникают в тело человека на всю его глубину, и процесс расщепления молекул не ограничивается только кожей. Опасность повреждения органов и тканей свободными радикалами в этом случае неизмеримо больше, чем при освещении ультрафиолетом. Меланин кожи в этих условиях не может полностью выполнить свою защитную роль, так как не в силах задержать глубоко проникающее излучение. Но если большие молекулы меланина превести в растворимое состояние (обработав его слабой щелочью) и затем ввести в кровь, разрушительное действие ядерных излучений будет заметно ослаблено. Так защитные свойства меланина находят и новые, столь же важные и полезные применения.

Попав в желудочно-кишечный тракт, белки, жиры, углеводы пищи распадаются на простые молекулы аминокислот, простых сахаров, жирных кислот, из которых животный организм строит сложнейшие вещества, необходимые для роста его клеток и тканей. Но есть вещества, довольно простые по строению, которые непосредственно усваиваются организмом из пищи, а не синтезируются в его тканях. Название этих веществ — витамины (жизненные амины) — не совсем точно, так как немногие из них содержат аминогруппу NH_2 . Но жизненная важность, необходимость их для человека — несомненна.

Суточная потребность взрослого человека в витаминах не превышает 2—5 мг; только витамин С (аскорбиновая кислота) должен поступать ежедневно в количестве 50—75 мг. Из-за недостатка даже такого ничтожного количества «примесей» в организме приостанавливается рост клеток, развиваются тяжелые заболевания. Например, недостаток витамина С вызывает цингу — болезнь, при которой кровоточат десны, выпадают волосы, развивается общая слабость, хрупкость сосудов, происходят кровоизлияния под кожу, во внутренние органы и т. п. При отсутствии в организме витамина B_1 (авитаминоз B_1) поражаются нервные стволы (полиневрит), а недостаток витамина А вызывает болезнь, которую называют куриной слепотой.

В мясе и жире животных содержится жирорастворимый витамин D. В отличие от других витаминов он может не только поступать в организм с пищей, но и образовываться в нем из других веществ. В различных растительных и животных продуктах содержатся стероидные вещества, которые сами по себе витаминной активностью не обладают, но очень близки по своему строению к витамину D. Это эргостерин, присутствующий в яичном желтке, проростках пшеницы, дрожжах, грибах, а также 7,8-дегидрохолестерин, которого много в коже и мышцах животных и человека. Чтобы превратиться в витамин D, его предшественники, провитамины, должны претерпеть два превращения: разрыв одного из углеродных колец (кольца В) и образование третьей двойной связи в молекуле. Для осуществления этих химических перегруппировок необходима энергия. И природа уже на ранних этапах

эволюции позвоночных изобрела простой и остроумный механизм использования для этой цели энергии ультрафиолетовых лучей Солнца. Сальные железы кожи ежедневно вырабатывают около 20 г кожной смазки, содержащей значительное количество 7,8-дегидрохолестерина или эргостерина. Под влиянием ультрафиолетовых лучей Солнца с длиной волны 2800—3130 Å это вещество превращается в витамин D и всасывается с поверхности кожи в кровь.

Физиологическая роль витамина D заключается в том, что он способствует всасыванию из кишечника и усвоению кальция. Кальций входит в состав костей, участвует в свертывании крови, уплотняет клеточные и тканевые мембраны, регулирует активность различных ферментов, выполняет много других важных функций. Постоянство концентрации ионов кальция в крови и других жидкостях организма имеет поэтому важное значение. В организме человека крохотные околотитовидные железы выделяют особый гормон — паратиреокальцитонин, с помощью которого содержание кальция (и фосфора) в крови поддерживается на одинаковом уровне независимо от поступления с пищей. Если в организме недостает витамина D, кальций пищи не усваивается и потребность в нем восполняется за счет кальция костей. Поэтому при авитаминозе D наиболее характерно поражение костей.

Болезнь, возникающая при недостатке витамина D у детей первых лет жизни, которых заботливые родители прячут от лучей Солнца, называется рахитом. Рахитичные дети капризны, раздражительны, плохо развиваются и не прибавляют в весе. Главные признаки болезни связаны с нарушением формирования скелета. Больные рахитом дети поздно начинают ходить или, болея, перестают ходить; их кости, теряя кальций, становятся чрезмерно гибкими и под влиянием тяги мышц и тяжести тела искривляются.

Недостаток витамина D иногда ощущается и взрослыми людьми. Во время беременности, например, увеличивается потребность организма в кальции. Кальций, необходимый для формирования скелета ребенка, при плохой усвояемости его из пищи заимствуется из костей материнского организма. При этом развивается размягчение костей — остеомалация.

Чтобы предупредить развитие рахита, пользуются как

естественными источниками витамина D (жиром печени трески), так и искусственными, облучая провитамины (эргостерин, холестерин и др.) ультрафиолетовыми лучами. Лучи короче 2700 \AA , не содержащиеся в солнечном свете, разрушают витамин D. При искусственном получении витамина из светового потока ультрафиолетовых ламп с помощью специальных фильтров исключаются наиболее коротковолновые лучи. Новые методы искусственного получения витамина D успешно разрабатываются в Институте биохимии АН УССР.

Витамин D предотвращает развитие рахита и лечит развившееся заболевание. Но самый лучший эффект наблюдается все же тогда, когда этот витамин образуется естественным путем в коже ребенка, освещенной Солнцем. В этом случае используется сила природы — путь, наиболее привычный для организма.

Однако световое голодание — это не только рахит. Это состояние, описанное и изученное особенно подробно советскими учеными, гораздо сложнее и шире. Потеря известными тканями зуба (эмалью, дентином) приводит к их разрушению. В организме больного туберкулезом известковые отложения ограничивают очаги в легких, как бы заключают в темницу возбудителей болезни. Из-за недостатка ультрафиолетовых лучей может нарушиться нормальное поступление кальция в организм и обостриться течение болезни. Потеря организмом кальция усиливает хрупкость мелких кровеносных сосудов — капилляров, увеличивает проницаемость тканей. Поэтому люди, долго живущие без солнечного света, легко простуживаются и тяжело переносят простуду. Солнечное голодание проявляется также в раздражительности, бессоннице, быстрой утомляемости и других признаках расстройства функций нервной системы человека.

В каких условиях может возникнуть световое голодание человека? Прежде всего большое значение имеют географические и климатические условия. На различных широтах земной поверхности длительность светового дня различна в разные сезоны года. Если на экваторе день всегда равен ночи и составляет 12 ч, то у полюсов ночь продолжается полгода. Различна и высота Солнца над горизонтом. В экваториальной области ежедневно в полдень Солнце стоит в зените, а за полярным кругом даже во время светлой половины года оно не поднимается вы-

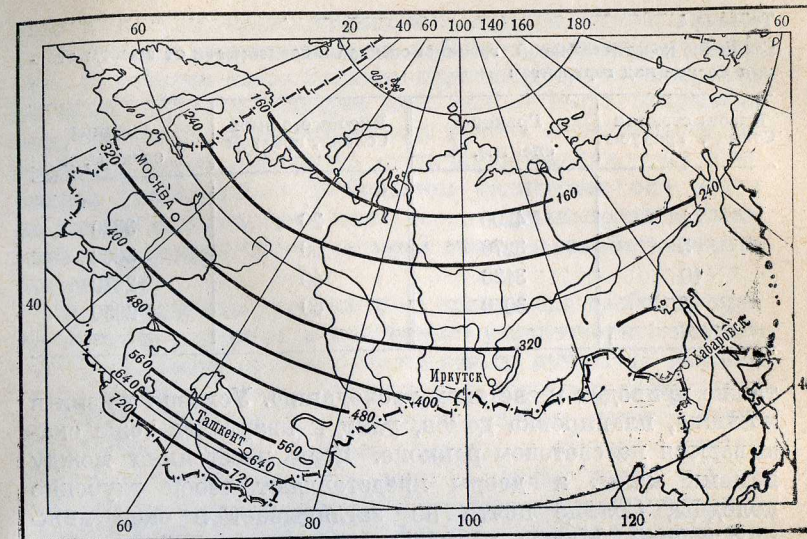


Рис. 18. Распределение ультрафиолетовой освещенности по территории СССР (годовые дозы эритемной радиации областей В + А, эр.-час/м²)

соко. При высоте стояния Солнца $7,3^\circ$ в его свете вследствие рассеяния отсутствуют даже фиолетовые лучи, не говоря уже об ультрафиолетовых. В табл. 4 показана зависимость коротковолновой границы спектра от высоты Солнца над горизонтом.

Чем севернее район проживания людей, тем меньше ультрафиолетовых лучей достигает Земли, тем длительнее период их недостатка (рис. 18). В Ленинграде, по данным Н. Ф. Галанина, с 15 октября по 15 марта продолжается биологическая полярная ночь: лучи, вызывающие эритему, не доходят до Земли. Суровые условия полярного и приполярного климата вынуждают людей почти круглый год носить плотную одежду, сквозь которую не могут проникнуть лучи Солнца, и это усугубляет световой голод.

Не менее важное значение имеют условия труда и жизни людей. В больших городах, где воздух загрязнен пылью, дымом, копотью, короткие ультрафиолетовые лучи почти не достигают поверхности Земли. Длительная работа в шахтах и рудниках, машинных отделениях и закрытых заводских цехах, труд ночью, а сон в дневные часы

в весе, более энергично развиваются, когда получают свою ежедневную порцию солнечных лучей.

Особенно сильно продукты фотоллиза возбуждают деятельность той системы организма, которая непосредственно ведаёт защитой от вредных внешних влияний. Называется она ретикуло-эндотелиальной или, по определению выдающегося советского ученого А. А. Богомольца, физиологической системой соединительной ткани. В ней вырабатываются белые тельца крови и тканей (лейкоциты и гистиоциты), особые белки (антитела), разрушающие чужеродные вещества и микробы. Под влиянием эритемных доз ультрафиолетовых лучей лейкоциты и гистиоциты становятся более активными, энергичнее поглощают и разрушают микроорганизмы; антитела вырабатываются быстрее и в большем количестве. Значительно возрастает сопротивляемость не только простудным заболеваниям, но и другим болезням, быстрее заживают раны. Кожа, защищающая тело от ушибов, проникновения бактерий, ядов и раздражающих веществ, под влиянием облучений усиливает свои барьерные свойства. Наконец, ультрафиолетовые лучи устраняют повышенную чувствительность организма — аллергию. При многократном воздействии ультрафиолетовых лучей продукты распада белков, возбуждая симпатико-адреналовую систему, как бы тренируют ее, увеличивая выносливость организма, закаляют его.

Такое же значение имеет тренировка систем, вырабатывающих гистаминазу — фермент, который разрушает гистамин и быстро устраняет его вредное влияние на организм.

Однако ультрафиолетовые лучи могут действовать на организм и посредством других природных факторов. Речь идет о влиянии ультрафиолетовых лучей на воздух, которым мы дышим, на его физическое состояние. Загрязнение воздуха пылью, газами, водяными парами оказывает вредное влияние на организм. Ультрафиолетовые лучи Солнца усиливают процесс естественного самоочищения атмосферы от загрязнений, способствуя более быстрому окислению пыли, частичек дыма и копоти, уничтожая находящиеся на пылинках микроорганизмы. Конечно, эта природная способность к самоочищению имеет пределы и при очень сильном загрязнении воздуха оказывается недостаточной.

Но роль ультрафиолетовых лучей не ограничивается этим. Самый чистый воздух все же недостаточно «аппетитен», если он не прошел «обработки» лучами Солнца. Советскими учеными А. Л. Чижевским, Л. Л. Васильевым, А. А. Минхом установлено, что воздух открытых пространств действительно обладает целебными свойствами, и ультрафиолетовый луч — одна из причин появления этого свойства.

Ультрафиолетовые, космические лучи и другие природные факторы ионизируют воздух. Ионы благодаря наличию заряда легче вступают в химические реакции, свободнее проникают через тканевые мембраны. Азот, составляющий основную массу атмосферы (78%), и углекислота (0,03%) в результате ионизации существуют преимущественно в виде положительных ионов. Выбитые электроны связываются главным образом с молекулами кислорода, обладающими особыми магнитными свойствами. Если азот не влияет на организм человека, а углекислота вредна, то отрицательные ионы кислорода, легко проникая в кровь через стенку легочных пузырьков — альвеол, лучше взаимодействуют с гемоглобином, улучшают снабжение организма столь необходимым для его жизни продуктом, влияют на уровень серотонина и других биологически активных веществ в крови. Вот почему чистый воздух так целебен для человека, вот почему так легко и глубоко дышится на лоне природы!

К сожалению, примеси, содержащиеся в воздухе больших городов, жилищ и общественных зданий, быстро уничтожают или сводят до минимума количество легких аэроионов. В последние годы широкое применение находят установки кондиционирования воздуха, которые очищают воздух от примесей, придают ему нужную температуру и влажность. Но такие установки, как правило, не могут восстанавливать нормальный ионный состав воздуха. Заменить природные факторы, в том числе ультрафиолетовые лучи, не так-то просто! Но ученые нашли выход: были созданы ионизаторы — приборы, искусственно ионизирующие воздух.

Для здоровья людей полезны легкие отрицательные аэроионы — ионы кислорода. К сожалению, многие конструкции ионизаторов дают ионы обоих зарядов или, что еще хуже, в результате разбрызгивания воды дают тяжелые ионы. Пожалуй, наилучшим является ионизатор коп-

струкции А. Л. Чижевского. В этом приборе поток отрицательных аэроионов образуется в электрическом поле.

Ионизация атмосферы — еще один важный путь воздействия ультрафиолетовых лучей на жизнь и здоровье человека. Чтобы человек до глубокой старости сохранял душевную бодрость, ясность ума и несокрушимое здоровье, он должен уметь использовать благотворную силу солнечного света.

«Куда заглядывает Солнце, туда не заглядывает врач»

Это старинное изречение весьма современно и в наши дни. В трущобах больших городов в капиталистических странах немало людей томится без света, без надежды на лучшую жизнь. Именно там — в темных и тесных жилищах — издревле гнездятся рахит и туберкулез, ревматизм и бронхиальная астма, сыпной тиф, трахома, дизентерия, холера, черная оспа — болезни, большинство которых ликвидировано в нашей стране.

Ультрафиолетовые лучи, разрушающие клетки зародышевого слоя кожи человека или клетки слизистой оболочки глаз, легко уничтожают и возбудителей всевозможных заразных болезней: туберкулезные палочки, холерные вибрионы, стрептококки, вирусы гриппа и др. Механизм разрушения одинаков, но значение бактерицидного действия ультрафиолетовых лучей огромно и вполне самостоятельно.

Наиболее эффективно и быстро уничтожают микроорганизмы лучи с длиной волны 2537—2675 Å. В обе стороны спектра бактерицидная эффективность излучения падает. Если принять максимум эффекта за 100%, то активность лучей с длиной волны 2900 Å (близких к коротковолновой границе солнечного спектра) составит 30%, действие лучей с длиной волны 3000 Å — всего 6%, а лучей, лежащих на границе видимого света (4000 Å), — лишь 0,01% максимальной.

Микроорганизмы обладают различной чувствительностью к ультрафиолетовым лучам. Дрожжи, плесневые грибки и споры бактерий гораздо устойчивее к их действию, чем вегетативные формы бактерий. А споры некоторых грибков, окруженные толстой и плотной оболочкой, отлично себя чувствуют в высоких слоях атмосферы и,

не исключена возможность, могут путешествовать даже в космосе. Чувствительность микроорганизмов к ультрафиолетовым лучам особенно велика в период деления и непосредственно перед ним. Кривые бактерицидного эффекта, торможения деления и роста клеток почти точно совпадают с кривой поглощения ультрафиолетовых лучей нуклеиновыми кислотами (см. рис. 16). Следовательно, денатурация и фотолит нуклеиновых кислот — важнейшей составной части аппарата наследственности — образование димеров тимина, сшивок между нитями ДНК, приводят к прекращению деления и роста клеток, а в больших дозах — к их гибели.

У человека среди микроорганизмов наряду с друзьями немало и врагов. Ультрафиолетовые лучи — одно из самых мощных орудий борьбы с вредными микробами. В ртутных лампах низкого давления, носящих название бактерицидных (серия БУВ), на долю излучения с длиной волны 2537 Å, обладающего максимальным бактерицидным эффектом, приходится больше 85% светового потока. Эти лампы чаще всего применяют для уничтожения микроорганизмов.

...Идет операция. Хирурги в стерильных халатах, шапочках и масках склонились над больным. Края раны закрыты стерильной простыней, обработаны йодом. Руки хирургов надежно упрятаны под тонкими резиновыми перчатками. Казалось бы, все сделано для того, чтобы уберечь операционную рану от заражения микробами. И все же гнойные осложнения иногда бывают после самой тщательной медицинской подготовки. Источником заражения является воздух. Для дезинфекции воздуха отличный эффект дают бактерицидные лампы. При их использовании число осложнений уменьшается в 5—10 раз.

Сейчас бактерицидными лампами оборудованы многие операционные, перевязочные, больничные палаты, ясли и детские сады. Это очень полезное нововведение. Только нужно помнить, что бактерицидные лучи вредны для кожи и прежде всего для глаз. Поэтому лампы следует включать либо тогда, когда в помещении нет людей, либо направлять их свет вверх и в стороны, но не вниз, избегая при этом и отражения от потолка и стен.

Бактерицидные свойства ультрафиолетовых лучей используются при дезинфекции игрушек, посуды, инструментов; с их помощью удлиняется срок хранения многих

пищевых продуктов. Лучи обеззараживают питьевую воду (если она достаточно прозрачна), инактивируют вирусы при изготовлении вакцин.

Лучи изменяют природу организмов

Современная наука достигла больших успехов в изучении проблемы наследственности. Доказана решающая роль нуклеиновых кислот, а также белков в накоплении, хранении, передаче наследственной информации от родителей к детям. Но нуклеиновые кислоты и белки легко поглощают фотоны ультрафиолетового света. Вызывая изменения структуры биополимеров, их частичную денатурацию, эти лучи могут вносить изменения в наследственную информацию. Если облучению подверглись половые клетки организма, то изменения, вызванные ультрафиолетовыми лучами в молекулах нуклеиновых кислот, будут свойственны всему организму, выросшему из этих клеток, и даже его потомкам. Стойкие, передающиеся по наследству изменения носят название мутаций, а вызывающий их агент называется мутагенным. Мутагенное действие ультрафиолетовых лучей было обнаружено в 1932—1934 гг. американским генетиком Е. Альтенбургом в опытах на мушках дрозофилах. Взрослые мушки, выросшие из облученных яиц, отличались от своих собратьев формой крыльев, цветом, размерами брюшка и т. п.

Появление мутаций при действии ультрафиолетовых лучей наблюдается у всех одноклеточных и простейших многоклеточных организмов, на семенах многих растений. Если облучать ультрафиолетовыми лучами бактерии, простейших, клеточные культуры, то относительно небольшие дозы облучения увеличивают частоту возникающих мутаций от 1 тыс. до 1 млн. раз. При больших дозах облучения почти все выживающие клетки оказываются носителями тех или иных наследственных повреждений. Однако малая проникающая способность ультрафиолетовых лучей ограничивает возможности их использования для получения мутаций. У большинства организмов, и прежде всего у млекопитающих, половые клетки расположены в теле так глубоко, что ультрафиолетовые лучи их не достигают. (Только более крупные и высокоэнергичные кванты рентгеновских и гамма-лучей обладают достаточной для этого проникающей способностью.) И все

же мутагенная активность ультрафиолетового излучения находит практическое применение. Лучистые и плесневые грибки, микроскопически малые по величине, производят могучие лечебные препараты — антибиотики. В повышении «производительности труда» грибов надежным помощником служат ультрафиолетовые лучи. Среди потомства облученных и мутировавших грибов отбирают наиболее производительных, которых снова облучают, добиваясь в конце концов нужных результатов.

С. И. Алиханян с сотрудниками вывел новые расы грибов, которые изготовляют антибиотики (террамицин и эритромицин) в 5—10 раз больше, чем исходные образцы. А всего за время использования антибиотиков в медицине производительность грибов удалось повысить в тысячу раз, а стоимость производства — значительно снизить. Так мутагенные свойства ультрафиолетовых лучей используются для селекции одноклеточных организмов и некоторых растений.

Нарушения, вносимые квантами ультрафиолетовых лучей в структуру молекул ДНК, могут быть различны. Если происходит замена одного пиримидинового основания другим (например, тимина — цитозином или урацилом) или пурина — пурином (аденина — гуанином и наоборот), то такие ошибки — их называют транзициями — не нарушают конфигурации молекулы ДНК; обычно они не распознаются и не устраняются восстановительными системами клетки (о них идет речь в главе V). Другой тип мутации — трансверсии, в которых происходит замена пурина пиримидином и наоборот, довольно заметно искажают скелет молекулы и обычно устраняются раньше, чем клетка успевает передать ошибочную информацию потомкам. Наконец, третий тип мутаций — выпадение (делеция) или вставка одного или нескольких азотистых оснований.

Каковы возможные последствия мутаций рассмотренных типов? Так как триплет азотистых оснований в молекуле ДНК соответствует одной аминокислоте в структуре кодируемого белка, то замена одного азотистого основания другим в ДНК (мутации первого и второго типов) означает замену аминокислоты; это может отразиться на функции будущего белка в клетке и даже на течении определенных обменных реакций. Мутации третьего типа могут давать гораздо более серьезные последст-

вия: выпадение или вставка основания изменяет весь шифр, так как сдвигается граница между триплетами, и структура кодируемого белка очень сильно искажается.

Мутации возникают и при поедании корма, облученного короткими ультрафиолетовыми лучами, в котором в результате облучения образуются, очевидно, химические мутагены.

