

**МР
И**
знаний

В. Л. БУЛАТ

Оптические явления в природе



М И Р З Н А Н И Й

В. Л. БУЛАТ

Оптические явления в природе

МОСКВА «ПРОСВЕЩЕНИЕ» 1974

535
Б90

Булат В. Л.
Б90 Оптические явления в природе.
М., «Просвещение» 1974.
143 с. с ил. («Мир знаний»)

Книга в популярной форме знакомит учащихся с наиболее интересными оптическими явлениями в природе: радугой, гало, полярными сияниями и др.

Б $\frac{60601-667}{103(03)-74}$ 198—74

535

© Издательство «Просвещение», 1974 г.

ОТ АВТОРА

Все вы изучаете физику в школе, читаете интересные книги по физике. Однако не всегда обращаете внимание на те физические явления, которые происходят вокруг нас в окружающей природе. А между тем лаборатория природы очень обширна и разнообразна, а явления, происходящие в ней, интересны, сложны и загадочны.

Эта книга предназначена для учащихся средней школы, интересующихся физикой и желающих узнать тайны наиболее интересных оптических явлений в природе: радуги, оптических дорожек, гало, полярных сияний и других.

Оптические явления, рассматриваемые в книге, объяснены с научной точки зрения. Книга учит наблюдать, в ней рекомендованы и описаны опыты, которые могут провести сами учащиеся.

Автор приносит сердечную благодарность рецензентам рукописи профессорам Р. В. Куницкому, В. Г. Семёнову, Б. И. Спасскому и В. П. Орехову и кандидату физ.-мат. наук И. И. Нурминскому, сделавшим замечания, которые содействовали улучшению книги.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время можно указать три основные источника энергии на Земле: излучение Солнца, внутренняя теплота Земли (геотермальная энергия) и внутриядерная энергия.

Вряд ли есть более важное явление в природе, чем излучение Солнца. Термоядерные процессы, происходящие внутри Солнца, раскаляют его поверхность примерно до 6000°K . Солнце — главный источник энергии, которой пользуется человек на Земле. Оно и светит нам и греет нас. Это его лучи вызывают круговорот воды и воздуха в природе... Грозные ураганы и нежное дуновение «зефира», зной Сахары и стужа Верхоянска, сияние дня и мрак ночи связаны с излучением Солнца.

Это его энергия, конденсированная в угле и нефти, согревает нас зимой, вращает колеса машин, плавит металл, варит пищу, светит за письменным столом и возит нас в автомобилях и самолетах.

Это оно освещает листья растений, приводя в действие зерна хлорофила, творящие органическую массу растений, которая в свою очередь служит пищей животным и человеку.

Огромную роль в жизни человека играет огонь — теплота и свет, излучаемые им. Природа излучения Солнца и огня одинаковы. Это температурное излучение. В чем же оно состоит? Что такое свет? Вопрос, что такое свет, волновал человечество с древних времен.

Мнения ученых разделились: одни считали, что свет — это поток частиц, корпускул, другие — что это волновой процесс. Творцом и защитником корпускулярной теории принято считать Исаака Ньютона (1642—1727). Однако уже Ньютону были известны явления дифракции, интерференции и поляризации света, которые нельзя объяснить иначе как с волновой точки зрения. Одно из этих явлений — кольца Ньютона — было открыто им самим. Ньютон пытался примирить волновую и корпускулярную точки зрения.

Основателем волновой теории света является голландский ученый Христиан Гюйгенс (1629—1695). Он считал, что свет — это механические волны, распространяющиеся в некоей особой предполагаемой среде, обладающей малой плотностью и большой упругостью, названной мировым эфиром.

Известный русский ученый М. В. Ломоносов (1711—1765) был последователем волновой теории света. В конце XVIII и начале XIX в., после того как в результате работ Т. Юнга (1773—1829), О. Френеля (1788—1827) и других на основе волновой теории были объяснены все известные в то время оптические явления — интерференция, дифракция и поляризация света, была измерена длина волны света, восторжествовала волновая теория, а корпускулярная была забыта почти на столетие.

Во второй половине XIX в., после того как были открыты электромагнитные волны, стало ясно, что свет, если он и имеет волновую природу, то это волны не механические, а электромагнитные. Свет распространяется с той же скоростью, что и электромагнитные волны, преломляется, отражается, так же как и электромагнитные волны...

Не успела развиться электромагнитная теория света, как она встретила с рядом непреодолимых трудностей.

На рубеже XX в. (в 1900 г.) Макс Планк (1858—1947), анализируя явление излучения абсолютно черного тела, пришел к квантовой теории света, согласно которой свет излучается, распространяется и поглощается частицами (фотонами), обладающими квантами (порциями) энергии

$$\varepsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda},$$

(где $h = 6,7 \cdot 10^{-34}$ дж \cdot сек — постоянная Планка, а ν — частота световой волны, имеющей длину λ ; c — скорость света).

На основе квантовой теории было объяснено много непонятных до того явлений, в частности явление фотоэффекта, открытое в 1888 г. А. Г. Столетовым (1839—1896), излучение света и др.

Так что же такое свет?

В некоторых явлениях он ведет себя как волны, в других как частицы.

Уже в самом уравнении

$$\epsilon = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

видна двойственность его природы. В этом уравнении отдельные, обособленные порции энергии связаны с некоторым волновым процессом, характеризуемым длиной волны и частотой.

В 1924 г. стало известно, что не только свет, но частицы (электроны, протоны, молекулы и т. п.) обладают волновыми свойствами.

С этого же времени стали считать, что свет тоже обладает двойственной корпускулярно-волновой природой. Он одновременно и частица и волна. В одних условиях на первый план выступают волновые, в других—корпускулярные свойства света.

В тридцатых годах двадцатого столетия зародилась, а затем стала развиваться новая наука — квантовая механика, соединившая математически воедино противоречивые свойства волн и частиц. Квантовая механика является основой не только современной теории света, но и элементарных частиц и целого ряда других явлений¹.

Электромагнитная волна, сопровождающая фотон, представляет собой процесс распространения периодических изменений (колебаний) векторов напряженности электрического и магнитного полей. Эти векторы в электромагнитной волне перпендикулярны друг другу и направлению распространения и колеблются без сдвига фаз. Таким образом, световая волна является волной поперечной.

¹ Советуем прочитать статью академика И. В. Обренова в книге У. Брэгга «Мир света. Мир звука». М., 1967.

Ниже приведена полная шкала электромагнитных волн, обладающих различными физическими свойствами.

Название волн	Степень метра	Длина волны
радио-волны { длинные средние короткие УКВ (ультракороткие)	10^3 10^1 10^{-1} 10^{-3}	до 10^3 м 10^3 м до 10 м 10 м до 10 см 10 см до 1 мм
Инфракрасные лучи	10^{-5}	1 мм до 760 нм ($760 \cdot 10^{-9}$ м)
Видимый свет	10^{-5}	760 нм до 400 нм
Ультрафиолетовые лучи	10^{-8}	400 нм до 10 нм
Рентгеновские лучи	10^{-10}	100 нм до 0,1 нм
γ -лучи	10^{-13}	0,1 нм до 10^{-3} нм
Космические лучи	10^{-15}	10^{-13} и менее

В некоторых случаях для выяснения явлений не важна природа света, достаточно знать его основные свойства, полученные из опыта: прямолинейность распространения в однородной среде, законы отражения и преломления. Отдел оптики, занимающийся изучением законов распространения света в средах и явлениями, происходящими на границе сред, называют лучевой или геометрической оптикой. Геометрическая оптика рассматривает световой поток как совокупность отдельных независимых световых лучей, каждый из которых подчиняется законам отражения и преломления.

В предлагаемой книге в первых пяти главах рассматриваются явления, для объяснения которых достаточно знать законы геометрической оптики. Затем идут главы, требующие знания законов волновой оптики, и, наконец главы, в которых используется квантовая оптика.

СВЕТ И ТЕНЬ

Очень часто мы замечаем, что если на пути лучей света оказывается какой-то непрозрачный предмет, то за ним образуется тень (рис. 1, а). Это одно из многочисленных наблюдений, показывающих, что в однородной среде свет распространяется прямолинейно.

Поэтому при всевозможных геометрических, геодезических, астрономических и физических измерениях и построениях луч света в однородной среде принимают за прямую линию.

Если источник света не точечный, а протяженный, то наряду с полной тенью образуется полутень (рис. 1, б). Происхождение ее понятно из рисунка.

Однако даже в случае точечного источника света при внимательном рассмотрении границы тени можно заметить, что она несколько размыта: вблизи нее видны светлые и темные полосы. Это явление объясняется дифракцией света, о чем подробнее будет рассказано ниже.

ИЗОБРАЖЕНИЕ СОЛНЦА

О Солнце!.. Там, где тень
От лип густа и ароматна,
Кидаешь ты такие пятна,
Что жалко мне ступать по ним!

(Э. Ростан)

В тени деревьев видны беспорядочно расположенные на земле светлые пятна различной величины, но одинаковой эллиптической формы. Их образуют солнечные

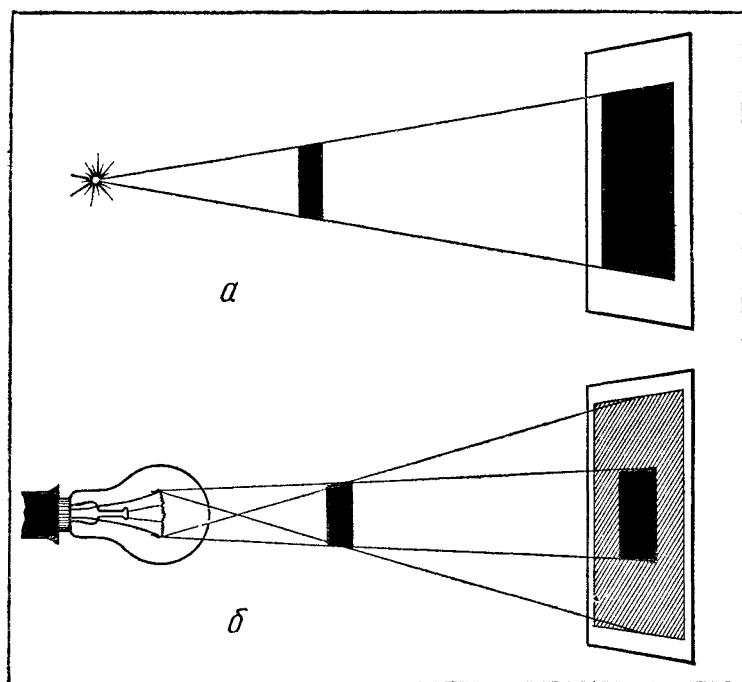


Рис. 1. Тень (а) и полутень (б).

лучи, проникающие через просветы в листьях деревьев (рис. 2). Эти светлые пятна и есть изображение Солнца.

Как же объяснить эллиптическую форму изображения Солнца?

Направим луч света на лист бумаги, располагая его перпендикулярно к падающему лучу; мы увидим круглое пятно. Поднимем лист выше — пятно становится меньше. Отсюда следует, что пучок лучей, образующих такое пятно, имеет форму конуса. Наклоним лист бумаги — пятно принимает форму эллипса.