Мутации, возникающие в клетках тела многоклеточных животных, не могут оказать влияния на наследственность всего организма или его потомков. Их влияние распространяется лишь на потомство самой облученной клетки. Но иногда, при каких-то невыясненных еще полностью условиях, перерождение клетки может пойти так далеко, что она превратится в раковую. Длительное воздействие солнечного света или ультрафиолетовых лучей искусственных источников в больших дозах вызывает образование злокачественных опухолей у подопытных животных (мышей, крыс) на участках кожи, не защищенных шерстью: на носу, ушах, хвосте. После облучения роговой слой кожи утолщается, и чтобы вызвать образование опухоли, нужно начинать с большой дозы лучей и постепенно ее увеличивать.

Доказана также роль солнечного света в происхождении рака кожи у людей. Он появляется исключительно на открытых участках кожи (на лице, шее, кистях рук) и главным образом у людей, длительно находящихся под воздействием солнечных лучей. Заболеваемость раком кожи тем выше, чем больше солнечной радиации в данном географическом районе. При этом чаще всего болеют не местные жители, а белокожие приезжие из более северных районов, менее приспособленные к данным условиям. Так, в южных штатах США белые болеют раком кожи в 10—12 раз чаще, чем негры, а на Гавайских островах — даже в 42 раза чаще.

В возникновении рака кожи, возможно, некоторую роль играют канцерогенные вещества, обладающие фотодинамическим действием. Подтверждено опытами, что ультрафиолетовые лучи вызывают фотохимические превращения, окисление жироподобных веществ кожи, причем некоторые из продуктов окисления приобретают канцерогенные свойства. Некоторые ученые предполагают, что злокачественное перерождение клетки происходит в результате прямого поглощения ультрафиолетовых лучей нуклео-

протеидами клеточного ядра и возникающих вследствие этого ошибок в передаче наследственной информации дочерним клеткам организма. Так или иначе, опасность возникновения рака кожи существует, и люди, постоянно работающие на открытом воздухе (моряки, пастухи, некоторые категории строителей, сельскохозяйственных рабочих), должны заблаговременно принимать меры для защиты кожи.

Свечение живого тела

О каком свечении пойдет здесь речь? Ведь о биолуминесценции — свечении живых организмов, рассказывалось выше. Явление, с которым познакомится сейчас читатель, существенно отличается от биолуминесценции. Развитие учения об ультрафиолетовом, невидимом свечении живого тела тесно связано с работами крупного советского ученого А. Г. Гурвича. Еще в 1923 г. он сумел доказать, что ткани растительного или животного организма, в которых происходит быстрое размножение клеток, являются источниками невидимого излучения. Если на пути пучка этих лучей поместить другой образец живой ткани, то и в нем под влиянием излучения деление клеток станет совершаться быстрее. Вновь открытые лучи Гурвич назвал митогенетическими, т. е. ускоряющими, вызывающими митоз — деление клеток.

Как пришел он к этому открытию, выдающееся значение которого становится ясным только сегодня, спустя полвека? Крупный цитолог и эмбриолог, посвятивший себя изучению развития организма из оплодотворенной яйцеклетки, Гурвич пришел к выводу, что формирование различных тканей, органов, систем происходит в зародыше из первоначально однородного зачатка не только в силу реализации наследственной программы развития, но и благодаря взаимному влиянию клеток эмбриона друг на друга.

Анализируя процесс клеточного деления — основу всех процессов роста и развития организмов, Гурвич установил, что он является следствием двух разных причин. С одной стороны, внутри клетки должны завершиться многочисленные сложные биохимические реакции, подготавливающие клетку к делению. В настоящее время мы знаем об этих процессах бесконечно больше, чем было из-

вестно полвека назад. До начала клеточного деления должен завершиться процесс самоудвоения молекул ДНК — основных носителей наследственной информации; только в этом случае каждая из дочерних клеток получит полный ее комплект. Кроме того, в клетке должен сформироваться специальный аппарат — веретено деления, который как бы растаскивает потом в противоположные стороны половинки разделившихся хромосом. Должна завершиться выработка всех необходимых для деления ферментных систем.

Одним словом, только завершение всех этих внутриклеточных, подготовительных процессов создает внутренние предпосылки для деления. Совокупность этих внутриклеточных причин Гурвич назвал «фактором готовности».

Но большой опыт цитолога и эмбриолога убеждал ученого, что дело не только во внутриклеточных процессах. Нередко клетка, полностью готовая к делению, сутками, неделями, месяцами прозябает в неподвижности, как бы ожидая команды извне. А клетки печени, нервных центров вообще делятся, только попав в особые, непривычные условия. Значит, наряду с внутренним «фактором готовности» для деления клетки нужен еще какой-то стимул, толчок извне. Гурвич назвал его «фактором осуществления».

Природа этого пускового агента на многие десятилетия приковала внимание ученого. Как истинный биолог-материалист, Гурвич не тратил времени на подыскание умозрительных, иррациональных объяснений, на поиски причин, лежащих вне ткани, вне организма. Почти сразу сложилась мысль: не есть ли «фактор осуществления» тот самый агент, с помощью которого клетки взаимодействуют между собой? Привычные представления о способах межклеточной связи не помогали: нервной системы, даже самой примитивной, у эмбриона еще нет. Химические взаимодействия возможны, но ими всего объяснить не удается. Напряженный поиск возможных механизмов привел к первой гипотезе.

В клеточной массе эмбриона, в быстро растущих тканях создается, по мысли Гурвича, своеобразное биологическое поле (аналог гравитационного, электромагнитного полей, существование которых служило в те годы предметом споров и дискуссий физиков), поле взаимодействия клеточных сил, формирующее дифференциацию клеток,

образование из одного зачатка разных тканей, органов.

Если такое поле существует, значит при определенных конфигурациях пластов делящихся клеток силы взаимодействия должны выходить за пределы ткани, и их можно обнаружить. Такой ход рассуждений привел Гурвича к постановке опытов на корешках лука. Слои клеток, в которых идут процессы деления, изогнуты в корешке так, что, по мысли ученого, гипотетические силы биологического поля должны выходить за пределы корешка.

Как их обнаружить? Очевидно, удобнее всего использовать другой биологический объект: ведь природа и даже факт существования сил биологического поля еще не установлены, следовательно, для их обнаружения нельзя применять физические или химические методы. Решающий опыт Гурвич поставил в 1923 г.: ученый поднес к донцу корешка лука, где активно шли процессы деления клеток, другой корешок. Спустя некоторое время второй корешок был разрезан, покрашен и помещен под микроскоп. Внимательный глаз исследователя обнаружил на срезе удивительное явление: количество делящихся клеток в той половине препарата, которая была обращена к доньщику первого корешка, увеличилось на 20—40% по сравнению с более удаленными клеточными слоями.

Многokrатно, с неизменным успехом, повторив опыт, Гурвич понял, что это не случайность, что делящиеся клетки (первого корешка) каким-то образом на расстоянии оказывают влияние на клетки другого растения, усиливая в них процесс клеточного деления. Вопрос о природе этого дальнего действия немедленно заинтересовал ученого. Изменяя расстояние, используя различные экраны и образцы размножающихся клеточных культур, Гурвич пришел к важным выводам. Некоторые растительные ткани выделяют в воздух летучие вещества, способные стимулировать или угнетать (в зависимости от концентрации) клеточные деления в бактериальных и других клеточных культурах. Известный советский биолог Б. П. Токин, посвятивший впоследствии изучению этих веществ всю жизнь, назвал их фитонцидами.

Однако в опытах Гурвича силы биологического поля выходили и из герметически закупоренного, даже запаянного сосуда с культурой делящихся бактерий, дрожжей и усиливали деление клеток корешка лука, если только

сосуд был изготовлен из кварцевого стекла. Обычное стекло прерывало взаимодействие делящихся клеток, становилось непреодолимым препятствием для сил биологического поля. Но кварц отличается от стекла прежде всего способностью пропускать, не поглощая, ультрафиолетовые лучи. Так Гурвич пришел к убеждению, что силы биологического поля имеют электромагнитную, оптическую природу.

В распоряжении Гурвича не было достаточно чувствительных приборов для измерения количества излучаемого тканью невидимого света, для его объективной регистрации, количественной характеристики. И все же ученому удалось установить, что спектр митогенетического излучения лежит в пределах 1800—3260 Å и что достаточно одного кванта этого излучения, чтобы вызвать деление клетки, завершившей внутреннюю подготовку к митозу. Невидимые лучи выделяются в виде короткой вспышки перед началом деления клетки. Излученная порция фотонов, поглощаясь соседними клетками, вызывает и в них невидимую вспышку, своего рода цепную реакцию, вторичное излучение.

Можно только поражаться, как удалось Гурвичу, опередив развитие науки на 30—50 лет, гениально предсказать и частично доказать (пользуясь примитивной с нашей сегодняшней точки зрения лабораторной техникой) не только существование митогенетического излучения, но его физическую природу и внутриклеточные источники энергии, оценить величайшее значение информации, выносимой из глубин клетки невидимым светом. Так, выяснилось, что импульс возбуждения, пробегающий по нервному волокну, сопровождается не только волной колебания электрического потенциала (так называемым потенциалом действия), но и волной ультрафиолетового излучения. Оказалось, что сильными излучателями являются клетки опухолей. Но зато в крови раковых больных появляется вещество, препятствующее излучению — так называемый раковый тушитель.

Гурвич пришел к убеждению, что энергия, необходимая для митогенетического излучения, освобождается в процессе нормальных обменных реакций, но непосредственный ее источник — побочные, в какой-то мере случайные продукты обмена — свободные радикалы. В наши дни твердо установлено, что главным источником энергии

излучения живых тканей является взаимная нейтрализация перекисных радикалов — продуктов неферментативного окисления главным образом жироподобных веществ — липидов.

Исследования в новой области сулили много интересного. Но на пути их развития стояло серьезное препятствие. Световой язык клеток был настолько слаб, что физические приборы того времени не могли его зарегистрировать. Поэтому и в качестве источников и приемников (детекторов) излучения приходилось использовать биологические объекты — корешки лука, затем — дрожжевые культуры на твердых питательных средах. Учет эффекта производился визуально — по количеству делящихся клеток, и очень многое зависело от внимательности и добросовестности наблюдателя. Наконец, далеко не всегда эффект митогенетического излучения удавалось зарегистрировать. Если клетки ткани или культуры размножались быстро и беспрепятственно, толчок извне был лишним. Митогенетические лучи ускоряли деление только на фоне его задержки.

Отдельные энтузиасты-физики упорно работали над созданием приборов, достаточно чувствительных для регистрации митогенетических лучей. Такие приборы — «счетчики фотонов» — были созданы у нас Г. М. Франком и за рубежом французским физиком Р. Одюбером. В 1938 г. крупнейший советский физик-оптик, впоследствии президент Академии наук СССР С. И. Вавилов, так отзывался об этих работах: «Результаты чрезвычайно интересных исследований Одюбера... позволяют нам считать, что эмиссия ультрафиолета... при биологических процессах окончательно установлена обычными физическими методами. Эти исследования являются очень достоверным подтверждением важного открытия, сделанного Гурвичем в середине прошлой декады»¹.

Но количество работ, в которых данные Гурвича не подтверждались или подвергались сомнению, также возрастало. В конце концов решающую роль сыграло общее несовершенство тогдашней лабораторной техники, регистрирующих оптических приборов. Нашлись в первые послевоенные годы люди, увидевшие в теории биологического

¹ Цит. по: А. Г. Гурвич, Л. Д. Гурвич. Введение в учение о митогенезе. М., Изд-во АМН СССР, 1948.

поля проявление идеализма, припомнившие, что учитель Гурвича, выдающийся немецкий эмбриолог Г. Дриш в последние годы своей жизни стал открытым виталистом. В конечном счете интерес к исследованиям с митогенетическим излучением резко упал, а после смерти А. Г. Гурвича работы в этой области по существу прекратились.

Прошли годы. Далеко вперед шагнула радиоэлектроника, техника измерений. Появились новые высокочувствительные приборы — так называемые фотоэлектронные умножители (ФЭУ), соединяющие свойства фотоэлементов и усилителей тока. На новом методическом уровне стало возможно то, о чем долгие годы мечтал А. Г. Гурвич, — стала возможной надежная объективная регистрация ничтожных по своей интенсивности световых потоков, посылаемых отдельными живыми клетками.

В 1954 г. итальянские исследователи Л. Колли и У. Фаччини с помощью ФЭУ, охлажденных сухим льдом (для повышения чувствительности), обнаружили свечение проростков некоторых растений. В 1958—1959 гг. ученые Московского университета Ю. А. Владимиров и Ф. Ф. Литвин доказали существование свечения живых тканей, которое они назвали сверхслабым. Начиная с 1961 г. широкие исследования сверхслабых свечений развернули там же Б. Н. Тарусов с сотрудниками, А. И. Журавлев и другие ученые. В наши дни работы в этой области ведутся очень широко, их количество возрастает с каждым годом. И дело здесь не только в создании чувствительной регистрирующей аппаратуры. Общий уровень развития биологии ныне столь высок, что она начинает свободно оперировать такими физическими понятиями, как свободные радикалы, хемилюминесценция, квантовый выход, понятиями, которые Гурвич одним из первых ввел в биологию.

Сверхслабое свечение клеток и тканей, подобно биолюминесценции, о которой шла речь в предыдущей главе, осуществляется за счет энергии окисления органических веществ. Но в люциферин-люциферазной реакции наличие специального фермента обеспечивает превращение в свет почти всей освобождающейся при окислении энергии. Поэтому-то дрожащий огонек светляка можно увидеть в темную ночь на расстоянии сотен метров. Сверхслабое свечение (которое для отличия от люциферин-люцифераз-

ной реакции именуют биохемилюминесценцией) не имеет своего фермента, и его квантовый выход 10^{-5} — 10^{-6} , т. е. лишь одна стотысячная часть энергии окисления липидов тканей высвечивается. Для регистрации этого излучения необходимы высокочувствительные фотоэлектронные умножители.

Процесс окисления липидов или фосфолипидов кислородом воздуха совершается с образованием промежуточных продуктов — перекисных радикалов и представляет собой цепную разветвленную, самоускоряющуюся реакцию. Если предоставить ее своему естественному течению, количество окисленных продуктов нарастает лавинообразно.

В организме эта реакция не может идти бесконтрольно: слишком важную роль выполняют в нем липиды — обязательная деталь мембран, основы структуры и функции клеток. В состав всех жиров наших тканей входят особые вещества — антиокислители (токоферол и др.), которые перехватывают и нейтрализуют радикалы, возникающие при окислении жиров, и постоянно удерживают процесс окисления на стабильном низком уровне. Этот механизм, как показали исследования Н. М. Эмануэля, Е. Б. Бурлаковой, А. И. Журавлева и других ученых, используется в организме для управления скоростью клеточных делений.

Дело в том, что свободные радикалы задерживают деление клеток. Чем выше в ткани количество антиокислителей, тем быстрее совершаются в ней митозы. Вероятно, поэтому быстро растущие опухоли накапливают большое количество ингибиторов — веществ, замедляющих процесс окисления жиров. Вот как далеко завело нас знакомство с биохемилюминесценцией. И, что особенно важно, — все эти и еще многие интересные факты о работе клеток нашего тела были раскрыты и изучены во многом благодаря анализу сверхслабого свечения тканей — тайного языка клеток, открытого А. Г. Гурвичем.

В 1939 г. в выступлении, посвященном памяти выдающегося советского ученого-биохимика Е. С. Лондона, Гурвич говорил, что есть два типа ученых. Открытия одних проходят в момент, когда наука готова к ним, когда созрели условия для всеобщего признания их открытий. Другие — к ним Гурвич относил Лондона — это ученые, опередившие время, те несчастливые гении, которые

не пользуются признанием современников. Такая нелегкая судьба выпала и на долю Александра Гавриловича Гурвича. Мысль его на полстолетия опередила время, и лишь сегодня его идеи, открытия и предвидения начинают сбываться, подтверждаются всем ходом науки.

И хотя сегодня большинство работ по изучению слабого свечения ведется в видимой области спектра (ультрафиолетовое излучение тканей еще в тысячи раз слабее, чем видимое), нет сомнения, что ультрафиолетовое свечение тканей существует не как случайный побочный продукт реакции, а как способ общения между клетками, важный канал обмена информацией. Недавнее открытие группы советских биологов во главе с В. П. Казначеевым из Новосибирска — еще одно доказательство этого.

Если культуру клеток заразить вирусом или ввести в среду ядовитую сулему, клетки погибают. Но если к гибнущей культуре поднести другую, здоровую, таким образом, чтобы их разделяла двойная стенка из кварцевого стекла, — в незараженной культуре с некоторым отставанием возникают изменения, зеркально повторяющие картину драмы, развернувшейся в зараженной культуре. Что это — случайность? Тысячи опытов утверждают, что в 90% случаев наблюдается зеркальный эффект. Но, быть может, вирус ухитрился проникнуть в соседнюю культуру? Проверка опровергает это допущение. В то же время замена кварцевой посуды стеклянной полностью прекращает описанное явление.

Итак, лучи — невидимые и безмерно слабые, но управляющие самыми интимными, сокровенными тайнами жизни! Волна излучения, возникающая в зараженной культуре на каждой последующей стадии процесса, точно воспроизводится культурой-детектором. Совершенная сигнализация, которая не только извещает об опасности, но и мобилизует на борьбу, зовет к отпору и даже к чрезмерному перенапряжению сил, управляет жизнью и смертью клеток, их ростом и размножением.

То, что скептикам еще недавно казалось наполовину фантазией, наполовину ошибкой опыта, ныне установлено неопровержимо: луч света — активный участник и регулятор самых сложных жизненных процессов. Лучи из глубин клетки — новый и важный источник информации о ее состоянии и функциях. Научившись понимать язык

клеток, ученые и врачи смогут раньше, точнее, эффективнее распознавать, а значит, и лечить больных. Обнаружение в крови ракового тушителя, возможно, окажется одним из надежных методов раннего выявления больных, а это, в свою очередь, сделает более действенным их лечение. Многое может дать для медицины и изучение причин появления тушителя в крови практически здоровых людей. Нет ли здесь указания на опасность возникновения рака в будущем?

Нужно научиться понимать световой язык клеток, читать и использовать ценнейшую информацию, исходящую из их глубин. Открытие, сделанное В. П. Казначеевым с сотрудниками, — еще одно доказательство плодотворности этого пути, начатого А. Г. Гурвичем полвека назад.

Использование ультрафиолетового излучения человеком

Итак, мы знаем, что ультрафиолетовые лучи наполняют бодростью, энергией и силой наше тело, делают его более крепким, выносливым, закаленным. Они ведут постоянную тайную войну с болезнями, уничтожая их возбудителей и усиливая сопротивляемость организма. Невидимые лучи ионизируют воздух, покрывают золотистым загаром нашу кожу. Они незримо трудятся в сокровенных глубинах нашего тела, служа одним из факторов прогресса форм жизни на Земле, ускоряя важнейшие жизненные процессы. С помощью ультрафиолетовых лучей консервируют пищевые продукты, обеззараживают детские игрушки. Нет, пожалуй, ни одной отрасли человеческой деятельности, ни одной стороны жизни вообще, на которую не оказывал бы так или иначе свое влияние этот невидимый труженик.

Но ультрафиолетовый свет имеет еще одно применение — он верный помощник человека в сельском хозяйстве. С помощью ультрафиолетового облучения семян некоторых растений удается получить мутации, из числа которых можно отобрать особи, обладающие ценными хозяйственными качествами. Особый интерес представляет применение ультрафиолета в животноводстве. В осенний, зимний и весенний периоды года домашний скот и птица начинают ощущать недостаток света, особенно ультрафи-

олетового. Уменьшается прирост веса животного (даже при достаточном количестве кормов). Коровы начинают давать меньше молока, куры — яиц, учащаются случаи яловости, потомство рождается более слабым. Все это происходит потому, что в крови скота и птицы уменьшается количество гемоглобина, эритроцитов, белка и кальция.

Выход из положения ясен: недостаток ультрафиолетового излучения нужно восполнять искусственно. Однако следует иметь в виду, что ошибки при назначении дозы облучения, невнимание к таким вопросам, как спектральный состав света ультрафиолетовых ламп, высота подвески над стойлами животных, длительность их горения и т. п., могут вместо пользы принести вред. Лампы типа ПРК, используемые в сельском хозяйстве, не годятся для восполнения недостатка природного ультрафиолета. В их спектре содержатся коротковолновые лучи (до 1800 Å), которые разрушают витамин D, вызывают заболевание глаз и угнетение роста. Для искусственного облучения пригодны лампы ЭУВ или РВЭ, дающие длинноволновое ультрафиолетовое излучение, близкое по составу к солнечному. Ежедневное освещение этими лампами позволяет увеличить привес свиней и мясного крупного рогатого скота, повысить удойность коров в стойловый период. Куры после ежедневного облучения увеличивают яйценоскость на 10—15%; яйца становятся крупнее, имеют более прочную скорлупу. Облучение значительно уменьшает гибель цыплят в раннем возрасте: они быстро растут и редко болеют. Ультрафиолетовое облучение яиц на инкубаторных станциях увеличивает выводимость цыплят из яиц и их вес по сравнению с необлученными.

Подобное благотворное воздействие ультрафиолетовых лучей объясняется влиянием нескольких факторов. В результате бактерицидного эффекта уменьшается загрязненность поверхности яиц; озон и окислы азота, образующиеся при работе ламп, в малом количестве усиливают жизненные процессы куриных зародышей. Часть лучей с наибольшей длиной волны проходит сквозь скорлупу и непосредственно влияет на зародыш и его пищевые запасы, разжижает, делает более усвояемым для зародыша белок яйца.

На службу людям поставлена еще одна удивительная особенность ультрафиолетовых лучей. Многие насекомые,

в большинстве своем вредители, «видят» ультрафиолетовые лучи и непреодолимо стремятся к ним. Некоторые насекомые с помощью невидимых лучей определенной длины волны находят самок. Используя эту особенность насекомых, в некоторых странах (Японии, США, Югославии и др.) для массового истребления насекомых-вредителей успешно применяют ультрафиолетовые лампы. Если лампу снабдить металлической сеткой и пропускать через нее ток, то летящие на свет бабочки, жуки, комары, касаясь сетки, будут гибнуть. За три часа работы ночью одна лампа уничтожает до 5 тыс. насекомых.