Но почему же на земле получается изображение Солнца, а не отверстия?

Рассмотрим рисунок 3. На нем показаны ширма с маленьким отверстием CD , предмет AB и его изображение A_1B_1 на экране. Мы видим, что лучи, выходящие из какой-либо точки предмета (например, A) и проходящие

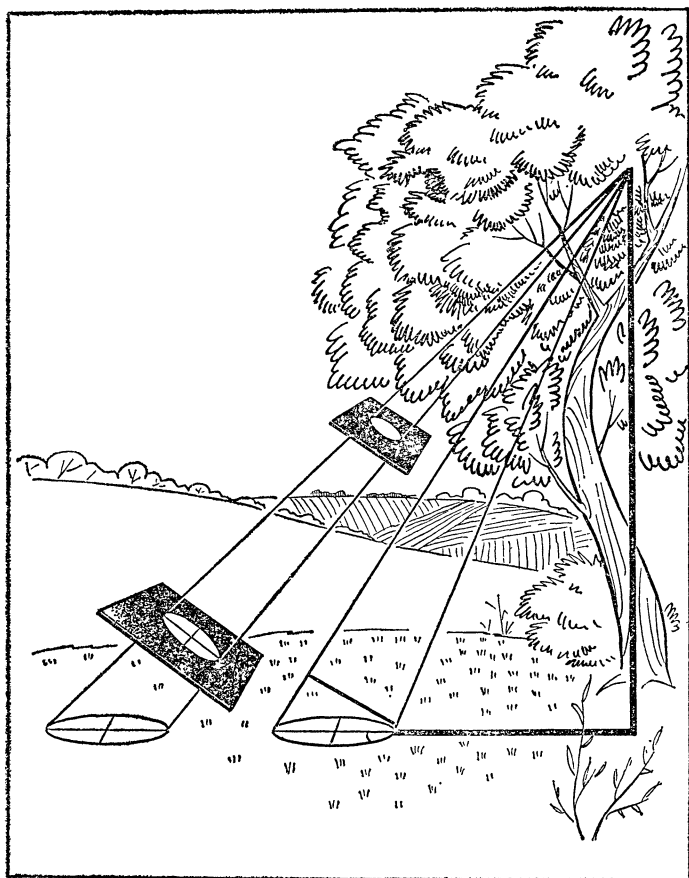


Рис. 2. В тени деревьев видны изображения солнца в виде эллипсов.

через отверстие C , дают на экране изображение этой точки в виде пятна (A_1), размеры которого тем меньше, чем меньше отверстие и чем дальше точка (A) от него. Такие пятна получаются от всех точек предмета. Они дают изображение предмета AB , которое тем менее размыто по краям, чем меньше отверстие и дальше предмет. Форма изображения при этом очень мало зависит от формы отверстия C . Если же источник света находится близко

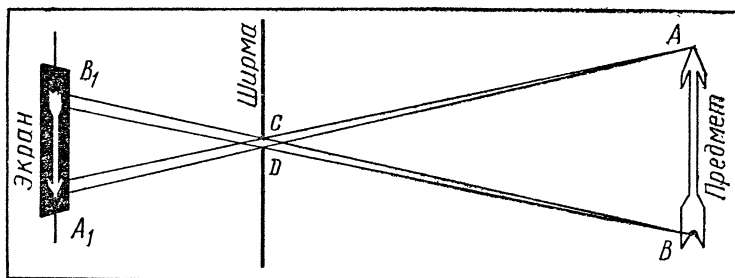


Рис. 3. Получение уменьшенного изображения предмета.

от отверстия, на экране получается светлое очертание отверстия, тем более отчетливое, чем меньше размеры источника света.

В темной комнате или в темном ящике (камера обскура), в одной из стенок которых (в ставне окна) проделано малое отверстие, можно отчетливо видеть не только Солнце, но и освещенные Солнцем ландшафты с движущимися в них предметами (рис. 4). Для получения четких изображений необходимо только подобрать величину отверстия.

Получение изображений в темной камере, видимо, было известно уже давно. Польский писатель Б. Прус в своем произведении «Фараон», написанном на основании изучения большого количества древнеегипетских

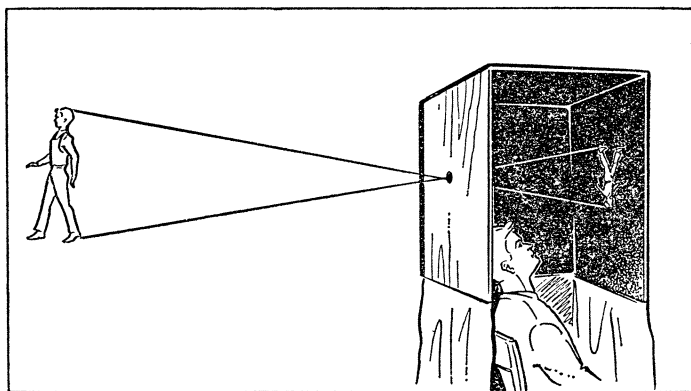


Рис. 4. Получение уменьшенного изображения освещенного предмета в темной камере.

документов, рассказывает о том, как жрецы в темной палатке показывали фараону картину битвы, происходящей на освещенном солнцем плато. Повелитель египтян и не подозревал, что все виденное им не божественное знамение, а очень простое физическое явление.

ТЕНЬ

Наряду со светлыми пятнами в тени полезно пронаблюдать форму тени от различных предметов в лучах Солнца, Луны и других источников света.

Обратите внимание на вашу собственную тень на земле. Тень ног резко очерчена, тень головы расплывчата.

Поместите руку близко перед листом бумаги, вы увидите отчетливую тень. Отодвиньте руку от бумаги. Полная тень каждого пальца становится все уже, в то время как полутени увеличиваются, пока не сольются друг с другом. Все это происходит потому, что Солнце и другие источники света не являются точечными источниками.

Посмотрите на тень бабочки. Она круглая. Это теневое изображение Солнца. Объясняет это явление рисунок 3.

Возьмите лист бумаги и поместите его горизонтально так, чтобы на нем образовалась тень от вертикальной проволочной сетки (например, от проволочного забора). Удаляйте бумагу от сетки. На некотором расстоянии вы увидите, что тени горизонтальных проволок исчезли, в то время как вертикальные тени остались.

Как же объяснить это явление?

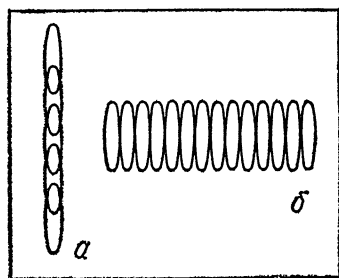


Рис. 5. Тени от проволоки в наклонно падающих лучах Солнца:

а) четкая; б) нечеткая тень.

Представим себе проволоку разделенной на большое количество участков. Каждый участок в лучах, падающих наклонно, дает на экране тень в виде эллипса. Вертикальная проволока дает эллипсы, расположенные так, как показано на рисунке 5, а. Они перекрывают друг друга и дают сплошную линию. Эллипсы же, образованные участками горизонтальной проволочки, располага-

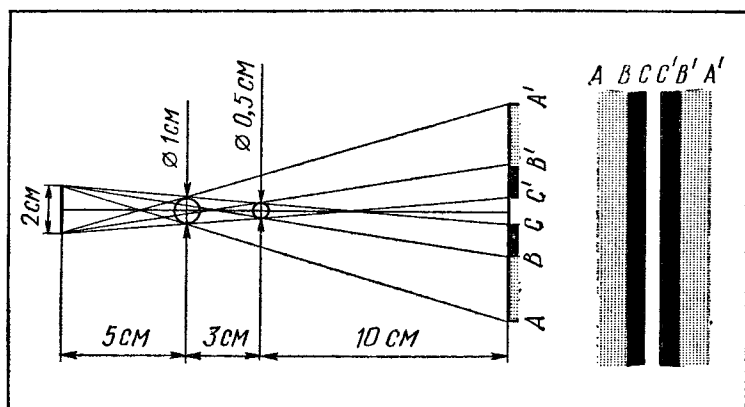


Рис. 6. Возникновение двойных теней.

ются так, как показано на рисунке 5, б, они расплываются.

Поздней осенью, когда деревья уже сбросили свою листву, можно часто видеть тени от двух параллельных ветвей наложенными одна на другую. Ветвь, расположенная ближе к нам, дает четкую тень, дальняя — более широкую, расплывчатую (полутень). Удивляет здесь то, что при наложении этих теней посредине более темной из них мы видим светлую полосу, так что тень выглядит двойной. Причиной является наложение полутеней. Для объяснения этого явления начертим сечения двух ветвей (рис. 6): одной — диаметром 1 см, другой — 0,5 см, расположив их центры на расстоянии 3 см друг от друга. На расстоянии 5 см от центра сечения толстой ветви расположим изображение протяженного источника света шириной 2 см и проведем от краев источника света прямые (лучи). На экране, отстоящем от центра тонкой ветви на расстоянии 10 см, обнаружим области полной тени (BC, B'C'), полутени (AB, A'B') и отсутствия ее (CC').

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОТРАЖЕНИЕМ СВЕТА

ПРЕДМЕТ И ЕГО ОТРАЖЕНИЕ

Некоторые считают, что отраженный в стоячей воде пейзаж не отличается от реального, а только повернут «вверх ногами». Это далеко не так.

Посмотрите поздним вечером, как отражаются в воде уличные светильники. Обратите внимание на отражение берега, спускающегося к воде. Оно кажется нам укороченным и совсем «исчезает», если мы находимся высоко над поверхностью воды. Вы никогда не сможете увидеть отражение верхушки камня, часть которого погружена в воду.

И это не удивительно. Мы видим пейзаж таким, как если бы смотрели на него из точки, находящейся на столько глубже поверхности воды, на сколько наш глаз находится выше ее поверхности. Разница между пейзажем и его изображением уменьшается по мере приближения глаза к поверхности воды, а также по мере удаления объекта.

Убедиться в этом можно с помощью чертежа.

Часто нам кажется, что отражение в пруду кустов и деревьев отличается большей яркостью красок и насыщенностью тонов. Наблюдая отражение предметов в зеркале, мы также замечаем эту его особенность. В чем же здесь дело? Видимо, здесь большую роль играет психология восприятия, чем физическая сторона явления. Рама зеркала, берега пруда ограничивают небольшой участок пейзажа, ограждая наше боковое зрение от избыточного рассеянного света, поступающего со всего неба и ослепляющего нас. Мы смотрим на небольшой участок пейзажа как бы через темную узкую трубу. Кроме этого, уменьшение яркости отраженного света по сравнению с прямым облегчает нам наблюдение неба, облаков и ярко освещенных предметов, которые при прямом наблюдении оказываются слишком яркими для глаза.

«ЗАЙЧИК»

Кто из нас не играл «зайчиком» отраженного от зеркала солнечного света. Расстояние, с которого видно это маленькое пятно света, удивительно велико. Утверждают, что зеркало размером 5×5 см можно видеть за 15—30 км.

Такое зеркало¹ может быть использовано для геодезических целей и сигнализации. Закрывая и открывая

¹ Прибор, в котором используется отраженный зеркалом луч солнечного света, называют гелиостатом.