Исчерпан ли перечень «профессий» невидимого луча? Конечно, нет! Мы еще не знаем многого. Наука и жизнь постоянно идут вперед, и то, что сегодня кажется фантастической мечтой, завтра становится рядовым явлением. Возможности использования ультрафиолетовых лучей, конечно, еще не использованы до конца. Их могучая природная сила будет всегда служить человеку; это не фантазия, а трезвый учет реальных возможностей.

ИНФРАКРАСНЫЕ ЛУЧИ

Излучение и теплота

Существование невидимых лучей за красной границей видимого спектра открыл в 1800 г. английский физик Вильям Гершель. Многие ученые сразу же заинтересовались природой этих лучей (названных впоследствии инфракрасными), их способностью нагревать различные тела. В 1835 г. французский физик Ампер высказал очень смелую по тем временам мысль о единстве природы тепловых и световых лучей. Дальнейшие исследования инфракрасных лучей показали, что они, как и лучи видимого света, возникают в нагретых телах и подчиняются одним и тем же законам отражения, преломления, рассеяния. Если видимые лучи охватывают область от 4000 до 7600 Å, то область инфракрасного излучения простирается от длинноволновой границы видимого спектра до области радиоволн. При этом области радиоизлучения и инфракрасного света как бы заходят одна за другую.

Радиоволны отличаются от оптических видов излучения прежде всего не длиной волны, а способом возникновения. Если видимые, инфракрасные и ультрафиолетовые лучи возникают главным образом при нагреве твердых, жидких и газообразных веществ, то радиоволны генерируются при колебательном разряде между двумя наэлектризованными проводниками. Существует обширная промежуточная область спектра, лучи которой в зависимости от способа их возникновения относятся либо к инфракрасной области, либо к радиоволнам. Советские физики А. Глаголева-Аркадьева и М. Левитская получили радиоволны длиной 125, 70 мк и короче. Немецкие физики Г. Рубенс и О. Бейер в спектре излучения паров ртути обнаружили лучи с длиной волны 340 мк. Учитывая способ возникновения, эти лучи отнесли к инфракрасному диапазону. В спектре солнечного излучения на долю инфракрасных лучей приходится больше 50% общей энергии,

а в спектре обычных ламп накаливания — около 95%; максимум излучения приблизительно соответствует 1,2 мк. С уменьшением температуры светящегося тела максимум излучения становится более длинноволновым; доля видимого света в излучении уменьшается. При этом резко снижается и суммарная энергия излучения. Например, при температуре черного тела 1550°C максимум излучения приходится на 1,7 мк; с переходом к максимуму в области 10 мк общая интенсивность излучения падает в 70 раз, а у волн длиной 18 мк — в 700 раз. Практически для получения мощного потока инфракрасного излучения пользуются источниками, температура которых достаточно высока (выше 1500°C); ненужный видимый свет отфильтровывают.

Фотоны инфракрасного света, естественно, по размерам меньше фотонов видимого света. Они соответствуют электронным переходам между высшими энергетическими уровнями. Так, первая инфракрасная серия в спектре водорода характеризует переход электронов с высших уровней на третий энергетический уровень. Инфракрасные линии спектра, соответствующие излучению отдельных атомов, имеют сравнительно небольшую длину волны и лежат недалеко от красной границы видимого спектра, в так называемой близкой инфракрасной области.

Инфракрасное излучение молекул обусловлено изменением колебательного состояния отдельных атомов и групп атомов, а также сдвигами во вращении молекулы. Кванты колебательной энергии молекул сравнительно велики — их энергия на порядок (примерно в 10 раз) меньше энергии фотонов видимого света; соответствующие линии излучения лежат в той же близкой инфракрасной области. Кванты энергии вращения молекул еще на порядок меньше. Поэтому изменение вращательной энергии молекул сопровождается излучением в далекой инфракрасной области.

Обширный диапазон инфракрасных лучей разделяется на три области: ближние лучи — от видимого света примерно до длины волны 3 мк, которые выделяются с помощью призм из кварцевого стекла; средние — с длиной волны от 3 до 16 мк, которые выделяются с помощью призм из каменной соли; дальние — с длиной волны больше 16 мк. Инфракрасные лучи, проникающие в ткани на глубину в несколько миллиметров, лежат в наиболее ко-

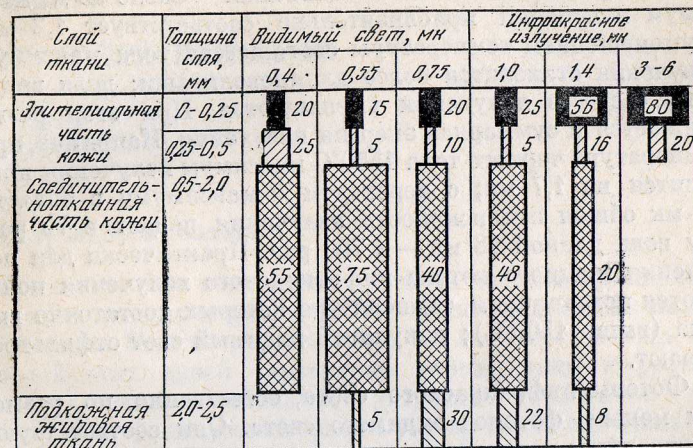


Рис. 19. Проникающая способность видимого и инфракрасного излучений по отношению к коже человека (поглощение в %)

ротковолновой области, от видимого света до лучей длиной 1,5 мк (рис. 19). Лучи с более длинными волнами обладают только поверхностным действием.

Непрерывный спектр инфракрасных лучей дают лампы накаливания и электронагревательные приборы. Линейчатый спектр излучают пары металлов, нагретые газы, электрические разряды в газе и некоторые твердые тела. Пары ртути, широко применяемые для получения ультрафиолетовых лучей, высвечивают ряд интенсивных линий и в инфракрасной области — 7730, 9260, 10 140, 13 000 Å, 4 и 5,5 мк. Газоразрядные трубки, наполненные неоном, дают многочисленные линии вблизи видимой области спектра. Цезиевая лампа отдает 25% своего света в виде линий длиной 8521 и 9844 Å. Натриевая газосветная лампа излучает двойную линию 8183—8194 Å. Многие соединения кислорода и кремния дают при нагреве инфракрасные полосы излучения на слабом непрерывном фоне. Их используют в специальных горелках.

Когда лучи одной спектральной области необходимо выделить, а лучи других диапазонов поглотить, пользуются специальными фильтрами. Обычная вода, например, прозрачна для лучей видимого света, но легко поглощает инфракрасные лучи. Если к ней добавить немного медно-

го купороса, поглощение значительно усиливается. Когда же нужно поглотить видимые лучи, а инфракрасные пропустить, пользуются растворами черных красителей либо йода в сероуглероде или четыреххлористом углероде. Обычное стекло не пропускает инфракрасных лучей с длиной волны больше 1,5—2 мк. Зеленые растения, интенсивно поглощающие благодаря содержанию хлорофилла лучи красной и синей областей видимого света, хорошо отражают инфракрасные лучи.

Фото- и киносъемки, сделанные в инфракрасных лучах, из-за особенностей отражения и поглощения имеют необычный вид: вода в водоемах кажется черной, а зеленые растения на берегу — белыми. Растения, подвергающиеся в нормальных условиях жизнедеятельности наиболее интенсивному инфракрасному облучению солнечного света, обладают и наибольшей способностью отражения инфракрасных лучей. Мхи и водоросли, растущие в темноте и под поверхностью воды, лишены этой способности. Высокогорные растения, подвергающиеся действию особенно интенсивных потоков радиации, отражают инфракрасные лучи вдвое энергичнее, чем равнинные растения тех же или близких видов. Лист, растущий на полном свете, отражает 27% падающих инфракрасных лучей; другой лист такого растения, развивающегося в расщелине скалы, отражает всего 22% лучей. Можно предположить, что в процессе эволюционного развития растения приобрели способность использовать лучи определенных участков солнечного спектра, а от других защищаться. В данном случае таким защитным механизмом растений оказалось отражение.

Инфракрасные, как и другие лучи оптического диапазона, возникают в веществе при его нагреве и, поглощаясь веществом, нагревают его. Иными словами, эти лучи служат средством переноса тепла, передачи тепловой энергии на расстояние.

Теплота — форма движения материи, состоящая в беспорядочном колебательном и вращательном движении слагающих тело микрочастиц (молекул, атомов, электронов и др.). Чем ниже температура тела, тем меньше амплитуда их колебаний. При абсолютном нуле (0° по шкале Кельвина) движение атомов и молекул прекращается. Но при любой температуре выше абсолютного нуля, т. е. практически в наших земных условиях везде, наб-

любуется колебание атомов и молекул, их хаотическое движение, степень выраженности которого и характеризует, собственно, температуру тел.

Существенная особенность теплоты, отличающая ее от других видов энергии, заключается в том, что она присуща всем без исключения материальным частицам в любой момент их существования. В результате неупорядоченности движения микрочастиц некоторый переход в тепло наблюдается при любом превращении одного вида энергии в другой. Обратный переход от тепловой к кинетической, электрической, химической и другим формам энергии затруднен; он совершается с меньшим коэффициентом полезного действия.

Выравнивание энергетического уровня, т. е. передача тепла от более нагретых тел к менее нагретым, может происходить различными путями. Первый путь — передача тепла посредством теплопроводности — осуществляется при непосредственном контакте тел с различной температурой. Частицы более нагретого тела передают часть своей вибрационной энергии частицам более холодного тела.

Второй путь — передача тепла путем конвекции — связан с тем, что воздух по мере нагрева становится менее плотным и поднимается вверх. Массы воздуха, нагреваясь у поверхности горячих предметов, при движении переносят часть тепловой энергии. Способ переноса тепла конвекцией используется для обогрева помещений. Тепловые завесы, устраиваемые у входа в метро, театры и другие общественные здания, представляют собой не что иное, как конвекционные токи нагретого воздуха, идущие от специальных обогревателей. Конвекционные токи возникают и в природе в результате неравномерного нагрева земной поверхности Солнцем. И конвекция, и теплопроводность предполагают наличие материальной среды, служащей посредником при переносе энергии.

Лучистая теплопередача коренным образом отличается от двух рассмотренных выше типов. Она не нуждается в вещественных посредниках и может осуществляться в пустоте, между телами, отделенными друг от друга колоссальными расстояниями. Кроме того, излучение — это свойство, присущее всем без исключения телам, нагретым свыше абсолютного нуля. Следовательно, тело с более низкой температурой тоже излучает тепло во все стороны,

в том числе и по направлению к телу с более высокой температурой, и лишь суммарный баланс теплообмена складывается так, что в направлении от более нагретого тела к менее нагретому переносится больше лучистой энергии, чем в обратном направлении.

Суммарный тепловой баланс Земли в самом общем виде таков. Из общего количества солнечной лучистой энергии, падающей на Землю ($2 \cdot 10^{11}$ вт), около 42% отражается обратно в мировое пространство, 14% поглощается атмосферой и только 44% — земной поверхностью, ее лито- и гидросферой. Из этих 44% расходуется на испарение влаги почти половина — 18%, на конвективный нагрев воздуха — 6% и на теплообмен излучением — 20%. В среднем за год со всей поверхности земного шара испаряется Солнцем 520 тыс. км³ воды. Столько же выпадает в виде осадков, однако весьма неравномерно. Отдача тепла в мировое пространство происходит главным образом за счет отражения солнечных лучей атмосферой. Из 42% солнечного тепла, отражаемого Землей, на долю атмосферы приходится 38%. Поверхность Земли отражает всего 4%. Это в большой мере результат присутствия в атмосфере водяных паров, поглощающих инфракрасное тепловое излучение планеты (парниковый эффект).

В состоянии непрерывного лучистого теплообмена с окружающей средой находится каждый живой организм, в том числе и организм человека. Это значит, что состояние организма, его температура в значительной степени зависит от температуры среды, от того, как сложится баланс излучений между организмом и окружающими его предметами. Максимум излучения тела человека приходится на длину волны 9,3 мк. Этот факт свидетельствует о важной роли инфракрасного излучения в жизнедеятельности человека. Ведь таким путем тело человека теряет значительную часть своего тепла.

Действие инфракрасных лучей на организм

Наиболее мощный источник инфракрасного излучения в земных условиях — это Солнце, свет которого более чем наполовину состоит из инфракрасных лучей с длиной волны 0,75—2 мк. Ежегодно Земля получает с инфракрасным излучением Солнца $6,7 \cdot 10^{20}$ кал. тепла. Нагретые Солнцем поверхность Земли и атмосфера, в свою очередь, непрерывно излучают тепловые лучи в том же спектральном диапазоне.

Наряду с прямым влиянием инфракрасной радиации на животный организм, о чем речь пойдет ниже, немалое значение имеет и косвенное ее влияние в результате изменения температуры и других физических параметров воздуха.

Поглощение инфракрасных лучей атмосферой, зависящее от присутствия в ней водяных паров, возрастает при увеличении абсолютной влажности. В спектре Солнца появляется широкая полоса поглощения между 0,9 и 3 мк. Воздух нагревается не только за счет прямого поглощения инфракрасных лучей, но и вторично, путем конвекции в результате нагрева земной поверхности. По мере увеличения температуры воздуха изменяется его газовый состав: уменьшается содержание кислорода (на экваторе оно на 0,5% меньше, чем в средних широтах). Этот процесс усиливается с повышением содержания в воздухе водяных паров. Кроме того, при нагреве воздух расширяется, в связи с чем снижается давление кислорода у поверхности Земли. Такие атмосферные явления, как ветер, дождь, гроза, в значительной степени обусловлены неравномерным солнечным нагревом земной поверхности и атмосферы. Тропические ураганы — наиболее могучее явление природы, связанное с испарением влаги и образованием конвекционных токов воздуха, — не что иное как способ отдачи тепла, аккумулированного водами тропических морей вследствие нагрева лучами Солнца. Морская вода поглощает до 95% падающей лучистой энергии Солнца. Именно деятельность Солнца, неравномерный нагрев и испарение влаги обуславливают движение воздушных и водных масс, глобальную систему ветров, циклонов и антициклонов, теплых и холодных течений, разнообразие климатических зон, погодных условий, непосредственно

влияющих на жизнедеятельность животных и растений, на самочувствие и состояние людей. Колебания атмосферного давления и температуры, особенно падение давления и увеличение температуры в сочетании с повышенной влажностью воздуха, действуют крайне неблагоприятно на людей, особенно с сердечно-сосудистыми заболеваниями.

Изменение температуры воды, нагрев ее лучами Солнца влияет на растворимость ряда веществ, а это, в свою очередь, может вносить изменения в жизнедеятельность растительных и животных организмов. Чем ближе к экватору, тем больше в океане кораллов и других организмов, накапливающих в теле известь, тем больше степень окостенения рыб. Для северных холодных морей характерны крупные бурые водоросли, своя богатая фауна и флора.

Микроорганизмы, простейшие, одноклеточные водоросли и грибы переносят значительные колебания температуры, не погибая (состояние анабиоза). Они выживают при температуре значительно ниже нуля, вплоть до температур жидкого азота (77°K). Разумеется, при этой температуре их жизненные процессы резко угнетены, размножение невозможно. Но одноклеточные сохраняют способность оживать при переносе в обычные температурные условия. Они выдерживают нагрев, в том числе и лучистый, до 60°C и выше. Отдельные организмы выработали специальные приспособления, позволяющие им переносить и более высокие температуры. Споры некоторых бактерий, грибов имеют толстую оболочку, защищающую их от колебаний температуры, влажности и других неблагоприятных воздействий. Семена растений также очень устойчивы к изменениям условий среды.

Более сложно устроенные организмы не могут переносить сильного охлаждения, но и у них выработались приспособления, помогающие им выживать в зимнюю стужу и летнюю жару. Земноводные, пресмыкающиеся, рыбы при понижении температуры среды впадают в состояние оцепенения, забираются в норы, речной ил, уходят в глубины воды. При повышении температуры они постепенно оживают, становятся подвижными, начинают отыскивать пищу, размножаются.

У наиболее сложно устроенных животных, млекопитающих и птиц температура тела поддерживается на по-

стоянном уровне. Специальные системы терморегуляции помогают развитию сложнейших жизненных процессов, совершенствованию мозга и других органов животных. Однако и у части млекопитающих выработалась система приспособлений, например зимняя спячка, позволяющих переносить неблагоприятные сезоны года.

Для обеспечения стабильной температуры тела необходимо, чтобы внутри организма вырабатывалось достаточное количество тепла. В организме человека и других высших животных вся энергия, образующаяся при сгорании, окислении пищевых веществ, в конечном счете превращается в тепло и отдается в окружающую среду. Тепловой баланс организма зависит от количества выработанного тепла (теплопродукции) и его выведения, удаления (теплоотдачи). Работа системы терморегуляции осуществляется автоматически с помощью центральной нервной и эндокринной систем.

Отдача тепла телом человека осуществляется тремя путями: конвекцией (нагревом воздуха), излучением и испарением. Наиболее важное значение имеет теплоотдача путем излучения инфракрасных лучей, на долю которой в обычных условиях приходится от 45 до 60% выводимого организмом тепла. Чем выше температура окружающих нас предметов, тем менее эффективна отдача тепла радиацией. Если воздух, так же как и тело, имеет высокую температуру, главную роль в теплоотдаче играет испарение. Однако возможности механизма отдачи тепла испарением тоже не беспредельны.

Когда теплоотдача затруднена, температура тела повышается, кровяное давление резко падает, пульс учащается, становится слабым, кожа лица багровеет, наступает потеря сознания — тепловой удар. Такое состояние развивается при особо неблагоприятных условиях чаще всего у людей, страдающих заболеваниями сердечно-сосудистой системы. Обычно организм справляется с неблагоприятными условиями среды, пуская в ход свой богатый арсенал средств регуляции теплообмена.

Помимо самочувствия, один из наиболее точных показателей теплового состояния организма — температура кожных покровов, которая всегда ниже температуры тела. Если человек находится в благоприятных температурных условиях (например, при температуре воздуха в комнате около 21°C и такой же температуре стен),

температура кожи туловища, лба равняется примерно $33,5^{\circ}\text{C}$. Кожа конечностей даже в состоянии полного теплового комфорта холоднее кожи туловища (ниже на $2-5^{\circ}\text{C}$). За счет изменения температуры конечностей поддерживается постоянство температуры туловища и головы, в которых размещены жизненно важные органы. Если воздух и предметы вокруг нас становятся холоднее, наш организм отвечает на это понижением температуры конечностей. С повышением температуры среды кровь начинает двигаться более мощным потоком по сосудам конечностей, приливает к коже. Ее температура (и теплоотдача) увеличивается. Еще более чувствительным и точным показателем теплообмена и теплового равновесия человека, чем температура кожи, может служить инфракрасный лучистый поток от отдельных участков тела.

Кожа животного имеет нервные чувствительные образования — рецепторы, которые служат приемниками температурных раздражений. Рецепторы представляют собой чувствительные окончания нервных клеток, имеющие на конце утолщения в виде шляпки гриба размером $0,25-1,35$ мм. Холодовые рецепторы расположены в сосочковом слое кожи, на границе между эпидермисом и собственно кожей, тепловые — немного глубже. Функцию температурных рецепторов кожи можно сравнить с работой палочкового аппарата сетчатки глаза. Подобно палочкам, они не различают цветов, т. е. не чувствуют разницы в длине волны излучения, а реагируют лишь на повышение или понижение температуры.

Из кожных рецепторов нервное возбуждение по нервным стволам направляется в спинной мозг, а оттуда в так называемый промежуточный мозг, ведающий поддержанием постоянства температуры тела. Ощущения холода и тепла осознаются нами; следовательно, нервное раздражение достигает уровня коры головного мозга. Из центральной нервной системы соответствующие указания поступают к мускулам, кровеносным сосудам, сердцу, железам внутренней секреции, потовым железам и др. Система терморегуляции, так же как и весь организм, работает по принципу рефлекса, реагируя на внешние температурные воздействия.

Инфракрасные лучи, оказывая тепловое действие на организм, повышают температуру тех слоев кожи, в которых они поглощаются. Роговой слой кожи, весь эпидер-

мис прозрачны для лучей видимого света, в особенности для красных. Красные и ближние инфракрасные лучи (с длиной волны до 1,5 мк) поглощаются преимущественно в дерме, но некоторая их часть (25—30%) проникает глубже, на 2,5—4 см, достигая подкожного жирового слоя и даже расположенных под ним органов. Более длинноволновые лучи целиком поглощаются в эпидермисе.

Используя инфракрасные лучи различного диапазона, можно достичь нужного лечебного результата. Так, для глубинного прогрева тканей рекомендуется использовать источники коротковолновых инфракрасных лучей, а для поверхностного обогрева — источники длинноволновой радиации.

Если мощность лучистого потока велика, ощущение тепла при действии радиации на кожу переходит в болевое ощущение; его порог для волн разной длины различен. Видимые лучи вызывают ощущение резкой боли при интенсивности 3,11 кал/см²·мин, коротковолновые инфракрасные лучи — при 1,79, а длинноволновые — при 1,33 кал/см²·мин. Такое различие объясняется глубиной проникновения лучей в кожу. Тонкие безмякотные нервные волокна, дающие ощущение боли, разветвляются на границе эпидермиса и собственно кожи. Поэтому боль появляется прежде всего при действии лучей, поглощающихся ближе к поверхности кожи. Чем больше проникающая способность лучей, тем легче они переносятся нашей кожей.