источник света или отраженный луч, можно передать сигналы азбукой Морзе.

Но луч, отраженный от объектива бинокля, в военных условиях может сыграть предательскую роль, открыв противнику место расположения наблюдателя. Поэтому запрещают вести наблюдения незащищенным оптическим прибором. В качестве защиты используют черные картонные или металлические трубки длиной 15—20 см, надеваемые на объектив прибора.

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ УГЛА ПАДЕНИЯ СВЕТА

На границе двух прозрачных сред свет частично отражается, частично проходит в другую среду и преломляется, частично поглощается средой. Отношение отраженной энергии к падающей называют коэффициентом отра-

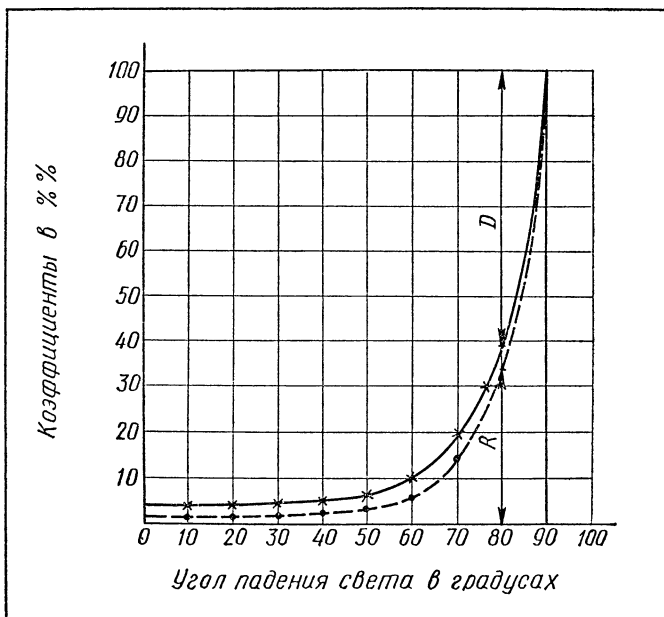


Рис. 7. Кривые зависимостей коэффициентов отражения R и пропускания D для границ воздух — стекло (сплошная кривая) и воздух — вода (штриховая кривая).

Т а б л и ц а

Граничащие среды	Угол падения	0°	10°	20°	
Воздух — стекло	Коэффициент отражения, %	4,7	4,7	4,7	
	Коэффициент пропускания, %	95,3	95,3	95,3	
Воздух — вода	Коэффициент отражения, %	2,0	2,0	2,1	
	Коэффициент пропускания, %	98,0	98,0	97,9	

жения. Отношение энергии света, прошедшего через вещество, к энергии падающего света называют коэффициентом пропускания.

Коэффициенты отражения и пропускания зависят от оптических свойств граничащих между собой сред и от угла падения света. Так, если свет падает на стеклянную пластинку перпендикулярно (угол падения $\alpha = 0$), то отражается всего лишь 5% световой энергии, а 95% проходит через границу раздела. При увеличении угла падения доля отраженной энергии возрастает. При угле падения $\alpha = 90^\circ$ она равна единице.

На странице 16 приведена таблица зависимости коэффициентов отражения и пропускания от угла падения света для границ воздух—стекло и воздух—вода, а на рисунке 7 показаны кривые этой зависимости: сплошной линией для границы воздух — стекло, штриховой для границы воздух — вода, причем нижний отрезок ординаты до пересечения с кривой изображает R , а верхний — D .

Зависимость интенсивности отраженного и проходящего через стеклянную пластинку света можно проследить, располагая пластинку под различными углами к световым лучам и оценивая интенсивность на глаз.

Интересно также оценить на глаз интенсивность света, отраженного от поверхности водоема, в зависимости

30°	40°	50°	60°	70°	80°	89°	90°
4,9	5,3	6,6	9,8	18	39	91	100
95,1	94,7	93,4	90,2	82	61	9	0
2,2	2,5	3,4	6,0	13,5	34,5	90	100
97,8	97,5	96,6	94,0	86,5	65,5	10,0	0

от угла его падения, пронаблюдать отражение солнечных лучей от окон дома при различных углах падения днем, при закате, восходе светила. Тогда легко можно ответить на вопрос: «Почему мы видим свет, отраженный от окон дома, только при низком положении Солнца?»

ЗАЩИТНЫЕ СТЕКЛА

Обычные оконные стекла частично пропускают тепловые лучи. Это хорошо для использования их в северных районах, а также для парников. На юге же помещения настолько перегреваются, что работать в них тяжело. Защита от Солнца сводится либо к затемнению здания деревьями, либо к выбору благоприятной ориентации здания при постройке. И то и другое иногда бывает затруднительным и не всегда выполнимым.

Для того чтобы стекло не пропускало тепловые лучи, его покрывают тонкими прозрачными пленками окислов металлов. Так, оловянно-сурьмяная пленка не пропускает более половины тепловых лучей, а покрытия, содержащие окись железа, полностью отражают ультрафиолетовые лучи и 35—55% тепловых.

Растворы пленкообразующих солей наносят из пульверизатора на горячую поверхность стекла во время его

тепловой обработки или формования. При высокой температуре соли переходят в окиси, крепко связанные с поверхностью стекла.

Подобным же образом изготавливают стекла для светозащитных очков.

СВЕТОВЫЕ ДОРОЖКИ НА ВОДЕ

Выйдите вечером на берег широкой реки, озера или моря. Вдали светят электрические фонари. Луна стоит не очень высоко над горизонтом и заливает окрестность серебристым светом. Посмотрите на поверхность воды, слегка взволнованную легким ветерком, дующим к берегу. Вода темная, а от источников света, расположенных вдали, в том числе от Луны, к вашим ногам простираются световые дорожки (рис. 8), слегка дрожащие на волнах. Свежий воздух, тишина, темный вечер и эта прекрасная игра света и тени располагают к мечтам и поэзии. Много поэтических произведений и картин посвящено таким вечерам. Посмотрите картину Куинджи «Украинская ночь» или произведения Левитана.

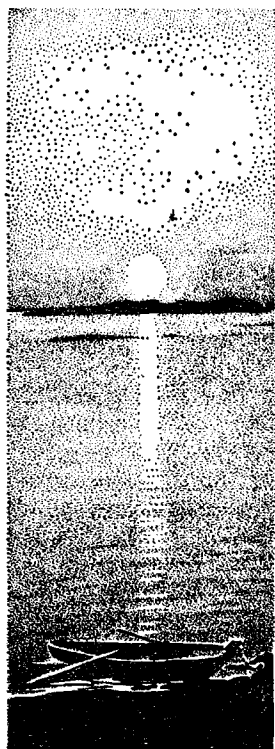


Рис. 8. Световая дорожка на воде.

Нетрудно догадаться, что световые дорожки являются следствием отражения света от поверхности воды, взволнованной ветром. Но почему свет виден в одном направлении, именно вдоль линии пересечения поверхности воды с вертикальной плоскостью, проходящей через наш глаз и источник света, в то время как вся поверхность воды покрыта волнами, отражающие поверхности которых ориентированы беспорядочно, и, казалось бы, вся поверхность воды должна отражать свет и светиться?

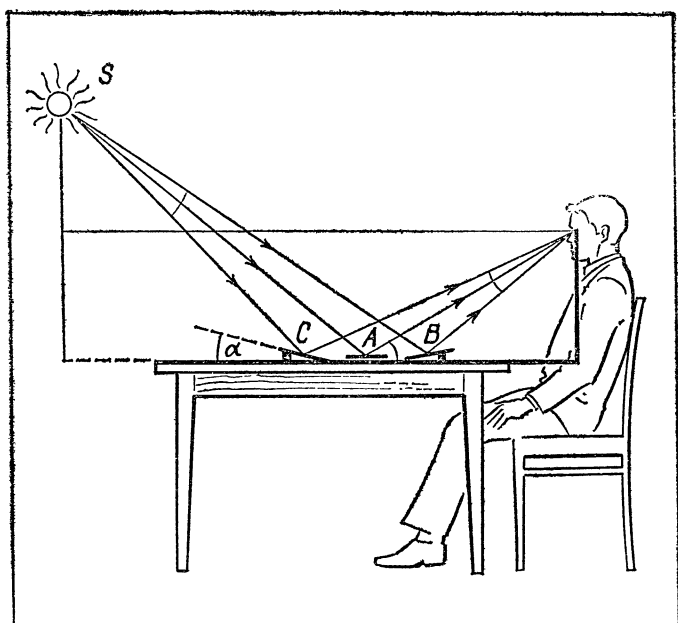


Рис. 9. Опыт, объясняющий образование световых дорожек.

Для изучения этого вопроса проведем опыт.

Положим на стол между лампой и нашими глазами небольшое зеркальце, которое должно имитировать отражающую поверхность волны (рис. 9).

Когда зеркальце расположено горизонтально, отраженный от него луч света попадает в глаз наблюдателя. Придадим зеркальцу небольшой наклон, что соответствует наклону поверхности воды на волне. Отраженный свет теперь уже в глаз не попадет. Для того чтобы его направить в глаз, необходимо переместить зеркальце по поверхности в точку, зависящую от направления наклона. Будем изменять наклон зеркальца к поверхности стола (что соответствует разнообразному наклону волн) и искать то место на столе, из которого зеркальце при данном наклоне посылает отраженный луч в глаз. После многократных опытов мы обнаружим на столе область, находясь в которой, зеркальце может послать отраженный свет в глаз при каком-либо наклоне. Эта область представ-

ляет собой эллипс, большая ось которого находится в плоскости, соединяющей глаз и источник света, и перпендикулярна поверхности стола. Чем меньше угол наклона зеркальца к поверхности стола, тем меньше эллипс, с которого отраженный луч попадает в глаз при какой-либо ориентировке зеркальца. Если угол наклона равен нулю, то эллипс превращается в точку. Этот опыт показывает, что в естественных условиях мы видим только те лучи, которые отражаются от волн, расположенных в узком эллипсе. При сильном ветре ширина его возрастает, а очертания становятся менее определенными.

Наблюдая явление, можно заметить, что ширина и длина эллипса зависят также от высоты источника света и глаза наблюдателя (или объектива фотоаппарата) над горизонтом, а также от направления ветра.

Расчеты и наблюдения подтверждают опыты с зеркальцем. Они показывают, что разнообразно ориентированные отражающие поверхности направляют в приемник света (глаз или объектив фотоаппарата) отраженные лучи только из тех точек, которые лежат в узкой полосе вокруг линии пересечения отражающей поверхности и вертикальной плоскости, проходящей через точку наблюдения и источник света. Форма этой полосы зависит от взаимного расположения наблюдателя и источника.

Если источник света находится над головой наблюдателя, то дорожка превращается в широкое пятно (рис. 10).

Световые дорожки можно наблюдать не только на поверхности воды, они видны на поверхности свежевыпавшего снега, особенно если он выпал в тихую погоду при легком морозе, когда сохраняются целыми снежинки. В этом случае свет отражается от поверхности разнообразно ориентированных снежинок, и в солнечный день или лунную ночь дорожка ярко выделяется на поверхности снежной равнины.