По данным специальных опытов, ощущение боли появляется при повышении температуры кожи примерно до 43,5°С, на 10°С выше нормальной температуры кожи. Источники радиации, дающие поверхностный нагрев, быстрее повышают температуру кожи и раньше вызывают неприятные ощущения. Наиболее глубоко проникает в ткани инфракрасное излучение Солнца, поэтому переносится оно значительно легче, чем более длинноволновое излучение искусственных источников.

Какие же изменения возникают в организме человека под действием инфракрасной радиации? Небольшие по величине кванты инфракрасных лучей несут слишком мало энергии, чтобы вызвать типичное фотохимическое действие, хотя для ближних лучей (0,76—1,5 мк) такой эффект полностью исключить нельзя. Нельзя исключить так-

же возможность фотосенсибилизированного возбуждения молекул при поглощении этих лучей, несмотря на то, что присутствие в организме специфических фотосенсибилизаторов пока не установлено.

Главное, а возможно, и единственное действие инфракрасных лучей состоит в глубинном (ближние лучи) или в более поверхностном (дальние лучи) прогреве живых тканей. Повышение температуры под действием инфракрасных лучей усиливает биологическую активность микроорганизмов и клеток кожи, ускоряет их размножение, темп обменных реакций, увеличивает подвижность клеток, способных к самостоятельному движению, — лейкоцитов и гистиоцитов, усиливает способность поглощать инородные тела и микроорганизмы. Повышение температуры увеличивает скорость обменных процессов.

В присутствии некоторых красителей (метилвиолета, цианиновых красителей) действие инфракрасных лучей на микроорганизмы значительно усиливается, наступает гибель клеток.

Таким образом, фотосенсибилизация в принципе возможна и в инфракрасных лучах.

При действии инфракрасных лучей на кожу человека глубина их проникновения зависит не только от длины волны лучей, но и от степени пигментации кожи, ее увлажнения, величины кровенаполнения кожных покровов (вода прекрасно поглощает инфракрасные лучи). Увлажнение кожи и легкий ее отек создают как бы жидкую подушку, своеобразный защитный экран, поглощающий инфракрасную радиацию. Усиливая ток крови в сосудах, расположенных в подсосочковых слоях кожи, инфракрасные лучи повышают обмен между кровью и тканями, облегчают вымывание из клеток продуктов обмена. Повышение температуры кожи оказывает легкое раздражающее действие на нервные окончания и, таким образом, на деятельность нервной системы в целом. Дозированный прогрев кожи оказывает болеутоляющее действие. Благодаря ускорению кровотока и оживлению деятельности потовых желез инфракрасное излучение способствует рассасыванию кожных поражений (абсцессов, фурункулов), ускоряет их созревание, облегчает удаление ядовитых веществ. Тепловые процедуры, ускоряя размножение клеток, способствуют заживлению кожных ран и накоплению пигмента в коже.

Наконец, достоверно установлено, что после воздействия инфракрасных лучей на кожу в крови человека появляются активные продукты распада белков, похожие на те, которые образуются в результате ультрафиолетового облучения. Можно предполагать, что повышение температуры кожи усиливает деятельность ферментов, расщепляющих белки.

Активные продукты распада белков наряду с нервными импульсами, возникающими в коже, распространяют местное действие инфракрасных лучей на весь организм. Эти нервные и гуморальные (жидкостные) влияния при умеренных дозах инфракрасной радиации нормализуют тонус вегетативной нервной системы, снимают чрезмерное напряжение, расслабляют тонус мышц, сосудов, оказывают болеутоляющее, противовоспалительное действие. Вот почему инфракрасные лучи широко используются в медицине для лечения самых разнообразных заболеваний.

Термография на службе здоровья

Термография — это метод регистрации собственного инфракрасного излучения тела человека. Сейчас твердо установлено, что излучение кожи в инфракрасной области не зависит от степени пигментации, расовой принадлежности и индивидуальных особенностей (толщины, характера рогового слоя) и определяется только температурой. Некоторые индивидуальные колебания излучения наблюдаются в лучах с длиной волны короче 5 мкм, но на эту область приходится всего 1% излучения кожи. Таким образом, термография — это метод регистрации распределения температур по поверхности тела человека.

Температура кожи, подкожной клетчатки и подлежащих тканей, служащих источником инфракрасного излучения, в свою очередь, зависит от трех факторов: кровоснабжения изучаемого участка, интенсивности обменных процессов в нем, а также различий в теплопроводности. У каждого человека распределение температур по поверхности тела стабильно и при одинаковых условиях измерения воспроизводится в повторных опытах. Но у разных людей топография температур может различаться довольно значительно. Абсолютные значения кожных температур могут колебаться у одного и того же человека,

главным образом на коже конечностей, довольно широко в зависимости от времени суток, температуры и влажности помещения, сезона года и т. п. Поэтому при термографических исследованиях принимаются во внимание лишь отклонения от симметричности распределения температур относительно продольной оси тела человека. В большинстве случаев симметричные участки тела человека действительно имеют одинаковую температуру.

Однако не столь уж редки случаи, когда аномальное ветвление артериальных стволов, различия в тонусе веточек вегетативной нервной системы (так называемые вегетативные асимметрии) вносят те или иные искажения в эту картину. Такие именно случаи и являются наиболее распространенной причиной ошибок в диагностике с применением термографии, о чем далее говорится более подробно.

Излучение абсолютно черного тела пропорционально, как следует из закона Стефана — Больцмана, четвертой степени температуры. Кожа человека при температуре тела ведет себя как абсолютно черное тело, и при повышении температуры кожи на 1°C ее полное излучение возрастает на 1,4%. В интересующей нас области от 6 до 10 мкм прирост составляет 2,4%. Современные приборы позволяют улавливать колебания лучистого потока с точностью до долей процента и разность температур отдельных участков кожи в пределах 0,1—0,01°C. Принцип действия термографов основан на фокусировании (с помощью системы зеркал) излучения определенного участка кожи на чувствительный приемник, преобразующий лучистую энергию в электрический ток. Пройдя через усилитель, ток питает источник света, освещающий фотопленку и вызывающий ее почернение. Луч по пленке перемещается синхронно с перемещением системы зеркал таким образом, что точка на пленке соответствует точке на коже. Почернение пленки пропорционально силе тока и, следовательно, температуре участка кожи. Вместо фотопленки в современных термографах используют электронно-лучевые трубки, что позволяет получать изображения за доли секунды. Переход к цветной термографии с использованием электронно-оптических преобразователей увеличивает количество оттенков цвета (по сравнению с черно-белым изображением) и повышает чувствительность прибора.

Итак, при исследовании излучения симметричных участков кожи обнаружилась разница их температур. В каких случаях и какую диагностическую информацию это может дать? По-видимому, наиболее полезна термография при выявлении опухолей грудной железы. В науке накоплен уже довольно большой опыт, который показывает, что почти всегда над раковой опухолью температура выше на $1-3^{\circ}\text{C}$, чем в симметричном участке. Местное повышение температуры наблюдается и при маститах, абсцессах грудной железы, воспалившейся кисте, быстро растущей доброкачественной опухоли — фиброаденоме и т. п. В процессе беременности и кормления также нередко наблюдается повышение температуры отдельных участков железы. Определенную путаницу вносят случаи вегетативной дистонии и аномалий распределения сосудов. Таким образом, данные термографии, как правило, не позволяют однозначно поставить точный диагноз. Однако в довольно большом проценте случаев изучение топографии температур позволяет обнаружить рак грудной железы, не выявляемый рентгеновским исследованием. Это подтверждает целесообразность использования нового метода, несмотря на его сложность, дороговизну аппаратуры. Использование этого метода позволяет быстро и без вреда для организма выявить и выделить из массы здоровых людей лиц, подлежащих более подробному и всестороннему обследованию.

Кроме опухолей грудной железы, с помощью термографии довольно успешно выявляются также опухоли костей и столь тяжелые сосудистые заболевания, как облитерирующий эндартериит, тромбофлебит, в самых начальных стадиях. В акушерстве с помощью термографа удается точно определить местоположение плаценты, облегчается распознавание ранних стадий беременности (по повышению температуры грудных желез).

Успешно используется метод термографии и в других областях биологии, медицины, ветеринарии.

Тепловой луч в деятельности человека

Главное промышленное использование инфракрасных лучей — инфракрасная сушка. Подбирая соответствующий источник излучения, расстояние между ним и материа-

лом, подвергаемым сушке, при сравнительно небольших затратах можно добиться очень быстрого и хорошего результата.

Метод инфракрасной сушки доказал уже свои преимущества перед конвекционной сушкой: более глубокий и равномерный прогрев, получение мощных, направленных в нужную сторону лучистых потоков (отсюда быстрота сушки), экономическая эффективность. Инфракрасным облучателям можно придать любую форму, удобную для создания равномерного поля прогрева.

Метод инфракрасной сушки изделий, покрываемых лаком, дает возможность быстро удалять растворитель. Лак наносится на изделие довольно тонким слоем, который в инфракрасных лучах прогревается на всю глубину. Благодаря применению этого вида сушки стало возможным использование искусственных смоляных лаков, пленка которых очень тверда и прочна. В зависимости от толщины слоя лака пользуются разными источниками, дающими либо ближние инфракрасные лучи (такие источники, главным образом лампы накаливания, называют «светлыми» из-за высокой температуры нити накала, дающей и видимые лучи), либо длинноволновый поток («темные» источники, представляющие собой металлические трубки, разогреваемые током).

Инфракрасные лучи применяются для сушки древесины, бумаги, а также в полиграфической, текстильной, кожевенной, обувной, пищевой промышленности, в производстве керамики, пластмасс, синтетических волокон и т. д.

Все шире применяются новые системы лучистого отопления жилищ, общественных и культурно-бытовых помещений. Змеевики, по которым течет горячая вода или циркулирует пар, монтируются в специальные панели, расположенные в стенах, полу, реже в потолке. Давая мощный поток тепла, такая система отопления позволяет сохранять в помещении свежий прохладный воздух. Для обогрева цехов, выставочных залов, пассажирских помещений, вокзалов, школ, столовых используют светильники, лампы накаливания, а также «темные» излучатели — металлические трубки. На инфракрасные лучи почти не влияют атмосферные помехи. В связи с этим инфракрасная фотография позволяет успешно производить съемку отдаленных предметов, в частности аэрофотосъемку зем-

ной поверхности с большой высоты (нескольких десятков и даже сотен километров), а также фотографирование небесных туманностей, дальних скоплений звездной материи и т. п.

Чтобы защитить фотопленку от действия видимых лучей, на объектив надевают специальные красные светофильтры. Для повышения чувствительности фотопленки к инфракрасным лучам в ее состав добавляют фотосенсибилизаторы, главным образом из группы цианиновых красителей, избирательно поглощающие лучи с длиной волны 0,8—1,2 мк (из ближней инфракрасной области) и ускоряющие почернение фотопластины.

Инфракрасная фотография нашла применение и в медицине. На снимках, сделанных в инфракрасных лучах, хорошо видны поверхностно расположенные вены кожи: на фотографиях они кажутся темными и обнаруживаются даже в тех случаях, когда не видны глазом. При нарушениях кровообращения в брюшной полости, особенно в системе воротной вены (например, при закупорках ее ветвей, циррозах, застое крови в печени сердечного происхождения и т. п.), усиливается отток крови по венам передней брюшной стенки. Количество и величина этих сосудов возрастают.

Инфракрасная фотография помогает врачу поставить правильный диагноз болезни. При заболеваниях сосудов нижних конечностей фотография в инфракрасных лучах позволяет контролировать полноту излечения тромбозов, эффективность оперативного лечения варикозного расширения вен и т. п.

С помощью инфракрасных лучей можно обнаружить нагретые тела (ракеты, самолеты, корабли, танки и т. п.), а также определить направление и скорость их движения. Инфракрасный тепловой индикатор, соединенный с усилителем, позволяет обнаружить цель в темноте и на значительном расстоянии по тепловому излучению и осуществить точную наводку орудия или ракеты.

Приборы теплового самонаведения оказались незаменимыми при разработке противоракетных систем. Такие приборы, устанавливаемые в головке противоракеты, обнаруживают корпус ракеты, раскаленный трением о воздух до 2000—3000° С, на расстоянии нескольких километров и обеспечивают самонаведение на эту быстро движущуюся мишень. Инфракрасные приборы успешно

используются также в разведке, для сигнализации, предотвращения пожаров, охраны важных объектов, для навигации и т. п. Возможна организация связи на инфракрасных лучах. Создание инфракрасных телескопов имеет большое значение для астрономических наблюдений.

Спектры поглощения различных веществ в инфракрасных лучах настолько индивидуальны и характерны, что с их помощью можно установить химическое строение сложных органических соединений, заметить ничтожные изменения структуры белков, нуклеиновых кислот, не обнаруживаемые другими методами.

Источники инфракрасного излучения широко используются в медицине. Задолго до открытия этого вида лучей и создания специальных ламп при лечении различных заболеваний люди пользовались средствами, способствующими уменьшению потерь собственного тепла. Шерстяные повязки при болях в пояснице, заболеваниях почек, ревматизме, специальные укутывания ограничивают теплоотдачу, повышают температуру кожи, рефлекторно воздействуют на вегетативную нервную систему, ослабляют спазмы, усиливают кровообращение. Применение теплых компрессов, грелок, электрических нагревательных подушек — новый шаг в области лечения теплом. Увлажнение компресса усиливает эффект, так как теплопроводность влажного эпидермиса увеличивается во много раз.

Наиболее современным методом физиотерапии является применение специальных ламп накаливания, излучающих инфракрасную радиацию ближнего диапазона, которая наиболее глубоко проникает в тело. Дозированное облучение отдельных участков кожи этими лучами дает отличный результат при заболеваниях лимфатической системы (отек, воспалительные инфильтраты), суставов (артриты, инфекционные артриты, ревматические поражения), грудной клетки (плевриты), органов брюшной полости (энтериты), печени, желчного пузыря. Особенно эффективен этот метод лечения при невралгиях, невритах, миозитах, различных кожных заболеваниях (фурункулах, карбункулах, абсцессах, пиодермитах, экземах), мышечных контрактурах. Инфракрасные лучи способствуют заживлению ран, оказывают болеутоляющее, антисептическое, противовоспалительное, отвлекающее действие, стимулируют жизненные процессы.

Однако пользуясь источниками инфракрасных лучей, необходимо помнить, что они представляют собой серьезную опасность для глаз. Ближние лучи вызывают сильный нагрев хрусталика и стекловидного тела, а длительное воздействие лучей приводит к катаракте, параличу зрачка, отслойке сетчатки. В связи с этим люди, работающие на специальных производствах и в физиотерапевтических учреждениях, должны носить защитные очки.

Инфракрасные лучи, обладающие сравнительно высокой проникающей способностью, находят свою область применения и в лечении глазных болезней. Нередко к офтальмологу обращаются больные с помутнениями роговицы, с просьбой об операции. Но прежде чем приступать к пересадке роговицы, врач должен знать, каково состояние глаза, радужной оболочки, зрачка там, под бельмом, будет ли видеть глаз после операции. Установить это можно только с помощью инфракрасных лучей, проникающих через мутную роговицу столь же легко, как сквозь прозрачную, и отражающихся от хрусталика и радужки. Снимок в инфракрасных лучах дает врачу нужную информацию для решения вопроса о целесообразности операции. Еще большие перспективы имеет применение электронно-оптических преобразователей, позволяющих непосредственно видеть в инфракрасных лучах состояние глаза. Этот метод удобен не только при непрозрачности роговицы, но и при сильной светобоязни, вызванной болезнью (наблюдение в темноте неболезненно в этом случае), облегчает отыскание инородных тел в глазу и исследование опухолей.

Инфракрасный обогрев дает отличные результаты в животноводстве, где в холодные периоды года бывают значительные потери молодняка. Особенно целесообразно сочетание ультрафиолетового и инфракрасного облучения молодняка, позволяющее не только обеспечить оптимальный температурный режим, но и восполнить недостаток лучей, способствующих синтезу витамина D, ускоряющих рост и развитие животных.

Итак, невидимый тепловой луч успешно работает на пользу человека.

В науке нередко бывает так: долгие годы ученые проходят мимо явления, которое буквально лежит на поверхности, не придавая ему серьезного значения. Единичные факты и наблюдения не привлекают внимания. И лишь когда развитие науки достигает более высокого уровня, явление, мимо которого равнодушно проходили долгие годы, вдруг привлекает всеобщее внимание и даже оказывается в фокусе научной мысли. Так случилось с фотореактивацией.

В 1949 г., работая в противоположных точках земного шара, в Советском Союзе и в Соединенных Штатах Америки, два ученых одновременно сделали одно и то же открытие. Сотрудник Одесского института глазных болезней им. В. П. Филатова И. Ф. Ковалев изучал действие ультрафиолетовых лучей на одноклеточные организмы — инфузории, из-за необычной формы тела получившие название туфельек. Лучи с длиной волны 2537 Å задерживали деление инфузорий, а при более длительном облучении туфельки обычно погибали. Ученый заметил, что, когда облученных инфузорий не помещают, как обычно, в темный шкаф, а оставляют под рассеянным дневным светом, количество погибших инфузорий уменьшается в два-три раза. Американский микробиолог Кельнер получил такой же результат, работая с культурами кишечной палочки и лучистого грибка — актиномицета. Новое явление получило название фотореактивации.

Лучи против лучей

Итак, организм таинственным способом использует лучи видимого света для ослабления вредного действия ультрафиолетовых лучей. А между тем эти лучи мирно со-

седствуют в свете Солнца, и никто не предполагал, что они могут враждовать друг с другом.

Вновь открытое явление вызвало всеобщий интерес. Ведь и в прежние годы ученые сталкивались с антагонизмом излучений. Так, врачи-физиотерапевты наблюдали ослабление ультрафиолетовой эритемы, если участок кожи одновременно освещался видимым светом и инфракрасными лучами. В 1936 г. один немецкий врач даже воспроизвел это явление на своей собственной коже. Другие ученые обнаружили, что ультрафиолетовые лучи в интервале 2537—3020 Å вызывают потемнение банановой кожуры, тогда как видимый ультрафиолетовый свет устраняет потемнение.

Фотореактивация наблюдается и тогда, когда между действием «разрушительных» и «восстанавливающих» лучей прошло около 1—2 часов. Если облучаемый организм сохраняется при низкой температуре или на голодной диете, т. е. в условиях угнетения обмена веществ, этот интервал может быть безболезненно увеличен. Фотореактивация — явление общебиологическое, свойственное почти всему органическому миру, от растворов белков и нуклеиновых кислот, вирусов, бактерий, грибов до насекомых, земноводных. Однако среди бактерий и простейших обнаружены отдельные виды, неспособные к фотореактивации, а млекопитающие, видимо, полностью лишены этой способности.

Наконец, наряду с классической фотореактивацией, при которой более длинноволновые лучи устраняют вредное действие коротковолнового ультрафиолета (2500—3000 Å), был обнаружен еще один эффект. На этот раз лечебное действие на облученные клетки оказывали еще более коротковолновые лучи в диапазоне 1850—2400 Å. Причем коротковолновая реактивация наблюдалась, по видимому, также и у организмов, лишенных способности к фотореактивации классической.

Наиболее легко восстанавливается процесс клеточного деления, резко уменьшается гибель клеток, частота мутаций, хромосомных повреждений, нормализуется способность к трансформации и нарушенный ритм клеточной активности. Все эти процессы так или иначе связаны с деятельностью наследственного аппарата клетки, с восстановлением функции нуклеиновых кислот ядра. Не поддаются фотореактивации процессы растворения кле-

точной оболочки, восстановления клеточного среза, движение ресничек у инфузорий и некоторые другие процессы, связанные главным образом с деятельностью клеточной плазмы. На один квант лучей-разрушителей должно приходиться 400—1000 квантов реактивирующего света. Но и при этом полного восстановления повреждений достигнуть не удастся. Очевидно, механизм фотореактивации влияет не на все аспекты действия повреждающего света.

Для понимания сущности фотореактивации не менее важное значение имеет установление зависимости ее от температурных условий. В фотохимических реакциях за счет поглощения фотона создается избыток энергии, и повышение температуры не оказывает влияния. Наличие температурной зависимости служит показателем участия темновых химических реакций. Значит, процесс фотореактивации не ограничивается поглощением кванта реактивирующего света облученным организмом; фактически с этого поглощения лишь начинается процесс. Приобретенная организмом энергия расходуется затем в темновых реакциях.

Что это за реакции? Иными словами, каков механизм фотореактивации? Ученые обнаружили, что в неживой природе существуют явления, чрезвычайно сходные с фотореактивацией живых организмов. Еще в 1898 г. французский ученый Виллар описал следующее интересное явление. В заснятой, но не проявленной рентгенограмме, помещенной на рассеянный солнечный свет, изображение получится не обычное, негативное, а обратное, позитивное. Дневной свет меняет на рентгенограмме местами светлые и темные пятна. Дать рациональное объяснение этому явлению не удавалось. Прошло несколько лет, и ученые обнаружили, что описанное Вилларом явление — всего лишь частный случай более общего явления, названного эффектом обращения. Если на фотопластинку подействовать сначала более коротковолновым излучением, а потом более длинноволновым, то последнее уничтожает или «перевортыкает», обращает (как в случае эффекта Виллара) результат, вызванный первым облучением. Нетрудно обнаружить черты сходства между эффектом обращения, наблюдающимся на фотоматериалах, и фотореактивацией живых организмов. Это подтверждало очень важную общую закономерность, свойственную

как живой, так и неживой природе. Оставалось «только» выяснить механизм явления.