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА

СВЕТ В СТРУЕ ВОДЫ

Красивое зрелище представляет вечером фонтан, у которого выбрасываемые струи освещаются изнутри. Как этого добиваются? Какое физическое явление при этом используют?



Рис. 10. Другая форма световой дорожки.

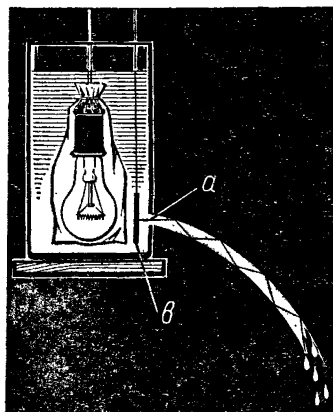


Рис. 11. Полное внутреннее отражение света в струе воды.

Проделайте опыт. Возьмите высокую консервную банку (рис. 11), на высоте 5 см от дна просверлите круглое отверстие (а) диаметром 5—6 мм. Края отверстия тщательно обработайте. Электрическую лампочку вместе с патроном аккуратно оберните целлофановой бумагой (так, чтобы вода не проникла в патрон и не вызвала короткого замыкания) и расположите ее напротив отверстия. В банку налейте воды. Открыв отверстие а, вы получите струю, освещенную изнутри. В темной комнате она ярко светится, и опыт выглядит очень эффектно. Струе можно придать любую окраску, поместив на пути лучей света цветное стекло б. Если на пути струи поставить палец, то она разбрызгивается и брызги ярко светятся. Можно использовать другие конструкции. Например, в банке сделать два отверстия — одно напротив другого. Заднее закрыть прозрачной пленкой и за ним поместить лампу.

Объяснить это явление довольно просто. Луч света проходит вдоль струи воды и попадает на изогнутую ее поверхность изнутри под углом, большим предельного, испытывает полное внутреннее отражение, а затем попадает на противоположную сторону струи опять под углом, большим предельного (рис. 11). Так луч проходит вдоль струи, изгибаясь вместе с ней.

Но если бы свет полностью отражался внутри струи, она не была бы видна извне. Часть света рассеивается

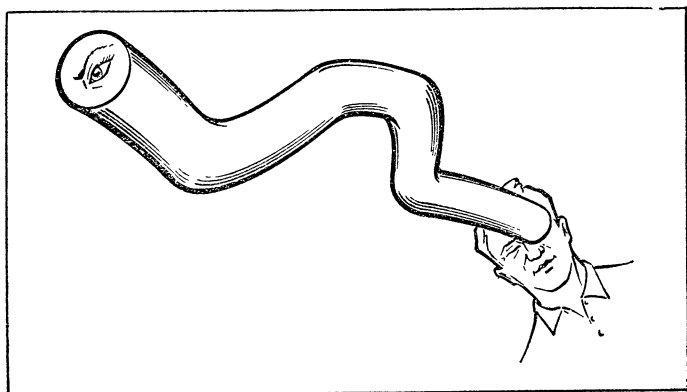


Рис. 12. Сквозь извилистый световод виден глаз человека.

водой, пузырьками воздуха и различными примесями, имеющимися в ней, а также вследствие неровностей поверхности струи, поэтому она видна снаружи.

СВЕТОВОДЫ

Можно ли «загнать» свет в изогнутую трубу и заставить луч изгибаться вместе с трубой?

Посмотрите на рисунок 12. Человек смотрит в световод с одного конца, а в другом его торце отчетливо виден его глаз.

Световод состоит из множества пластмассовых или стеклянных волокон, в которых также, как и в струе воды происходит многократное внутреннее отражение света от стенок с выходом в торец.

В настоящее время световоды широко используют в медицине. Вместе с миниатюрной подсвечивающей лампочкой световод вводят во внутренние полости органов (сердца, желудка, кишечника и т. п.), и он позволяет осмотреть стенки этих органов.

АЛМАЗЫ И САМОЦВЕТЫ

К 50-летию Великого Октября в Кремле была открыта выставка алмазного фонда СССР.

Входим в зал. Свет слегка приглушен. В витринах сверкают и переливаются изумительные творения юве-

лиров. Эти изделия пленяют изяществом рисунка, неповторимой гармонией цветовых сочетаний, глубоким проникновением в красоту камня. Они заставляют нас преклоняться перед гением человека, вложившего в них свой художественный вкус, талант, сумевшего так вдохновенно воплотить в камне мечту о прекрасном.

Вот чудо природы — алмаз «Орлов» (см. цветную вклейку I).

С именем великого русского писателя связано появление в России другого алмаза — уника «Шах». После того, как в 1829 г. религиозные фанатики убили в Тегеране русского посла Александра Сергеевича Грибоедова, алмаз «во искупление вины» был подарен Николаю I персидским шахом.

Сверкает солнечными искрами алмаз «Мария» — самый крупный советский кристалл, названный именем Марии Марковны Коненкиной, которая нашла его в Якутии. Здесь же алмаз «Валентина Терешкова».

В чем же секрет прелестной игры света в алмазах и других драгоценных камнях?

Алмаз имеет высокий показатель преломления ($n = 2,4173$) и вследствие этого малый предельный угол полного внутреннего отражения ($\alpha_{\text{пред}} = 24^\circ 30'$, в то время как у стекла $\alpha_{\text{пред}} = 30 - 40^\circ$) и обладает большой дисперсией, вызывающей разложение белого света на простые цвета.

Кроме того, игра света в алмазе зависит от правильности его огранки (рис. 13).

Как видно из рисунков, грани алмаза многократно отражают свет внутри кристалла. Вследствие большой прозрачности алмазов высокого класса свет внутри них почти не теряет своей энергии, а только разлагается на простые цвета, лучи которых затем вырываются наружу в различных, самых неожиданных направлениях. При повороте камня меняются цвета, исходящие из камня,

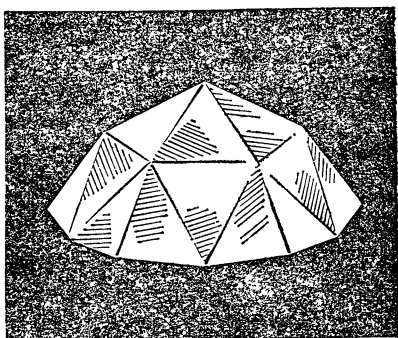


Рис. 13. Огранка бриллианта «розою».

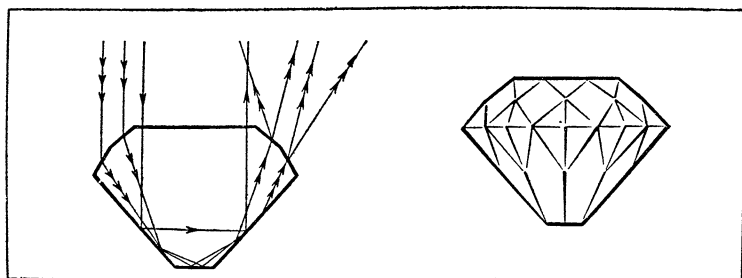


Рис. 14. Огранка бриллианта.

и кажется, что сам он является источником многих ярких разноцветных лучей.

Встречаются алмазы, окрашенные в красный, голубоватый и сиреневый цвета. Сияние алмаза зависит от его огранки. Если смотреть сквозь хорошо ограненный водянoproзрачный бриллиант¹ на свет, то камень кажется совершенно непрозрачным, а некоторые его грани выглядят просто черными. Это происходит потому, что свет, претерпевая полное внутреннее отражение, выходит в обратном направлении или в стороны.

Если смотреть на верхнюю огранку со стороны света, она сияет многими цветами, а местами блестит. Яркое сверкание верхних граней бриллианта называют алмазным блеском. Нижняя сторона бриллианта снаружи кажется как бы посеребренной и отливает металлическим блеском.

Наиболее распространенными формами огранки являются две: собственно бриллиантовая и огранка «розой». Разрез первой изображен на рисунке 14, слева, а вид ее сбоку — на рисунке 14, справа. Здесь же показан ход трех лучей, упавших на алмаз в различных точках грани. Лучи 2 и 3 вследствие дисперсии разлагаются на все цвета спектра, из которых на рисунке изображены лишь крайние. На рисунке 13 изображена огранка «розой».

Наиболее прозрачные и крупные алмазы служат украшением. Мелкие алмазы находят широкое применение в технике в качестве режущего или шлифующего инструмента для металлообрабатывающих станков. Алмазами армируют головки бурильного инструмента для проходки

¹ Бриллиантом называют ограненный и полированный алмаз,

скважин в твердых породах. Такое применение алмаза возможно из-за большой отличающей его твердости. Другие драгоценные камни в большинстве случаев являются кристаллами окиси алюминия (Al_2O_3) с примесью (очень незначительной) окислов окрашивающих элементов — хрома (рубин), меди (изумруд), марганца (аметист) и т.д. Они также отличаются твердостью,

прочностью и обладают красивой окраской и «игрой света». В настоящее время умеют получать искусственным путем крупные (до нескольких килограммов) кристаллы окиси алюминия и окрашивать их в желаемый цвет. Искусственно получают и алмазы. Для этого ампулу с графитом помещают в контейнер с пирофилитом — веществом, напоминающим глину. Контейнер помещают между шестью пуансонами (рис. 15), которые при помощи гидравлических прессов сдвигаются и сжимают контейнер до давления 60 000 атм. Затем через два противоположных пуансона и через контейнер пропускают электрический ток, который разогревает контейнер до 2000—2500° С. Графит плавится, после чего ток выключают и начинается постепенное охлаждение углерода при высоком давлении.

Кристаллизация углерода внутри кубика происходит довольно быстро, при этом получают алмазы, достигающие размера 2—3 мм, а по твердости превосходящие натуральные, но темного цвета.

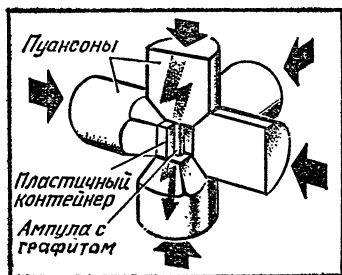


Рис. 15. Получение искусственных алмазов.

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПРЕЛОМЛЕНИЕМ СВЕТА

ПРЕЛОМЛЕНИЕ СВЕТА ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ ВОДЫ В ВОЗДУХ

Опущенная в воду палочка, ложечка в стакане чая вследствие преломления света на поверхности воды кажутся нам преломленными.

Поместите на дно непрозрачного сосуда монету так, чтобы она не была видна. А теперь налейте в сосуд воды.

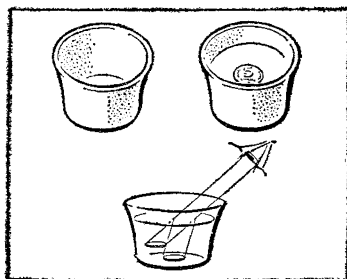


Рис. 16. Опыт с монетой в чашке.

Монета окажется видимой. Объяснение этого явления понятно из рисунка 16.

Посмотрите на дно водоема и попытайтесь оценить его глубину. Чаще всего сделать это правильно не удастся.

Проследим более детально, как и насколько нам кажется уменьшенной глубина водоема, если мы смотрим на него сверху.

Пусть H (рис. 17) — это истинная глубина водоема, на дне которого лежит небольшой предмет, например камешек. Свет, отраженный им, расходится во все стороны. Некоторый пучок лучей падает на поверхность воды в точке O снизу под углом α_1 , преломляется на поверхности и попадает в глаз. В соответствии с законом преломления можно записать:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{n_{\text{воздуха}}}{n_{\text{воды}}} = \frac{n_2}{n_1},$$

но так как $n_2 = 1$, то $n_1 \sin \alpha_1 = \sin \gamma_1$.

Преломленный луч попадает в глаз в точке B . Заметим, что в глаз попадает не один луч, а пучок лучей, сечение которого ограничено зрачком глаза. На рисунке

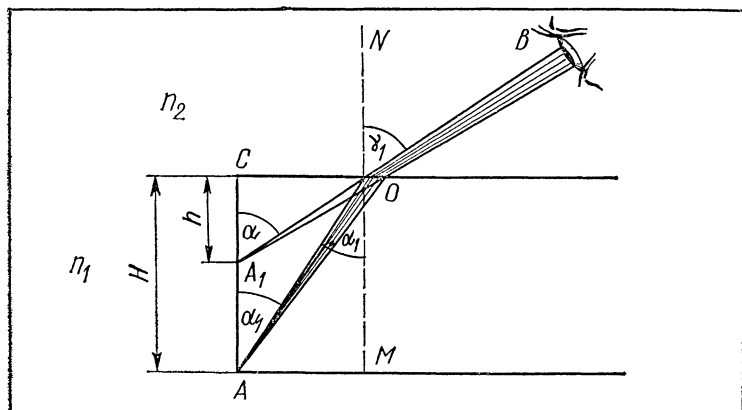


Рис. 17. Преломление света при переходе из воды в воздух.

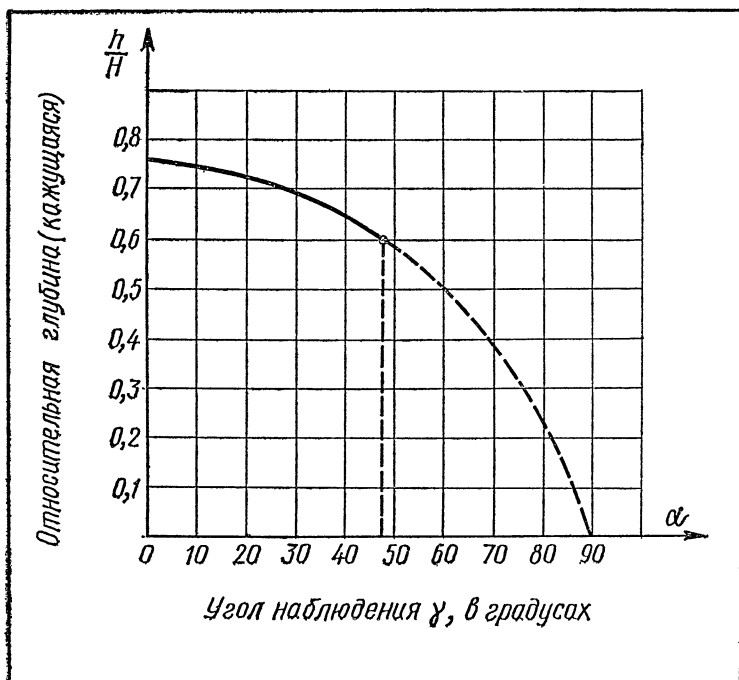


Рис. 18. График зависимости относительной глубины водоема от угла наблюдения.

17 пучок показан тонкими линиями. Однако этот пучок узок и мы можем пренебречь его сечением, приняв его за линию AOB .

Глаз проецирует A в точку A_1 , и глубина водоема нам кажется равной h .

Из рисунка видно, что кажущаяся глубина водоема h зависит от истинной величины H и от угла наблюдения γ_1 .

Выразим эту зависимость математически.

Из треугольников AOC и A_1OC имеем:

$$H = \frac{OC}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad h = \frac{OC}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Исключая из этих уравнений OC , получим:

$$h = H \frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha} = H \frac{\sin \alpha_1 \cos \alpha}{\cos \alpha_1 \sin \alpha} = H \frac{\sin \alpha_1 \cos \gamma_1}{\cos \alpha_1 \sin \gamma_1}.$$

Учитывая, что $\alpha = \gamma_1$ и $\sin \gamma_1 = n_1 \sin \alpha_1 = n \sin \alpha$, получим:

$$h = H \frac{\cos \gamma_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \gamma_1}} = H \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \gamma_1}{n^2 - \sin^2 \gamma_1}}.$$

В этой формуле зависимость кажущейся глубины водоема h от истинной глубины H и угла наблюдения не выступает явно. Для более отчетливого представления этой зависимости выразим ее графически.

На графике (рис. 18) по оси абсцисс отложены значения углов наблюдения в градусах, а по оси ординат — соответствующие им кажущиеся глубины h в долях действительной глубины H . Полученная кривая показывает, что при малых углах наблюдения кажущаяся глубина составляет около $\frac{3}{4}$ действительной и уменьшается по мере увеличения угла наблюдения. При угле наблюдения $\alpha = 47^\circ$ наступает полное внутреннее отражение и луч из воды не может выйти наружу.

МИРАЖИ

За Киевом показалось великое чудо! Вдруг стало видимо далеко во все концы света. Вдали засинел Лиман, за Лиманом разливалось Черное море. Бывалые люди узнали и Крым, горою подымавшийся из моря, и болотный Сиваш. По правую руку видна была земля Галицкая.

— А это что такое? — допрашивал собравшийся народ, указывая на далеко мерещившиеся на небе и больше похожие на облака серые и белые верхи.

— То Карпатские горы! — говорили старые люди...

(Н. В. Гоголь)

Сказки ли это? Безудержная ли фантазия? Нет.

Это рассказы о реальных атмосферных явлениях — миражах. Многие люди их видели, они сфотографированы, описаны, их происхождение объяснено.

В неоднородной среде свет распространяется непрямолинейно. Если мы представим себе среду, в которой показатель преломления изменяется снизу вверх, и мысленно разобьем ее на тонкие горизонтальные слои,

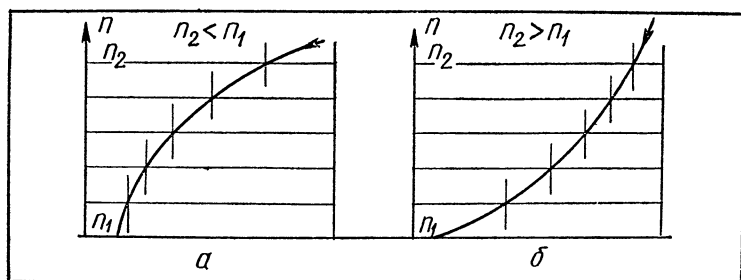


Рис. 19. Искривление в среде с показателем преломления, уменьшающимся с высотой.

Рис. 20. Искривление в среде с показателем преломления, увеличивающимся с высотой.

то, рассматривая условия преломления света при переходе от слоя к слою, заметим, что в такой среде луч света должен постепенно изменять свое направление (рис. 19, 20).

Такое искривление световой луч претерпевает в атмосфере, в которой по тем или иным причинам, главным образом благодаря неравномерному нагреванию ее, показатель преломления воздуха изменяется с высотой (рис. 21).

Воздух обычно нагревается от почвы, поглощающей энергию солнечных лучей. Поэтому температура воздуха

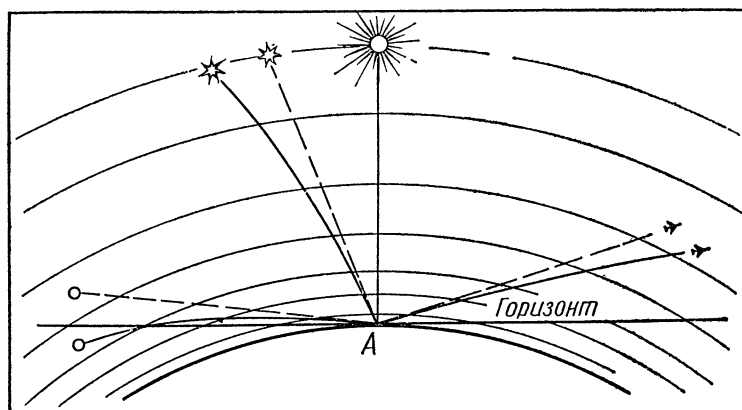


Рис. 21. Нормальная атмосферная рефракция «приподнимает» предметы.

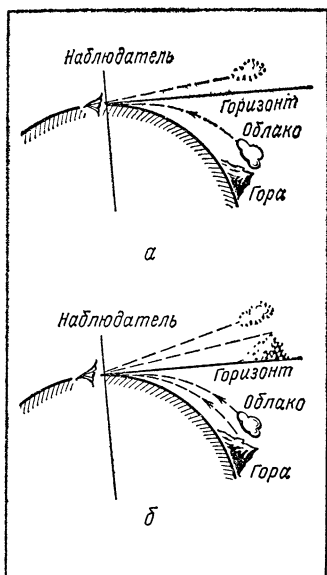


Рис. 22. Схема, поясняющая появление миражей дальнего видения.

понижается с высотой. Известно также, что с высотой понижается и плотность воздуха. Установлено, что с увеличением высоты показатель преломления уменьшается, поэтому лучи, идущие сквозь атмосферу искривляются, пригибаясь к Земле (рис. 21). Это явление получило название нормальной атмосферной рефракции. Вследствие рефракции небесные светила кажутся нам несколько «приподнятыми» (выше своей истинной высоты) над горизонтом.

Вычислено, что атмосферная рефракция «приподнимает» предметы, находящиеся на высоте 30° , на $1'40''$, на высоте 15° — на $3'30''$, на высоте 5° — на $9'45''$. Для тел, находящихся на гори-

зонте, эта величина достигает $35'$. Эти цифры отклоняются в ту или другую сторону в зависимости от давления и температуры атмосферы. Однако по тем или иным причинам в верхних слоях атмосферы могут оказаться массы воздуха с температурой более высокой по сравнению с нижними слоями. Их могут принести ветры из жарких стран, например, из области горячей пустыни. Если в это время в нижних слоях находится холодный, плотный воздух антициклона, то явление рефракции может значительно усиливаться и лучи света, выходящие от земных предметов вверх под некоторым углом к горизонту, могут вернуться обратно на землю (рис. 22).

Однако может случиться так, что у поверхности Земли вследствие сильного ее нагревания, воздух настолько разогревается, что показатель преломления света вблизи почвы станет меньше, чем на некоторой высоте над почвой. Если при этом стоит безветренная погода, то такое состоя-

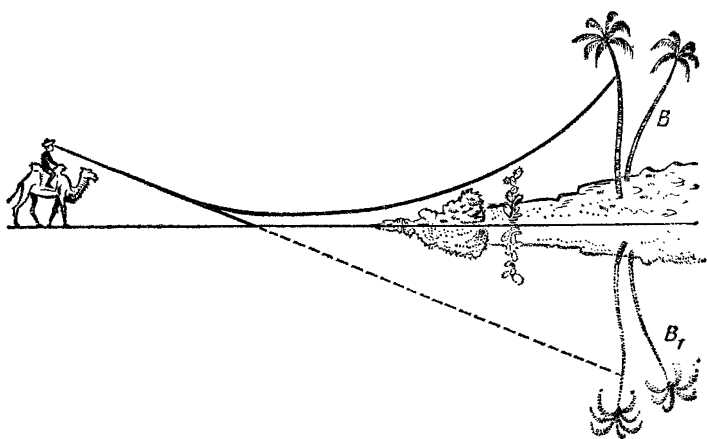


Рис. 23а. Схема искривления световых лучей при «озерном» мираже.