На существо этой сложной проблемы пролили новый свет опыты, проведенные на неживом материале. Если подействовать инфракрасными лучами на некоторые возбужденные фосфоресцирующие вещества, длительность фосфоресценции сокращается, высвечивание происходит быстрее. Вспомним, что фосфоресценция представляет собой послесвечение возбужденных молекул, находящихся в метастабильном состоянии. Фотоны инфракрасного света, поглощаясь этими молекулами, доставляют им недостающую энергию для подъема возбужденного электрона на обычный уровень возбуждения, с которого возврат в исходное состояние, разрядка возбуждения, совершается с максимальной скоростью. В этом примере инфракрасные лучи ослабили действие света (ультрафиолетового или видимого), возбуждавшего фосфоресценцию, уменьшили длительность послесвечения. Степень фотохимического действия ультрафиолетового света зависит от времени жизни возбужденных состояний облученных молекул. Если с помощью более длинноволнового света «разрядка» совершается быстрее, то фотохимический эффект первого облучения оказывается ослабленным. Так можно объяснить механизм эффекта обращения, обнаруженного на фотоматериалах.

Однако подлинный механизм фотореактивации клеток сложнее. Реактивируются главным образом поражения ядерного наследственного аппарата клеток. В повреждении этого аппарата ультрафиолетовыми лучами имеет значение образование димеров тимина и, в меньшей степени, других пиримидиновых оснований. В процессе фотореактивации эти дефекты, очевидно, каким-то образом устраняются за счет использования лучистой энергии. Но как? Сейчас известно, что димеры — действительно основная мишень фотореактивации. А механизмов ее существует столько же, сколько и видов, — два.

В случае коротковолновой фотореактивации большие кванты излучения, поглощенные азотистыми основаниями нуклеиновых кислот, непосредственно разрывают связи между тиминовыми остатками, освобождают их, облегчая восстановление исходной структуры. Чтобы такой механизм стал возможным, нужна энергия даже несколько большая, чем та, которая привела к образованию диме-

ров. Вот почему для реализации этого механизма нужны лучи с меньшей длиной волны и с большей энергией квантов, чем у лучей повреждающих.

Но в естественных условиях существования жизни на Земле лучи с такой длиной волны и энергией квантов отсутствуют. Поэтому природный механизм фотореактивации сформировался с учетом использования имеющейся лучистой энергии — видимого и длинноволнового ультрафиолетового света. А чтобы этот механизм был достаточно эффективным, природа создала специальный фотореактивирующий фермент.

Чудо-ферменты

При знакомстве с явлением живого свечения — биолуминесценции — выяснилось, что высокий коэффициент ее полезного действия обязан участию специализированного фермента люциферазы. Когда же хемилюминесценция тканей совершается без участия фермента, ее эффективность, квантовый выход, снижается в миллионы раз.

Фотореактивация — ферментативный процесс, и благодаря этому димеры тимина, возникшие при ультрафиолетовом поражении живых клеток, устраняются почти полностью. Для того чтобы процесс восстановления достиг максимального выражения, наряду с избытком реактивирующего света необходимо еще и время. Дело в том, что процесс внутриклеточного восстановления совершается в период между клеточными делениями, во время так называемой интерфазы. Наступление митоза (клеточного деления) прерывает процесс восстановления, и не ликвидированные еще повреждения становятся необратимыми. Поэтому всякого рода задержки деления (вызванные, например, понижением температуры, недостаточным питанием и т. п.) облегчают деятельность фермента фотореактивации, делают ее более продуктивной.

Если облучить культуру бактерий или колонию инфузорий бактерицидным ультрафиолетом в дозе, вызывающей гибель практически всех клеток, то после выставления облученной колонии на рассеянный дневной свет выживает от 35 до 70, а иногда и до 90% пострадавших клеток. Такова мощь этого чудо-фермента! Детали его работы еще не вполне изучены. Сравнительно недавно американскому биохимику К. С. Руперту удалось вы-

делить его из дрожжей. Он получен в чистом виде, но его структура и, в частности, устройство хромофора, улавливающего видимый свет, пока не установлены; известно, что максимум поглощения им света лежит у 2800 Å. Вероятнее всего, фермент представляет собой флавопротеид. Восстановление поврежденной ультрафиолетом нуклеиновой кислоты совершается в два этапа. Сначала фермент,двигающийся вдоль двойной цепи ДНК, обнаруживает дефект — димер тимина и присоединяется к нему своим активным центром. Энергия видимого света, поглощенная хромофорной группой, используется для того, чтобы отделить фермент от отремонтированного участка ДНК, после чего можно заняться следующим димером. Производство фотореактивирующего фермента «запрограммировано» в генетическом аппарате клетки, где имеется специальный ген, обозначаемый латинскими буквами *UVR*. Потеря или отсутствие этого гена означает утрату способности к фотореактивации.

Почему же чудо-фермент не справляется со своей благородной задачей на 100%? Для этого есть несколько причин. Прежде всего ультрафиолетовые лучи вызывают появление не только димеров, но и других, не фотореактивируемых типов повреждений (окисление и разрушение отдельных оснований, разрывы цепи и т. п.). Во-вторых, для ремонта части димеров может не хватить времени — наступление митоза прерывает работу фермента.

Значит, полного восстановления и не может быть? Нет, такой вывод был бы преждевременным. Дело в том, что фотореактивация — не единственный механизм ремонта поврежденной ДНК. Эти повреждения могут возникать не только при воздействии ультрафиолетовых лучей. Ионизирующая радиация и различные химические вещества — мутагены способны вызвать разнообразные поломки, изменения, нарушения структуры ДНК. Димеры тимина — лишь один из возможных видов повреждений. Поскольку для ультрафиолета их образование имеет главное значение, постольку фотореактивация — специализированный механизм восстановления — направлена именно против димеров.

Но наряду с этим тонким механизмом в тканях животных (в том числе и лишенных фермента фотореактивации) существует более общий, всеобъемлющий механизм восстановления. Поскольку он не нуждается в свете

для своей работы, его называют механизмом темновой репарации. В связи с необходимостью устранить разнообразные дефекты структуры ДНК этот механизм несравненно более сложен: он складывается из содружественной взаимосвязанной работы нескольких ферментов. В процессе темновой репарации димеры (и другие нарушения структуры ДНК) не расщепляются, а удаляются из ДНК. Процесс этот совершается в несколько этапов.

Сначала специальный фермент — он носит название эндонуклеазы — отыскивает поврежденный участок в одной из нитей ДНК и надрезает нить. Следующий фермент — вырезающая нуклеаза или экзонуклеаза — удаляет из молекулы ДНК не только поврежденное звено, например димер тимина. Как заправский хирург, фермент удаляет повреждение «с запасом», оперирует «в пределах здоровых тканей». В итоге его деятельности образуется дефект структуры ДНК, брешь в одной из нитей, достигающая более или менее значительных размеров.

Молекула ДНК не распадается в результате операции выщепления, потому что вторая, неповрежденная нить скрепляет ее. Но роль второй нити этим не ограничивается. Когда встает задача ремонта повреждения, заделки бреши, требуется не только строительный материал. Ведь ДНК — молекула особая: последовательность азотистых оснований в каждой нити ДНК имеет информационное значение, содержит в зашифрованном виде сведения о структуре того или иного клеточного белка. Восстановление будет полным лишь в том случае, если восстанавливается исходная последовательность мономеров ДНК. И вот тут-то неоценимую роль играет вторая, неповрежденная нить ДНК.

Две нити ДНК связаны водородными связями между азотистыми основаниями, причем каждое из оснований имеет только одного напарника. Существует всего две разновидности связей: аденин — тимин (А—Т) и гуанин — цитозин (Г—Ц). Если в одной из нитей все азотистые основания сохранились, при восстановлении дефекта каждое из этих оснований как бы «подбирает» себе пару из имеющихся деталей. Поэтому в ремонтируемом участке нити ДНК порядок азотистых оснований восстанавливается в своем исходном, первозданном виде. Процесс застройки бреши требует участия специального фермента. Ни наличие «стройматериалов» — деталей структуры

ДНК, ни присутствие второй неповрежденной сети еще не гарантирует выполнения ремонтных работ. Активная роль принадлежит ферменту ДНК — полимеразе. Завершает процесс темнового восстановления четвертый фермент — лигаза, сшивающий отремонтированный участок ДНК с концами нити, уцелевшими после операции выщепления. В итоге сложного процесса повреждение нити ДНК устраняется, а структура нити восстанавливается полностью.

Темновая репарация и фотореактивация — два великодушных природных механизма, осуществляющих защиту наследственности живых организмов от повреждений, сохранение в целостности и неизменности наследственной программы вида. При определенных условиях эти механизмы способны полностью устранить возникающие повреждения. Но хорошо ли это? Следует ли к этому стремиться? Условия на Земле и прежде всего взаимоотношения, взаимодействия между разнообразными живыми организмами в пределах биосферы постепенно изменяются, усложняются. Сохранить наследственную программу вида и неприкосновенности — не значит ли отстать?

Чтобы выжить, нужно приспособиться к условиям среды. Изменение условий существования требует постоянного изменения, совершенствования, развития наследственной основы, внесения в нее дополнений, поправок. Источник этих усовершенствований — мутации, из числа которых в процессе естественного отбора сохраняются и наследуются наиболее ценные, полезные в данных условиях. Следовательно, для прогресса организации живого необходима определенная степень неполноценности, несовершенства восстановительных механизмов.

С общеприродной, эволюционной точки зрения ультрафиолетовые лучи, обладающие мутагенными свойствами, выполняют (наряду с другими мутагенами) функцию поставщиков материала, сырья для естественного отбора, а ферменты фотореактивации и темнового восстановления — роль регуляторов этого процесса.

Вот какие сложные, но надежные механизмы выработались у живых существ в процессе эволюции для устранения наиболее опасных и вредных последствий ультрафиолетового облучения.

Итак, все живое на Земле вынуждено защищаться от ультрафиолетовых лучей. Фотореактивация оказалась наиболее эффективным механизмом защиты, что и обусловило закрепление его в наследственном аппарате.

Фотореактивирующий свет используется в организме не для предотвращения или ослабления вредного действия ультрафиолета: он расходуется на устранение уже возникшего повреждения. Следовательно, мы имеем дело не с защитой от действия вредного агента, а с устранением вызванных им нарушений, т. е. с лечением. Значит, к фотореактивирующему свету применим термин «луч-целитель» больше, чем «луч-защитник».

Под фотореактивацией ученые подразумевают совершенно определенное явление: ослабление вредного действия коротковолнового ультрафиолета с помощью видимого света и длинноволновых ультрафиолетовых лучей. А как же другие лучи? Не существует ли антагонизма между другими парами излучений? На неживых системах, например на фотопленках, установлена более общая закономерность: длинноволновое излучение ослабляет эффект предшествующего коротковолнового. Проявляется ли эта закономерность и на живых организмах?

Инфракрасные лучи, например, немного ослабляют эритемное действие длинноволнового ультрафиолета, но присутствие инфракрасных лучей в спектре солнечного излучения в известной мере дополняет действие на организм других его компонентов, обеспечивая главным образом тепловое, согревающее действие солнечного света. Лучи, возникающие в процессе радиоактивного распада атомов (гамма-лучи) или в специальных вакуумных трубках в результате удара о препятствие потока электронов (лучи Рентгена), имеют еще меньшую длину волны, чем ультрафиолетовые лучи. Следовательно, их кванты несут громадную энергию. В нашу задачу не входит описание всех разрушений, которые производит в животном организме мощный поток рентгеновских или гамма-лучей. Действие их вызывает острую лучевую болезнь — бич атомного века. Борьба с лучевой опасностью — одна из важнейших задач, стоящих перед современной наукой.

А нельзя ли использовать антагонизм излучений для борьбы с лучевой опасностью? В течение двух последних

десятилетий ученые пытались отыскать в широком спектре электромагнитных колебаний волны, облучение которыми ослабляло бы разрушительный эффект ядерных излучений. К сожалению, надежды не оправдались.

Впрочем, в опытах, проделанных на дрожжах и культурах ткани, было установлено, что ультрафиолетовые лучи, убивающие живые клетки, разрушающие ткани и нарушающие процесс деления, в то же время способны несколько ослаблять вредное действие предшествующего им рентгеновского облучения. Смягчающее действие ультрафиолетовых лучей, в свою очередь, может быть устранено видимым светом. Значит, небольшим реактивирующим действием по отношению к рентгеновским и гамма-лучам могут обладать ультрафиолетовые лучи, более длинноволновые, но все же непосредственно прилегающие к диапазону лучей Рентгена.

Использование фотореактивации в практике

Использование лучей в борьбе с лучевой болезнью не дает значительных результатов по многим причинам. Во-первых, проникающая способность рентгеновских и гамма-лучей очень высока: они могут проходить сквозь тело человека. Ультрафиолетовые лучи, как мы уже знаем, обладают слабой проникающей способностью, поэтому они вызывают изменения лишь в облученном участке кожи. Правда, этот участок сразу же становится источником нервных и гуморальных влияний, охватывающих весь организм, но эти влияния не имеют прямого и непосредственного отношения к повреждающему действию ядерных излучений, как при фотореактивации. Кроме того, изменения, вызванные лучами Рентгена, очень быстро становятся необратимыми. В связи с этим воздействие фотореактивирующего агента должно быть максимально быстрым и достаточно мощным. Имеет значение и то обстоятельство, что классический эффект фотореактивации выработан в течение многотысячелетнего эволюционного развития и направлен против постоянно встречающегося вредного агента — ультрафиолетовых лучей. А против ядерных излучений живой организм не выработал соответствующих

защитных приспособлений, поскольку в естественных земных условиях их мощные источники отсутствуют.

Тем не менее принцип «лучи против лучей» нашел некоторое место в арсенале средств борьбы с лучевой болезнью. Действие умеренных доз ультрафиолетовых лучей приводит в известной степени к результатам, противоположным эффекту ядерных излучений. Ультрафиолетовые лучи усиливают процессы кроветворения, которые в организме, пораженном лучевой болезнью, всегда подавлены: поднимают жизненный тонус, общую сопротивляемость организма, повышают деятельность желез внутренней секреции. В связи с этим ученые решили испытать ультрафиолетовые лучи в качестве средства профилактики лучевой болезни. Здесь, наконец, их ожидала, хотя и скромная, но удача. Организм, подвергавшийся многократному облучению ультрафиолетовыми лучами в эритемных дозах, становится более устойчивым к действию больших доз ядерных излучений.

И еще в одном случае ультрафиолетовые лучи могут оказаться полезными. Лучевые ожоги, дерматиты, язвы, возникающие иногда при лучевом лечении опухолей и других болезней, плохо заживают. Ультрафиолетовые лучи в умеренных дозах ускоряют их заживление.

Есть область практической деятельности человека, в которой фотореактивация сразу же после ее открытия интенсивно используется. Это селекция новых штаммов грибов, вырабатывающих антибиотики. Мы уже говорили, что с помощью ультрафиолетовых лучей у лучистых и плесневых грибов удается получить множество разнообразных мутаций, из которых ученые отбирают наиболее ценные и производительные. Но для получения большого количества мутаций приходится прибегать к высоким дозам ультрафиолетовых лучей, под действием которых большинство облученных грибов гибнет. Чередую воздействие ультрафиолетовым и видимым светом, С. И. Алиханян и его ученики добились снижения смертности грибов при сохранении высокого процента мутаций. Это позволило селекционерам в кратчайшие сроки достичь больших результатов.

Фотореактивация — недавно открытое явление. Изучение его идет быстрыми темпами. Использование скрытой гигантской силы лучей солнечного спектра откроет новые пути в овладении силами и тайнами природы.

Свет — это диалектическое единство прерывности и непрерывности, корпускулярных и волновых свойств. В обычных температурных источниках света возникающие фотоны движутся хаотически, освобождаются несинхронно и отличаются определенным, более или менее выраженным, статистическим распределением частот и длин волн. Поэтому излучение обычных источников (в том числе и Солнца) *полихроматично*, ибо содержит всегда довольно широкий набор длин волн — «разноцветное» свечение; оно *некогерентно*, так как каждый квант излучается как бы сам по себе, вне связи с другими, и распространяется поэтому непараллельно с другими квантами и не в одной с ними фазе колебаний.

Стимулированному излучению присущи совершенно новые свойства. Вследствие явления резонанса квант «вынуждающий» и квант «вынужденный» имеют одинаковую (или, строго говоря, очень близкую) энергию, длину волны и частоту колебаний. Лазерное излучение поэтому в высокой степени *монохроматично*. Конечно, и в свете обычных источников можно искусственно выделить интересующую нас узкую спектральную область, если, например, луч Солнца с помощью мощной призмы развернуть в полосу спектра и затем весь спектр, кроме избранной узкой полосы, экранировать и поглотить. Но какую бы узкую часть спектра мы ни старались выделить, она будет содержать лучи с несколькими различными частотами и длинами волн. Кроме того, по мере повышения монохроматичности пучка лучей интенсивность его резко падает, вплоть до ничтожной величины.

Принципиальная особенность вынужденного излучения, первая, но не единственная, и состоит в том, что практически все стимулированное свечение относится к очень узкому интервалу частот. Монохроматичность новых источников света несравненно выше всего, что можно было получить до создания лазеров.

Кстати, слово лазер (LASER) происходит от первых букв слов английской фразы Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (что можно перевести как усиление света путем вынужденного испускания излучения).

Вторая, не менее удивительная особенность стимулированного излучения — пространственная и временная когерентность. Квант, столкнувшийся с электроном с уровня

возбуждения, и квант, возникший при этом соскоке, имеют не только одинаковую величину. Они и движутся в одном направлении, распространяясь в пространстве параллельно; и волновые колебания, сопутствующие их движению, совершаются синхронно во времени, однофазно. Выделить в потоке солнечного света или излучения искусственных источников когерентную часть — еще более сложно, чем с помощью монохроматора выделить узкий спектральный пучок. Поэтому явление когерентности света физики и оптики стали изучать практически только после открытия лазеров. Эти кардинальные особенности лазерного излучения сделали возможным появление еще целого ряда удивительных свойств нового вида свечения.

Концентрация лучистой энергии во времени и пространстве

Почему вынужденное излучение не наблюдается обычно? И что нужно сделать, чтобы лазерный луч зажегся? На первый из этих вопросов ответить относительно просто. Чтобы получить вынужденное излучение, иными словами, чтобы добиться усиления приходящего извне света нужной частоты, необходимо иметь вещество, в котором большое количество электронов находилось бы на высших электронных уровнях возбуждения. А как этого добиться? Быть может, простым нагревом?

При повышении температуры, как известно, увеличивается количество атомов, энергия которых достаточно высока, чтобы забросить электрон на один из возбужденных уровней. Но эти переходы кратковременны, независимы друг от друга и, следовательно, хаотичны. В каждый данный момент все-таки подавляющее большинство электронов оказывается на основном, невозбужденном уровне.

Что произойдет в этом случае с квантами внешнего излучения, частота колебаний которых совпадает с разницей энергетических уровней вещества? Они попросту поглотятся веществом, израсходуются на возбуждение его электронов. Следовательно, для получения вынужденного излучения нужно сначала добиться перехода на уровень возбуждения большей части электронов вещества, достичь, выражаясь языком специалистов, инверсной (т. е.

обратной) заселенности энергетических уровней. Если большинство электронов пребывает на уровне возбуждения, прохождение квантов резонансной частоты вызовет их массовый и одновременный соскок на основной уровень. Иными словами, инверсная заселенность — необходимое условие усиления света за счет вынужденного излучения.

Эти рассуждения, вытекающие в сущности из работ Эйнштейна, позволили в 1940 г. советскому физiku В. А. Фабриканту предположить, что вынужденное излучение можно использовать для усиления светового потока. В годы Великой Отечественной войны эти работы прервались и возобновились только в 1951 г. Они завершились заявкой на изобретение. Однако дальнейшие шаги в направлении создания оптических квантовых генераторов (лазеров) суждено было сделать другим ученым — Н. Г. Басову и А. М. Прохорову в СССР, Ч. Таунсу в США. Первый действующий лазер был построен Т. Майманом в США в 1960 г.

В качестве рабочего вещества для возникновения вынужденного излучения в первых лазерах использовали стержни из искусственного рубина — кристалла окиси алюминия с небольшой (0,05—0,5%) примесью атомов хрома, придающих кристаллу красный цвет. Они-то и играют главную роль в возникновении стимулированного излучения, так как их электроны способны при возбуждении довольно длительно ($3 \cdot 10^{-3}$ сек) задерживаться на метастабильном уровне.

Если рубиновый стержень поместить внутри спирально изогнутой мощной лампы (чаще всего ксеноновой), то такой рубиновый сердечник будет довольно равномерно освещаться лампой. Из широкого спектра свечения лампы какая-то одна группа частот окажется резонансной: при мощной вспышке лампы электроны атомов хрома одновременно (пусть на короткие доли секунды) взлетят на уровень возбуждения. Чтобы это произошло, вспышка ксеноновой лампы осуществляется разрядом батареи конденсаторов.

Итак, высший уровень возбуждения в атомах хрома заселен электронами. Дальше события развиваются молниеносно. Квант резонансной частоты (то ли высвеченный криптоновой лампой, то ли возникший в атоме хрома при разрядке метастабильного состояния), пролетая

мимо возбужденного электрона, вызывает и его разрядку, освобождая второй, подобный себе квант. Если каждый из этих фотонов разрядит еще по одному возбужденному атому, количество фотонов снова удвоится. Налицо усиление света за счет вынужденного излучения.

Но лазер — детище второй половины XX в. — способен на большее. Если у торцов рубинового стержня установить зеркала (или нанести непосредственно на торцы, отражающий слой серебра), поток света, усиленного в стержне, отразится от зеркала, вернется в кристалл, отразится от второго зеркала и т. д. При каждом отражении интенсивность света возрастает за счет разрядки возбужденных атомов хрома. А возбуждение последних поддерживается периодическими импульсами ксеноновой лампы, которые как бы накачивают в кристалл энергию электронного возбуждения. Отсюда и название — «лампа накачки».

Интенсивность света в такой системе могла бы возрастать очень сильно. Но перегрев стержня прекращает генерацию вынужденного излучения. Поэтому в конструкции рубинового лазера — самого распространенного типа оптических квантовых генераторов в наши дни — предусмотрены, во-первых, охлаждение стержня и, во-вторых, своевременный отвод лучистой энергии. Одно из торцевых зеркал делается полупрозрачным, и когда лихорадочно (со скоростью света!) мечущийся внутри стержня от торца к торцу поток излучения достигает гигантской плотности, он вырывается наружу в виде мгновенного (длительностью в тысячные доли секунды) всплеска излучения невиданной яркости.