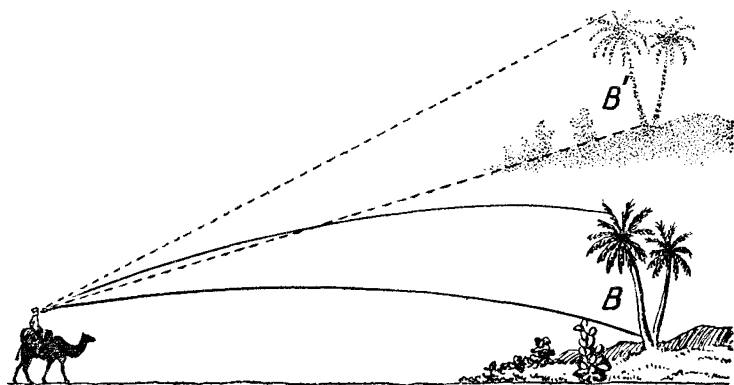


Рис. 23б. Схема искривления световых лучей при верхнем мираже.

ние может сохраниться довольно долго. Тогда лучи от предметов, падающие под некоторым довольно большим углом к поверхности Земли, могут искривляться настолько, что, описав дугу около поверхности Земли, они пойдут снизу вверх (рис. 23а). Возможен и случай, показанный на рисунке 23б.

Описанные выше состояния в атмосфере и объясняют возникновение интересных явлений — атмосферных



Рис. 24. Озерный мираж в пустыне.

миражей¹. Эти явления обычно делят на три класса. К первому классу относят наиболее распространенные и простые по своему происхождению, так называемые озерные (или нижние) миражи, вызывающие столько надежд и разочарований у путников пустынь.

Французский математик Гаспар Монж, участвовавший в египетской кампании 1798 г., так описывает свои впечатления от миражей этого класса:

«Когда поверхность Земли сильно накалилась Солнцем и только-только начинает остывать перед началом сумерек, знакомая местность больше не простирается до горизонта, как днем, а переходит, как кажется, примерно в одном лье в сплошное наводнение.

Деревни, расположенные дальше, выглядят словно острова среди обширного озера. Под каждой деревней — ее опрокинутое отражение, только оно не резкое, мелких деталей не видно, как отражение в воде, колеблемой ветром. Если станешь приближаться к деревне, которая кажется окруженной наводнением, берег мнимой воды все удаляется, водный рукав, отделявший нас от деревни, постепенно суживается, пока не исчезнет совсем, а озе-

¹ Материал для этой главы (рисунки и цитаты) частично заимствованы из статьи Н. Бернштейна в журнале «Наука и жизнь», № 1, 1965, г., а также из книги Н. Г. Новиковой «Необыкновенные небесные явления». М., 1961.

ро... теперь начинается за этой деревней, отражая в себе деревни, расположенные дальше» (рис. 24).

Объяснение этого явления простое. Нижние слои воздуха, разогретые от почвы, не успели еще подняться вверх; их показатель преломления света меньше, чем верхних. Поэтому лучи света, исходящие от предметов (например, от точки B на пальме, рис. 23а), изгибаясь в воздухе, попадают в глаз снизу. Глаз проецирует луч в точку B_1 . То же происходит с лучами, идущими от других точек предмета. Предмет кажется наблюдателю опрокинутым.

Откуда же вода? Вода — это отражение небосвода.

Чтобы увидеть мираж, нет надобности ехать в Африку. Его можно наблюдать в жаркий тихий летний день и у нас над разогретой поверхностью асфальтового шоссе.

Миражи второго класса называют верхними или миражами дальнего видения. На них больше всего похоже «неслыханное чудо», описанное Н. В. Гоголем. Приведем описания нескольких таких миражей.

С Лазурного берега Франции ранним ясным утром из вод Средиземного моря, из-за горизонта, поднимается темная цепочка гор, в которой жители узнают Корсику. Расстояние до Корсики больше 200 км, так что о прямой видимости не может быть и речи.

На английском побережье, близ Гастингса, можно видеть французский берег. Как сообщает натуралист Ньедиге, «близ Реджо в Калабрии, напротив сицилийского берега и города Мессины, временами видны в воздухе целые незнакомые местности с пасущимися стадами, кипарисовыми рощами и замками. Недолго продержавшись в воздухе, миражи исчезают».

Миражи дальнего видения появляются в том случае, если верхние слои атмосферы окажутся по каким-либо причинам, например при попадании туда нагретого воздуха, особенно разреженными. Тогда лучи, исходящие от земных предметов, искривляются сильнее и достигают земной поверхности, идя под большим углом к горизонту. Глаз же наблюдателя проецирует их в том направлении, по которому они входят в него.

Видимо, в том, что большое количество миражей дальнего видения наблюдается на побережье Средиземного моря, повинна пустыня Сахара. Горячие массы воздуха

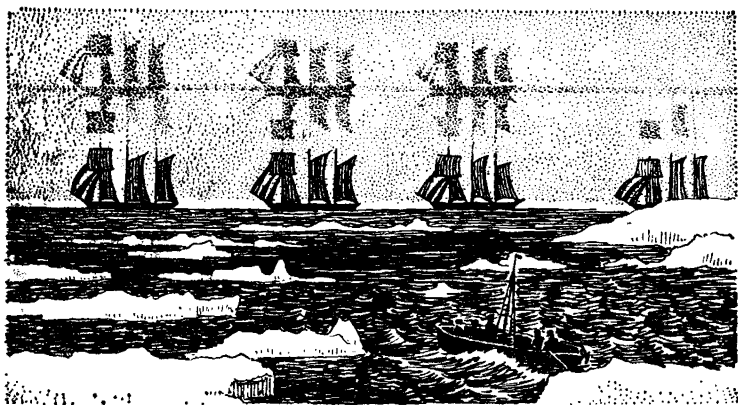


Рис. 25. Двойной мираж на севере.

поднимаются над ней, затем уносятся на север и создают благоприятные условия для возникновения миражей.

Верхние миражи наблюдаются и в северных странах, когда дуют теплые южные ветры. Верхние слои атмосферы оказываются нагретыми, а нижние — охлажденными из-за наличия больших масс тающих льдов и снегов.

Иногда наблюдаются одновременно прямые и обратные изображения предметов. На рисунках 25—27 представлены именно такие явления, наблюдаемые в арктических широтах. Видимо, над Землей имеются перемежающиеся более плотные и более разреженные слои воздуха, искривляющие лучи света примерно так, как показано на рисунке 26.

Миражи третьего класса — сверхдальнего видения — трудно объяснить. Приведем описание нескольких из них.

«Опираясь на свидетельства нескольких лиц, заслуживающих доверия, — пишет К. Фламарион в книге «Атмосфера», — я могу сообщить про мираж, который видели в городе Вервье (Бельгия) в июне 1815 года. Однажды утром жители города увидели в небе войско, и так ясно, что можно было различить костюмы артиллеристов, пушку со сломанным колесом, которое вот-вот отвалится... Это было утро сражения при Ватерлоо!» Расстояние между Ватерлоо и Вервье по прямой линии — 105 км.

Известны случаи, когда миражи наблюдались на расстоянии 800, 1000 и более километров.

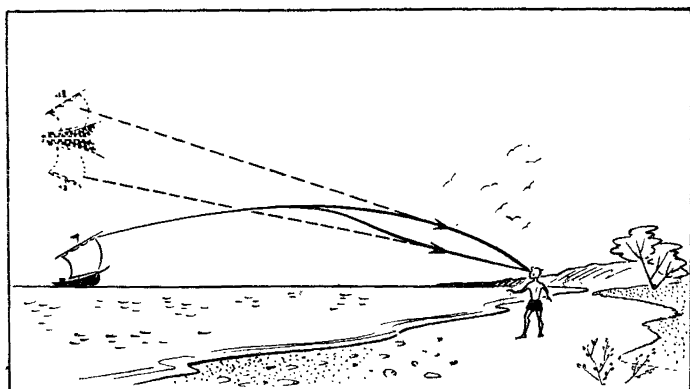


Рис. 26. Возможная схема образования двойного миража.

Приведем еще один поразительный случай. В ночь на 27 марта 1898 г. среди Тихого океана экипаж бременского судна «Матадор» был напуган видением. Около полуночи экипаж заметил приблизительно в двух милях (3,2 км) судно, которое боролось с сильным штормом.

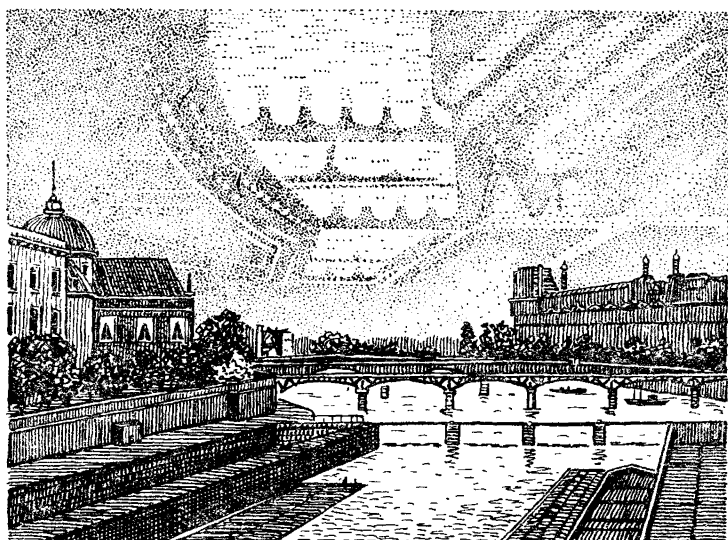


Рис. 27. Верхний мираж в городе.

Это было тем более удивительно, что кругом стоял штиль. Судно пересекало курс «Матадора», и были мгновения, когда казалось, что столкновение кораблей неизбежно... Экипаж «Матадора» видел, как во время одного сильного удара волны о неизвестное судно в каюте капитана потух свет, который виднелся все время в двух иллюминаторах. Через некоторое время судно исчезло, унося с собою ветер и волны.

Дело разъяснилось позже. Оказалось, что все это происходило с другим судном, которое во время «видения» находилось от «Матадора» на расстоянии 1700 км.

Какими же путями проходит свет в атмосфере так, что сохраняются отчетливые изображения предметов на столь больших расстояниях? Точного ответа на этот вопрос пока нет. Высказывались предположения об образовании в атмосфере гигантских воздушных линз, о создании вторичного миража, т. е. миража от миража. Возможно, что здесь играет роль ионосфера¹, отражающая не только радиоволны, но и световые волны.

Видимо, описанные явления имеют такое же происхождение, как и другие наблюдаемые на морях миражи, носящие название «Летучего голландца» или «Фата Моргана», когда моряки видят призрачные суда, исчезающие затем и наводящие страх на суеверных людей.

РАДУГА

А уж давно звучнее и полней
Пернатых песнь по роще раздалась,
А радуга концом дуги своей
В зеленую вершину уперлася.

(Ф. И. Тютчев)

Радуга — это красивое небесное явление — всегда привлекала внимание человека. В прежние времена, когда люди еще очень мало знали об окружающем их мире, радугу считали «небесным знамением». Так, древние греки думали, что радуга — это улыбка богини Ириды.

Радуга наблюдается в стороне, противоположной Солнцу, на фоне дождевых облаков или дождя. Разноцветная дуга обычно находится от наблюдателя на расстоянии 1—2 км, иногда ее можно наблюдать на расстоянии 2—3 м

¹ Слой ионизованных газов, находящийся на высоте 80—100 км, отражающий радиоволны.

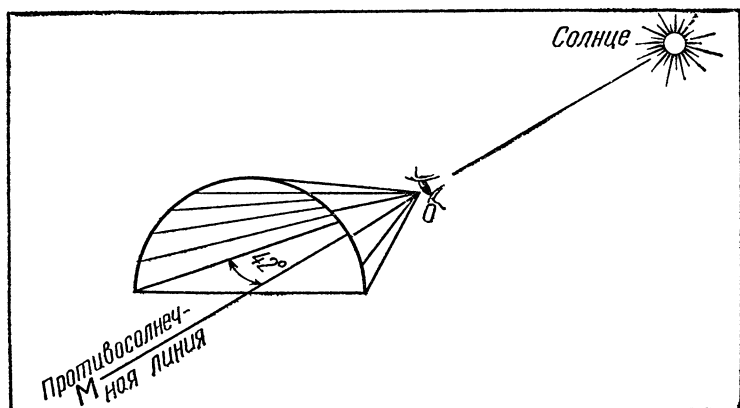


Рис. 28. Схема радуги.

на фоне водяных капель, образованных фонтанами или распылителями воды.

Центр радуги находится на продолжении прямой, соединяющей Солнце и глаз наблюдателя, — на противосолнечной линии. Угол между направлением на главную радугу и противосолнечной линией составляет $41\text{—}42^\circ$ (рис. 28).

В момент восхода солнца противосолнечная точка (точка *М*) находится на линии горизонта и радуга имеет вид полуокружности. По мере поднятия Солнца противосолнечная точка опускается под горизонт и размер радуги уменьшается. Она представляет собой лишь часть окружности. Для наблюдателя, находящегося высоко, например на самолете, радуга видна как полная окружность с тенью наблюдателя в центре.

Часто наблюдается побочная радуга, концентрическая с первой, с угловым радиусом около 52° и обратным расположением цветов.

При высоте Солнца 41° главная радуга перестает быть видимой и над горизонтом выступает лишь часть побочной радуги, а при высоте Солнца больше 52° не видна и побочная радуга. Поэтому в средних и экваториальных широтах в околополуденные часы это явление природы никогда не наблюдается.

У радуги, как и у спектра, различают семь основных цветов, плавно переходящих один в другой.

Вид дуги, яркость цветов, ширина полос зависят от размеров капелек воды и их количества. Большие капли создают радугу более узкую, с резко выделяющимися цветами, малые — дугу расплывчатую, блеклую и даже белую. Вот почему яркая узкая радуга видна летом после грозового дождя, во время которого падают крупные капли.

Впервые теория радуги была дана в 1637 г. Р. Декартом. Он объяснил радугу как явление, связанное с отражением и преломлением света в дождевых каплях.

Образование цветов и их последовательность были объяснены позже, после разгадки сложной природы белого света и его дисперсии в среде. Дифракционная теория радуги разработана Эри и Пертнером.

Рассмотрим простейший случай: пусть на каплю, имеющую форму шара, падает пучок параллельных солнечных лучей (рис. 29). Луч, падающий на поверхность капли в точке A , преломляется внутри нее по закону преломления: $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$, где $n_1 = 1$, $n_2 \approx 1,33$ — соответственно показатели преломления воздуха и воды, α — угол падения, β — угол преломления света.

Внутри капли луч идет по прямой AB . В точке B происходит частичное преломление луча и частичное его отражение. Заметим, что, чем меньше угол падения в точке B , а следовательно, и в точке A , тем меньше интенсивность отраженного луча и тем больше интенсивность преломленного луча.

Луч AB после отражения в точке B проходит под углом $\beta'_1 = \beta_1$ и попадает в точку C , где также происходит частичное отражение и частичное преломление света. Преломленный луч выходит из капли под углом γ_2 , а отраженный может пройти дальше, в точку D и т. д. Таким образом, луч света в капле претерпевает многократное отражение и преломление. При каждом отражении некоторая часть лучей света выходит наружу и интенсивность их внутри капли уменьшается. Наиболее интенсивным из выходящих в воздух лучей является луч, вышедший из капли в точке B . Однако наблюдать его трудно, так как он теряется на фоне ярких прямых солнечных лучей. Лучи же, преломленные в точке C , создают в совокупности на фоне темной тучи первичную радугу, а лучи, испытывающие преломление в точке D

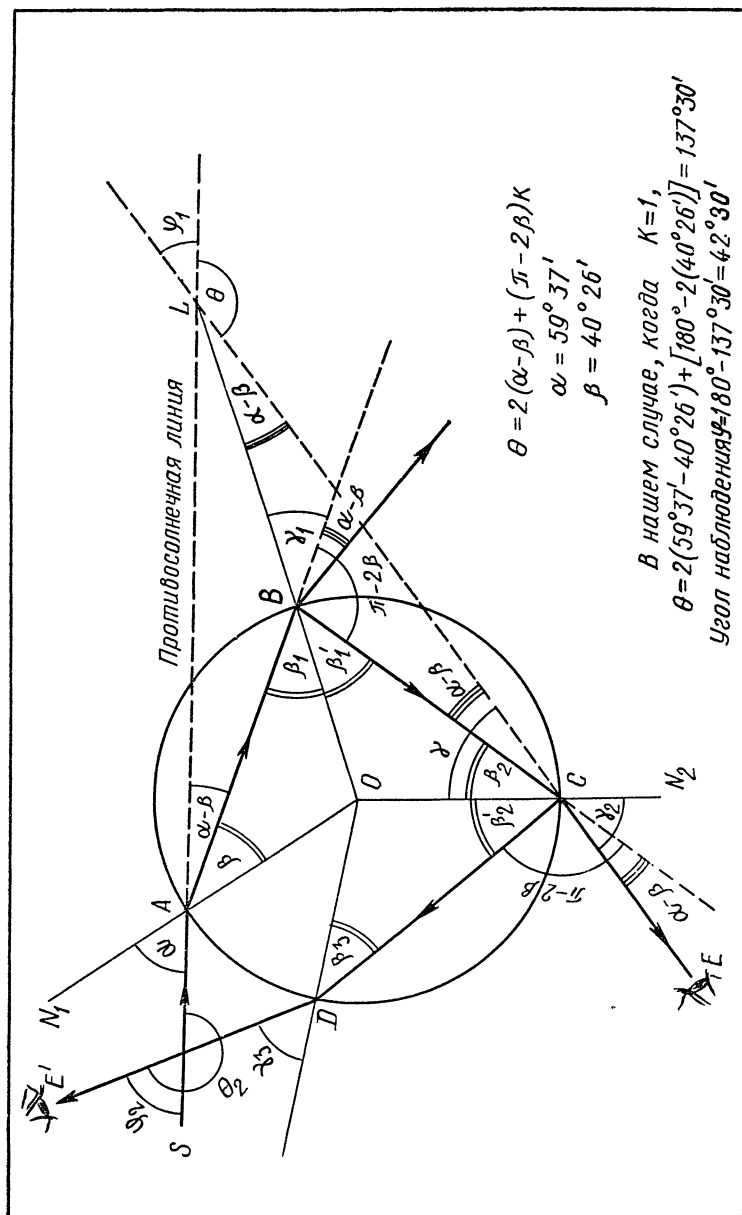


Рис. 29. Преломление луча SA в капле воды.

дают вторичную радугу, которая, как следует из сказанного, менее интенсивна, чем первичная.

Можно подсчитать угол θ поворота луча после отражения его внутри капли. Из рисунка видно, что $\theta = 2(\alpha - \beta) + K(\pi - 2\beta)$, где K — число отражений и порядок радуги.

Для случая $K = 1$ получаем $\theta = 2(59^\circ 37' - 40^\circ 26') + 1[180^\circ - 2(40^\circ 26')] = 137^\circ 30'$.

Следовательно, угол наблюдения радуги первого порядка равен:

$$\varphi_1 = 180^\circ - 137^\circ 30' = 42^\circ 30'.$$

Для луча DE' , дающего радугу второго порядка, т. е. в случае $K = 2$, имеем:

$$\theta = 2(59^\circ 37' - 40^\circ 26') + 2[180^\circ - 2(40^\circ 26')] = 236^\circ 38'.$$

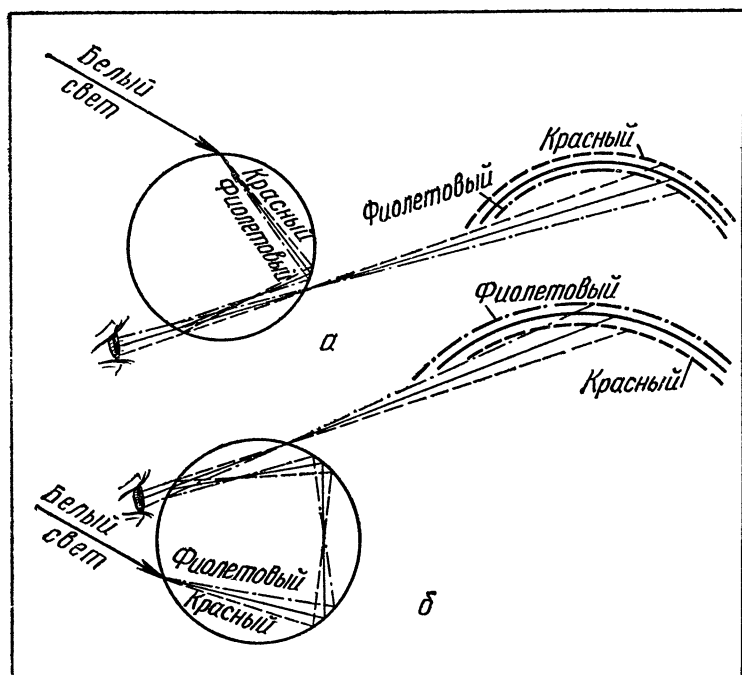


Рис. 30. Образование радуги первого (а) и второго (б) порядков.

Угол наблюдения радуги второго порядка

$$\varphi_2 = 180^\circ - 234^\circ 38' = -56^\circ 38'.$$

Отсюда следует (это видно и из рисунка), что в рассматриваемом случае радуга второго порядка с земли не видна. Для того чтобы она была видна, свет должен входить в каплю снизу (рис. 30, б).