Рубиновый лазер генерирует излучение в красной области спектра с длиной волны 6943 Å (небольшая часть излучения приходится на волну 6929 Å). В энергию лазерного импульса преобразуется лишь небольшая часть энергии, излучаемой лампой накачки. Иными словами, коэффициент полезного действия рубинового лазера невелик — около 1%. Но это сравнительно небольшое количество лучистой энергии (мощность современных рубиновых лазеров колеблется от 1—2 до нескольких сот ватт) концентрируется прежде всего в пространстве — в узкий, практически не расходящийся пучок, а также во времени — в короткий импульс излучения. Если лазер генерирует лучистую энергию мощностью 1 Вт (т. е. 1 Дж. в се-

кунду)¹ и импульсы излучения продолжительностью в 0,001 сек следуют друг за другом с интервалом в 1 сек, то во время каждого импульса концентрация энергии в пучке достигает 1000 Дж. Особенности лазерного излучения, прежде всего его монохроматичность и когерентность, облегчают задачу концентрирования пучка в пятно ничтожного диаметра. Расчеты показывают, что предел концентрации — размер, соответствующий половине длины волны света, т. е. для рубинового лазера минимальный возможный диаметр пятна — 0,2 мкм. Практически достигнутый предел — несколько меньше 1 мкм.

При такой фокусировке светового луча плотность энергии на единицу площади еще более фантастически возрастает, достигая совершенно невероятных величин, не осуществимых никаким иным способом. Но и это еще не предел — мощность лазерных установок непрерывно возрастает. Кроме того, есть еще один резерв — уменьшение длительности каждого отдельного импульса.

В обычном рубиновом лазере полупрозрачное зеркало препятствует слишком раннему разряду; световой импульс вырывается наружу лишь после достижения какой-то критической плотности светового потока. Если затвор на выходе из кристалла сделать более плотным, концентрацию световой энергии можно еще более увеличить. Но зато и импульс прервется раньше — так что особого выигрыша получить не удастся. Очевидно, выход состоит в том, чтобы сделать затвор переменной плотности: когда световой поток внутри кристалла достигнет предельной плотности, достаточно «раскрыть шлюз», и разрядка даст гигантский импульс еще невиданной концентрации.

Такие лазеры (с переменной, или модулированной добротностью) уже созданы. Общее количество излучаемой энергии в них не увеличивается; возрастает лишь ее концентрация во времени за счет сокращения длительности импульса до 10^{-12} сек и даже ниже. С помощью лазеров такого типа удастся, например, достичь температуры 1—2 млн. градусов и выше — задача, совершенно неосуществимая большинством других способов. Правда, это повышение температуры невообразимо кратковременно и совершается в ничтожном объеме вещества. Но это уже реальность сегодняшнего дня, перед которой меркнут не

¹ Джоуль равен 10^7 эрг.

только зеркала Архимеда, но и пламя самых мощных дуговых печей.

Лазерный луч находит себе применение в опытных установках термоядерной энергетики — с его помощью особенно удобно в кратчайшее время поднять температуру плазмы до предела, за которым становится возможным и энергетически выгодным слияние легких ядер. Можно предполагать, что когда использование термоядерной энергии станет реальностью и из стен лабораторий выйдет на простор промышленной энергетики, лазер займет достойное место в качестве одной из важнейших деталей процесса. Но это лишь одно из бесчисленных реальных применений искусственного Солнца.

...И невозможное становится возможным

Рассказ об удивительных способностях лазерного луча не окончен. Монохроматичность и когерентность и особенно концентрация энергии достигают в лазерном луче невиданных размеров. А количественные изменения рано или поздно приводят к появлению новых признаков, свойств, явлений — нового качества. Таков всеобщий закон объективной диалектики природы, неоднократно подтверждавшийся и подтверждающийся по мере развития научного познания. Лазерный луч — еще одно тому доказательство.

Как влияет мощный световой поток на свойства вещества? Как ведет он себя в прозрачной среде, которая его не поглощает? Над этими вопросами впервые задумался выдающийся советский физик-оптик, будущий президент Академии наук СССР Сергей Иванович Вавилов. В то время, 30—50 лет назад, источники света были маломощными, о лазерах и не мечтали. Законы оптики казались незыблемыми, как египетские пирамиды. Г. Г. Слюсарев в своей книге «О возможном и невозможном в оптике», вышедшей на самом пороге лазерного века, категорически утверждал: невозможно сжигание предметов на большом расстоянии; невозможно получение параллельных пучков светового излучения, переносящих энергию на значительные расстояния; явления преломления и отражения света обратимы (за вычетом рассеяния и поглощения) и т. п.

Лазерный луч ниспроверг все эти и многие другие, дотоле незыблемые твердыни, открыл новую главу науки

о свете, получившую название «нелинейной оптики». Лишь С. И. Вавилов пророчески предвидел возможность нелинейных явлений при использовании очень мощных световых потоков. Удивительные физические особенности лазерного излучения нашли выражение в целом ряде новых оптических явлений. Выше уже шла речь о том, что луч лазера можно сфокусировать в пятнышко менее микрона в диаметре. Обычный, монохроматический луч сфокусировать в точку принципиально невозможно: каждая волна, каждый диапазон частот образует в этом случае свой фокус, а общее пятнышко окажется достаточно большим (явление хроматической аберрации). Луч лазера, сделав невозможное возможным, ниспроверг один из запретов классической оптики.

Но революция в оптике, начатая с созданием оптических квантовых генераторов, этим не ограничивается. Один из классических законов оптики, экспериментально найденный Столетовым и сформулированный Эйнштейном, утверждает, что выбить электрон из металла (фотоэлектрический эффект) может свет определенной частоты и длины волны. Если длина волны света становится больше какой-то величины (так называемого красного порога), то фотоэффект не наблюдается, сколько бы мы ни увеличивали интенсивность освещения. Эйнштейн дал объяснение этому явлению с позиций квантовой теории: каждый фотон света самостоятельно и независимо от других фотонов взаимодействует с электроном, отдавая ему свою энергию. Если этой энергии достаточно для преодоления внутриатомного взаимодействия — электроны вылетают, образуя фототок. Если энергия каждого кванта недостаточна для выбивания электрона — эффекта не будет, как бы много фотонов с малой энергией ни падало на металл. Итак, считалось твердо установленным, что увеличением количества света нельзя компенсировать недостатка его качества, нельзя преодолеть красный порог.

С открытием лазеров рухнул и этот запрет. Сверхплотное и когерентное излучение оптических квантовых генераторов взаимодействует с веществом иначе, чем обычный свет. Фотоны в лазерном луче летят столь плотным потоком, что они могут одновременно реагировать с одним атомом, с одним электроном. Становятся возможны двух- и многофотонные процессы (еще один наглядный пример перехода количества в качество), исчезает крас-

ный порог: одновременное действие двух фотонов соответствует эффекту одного фотона с удвоенной частотой колебаний (с вдвое более короткой волной). Кванты красного света слишком малы, чтобы вызвать фотоэффект. Но луч рубинового лазера — тоже красный — вызывает интенсивную фотоионизацию, вплоть до полного отрыва электронов от ядер, с превращением вещества в плазму.

Согласно строгим квантовым законам, открытым Н. Бором, атом поглощает и испускает излучение строго определенных частот, энергия квантов которого точно соответствует разности энергетических уровней атома. Многофотонные процессы, характерные для лазерного излучения, ниспровергли и этот запрет: теперь важно, чтобы энергия суммы фотонов (двух, трех или более) соответствовала разности уровней. В связи с этим закон сохранения и превращения энергии, полностью сохраняя силу, приобретает новую форму.

Сорок лет назад С. И. Вавилов и В. Л. Левшин наблюдали первый нелинейный эффект — изменение коэффициента поглощения вещества под действием света. В обычных условиях, сколько бы света ни падало на вещество, его поглощающая способность остается прежней — своеобразная бочка Данаид! Но ведь возбужденный атом, поглотивший электрон, приобретает новые квантовые, а значит, и оптические свойства. Поглотить еще один квант того же света он уже обычно не может. Пока число таких возбужденных атомов в веществе относительно невелико, их изменившиеся свойства внешне не проявляются. Но мощный световой поток и в этом случае должен привести к качественно новым явлениям. В опыте Вавилова и Левшина при поглощении урановым стеклом света мощной искры прозрачность стекла под влиянием сильного освещения возрастала.

С открытием лазера стало ясно, что опыт Вавилова — не исключение: мощный световой поток как бы прокладывает себе дорогу в веществе, изменяя дотоле неизменяемую константу — коэффициент поглощения. Новый эффект самоканализации сразу же нашел применение. Для получения гигантских импульсов в лазерах с модулированной добротностью стали применять не механические, а оптические затворы: при достаточно высоком уровне возбуждения кристалла возникают нелинейные явления, и затвор, дотоле непрозрачный, открывается сам.

Аналогичная судьба постигла еще одну константу классической оптики — показатель преломления. Свет, как известно, — электромагнитные колебания, электромагнитное поле. Синхронность, однофазность световых колебаний в лазерном луче и большая плотность энергии в нем создают напряженность электрического поля до миллионов вольт на сантиметр. Такое поле оказывает сильное влияние на электроны атомов вещества, через которое проходит луч. Если частота и амплитуда колебаний электронов близки к частоте световых колебаний, то проходящий лазерный луч, вызывая резонансные колебания электронов вещества, изменяет, модулирует себя: возникает волна удвоенной частоты. Подбор кристаллов делает возможным превращение невидимого света неодимового лазера (лежащего в ближней инфракрасной области с длиной волны $10\cdot 600\text{ \AA}$) в видимый ($\lambda = 5300\text{ \AA}$) зеленый луч; а красный свет рубинового лазера может быть таким же образом превращен в ультрафиолетовый с коэффициентом полезного действия, близким к 50%!

Принцип удвоения частоты уже используется практически для получения лазеров, работающих в ультрафиолетовой и видимой частях спектра. Тот же эффект при прохождении в кристалле двух разных световых потоков дает более сложный эффект взаимной модуляции; рождаются две новые волны: одна с частотой, равной сумме, другая — разности частот первичных волн. Это явление используется для получения радиоволн, ультракоротких и миллиметровых.

Изменение показателя преломления вещества под влиянием мощного светового потока приводит к еще одному необыкновенному явлению: лазерный луч, проходящий в однородной прозрачной среде, самофокусируется! При этом плотность лучистой энергии в пучке света еще более возрастает. И если в прозрачной среде попадают хотя бы малейшие неоднородности, поглощение в них хотя бы ничтожной части энергии вызывает растрескивание, разрыв стекла или другого прозрачного материала.

В свое время выдающемуся русскому физiku П. Н. Лебедеву пришлось потратить годы и проявить поистине ювелирное мастерство, чтобы доказать реальность светового давления. А лазер и здесь сделал невозможное возможным, сложное и абстрактное — простым и наглядным. Лазер мощностью всего 0,25 вт — лилипут в мире вели-

канов — в состоянии удерживать на своем луче, направленном вертикально вверх, стеклянный шарик диаметром 0,025 мм. А в фокусе луча мощного импульсного лазера давление превышает тысячу тонн на квадратный сантиметр! Перечень революционных свойств лазерного луча можно было бы продолжить. К их числу относится, например, возникновение в веществе ультра- и гиперзвуковых колебаний. Но и сказанного достаточно, чтобы понять, что с созданием оптических квантовых генераторов в учении о свете открылась новая глава.

Луч-исследователь и луч-труженик

Мы познакомились пока с устройством лишь одного, правда, наиболее распространенного лазера — рубинового. Но сегодня семья лазеров уже весьма многочисленна и продолжает расти не по дням, а по часам. Познакомимся же с наиболее интересными ее членами.

Если заменить рубин бариевым стеклом с добавкой ионов элемента неодима, мы получим лазер, излучающий в ближней инфракрасной области, с длиной волны $10\ 600\text{ \AA}$ (1,06 мкм). Неодимовый лазер более экономичен, его КПД более 4% и значительно превышает таковой рубинового лазера. Из неодимового стекла можно получать стержни любой величины и создавать лазеры большой мощности — до нескольких тысяч джоулей. В качестве активного вещества — рабочего тела лазеров используется также стекло с добавкой атомов иттербия, гадолиния, гольмия, тербия и других редкоземельных элементов. Лазер на кристалле флюорита, активированном диспрозием, излучает на волне 2,35 мкм, на кристалле иттрий-алюминиевого граната, активированном неодимом, излучает на той же волне, что и лазер на неодимовом стекле — 1,06 мкм, но не в импульсном, а в непрерывном режиме при комнатной температуре. Существуют и другие типы лазеров.

В жидкостных лазерах в качестве активного вещества используются растворы окислов и комплексных соединений все тех же редкоземельных металлов. Жидкостные лазеры удобны тем, что они проще в изготовлении, не нуждаются в специальной системе охлаждения (достаточно обеспечить циркуляцию жидкости в установке); подбирая растворенные соединения, можно легко изме-

нять длину волны излучения. Однако мощность жидкостных лазеров невелика. Жидкостные лазеры на красителях обладают свойством плавно изменять частоту генерируемых световых колебаний (в определенных пределах).

Газовые лазеры работают в непрерывном режиме. Одно из их достоинств — необыкновенная даже в мире лазеров монохроматичность — она еще в 100 тыс. раз выше, чем у рубинового лазера. Гелий-неоновый лазер излучает на волне 6328 Å красный свет. Аргонный — в синезеленой области (4880 и 5145 Å). Углекислотный лазер, обладающий высоким коэффициентом полезного действия — до 15—25%, — излучает в длинноволновой инфракрасной области (10,6 мкм). Наконец, лазер на азоте — первый ультрафиолетовый лазер с длиной волны 3371 Å.

Особую группу образуют полупроводниковые лазеры. Хотя активное вещество в них представляет собой твердое тело, но принцип генерации света отличается от такового у твердотельных лазеров: вместо световой накачки используется электрическое возбуждение. Их КПД наиболее высок — до 60—70%. В магнитном поле удается изменять частоту излучаемого ими света. Мощность полупроводниковых лазеров пока невелика.

Работы по созданию новых типов лазеров ведутся во многих странах. И если вспомнить, что первый лазер был создан всего в 1960 г., нельзя не признать, что сделано уже немало. Лазер прочно вошел в арсенал науки, техники, промышленности, сельского хозяйства и медицины. Рассмотрим коротко, что уже дает и может дать человечеству в самом ближайшем будущем использование лазерного луча.

Высокая концентрация лучистой энергии в лазерном импульсе, а также возможность фокусировки луча позволяет создать столь значительное, хотя кратковременное и локальное, повышение температуры, что самые тугоплавкие вещества, рекордсмены прочности испаряются, попав в фокус излучения. Это свойство лазерного луча широко и разносторонне используется в технике.

Пробивание отверстий малого диаметра в таких твердых материалах, как алмаз, корунд, особо прочные сорта стали, металлокерамические изделия, лазерный луч производит несравненно проще, быстрее, производительнее и дешевле, чем любые другие инструменты. Для получения сверхтонкой проволоки, например, нагретые заготовки ме-

талла протягиваются через крохотные отверстия в алмазной фильере. Сверлить эти отверстия до последнего времени удавалось лишь с помощью алмазного же порошка, на что уходило много времени и дорогостоящего сырья. Лазерный луч сокращает время пробивания отверстия с 2—3 дней до 2—3 минут; он сверлит отверстия очень малого размера (до 0,009 мм), получить которые другим способом невозможно. В результате производительность труда и экономия материалов увеличиваются в тысячи раз. Отечественная установка «Квант-9» обладает всеми этими преимуществами, пробивая отверстия тоньше волоса.

В микроэлектронике, производстве интегральных схем лазерный луч осуществляет травление, т. е. удаляет крохотные излишки металла; повышает точность изготовления прецизионных сопротивлений, испаряя избыточный материал; производит резку и пайку тончайших проводов и деталей внутри вакуумных приборов, не нарушая вакуума. Советская установка «ТИЛУ-1» дает в год сотни тысяч рублей экономии.

Лазерный луч, испаряя в ничтожные доли секунды крохотную частичку вещества, образует облачко пара. Через секунду-другую оно рассеивается, и если не упустить времени, то на фотопластинке спектрографа это облачко оставит след в виде набора линий, по которым специалисты определяют элементарный состав изучаемой пробы. Лазерный микроанализ успешно работает в биологии, медицине, позволяет определить химический состав участка хромосомы или человеческого волоса, сыворотки крови или ткани опухоли; в криминалистике (примесь какого-либо вещества позволяет установить происхождение и принадлежность вещественного доказательства); в живописи (химический состав краски может подсказать возраст картины); в геологии (где серийный анализ проб облегчает по следам металла отыскание его месторождения) и т. п.

Лазерный луч под контролем ЭВМ осуществляет автоматическую резку металла, раскрой стальных и алюминиевых листов, тканей и кожи, причем выполняет все эти операции несравненно быстрее и точнее человека. Для резки наиболее удобны лазеры непрерывного действия, например углекислотные.

Сварка металлических швов — одна из новых областей применения лазера. Чтобы луч плавил металл, а не испа-

рял его, нужно было увеличить длительность лазерного импульса с десятитысячных до сотых долей секунды. Для этого пришлось замедлить разряд конденсаторов и растянуть свечение лампы накачки. При переходе от точечной сварки к сварке швов сферические фокусирующие зеркала заменили цилиндрическими, и луч лазера стал собираться не в точку, а в линию. Советские сварочные лазерные установки «СУ-1», «СЛС-10», «Квант-10», «УЛ-2» обеспечивают высококачественную скоростную (до 2—5 см/сек) сварку металлов, сваривают золото и кремний, золото и германий, алюминий и никель, тантал и медь.

Широки возможности использования лазерного излучения в связи в качестве средства передачи информации. Радиоволновой диапазон, используемый для радио- и телесвязи, в настоящее время переполнен. Интенсивно развивающееся цветное телевидение сулит новые трудности, так как объем передаваемой информации резко возрастает и требует увеличения диапазона занимаемых частот.

Частота видимого света в миллион раз выше частоты радиоволнового диапазона, и область оптических частот принципиально может вместить соответственно больший объем передаваемой информации. Для того чтобы луч мог переносить информацию, нужно его пометить, т. е. изменить, промодулировать. Естественно, что луч правильной, когерентной структуры, в котором все волны идут «в ногу», строго синхронно и синфазно, для приобретения информационного значения нуждается в минимальных метках-модуляциях и в состоянии перенести несравненно больший объем сведений, чем луч обычного света, и без того отличающийся несинхронной и некогерентной структурой, несущий всякого рода искажения. Вот почему излучение лазера — идеальное средство связи. Модуляция частоты лазерного света в пределах всего 1% создает диапазон, достаточный, по подсчетам специалистов, для передачи по крайней мере 1 млрд. телефонных разговоров, не мешающих друг другу.

Каким же образом можно промодулировать лазерный луч? В обычной радиотелефонной связи звуковые волны нашего голоса, падающего на микрофон, порождают электрический ток переменной интенсивности, модулирующий основной радиосигнал. В телевидении роль модулятора

выполняет электронный луч, интенсивность которого меняется в зависимости от яркости отдельных строк и участков изображения. Простейший способ модуляции лазерного луча осуществляется с помощью оптического затвора, степень пропускания которого меняется с приложенным напряжением, колеблющимся за счет сигналов от микрофона. В этом случае модулируется интенсивность лазерного луча, но может изменяться и частота.

Преимущество лазерной связи — это также малая расходимость, строгая направленность луча; отсюда высокая экономичность (радиостанция излучает по всем направлениям) и возможность работы на одной волне многих излучателей. Наконец, высокая частота колебаний лазерного луча делает возможной передачу на одной волне тысяч телепрограмм и миллионов телефонных разговоров, не мешающих друг другу.

Но на пути практического создания лазерных систем связи есть по крайней мере два серьезных и пока не преодоленных препятствия. Во-первых, световой луч в атмосфере подвержен влиянию дымки, тумана, облачности, пыли, и это снижает надежность связи, вызывая рассеяние световых волн. Инфракрасное излучение в этом отношении более надежно, так как меньше ослабляется атмосферными помехами. Экспериментальные системы лазерной связи на короткие расстояния существуют, в том числе и в Москве. Однако серьезную конкуренцию существующим системам связи лазерный луч сможет составить лишь в том случае, если для его распространения будет создана система труб с достаточно высоким вакуумом — своеобразных световодов, светорелейных линий. Возможно, система лазерной связи будет поднята в высокие слои атмосферы или в космос, свободный от атмосферных помех.

Во-вторых, препятствием для дальней лазерной связи является кривизна земной поверхности. Длинные радиоволны преодолевают это препятствие за счет дифракции, короткие — отражаясь от ионосферы. Лазерный луч — световой, и он распространяется строго прямолинейно, т. е. в пределах видимости. Это препятствие можно преодолеть, лишь пользуясь одним из двух названных выше способов.

Что касается существующих типов лазеров, то импульсные (твердотельные и жидкостные) установки не

годятся для связи — импульсный сигнал труднее модулировать, «нагружать» информацией. У полупроводниковых лазеров область излучаемых частот слишком широка. Газовые лазеры хороши, но мощность их пока невелика. Таким образом, предстоит еще немалый путь, чтобы принципиальную возможность воплотить в реальное техническое решение. Но путь этот будет пройден — сомнений в этом нет. Уже в ближайшие годы возможно создание лазерных систем связи между искусственными спутниками земли, космическими кораблями и орбитальными станциями, а также между самолетами, летящими на большой высоте. А существующие экспериментальные системы уже сейчас обеспечивают связь в пределах примерно полутора десятков километров.

Ведутся работы и над конструкциями лазерного телевизора. Японские ученые, особенно интенсивно работающие в этой области, нашли, что вместо электронно-лучевой трубки — самой громоздкой части современного телевизора — можно использовать кристалл двуокиси теллура, модулируя отклонение светового луча путем воздействия ультразвуковых колебаний, изменяющих показатель преломления кристалла. Японская фирма «Хитати» уже продемонстрировала в г. Осака на всемирной выставке «Экспо-70» экспериментальную систему цветного телевидения, в которой проекция на огромный экран (3×4 м) осуществляется с помощью трех лазеров — криптонового (красного) и двух аргоновых (зеленого и синего). Видеосигналы передаются от обычной цветной телекамеры, усиливаются и модулируют лазерные сигналы. Благодаря применению лазеров цветовая передача изображений резко улучшается. Горизонтальная и вертикальная развертка обеспечивается системой из 40 зеркал.

Другая важная область практического использования лазерного излучения — производство точных и прецизионных измерений: расстояния до Луны (с помощью установленного на Луне отражателя точность повышена до 50 м), дрейфа континентов (с помощью отражателей и специального спутника), движения ледников, толщины облачности, для геодезических измерений, определения расстояния до цели. Луч лазера может быть использован и для обнаружения пожаров — дым и токи нагретого воздуха способны слегка отклонять его траекторию. Установка лазера в сейсмоопасном месте (на коренных породах),

может облегчить предсказание землетрясений — по отклонению пятикилометрового луча. Наконец, лазерный визир используется при прокладке трубопроводов через водохранилища и реки, при бурении тоннелей и скважин. Лазерный визир использовался и при строительстве Останкинской телебашни — для своевременного выявления отклонений от вертикальной линии.

Специалистами широко обсуждаются перспективы передачи энергии на большие расстояния с помощью лазерного луча. В качестве световодов испытываются стеклянные волокна с полированной зеркальной поверхностью (волоконная оптика) и кварцевые трубки, заполненные четыреххлористым этиленом. Но потери энергии в таких световодах довольно значительны. Реальна также опасность их разрушения поглощенным светом. Передача же без световодов принципиально возможна главным образом за пределами плотных слоев атмосферы.

В военном деле лазерный луч используется для обнаружения и уничтожения самолетов и ракет противника, в системах наведения и самонаведения на цель ракет, бомб, снарядов, для скрытого ведения воздушной разведки в ночное время, аэрофотосъемки (инфракрасный лазер). Лазер может быть деталью дистанционного взрывателя и, наконец, сжигать на расстоянии военные объекты, в том числе движущиеся, — задача, привлекавшая внимание людей еще в древности и воплощенная в фантастических проектах — сначала в зеркалах Архимеда, а затем в «Гиперболоиде инженера Гарина» А. Н. Толстого.

Большое будущее, видимо, ожидает лазер еще в одной области применения: в голографии. Этот вид объемной фотографии, содержащей всю информацию о предмете («голо» — по-латыни весь), был теоретически предсказан в 1948 г. английским физиком Д. Габором. Если зафиксировать на фотопластинке дифракционную картину, возникшую при прохождении света мимо препятствия в виде точки, а затем пропустить через пластинку точно такой же пучок света, на экране вновь возникнет та же точка. Но теоретические предположения Габора осуществить было невозможно — пучок света с его хаотической структурой воспроизвести вторично не удавалось.

Лазерный луч и в этом случае сделал невозможное возможным. Монохроматичный и когерентный свет ла-

ра проходил через предмет, дифрагируя на отдельных его точках, и падал на фотопластинку. На ту же пластинку падала часть лазерного пучка, прошедшая предварительно через систему призм или зеркал в обход предмета. Фотопластинка, содержащая в причудливом переплетении дифракционных колец и линий всю информацию о предмете (она-то и называется голограммой), при подсвечивании аналогичным лазерным лучом дает на экране объемное изображение предмета. Более того, каждый кусок разбитой голограммы также способен при освещении дать объемное изображение всего предмета. Использование этого принципа сулит качественно новые возможности для кино и телевидения. Однако технические трудности значительны, и на их преодоление потребуется, вероятно, пять—десять лет.

Принцип голографии может найти применение и в цветном телевидении, и в особой конструкции микроскопа. Направления использования лазеров в будущем трудно исчерпать. Остановимся подробнее на некоторых возможностях их применения в биологии и медицине.

Луч лазера и живая ткань

Монохроматическое излучение оптических квантовых генераторов в отличие от полихроматического, широкополосного излучения Солнца и искусственных источников света может избирательно поглощаться определенными структурными элементами тканей, клеток, некоторыми хромофорными группами, пигментами. Поэтому, подбирая соответствующую длину волны, можно в принципе оказывать воздействие очень тонкое, специфическое. Лазерный луч может стать, и со временем станет, орудием направленного воздействия на организм, средством управления жизненными процессами, в особенности, когда врач будет располагать целым арсеналом лазеров, генерирующих излучение в разных областях оптического диапазона. Разумеется, для таких тонких избирательных воздействий на организм нужно использовать нефокусированное излучение сравнительно малой интенсивности, не вызывающее не только испарения, но и ожога ткани.

Световое излучение лазера вызывает в живой ткани сдвиги, присущие в обычных условиях лишь гораздо более высокоэнергетическому ионизирующему и ультрафио-

летовому излучению,— выбивание электронов, образование ионов и свободных радикалов. Главное в этом эффекте лазерного луча принадлежит мощным электромагнитным полям. Действие поля сказывается лишь непосредственно в пределах облучаемых участков и в сочетании с нелинейным двухфотонным взаимодействием порождает фотоэлектрический эффект, хотя энергия каждого в отдельности кванта для этого недостаточна. Поэтому мощному излучению рубинового лазера оказываются присущи некоторые биологические эффекты, наблюдавшиеся ранее только при воздействии рентгеновских и гамма-лучей,— возникновение свободных радикалов и вследствие этого — изменение структуры отдельных азотистых оснований ДНК, появление мутаций и т. п. Под влиянием нелинейных эффектов возможно изменение прозрачности сред глаза и отсюда появление в стекловидном теле пузырьков газа (очагов локального испарения в участках пониженной прозрачности), а со временем — и помутнения хрусталика, так называемой катаракты.

При импульсном режиме работы лазеров в облучаемом веществе нередко образуются механические колебания атомов и молекул. Когерентное импульсное излучение как бы раскачивает молекулы, и они начинают колебаться с ультра- и даже гиперзвуковой частотой. Образующиеся при этом упругие волны распространяются в живой ткани гораздо дальше и глубже, чем проникают световые волны, усиливают действие лазера и делают его более распространенным.

Кожа и другие ткани организма имеют сложную структуру; они состоят из слоев клеток различного строения, обладающих разными механическими свойствами. При прохождении ультразвуковых волн молекулярные и клеточные слои колеблются, резонируют неодинаково. Поэтому между молекулами биополимеров, между клеточными слоями возникают микроскопические разрывы, просветы, полости. Это явление называется кавитацией (от латинского кавитас — полость). Разрывы возникают на очень короткое время (ничтожные доли секунды), но сопровождаются определенным нарушением структуры и функции живой ткани.

Очень большое значение имеет присутствие в клетках пигмента. Беспигментные клетки почти не поглощают лучей рубинового и неодимового лазеров (наиболее распро-

страненных и в основном использующихся пока в биологии и медицине) и потому мало чувствительны к ним. Луч, прожигающий отверстие в стальном листе толщиной 1—5 мм, не вызывает никаких заметных повреждений в клетках кожи, лишенных пигмента. Но присутствие гранул меланина делает клетку особенно «привлекательной» для луча лазера, и в крохотный промежуток времени такая клетка испаряется, исчезает, тогда как ее беспигментные соседки остаются невредимыми. В белой незагоревшей коже луч лазера проникает поэтому на большую глубину и больше рассеивается, не давая сильного местного поражения. Имеет значение и степень кровенаполнения ткани. Прилив крови облегчает поглощение лазерного луча гемоглобином; страдают при этом в первую очередь клетки крови, а также стенки сосудов.

А теперь познакомимся непосредственно с картиной лазерного поражения живой ткани. Ожог и мгновенное испарение части вещества кожи в месте падения лазерного луча завершаются образованием кратерообразного углубления. Дно кратера обожжено, покрыто тонким слоем сухой омертвевшей ткани. Все произошло в считанные доли секунды. Но случившееся — не конец, а начало процесса. Мгновенное испарение вещества, закипание жидкостей тела вызывает быстрое и резкое повышение давления в клетках облученной ткани. Как волны от упавшего в воду камня, во все стороны от облученного участка распространяется ударная волна. Чем меньше продолжительность лазерного импульса, тем более мощная волна распространяется по ткани. Обычно она не вызывает серьезных повреждений. Но если ударная волна распространяется внутри замкнутой полости — черепа, грудной, брюшной — она вызывает более или менее сильный ушиб мягких тканей (мозга, легкого, сердца) о твердые костные стенки полости. Возникают кровоизлияния.

Если лазерный импульс большой мощности проникает внутрь глаза (оболочка глазного яблока достаточно жестка), происходят частичное испарение стекловидного тела с образованием пузырей в нем, кровоизлияния в сетчатку и ее отслойка, а при особо мощной ударной волне — даже разрыв глазного яблока. Лазерный импульс, упавший на лобную кость мыши, вызывает мгновенную гибель в результате ушиба мозга ударной волной и массивных кровоизлияний. В то же время кожа лба,

кость остаются неповрежденными. У более крупных животных лобная кость толще, и мозг не повреждается.

Другой фактор распространения лазерного поражения — ультразвуковые упругие колебания. Степень их опасности и особенности действия изучены недостаточно.

Итак, можно говорить о двух основных формах взаимодействия лазерного луча с живой тканью. При большой концентрации лучистой энергии на первый план выдвигается чисто тепловое действие — ожог, испарение, выгорание ткани. В этом случае длина волны лазерного излучения значения не имеет. При нефокусированном облучении в малых дозах основное значение имеет избирательное поглощение лучистой энергии теми или иными хромоформными группами. При этом лучи разной длины волны поглощаются разными веществами ткани и вызывают различные биологические эффекты. Однако в обоих случаях главные события разыгрываются в клетках, снабженных пигментом или иным хромофором. Белки и нуклеиновые кислоты — основные компоненты живых тканей — непосредственно не поглощают излучения рубинового и неодимового лазера. Чтобы возник биологический эффект, необходимо присутствие фотосенсибилизатора — красителя, переносящего поглощенную энергию света на молекулы биополимеров. И там, где такой посредник имеется, эффект лазерного луча сильнее и развивается при значительно меньших дозах облучения. Вот почему легко разрушаются в поле лазерного облучения красные клетки крови — эритроциты, пигментированные клетки кожи, клетки печени, а беспигментные клетки способны переносить без ущерба воздействие весьма значительных количеств лучистой энергии.

Глаз и кожа под лучом лазера

Глаз — наименее защищенный, наиболее уязвимый орган в условиях лазерного воздействия. Проникший внутрь глаза лазерный луч беспрепятственно проходит прозрачные среды глаза, которые фокусируют его (как и любой луч) на сетчатку. Фокусирующие свойства глаза создают в определенной точке сетчатки очень большую плотность лучистой энергии, даже если луч лазера маломощен и попадает в глаз не прямо, а будучи отражен от стен, предметов и т. п. Основные слои сетчатки также почти совершенно прозрачны для лучей лазера. Но внутренний,

пигментный слой полностью их поглощает. В точке на сетчатке, где фокусируется свет лазера, пигментный эпителий и слой светочувствительных палочек и колбочек мгновенно выгорает, оставляя после себя плоский белый рубец диаметром около 1 мм (погибшие клетки замещает соединительная ткань). Одно-два таких пятнышка, особенно если они локализируются не в области желтого пятна, быть может, и не окажут серьезного влияния на функции зрения. Но при повторных ожогах число таких участков возрастает, и постепенно может наступить слепота.

При ожоге сетчатки часть ее вещества испаряется; в этом случае также образуются пузырьки, которые нарушают зрение еще больше, чем локальные повреждения сетчатки. На радужной оболочке, содержащей пигмент, при попадании луча также возникает участок омертвения, замещающийся в дальнейшем рубцом из соединительной ткани. Рубец вызывает сужение зрачка или изменение его формы. Могут образоваться и сращения между радужкой и роговицей или хрусталиком. При попадании луча на склеру поражаются сосуды из-за поглощения лучей гемоглобином. Образуются тромбы или кровоизлияния.

Инфракрасное излучение неодимового лазера в большей степени поглощается прозрачными средами глаза и при многократном воздействии может вызвать катаракту. А длинноволновое излучение углекислотного лазера может привести к ожогу роговицы и конъюнктивы, к обгоранию ресниц.

Учитывая все сказанное выше, следует помнить, что при работах с лазерными установками наиболее важно защищать глаза. Ни при каких условиях не следует смотреть на лазерный луч. Для уменьшения опасности воздействия отраженного света необходимо устранить в соответствующих лабораториях и цехах всякого рода зеркальные, гладкие поверхности. Стены, потолки и приборы должны быть покрашены матовой, поглощающей лазерные лучи краской. Персонал должен пользоваться защитными очками, помня при этом, что каждый тип лазеров отличается особой спектральной характеристикой и требует особых защитных стекол.

Кожа — гораздо менее чувствительный к действию света орган, чем глаз, самой природой созданный для защиты тела от разнообразных вредных воздействий. Однако не все защитные механизмы кожи в полной мере вы-

полняют свое назначение в условиях лазерного облучения. Меланин — универсальный защитный барьер против любого лучистого перегрева — в этом случае играет обратную роль. «Принимая огонь на себя», он резко увеличивает чувствительность клеток кожи к лазерному воздействию. Однако в некоторых случаях и эта особенность пигментных клеток находит себе применение. Так, лазерный луч оказался идеальным средством удаления татуировок: выжигая пигмент, он оставляет в неприкосновенности клетки кожи. А при лечении пигментных опухолей кожи — меланом — и сосудистых опухолей — ангиом — лазерный луч ведет себя, как самый осторожный, бережный хирург, не задевающий ни одной здоровой клетки.

Если кожа белая, незагоревшая, луч лазера может вызвать в ней серьезные изменения, лишь достигнув сосочкового слоя кожи с его сосудами. Луч аргонового лазера особенно хорошо поглощается гемоглобином. Но если увеличивать дозу облучения, то можно, конечно, достичь предела устойчивости даже белой кожи. Он разный при различной продолжительности импульса, фокусировке лучей, спектральном его составе. Но концентрация энергии порядка 30—50 дж/см² уже вызывает ожог первой и второй степени, а с увеличением дозы — третьей и четвертой.

Первыми научились использовать чудесный луч офтальмологи — специалисты по глазным болезням. Отслойка сетчатки — один из самых страшных недугов, обычно заканчивающийся слепотой. Причина отслойки — чаще всего кровоизлияние в расположенной глубже сосудистой оболочке. Сетчатка, лишенная привычной связи с подлежащими слоями и нормального питания, погибает. Последним словом лечения отслоек сетчатки в долазерный период было использование мощных световых вспышек. Сконцентрированная специальным рефлектором вспышка ксеноновой лампы вызывала очаговый ожог сетчатки, как бы «приваривала» ее к глубже лежащим слоям. Серия таких рубцов по периферии отслоившегося участка прекращала кровоизлияние и возвращала сетчатку на место. Но использование ксеноновой лампы вызывало боль и неприятные ощущения в глазу, да и процедура была длинной, зрачок от яркого света сокращался, и после каждого импульса нужно было делать перерыв.

С помощью лазера совершилась революция в лечении отслоек сетчатки. Каждый импульс лазера столь краток,

что ни боли, ни сокращения зрачка не наступает. Лечение стало безболезненным, гораздо более эффективным и быстрым. Лазерный луч успешно применяется и для разрушения небольших пигментных и сосудистых опухолей глаза. Иногда с его помощью прожигают отверстие в радужной оболочке — чтобы заменить зрачок, закрытый рубцом. Пионерами применения лазера в лечении глазных болезней в СССР стали сотрудники Института глазных болезней им. В. П. Филатова в Одессе во главе с членом-корреспондентом АМН СССР Н. А. Пучковской.

Весьма заманчива для хирургов идея «лазерного ножа». Разрезы тканей световым ножом уже не раз производились на подопытных животных. Очень важно, что луч аргонового лазера, чаще всего используемый в этих исследованиях, вызывал мгновенное закрытие просвета разрезанных кровеносных сосудов сгустками свернувшейся крови. Нож, который сам останавливает кровотечение, — это ли не мечта! Детали бескровной хирургии, наиболее удобные конструкции лазерного ножа изучаются доктором медицинских наук Б. М. Хромовым в Ленинграде.

Особенно перспективным кажется использование лазерного ножа для удаления злокачественных опухолей. Пигментные опухоли — меланомы наиболее удобны для таких операций. Но и беспигментные опухоли могут разрушаться под лучом, если в них предварительно ввести краситель — метиленовый синий, янус зеленый, малахитовый зеленый и т. п. Чем интенсивнее и глубже окрашивается опухоль, тем легче и быстрее она разрушается.

В Киевском институте проблем онкологии АН УССР под руководством академика АН УССР Р. Е. Кавецкого создано отделение лазерной терапии опухолей, где уже накоплен немалый опыт клинического применения лазеров в онкологии. Ведутся исследования в этом направлении также в Москве, в Институте онкологии им. А. А. Герцена и в Институте экспериментальной и клинической онкологии. Пока лазер используют для лечения поверхностно расположенных опухолей, в основном кожных. Но медики готовятся к применению лазерного луча при операциях на мозге и печени.

Лазеры найдут применение также и в стоматологии. Лазерный луч может очень быстро и, главное, безболезненно вскрывать полость больного зуба, избавляя больного от неприятной встречи с бормашиной. Лазерный им-

пульс так короток, что ощущение боли просто не успевает развиваться. Особенно удобно пользоваться лазером при лечении кариозных зубов, при удалении пломб и коронок. Наконец, луч может сделать зубы более устойчивыми к кариесу, сплавляя в одно целое элементы зубной эмали. Время внедрения лазеров в стоматологию настало. Уже проведены (и у нас, и за рубежом) эксперименты на зубах животных и удаленных человеческих, разработаны конструкции, обеспечивающие безопасное подведение лазерного излучения в полость рта больного. Лазер, очевидно, станет новым эффективным орудием в руках врача.

Взгляд в будущее

В наше время писателям-фантастам особенно трудно. Наука, техника, производство шагают вперед столь быстрыми темпами, что то, что вчера казалось неосуществимой мечтой, миражем, волнующим воображение, сегодня становится обыденной деталью заводского пейзажа или хирургической операционной. Алексей Толстой не дождался создания гиперболюдов. Мечты современных писателей становятся реальностью несравненно быстрее.

Первый лазер был построен в 1960 г. А сегодня нет отрасли человеческой деятельности, где бы он не нашел применения или не планировался для использования. Завтрашний день лазерной связи — это не только увеличение диапазона частот, но и объемное цветное телевидение и кино (на основе голографии), и гигантские метровые дневные телеэкраны, и использование лазерного луча в качестве звукозаписывающего. Завтрашний день лазерной энергетики — это гигантские термоядерные реакторы с лазерным подогревом плазмы, и передача энергии без проводов, и заоблачные космические электростанции.

Будущее лазерной биологии и медицины — это тончайшие операции на хромосомах и отдельных генах (ведь диаметр лазерного ножа можно довести до десятой доли микрона!), способствующие выведению новых сортов растений, новых пород животных с нужными свойствами. Это управление процессами жизнедеятельности, лечение многих болезней, оздоровление организма путем подбора лазерных лучей нужной длины волны. Но самые яркие, неожиданные возможности использования чудесного луча еще впереди.

На страницах этой книги мы познакомились с природой света, составом и свойствами солнечных лучей, оценили силу и разнообразие их воздействий на живые существа. Не зря солнечный луч называют животворным: Земля стала колыбелью жизни, родным домом человечества в огромной мере благодаря солнечному теплу и свету. Не только зарождение жизни, но и весь длинный и сложный путь ее развития связан с постоянным использованием лучистой энергии Солнца, с воздействием потоков частиц солнечного вещества, магнитных и электрических процессов на Солнце.

С развитием жизни на Земле, с усложнением форм ее организации связь жизни с Солнцем становится все более многообразной. И видимые, и невидимые лучи Солнца участвуют в повседневной жизни земных растений и животных: освещают их и согревают, снабжают недостающими веществами, служат средством познания окружающего мира, увеличивают сопротивляемость живых существ невзгодам, изменяют наследственные свойства организмов, очищают воздух и воду от микробов.

Но есть еще один вид связи между земной жизнью и Солнцем, еще одно направление вмешательства солнечного луча в процессы жизнедеятельности — влияние на ритмику жизненных процессов.

Все реакции обмена веществ, все физиологические функции организмов осуществляются ритмически, волнообразно: периоды деятельного состояния сменяются периодами относительного покоя. В жизненном цикле каждой клетки период ее деятельности, процесс производства определенных ферментов, гормонов, антител и тому подобных веществ сменяется периодом синтеза нуклеиновых кислот, а затем — периодом клеточного деления. Свои физиологические ритмы можно обнаружить в деятельности сердца (сокращения и расслабления сердца складываются в закономерный пульсовый ритм), легких (чере-

дование вдохов и выдохов), желудочно-кишечного тракта (выделение пищеварительных соков совершается через правильные промежутки времени), центральной нервной системы (периоды сна и бодрствования). Одним словом, все жизненные процессы протекают волнообразно. Частота жизненных ритмов разнообразна: от тысячных долей секунды до нескольких десятков и даже сотен лет (ведь жизнь каждого организма — это тоже период в жизни органического вида, одна волна синусоиды). А самые кратковременные, короткопериодические ритмы наблюдаются в течении некоторых обменных реакций, в работе нервных клеток. На любое однократное воздействие извне (например, на удар или вспышку света) чувствительная нервная клетка отвечает залпом нервных импульсов. Величина их одинакова, а количество возрастает с увеличением силы раздражения; продолжительность же каждой волны измеряется тысячными долями секунды.

Согласно глубокой мысли выдающегося отечественного физиолога Ивана Петровича Павлова, волнообразность проявляется во всех тех случаях, когда борются противоположные процессы. Действительно, взаимодействие полярных сил обнаруживается в каждой физиологической функции. В деятельности нервной системы — это процессы возбуждения и торможения. Единство противоположно направленных сил, волнообразные колебания физиологических функций вокруг какой-то средней, нормальной величины — замечательное, единственное в своем роде качество жизни. Оно обеспечивает очень точную и чувствительную регулировку функции организма, ее приспособление к условиям существования, к потребностям живого существа в каждый данный момент. Малейшее изменение соотношения полярных сил проявляется существенным сдвигом функции организма в сторону усиления или ослабления. Контролировать функцию легко: управляющий механизм может вызывать изменения любой степени с помощью минимальных воздействий.

Направление сдвигов жизненных функций, иногда в сторону усиления, иногда в направлении ослабления имеет в сущности одну цель — приспособление к волнообразно и периодически изменяющимся условиям существования. Все живое на Земле существует и подчиняется двум основным ритмам, связанным с вращением Земли вокруг своей оси (смена дня и ночи) и вокруг Солнца (смена

времен года). Суточный и годовой ритмы сопровождаются изменениями длительности и силы солнечного сияния, колебаниями температуры, влажности воздуха, направления и силы ветров и т. п., оказывающими весьма существенное влияние на жизнедеятельность организмов. Поэтому уже для первых, самых просто устроенных живых существ насущной жизненной потребностью было согласование своих внутренних ритмов с внешними, природными ритмами. Индивидуальная жизненная программа строилась так, чтобы периоды активной жизнедеятельности и размножения происходили в благоприятный сезон природных условий. В период, когда условия для жизни малоприспособлены, жизнедеятельность ограничивалась, чтобы снизить опасность для отдельных живых существ.

Чтобы это стало возможным, организмы должны были с самого начала «работать по графику» — подчинять жизненные процессы очень строгому и совершенно точному ритму, совпадающему с ритмом физических процессов на земной поверхности. Осуществить это можно было двумя принципиально различными путями. Либо жизнедеятельность каждого живого существа должна на протяжении всего его существования постоянно контролироваться земным хронометром — сверяться с ритмом геофизических процессов, синхронизироваться с колебаниями какого-то одного существенного физического фактора, например светового, температурного, барометрического. Либо каждый организм вырабатывает собственную систему отсчета времени — внутренние биологические часы, которые нужно лишь периодически сверять с ритмом земного хронометра.

Наука еще не сделала окончательного выбора между этими возможностями. До сих пор не установлено точно, пользуются организмы внутренними или внешними часами. Американский ученый Ф. Браун считает, что магнитное и электрическое поле Земли, изменяясь в течение суток и на протяжении года, играет роль датчика времени для биологических ритмов, обеспечивает отсчет времени организмами. Советский биофизик А. С. Пресман, разделяющий эту точку зрения, подчеркивает, что источником информации о суточном ритме в природе могут служить суточные колебания интенсивности космических лучей, электрического и магнитного поля Земли, радиоизлучения Солнца. Многочисленные опыты показывают, что организмы, помещенные в условия постоянного освеще-

щения, температуры, давления и т. п., — упорно и длительно продолжают сохранять суточную периодичность функций и процессов. По мнению Ф. Брауна, слабые колебания магнитного и электрического полей выполняют роль внешних часов, перенося внутрь организмов, живых клеток информацию о суточной (и годичной) динамике процессов в земной природе.

Однако подавляющее большинство специалистов по биохронометрии придерживаются противоположной точки зрения; они предполагают существование в клетках и живых организмах собственных, внутренних биологических часов. Этот вывод опирается на большой исследовательский материал. Если инфузорию, устрицу, таракана или фасоль поместить в специально созданные условия постоянной температуры, влажности, освещения и длительно исследовать у них ритмику жизненных процессов, выясняется одно любопытное обстоятельство. Ритмичность функций и процессов действительно сохраняется длительно. Но эти ритмы лишь приблизительно совпадают с суточным ритмом в природе. Даже у организмов одного вида, у близких родственников эти ритмы не одинаковы и чаще всего отличаются от 24-часовой периодичности земных суток. В условиях полной темноты у одного из тараканов период колебаний может быть равен 23 часам, у второго — 26 или 28 часам. Эти ритмы получили название околосоточных, или циркадных.

Индивидуальная частота колебаний сохраняется очень стабильно. Можно ли ее нарушить, изменить? Оказывается, можно. Если темноту камеры, где содержатся подопытные «живые хронометры», прорезать на тысячную долю секунды лучом света, произойдет неожиданное. Независимо от того, в какое время суток произошла световая вспышка, «заклученные» принимают ее за точку нового отсчета времени, за начало циркадного цикла. И все живые организмы (тараканы, мухи, растения и т. п.), длительно пребывавшие в темноте и обладающие своими собственными, индивидуальными часами, спешащими или отстающими по сравнению с временем суток, как бы подводят свои часы, устанавливают их заново. Все начинают использовать световую вспышку как точку отсчета времени. Иными словами, свет в этом опыте играет роль синхронизатора жизненных процессов, индивидуальных циркадных ритмов, роль сигнала точного времени для всех

биологических часов. Отсчет от нулевой точки каждый организм ведет, пользуясь индивидуальным циркадным ритмом.

Большинство ученых истолковывают эти данные так. Очевидно, каждый организм имеет свои внутренние, наследственно обусловленные биологические часы, свой личный циркадный ритм, в пределах которого фазы деятельности и покоя, возбуждения и торможения автоматически сменяют друг друга. У каждого организма ритмы различных процессов либо совпадают, либо скоординированы так, что на протяжении периода одного ритма укладывается целое число периодов другого ритма. Иными словами, в каждом живом существе имеется целая иерархия ритмов, подчиняющаяся одному главному (циркадному) ритму. Более частые колебания выглядят при этом как мелкая рябь на поверхности крупных волн. А главный, циркадный ритм все время как бы проверяется, корректируется сигналами из внешней, природной среды, оповещающими о длине земных суток.

Существование биологических часов признается не всеми учеными. Однако ясно, что, если они существуют, точность их хода, их увязка с колебаниями физических условий на Земле, их синхронизация и «заход» осуществляется светом, солнечным лучом. Ни температура, влажность или скорость ветра, а именно свет, переходы от дня к ночи и обратно, ежедневный ритм освещения постоянно закручивает пружину жизни, проверяет точность хода биологических часов.

Ну, а если живые существа своего механизма отсчета времени не имеют? Тогда роль Солнца в регуляции жизненных процессов еще больше. В этом случае Солнце прямо, своим световым излучением, или косвенно, через изменение параметров электрического и магнитного поля Земли, вносит порядок, временную организацию в течение жизненных процессов, выполняет роль уже не синхронизатора, а регулятора биологических процессов.

Окончательное решение вопроса о природе и месте расположения биологических часов — впереди. Но уже сегодня можно дать научное объяснение устройству внутриклеточного механизма отсчета времени. Очевидно, самым первым клеточным ритмом было чередование периодов синтеза, самоудвоения молекул ДНК. Это единственные молекулы, способные к самоудвоению, и повторение цик-

лов их воспроизведения могло служить первичным способом отсчета времени. Роль биологических часов могут играть и другие циклические внутриклеточные процессы, отличающиеся короткой периодичностью. Некоторые ученые придают главное значение энергетическим процессам (зарядке и перезарядке клеточных мембран), физическим колебаниям типа объединения молекул в комплексы и их разъединения, движениям частиц в протоплазме, разнообразным химическим реакциям. Известно, например, что многие внутриклеточные реакции обмена веществ замедляются и приостанавливаются, когда накапливается большое количество конечных продуктов этой реакции. Механизм отрицательной обратной связи обеспечивает волнообразное течение биохимических реакций, ритмичное колебание их активности вокруг средней величины. Такие реакции пригодны для отсчета времени.

Каждая клетка обладает подобного рода биохимическими хронометрами. У одноклеточных и растений этим делом ограничивается. У животных же образуется одна какая-то группа клеток, берущая на себя роль ведущего регулятора ритмов, главных часов организма. У млекопитающих и человека такой «пульт управления» ритмами расположен, по-видимому, в подкорковых центрах мозга: зрительном бугре, подбугровой и сетчатой областях и в гипофизе. Суточная периодичность жизненных функций у животных с удаленными полушариями головного мозга сохраняется полностью. Находящиеся в подбугровой области центры углеводного, жирового, водно-солевого обмена, температуры тела оказывают синхронизирующее влияние на все клетки организма через вегетативную нервную систему и железы внутренней секреции, которыми управляет гипофиз. Чем выше уровень организации, тем точнее работают биологические часы, ближе циркадный ритм к суточному, тем труднее его сдвинуть.

Наряду с циркадным ритмом существуют и более продолжительные жизненные циклы, зависящие от изменения длительности и силы освещения. К их числу относятся лунные, годовые ритмы и приливно-отливные ритмы, присущие многим обитателям прибрежных вод. По-видимому, в этих случаях единый механизм отсчета времени; одинаков и регулятор, и синхронизатор — свет. У растений свет воспринимается листьями, у животных — светочувствительными клетками кожи и сетчатки глаз.

Сезонные колебания освещения, температуры, влажности имеют чрезвычайно важное значение для всех органических видов, так как с ними увязывается цикл размножения организмов. Приспособленность живых существ к земным условиям жизни выражается, в частности, в том, что они выводят потомство, приступают к цветению и плодоношению в строго определенные, наиболее благоприятные для этого периоды. Растения короткого дня зацветают в период, когда длительность светового дня уменьшается, т. е. осенью. Растения длинного дня зацветают весной, на фоне удлиняющегося светлого времени суток. Под влиянием света в молодых зеленых листьях вырабатываются гормоны, способствующие зацветанию.

У животных с увеличением длительности дня тоже усиливается деятельность желез внутренней секреции, особенно половых, что благоприятствует весеннему размножению. Рождение потомства в этом случае приходится на теплое время года, и к наступлению холодов молодой организм успевает обычно «стать на собственные ноги».

Итак, все живое на Земле, все жизненные процессы в теле бактерий и высших растений, инфузорий и человека совершаются ритмично, волнообразно. Каждый живой организм — это система, иерархия взаимодействующих, скоординированных, соподчиненных ритмов, от короткопериодических (исчисляемых долями секунды, минутами, часами) до суточных, лунных, годовых ритмов. Суточный, циркадный ритм, очевидно, основной из них. Синусоида, волнообразная кривая, описывающая эту суточную ритмику, очень проста. Но на каждом витке кривой, на каждом ее изгибе размещается несколько более мелких волн второго порядка. Более внимательный анализ позволяет выявить и волны третьего, четвертого, пятого порядков — все более мелкую рябь на гребнях волн. Непрерывная соподчиненность ритмов прослеживается и в другом направлении, т. е. суточная волнообразность накладывается на более медленные, но отличающиеся большей амплитудой месячные и годовые волны. В системе волн господствует четкая координация ритмов.

Ее нарушение, вероятно, служит причиной или важным механизмом многих болезней. Психические травмы, переутомление, атака микробов или вирусов могут, по данным американского биохронолога К. Рихтера, нарушить синхронность физиологических процессов, привести к бо-

лезни. Некоторые опыты прямо свидетельствуют о серьезной опасности нарушения координации ритмов. В нервных узлах таракана — наиболее частого и удобного подопытного животного биохронологов — выявлена группа клеток, задающих циркадный ритм. У разных особей этот ритм, как мы уже знаем, несколько различен. Если таракану приживить этот «руководящий» нервный узел от другого таракана, в его теле окажется два «пульта управления», работающих к тому же не вполне синхронно. Органы и ткани таракана, получающие противоречивые приказы, постепенно выходят из повиновения. Проявление беспорядка — развитие злокачественных опухолей.

Эти опыты способны убедить скептиков в том, что ритмичная организация жизненных процессов — закономерная система, диктуемая потребностями существования организмов в среде с ритмично изменяющимися свойствами.

Солнечный луч — луч жизни, источник жизненной энергии и информации — выполняет еще и эту ответственную и важнейшую функцию — синхронизирует все бесчисленное множество индивидуальных биологических часов, ежедневно «заводит» их, закручивая до отказа энергетическую пружину жизни. Жизненные ритмы возникли под влиянием периодического воздействия солнечных лучей и связаны с Солнцем с помощью солнечного луча. Он является носителем упорядоченности, источником ритма и координации жизненных процессов, а по мнению некоторых ученых, непосредственно отмеряет время любого физиологического процесса.

Жизнь каждого организма ограничена, имеет довольно жесткие временные параметры. Быть может, поэтому для большинства организмов годичный цикл представляется пределом длительности, наиболее крупным ритмом. Но с точки зрения сроков существования видов и биосферы в целом годичный ритм представляется мелкой рябью, которая накладывается на крупные волны.

Каковы они? О них уже шла речь. Это 11-, 22-, 80-, 180-летние и более длительные циклы солнечной активности, медленно, но весьма значительно изменяющие условия жизни на отдельных участках земной поверхности, географических зонах и целых континентах. Но 180 лет — тоже, видимо, не предел величины солнечных волн. Данные археологии, раскопки и исследования пещерных рисунков в Сахаре обнаружили, что не всегда

эта область была столь бесплодна, что когда-то там колосились высокие травы, паслись огромные стада животных, лились благодатные дожди и текли многоводные реки. Периоды повышенной влажности сменялись засушливыми периодами, а их длительность составляла, по расчетам, около 1600 лет. Но и это еще, видимо, не предел.

Геологическая история Земли по мере ее изучения обнаруживает довольно правильное чередование периодов горообразования, бурной вулканической деятельности, обледенения с периодами отступления ледников, потепления и ослабления геологических процессов. Современная наука допускает зависимость этих периодов от вращения солнечной системы вокруг центра Галактики. Изменение интенсивности гравитационного влияния галактического ядра, возможно, вызывает своеобразную «пульсацию» процессов в недрах Земли, смену периодов ее расширения и сжатия — горообразования, землетрясения, извержения вулканов и т. п. А период обращения Земли вокруг галактического ядра около 200 млн. лет.

От тысячных долей секунды до сотен миллионов лет — таков диапазон периодичности солнечных ритмов, таков размах колебаний, непосредственно влияющих на биосферу. Волны солнечного моря раскачивают лодку жизни, то ускоряя, то замедляя ее ход. И каждый толчок, каждая волна находит отклик в недрах жизни, рожденный силой, энергией, теплом солнечного луча.

Немало его тайн познала сегодняшняя наука. Проникновение в секреты биологических часов наверняка увеличит власть человека над живой природой, над собственным телом. А сколько еще не раскрытых тайн ждет смелых и пытливых! Сколько ярких гипотез, важных идей, неожиданных мыслей возникнет завтра у исследователей свойств солнечного луча. Сколько новых открытий ждет ученых в ближайшем будущем! Но будем справедливы — и того, что мы знаем сейчас, достаточно, чтобы оценить по достоинству и помянуть добрым словом нашего лучшего друга — луч Солнца, луч жизни, этого неутомимого труженика, энергия которого бьется в нашем мозгу, течет по артериям, сила и точность которого постоянно заводят и механизм нашего внутреннего хронометра. В спешке и напряженном ритме жизни не следует забывать, что человек — создание матери-природы, подчиняющееся ее величественным и строгим законам, что мы дети Солнца и солнечного света.

ЛИТЕРАТУРА

- Агаджанян Н. А. Биологические ритмы. М., «Медицина», 1967, 120 с.
- Агаджанян Н. А. Человек, атмосфера и Солнце. М., «Знание», 1968.
- Азимов А. Вид с высоты. М., «Мир», 1965.
- Апариси Р. Р., Гарф Б. А. Использование солнечной энергии. М., Изд-во АН СССР, 1958.
- Андреа де Сильва Ж. Л., Лопеш Ж. Поля, частицы, кванты. М., «Наука», 1972.
- Бернал Дж. Возникновение жизни. М., «Мир», 1969.
- Брегг У. Мир света. Мир звука. М., «Наука», 1967.
- Вавилов С. И. Глаз и Солнце. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Васильев Ф. Химическое свечение. М., «Знание», 1967.
- Владимиров Ю. А. Сверхслабые свечения при биохимических реакциях. М., «Наука», 1966.
- «Возникновение жизни во Вселенной». М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Власов А. Ф. Цвет и безопасность труда. М., «Машиностроение», 1970.
- Галантин Н. Ф. Лучистая энергия и ее гигиеническое значение. Л., «Медицина», 1969.
- Гамалей Н. Ф. Лазеры в эксперименте и клинике. М., «Медицина», 1972.
- Глюк И. И все это делают зеркала. М., «Мир», 1970.
- Грегг Дж. Опыты со зрением. М., «Мир», 1970.
- Гробстайн К. Стратегия жизни. М., «Мир», 1968.
- Гурвич А. Г. Введение в учение о митогенезе. М., Изд-во АМН СССР, 1948.
- Дерибери М. Цвет в деятельности человека. М., Изд-во литературы по строительству, 1964.
- Дубров А. П. Действие УФ радиации на растения. М., Изд-во АН СССР, 1963.
- Зигель Ф. Виногато Солнце. М., «Детская литература», 1972.
- Зоз Н. И., Шафранов Б. В. Свет и цвет на производстве. М., «Медицина», 1970.
- Журавлев А. И., Тростников В. Н. Свечение живых тканей. М., «Наука», 1966.
- Кальвин М. Химическая эволюция. М., «Мир», 1971.
- Крылов И. Н. На заре жизни. М., «Наука», 1972.
- Кэньон Д., Стейнман Г. Биохимическое предопределение. М., «Мир», 1972.
- Левшин В. Л., Левшин Л. В. Люминесценция и ее применение. М., «Наука», 1972.
- Леонов В. В., Шиходыров В. В. Лазеры и клетка. М., «Знание», 1966.
- Мандельберг Е. М. В мире холодного света. М., «Наука», 1968.

- Меркулов А. За пределами зримого. М., «Машиностроение», 1971.
- Миннарт М. Свет и цвет в природе. М., Физматгиз, 1958.
- Овенден М. В. Жизнь во Вселенной. М., «Мир», 1965.
- Опарин А. И. Возникновение жизни на Земле. М., Изд-во АН СССР, 1957.
- Опарин А. И. Жизнь, ее природа, происхождение и развитие. М., Изд-во АН СССР, 1960.
- Парини В. П., Казакова З. С. Палитра химии. М., «Наука», 1964.
- Парфенов А. П. Солнечное голодание человека. Л., Медгиз, 1963.
- Пирс Дж. Электроны, волны и сообщения. М., Физматгиз, 1961.
- Пресман А. С. Электромагнитные поля в биосфере. М., «Знание», 1971.
- Рабкин Е. Б., Соколова Е. Г. Цвет вокруг нас. М., «Знание», 1964.
- Рыжков В. Л. Структура жизни. М., «Знание», 1972.
- Салливан У. Мы не одни. М., «Мир», 1967.
- Себрант Ю. В., Троянский М. П. Лазеры и живая ткань. М., «Знание», 1972.
- Северный А. Б. Физика Солнца. М., Изд-во АН СССР, 1956.
- Слюсарев Г. Г. О возможном и невозможном в оптике. М., Физматгиз, 1960.
- Смит К., Хэнеуолт Ф. Молекулярная фотобиология. М., «Мир», 1972.
- Тарусов Б. Н. Сверхслабое свечение живых организмов. М., «Знание», 1972.
- Тарусов Б. Н., Иванов И. И., Петрусевич Ю. М. Сверхслабое свечение биологических систем. М., Изд-во МГУ, 1967.
- Теренин А. Н. Фотоника молекул красителей. Л., «Наука», 1967.
- Толанский С. Удивительные свойства света. М., «Мир», 1969.
- Толанский С. Революция в оптике. М., «Мир», 1971.
- Устинов Д. А. Свет молекул. М., «Колос», 1966.
- Файн С., Клейн Э. Биологическое действие излучения лазера. М., Атомиздат, 1968.
- Фирсов В. Жизнь вне Земли. М., «Мир», 1966.
- Хильми Г. Ф. Основы физики биосферы. М., Гидрометеоиздат, 1966.
- Чижевский А. Л. Солнце и мы. М., «Знание», 1963.
- Чижевский А. Л., Шишина Ю. Г. В ритме Солнца. М., «Наука», 1969.
- Чубинский С. М. Лучи Солнца и действие их на организм человека. М., Медгиз, 1959.
- Чубинский С. М. Биоклиматология. М., «Медицина», 1965.
- Шаронов В. В. Свет и цвет. М., Физматгиз, 1961.
- Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М., Изд-во АН СССР, 1962.
- Щербиновский Н. С. Сезонные явления в природе. М., «Колос», 1966.
- Эмме А. М. Биологические часы. Новосибирск, «Наука», 1967.

Введение	3
Глава I. Солнце и жизнь на Земле	7
Глава II. Видимый свет	71
Глава III. Ультрафиолетовые лучи	133
Глава IV. Инфракрасные лучи	174
Глава V. Антагонизм излучений	193
Глава VI. Лазерный луч	204
Вместо заключения	230
Литература	239

Вилен Абрамович Барабой

СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ

Утверждено к печати редколлегией серии научно-популярных изданий Академии наук СССР

Редактор издательства В. Н. Вяземцева

Художник В. К. Бисенгалиев

Художественный редактор В. Н. Тихонов

Технический редактор Н. И. Плехова

Корректор В. А. Шварцер

Сдано в набор 16/IV 1976 г. Подписано к печати 24/IX 1976 г.

Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 1. Усл. печ. л. 12,8

Уч.-изд. л. 13,4. Тираж 70 000. Т-16041. Тип. зак. 562

Цена 47 коп.

Издательство «Наука»

103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21

2-я типография издательства «Наука»

121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10