При рассмотрении образования радуги нужно учесть еще одно явление — неодинаковое преломление волн света различной длины, т. е. световых лучей разного цвета. Это явление носит название дисперсии. Вследствие дисперсии углы преломления γ и углы отклонения лучей Θ в капле различны для лучей различной окраски. Ход трех лучей — красного, зеленого и фиолетового — схематически показан на рисунке 30, а для дуги первого порядка и на рисунке 30, б для дуги второго порядка.

Из рисунков видно, что последовательность цветов в этих дугах противоположна.

Чаще всего мы наблюдаем одну радугу. Нередки случаи, когда на небосводе появляются одновременно две радужные полосы, расположенные одна над другой; наблюдают, правда, довольно редко, и еще большее число радужных небесных дуг — три, четыре и даже пять одновременно. Это интересное явление наблюдали ленинградцы 24 сентября 1948 г., когда во второй половине дня среди туч над Невой появились четыре радуги. Оказывается, что радуга может возникать не только от прямых солнечных лучей; нередко она появляется и в отраженных лучах Солнца. Это можно видеть на берегу морских заливов, больших рек и озер. Три-четыре такие радуги —

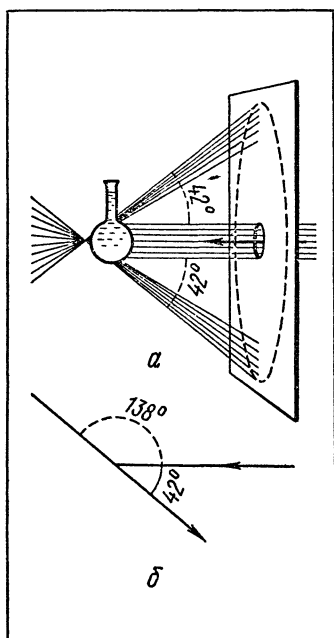


Рис. 31. Моделирование радуги при помощи колбы с водой.

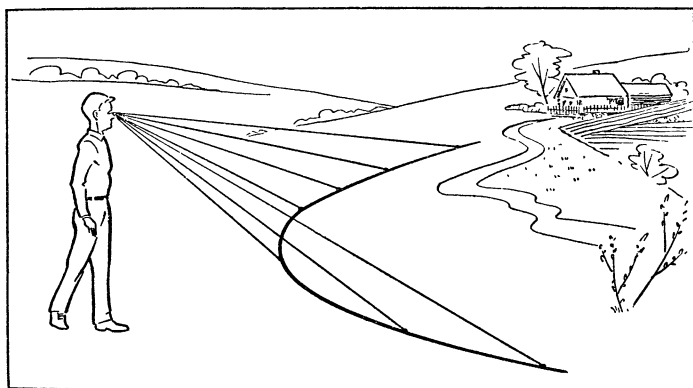


Рис. 32: Радуга на лугу имеет форму гиперболы.

обыкновенные и отраженные — создают подчас красивую картину. Так как отраженные от водной поверхности лучи Солнца идут снизу вверх, то радуга, образующаяся в этих лучах, может выглядеть иногда совершенно необычно.

Не следует думать, что радугу можно наблюдать только днем. Она бывает и ночью, правда, всегда слабая. Увидеть такую радугу можно после ночного дождя, когда из-за туч выглядывает Луна.

Некоторое подобие радуги можно получить на следующем опыте. Возьмите колбу с водой, осветите ее солнечным светом или лампой через отверстие в белой доске. Тогда на доске отчетливо станет видна радуга (рис. 31, а), причем угол расхождения лучей по сравнению с начальным направлением составит около $41\text{--}42^\circ$ (рис. 31, б). В естественных условиях экрана нет, изображение возникает на сетчатке глаза, и глаз проецирует это изображение на облака.

Если радуга появляется вечером перед заходом Солнца, то наблюдают красную радугу. В последние пять или десять минут перед закатом солнца все цвета радуги, кроме красного, исчезают, она становится очень яркой и видимой даже спустя десять минут после заката.

Красивое зрелище представляет собой радуга на росе.

Ее можно наблюдать при восходе Солнца на траве, покрытой росой. Эта радуга имеет форму гиперболы (рис. 32).

НИМБЫ

Рассматривая радугу на луку, вы невольно заметите удивительный неокрашенный световой ореол — нимб, окружающий тень вашей головы. Это не оптическая иллюзия и не явление контраста. Когда тень падает на дорогу, ореол исчезает. Каково же объяснение этого интересного явления? Капли росы определенно играют здесь важную роль, ибо при исчезании росы исчезает явление.

Для выяснения причины явления сделайте следующий опыт. Возьмите сферическую колбу с водой и поставьте ее на солнечный свет. Пусть она изображает каплю. Поместите позади колбы близко к ней лист бумаги, который будет играть роль травы. Посмотрите на колбу под малым углом по отношению к направлению падающих лучей. Вы увидите ее ярко освещенной лучами, отраженными от бумаги. Лучи эти идут почти точно навстречу лучам Солнца, падающим на колбу. Чуть в сторону отведите глаза, и яркого освещения колбы уже не видно.

Здесь мы имеем дело не с рассеянным, а с направленным пучком света, исходящим от яркого пятна на бумаге. Колба действует как линза, направляющая свет на нас.

Пучок параллельных солнечных лучей после преломления в колбе дает на бумаге более или менее фокусированное изображение Солнца в виде яркого пятна. В свою очередь довольно много света, излучаемого пятном, захватывается колбой и после преломления в ней направляется назад в сторону Солнца, в том числе в наши глаза, так как мы стоим спиной к Солнцу. Оптические недостатки нашей линзы — колбы дают некоторый рассеянный световой поток, но все же основной поток света, исходя-

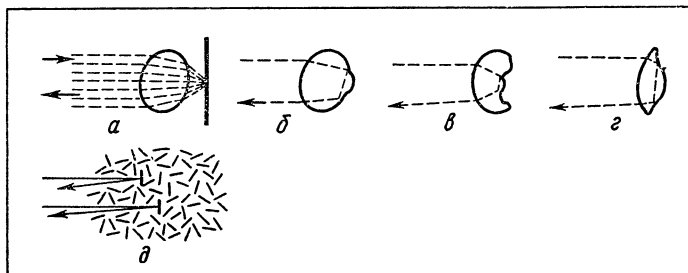


Рис. 33. Образование нимбов.

щего от яркого пятна на бумаге, направлен в сторону Солнца. Но почему же свет, отраженный от травинок, не зеленый?

Он в действительности имеет слабый зеленоватый оттенок, но в основном он белый, так же как свет, направленно отраженный от гладких окрашенных поверхностей, как, например, блики от зеленой или желтой классной доски, от цветного стекла.

Но капельки росы не всегда шарообразны. Они могут быть искаженными. Тогда некоторые из них направляют свет в сторону, но он проходит мимо глаз. Другие же капельки, как, например, изображенные на рисунке 33, имеют такую форму, что упавший на них свет после одного или двукратного отражения направляется обратно в сторону Солнца и попадает в глаза наблюдателя, стоящего к нему спиной.

Наконец следует отметить еще одно остроумное объяснение этого явления: направленно отражают свет только те листья травы, на которые падает прямой свет Солнца, т. е. те, которые со стороны Солнца не заслонены другими листьями. Если учесть, что листья большинства

растений всегда поворачиваются своей плоскостью к Солнцу, то очевидно, что таких отражающих листьев окажется довольно много (рис. 33, *б*). Поэтому нимбы можно также наблюдать и в отсутствие росы, на поверхности гладко скошенного луга или сжатого поля.



Рис. 34. Брокенское видение.

ГАЛО

Под этим названием объединяют целую группу сложных оптических явлений в атмосфере, обусловленных преломлением и отражением света в кристаллах льда, из которых обычно состоят облака верхнего яруса.

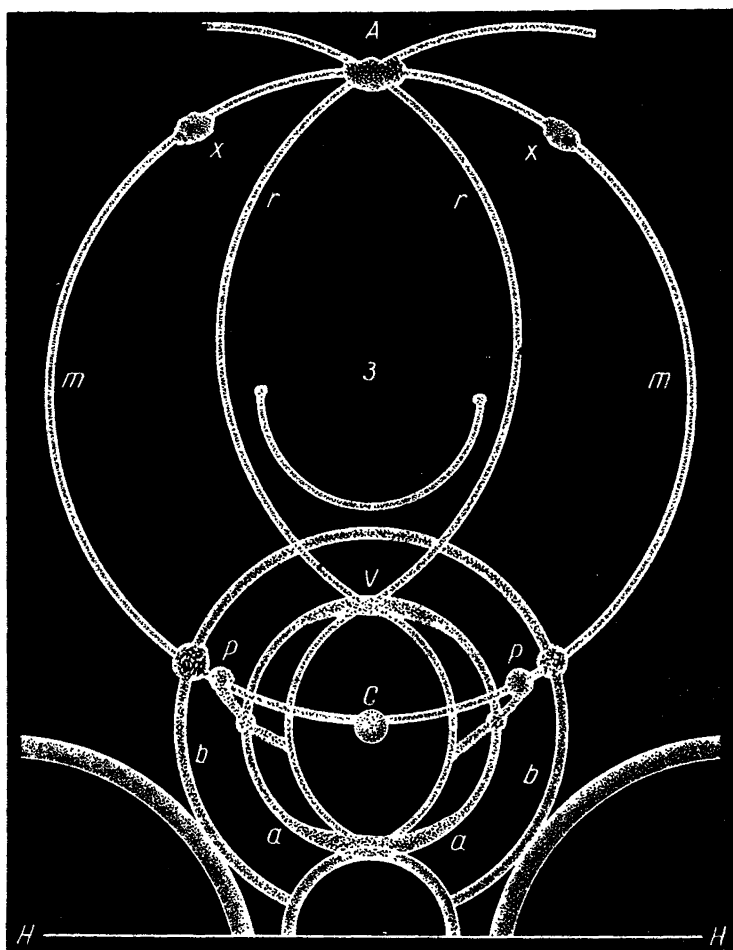


Рис. 35. Сложное гало.

Чаще всего наблюдают малые гало, представляющие собой кольца вокруг Солнца или Луны, имеющие угловой радиус около 22° . Большие же гало имеют угловой радиус около 46° . Иногда отдельные участки этих гало светятся более ярко, образуя так называемые ложные солнца — паргелии («пара» — близкий, «гелиос» — солнце). Гало, причиной которых является преломление

лучей света в кристаллах, всегда слегка окрашены в радужные тона, что объясняется дисперсией света.

Наиболее известным примером большого гало является знаменитое, часто повторяющееся «Брокенское видение» (рис. 34). Это гало имеет вид нескольких гигантских светлых колец вокруг Солнца с силуэтами наблюдателей на общем туманном фоне неба, причем изображение наблюдателей разрастается в колоссальные теневые фигуры на облаках, повторяющие все движения присутствующих.

На рисунке 35 изображено сложное гало, представляющее собой переплетение многих дуг и пятен. Такое явление наблюдали 18 июля 1794 г. в Петербурге в течение 5 часов.

ОБРАЗОВАНИЕ ГАЛО

Кристаллы, из которых состоят облака, представляют собой тонкие шестиугольные пластинки — снежинки (рис. 36а) или правильные шестигранные призмы с плоским или заостренным основанием (рис. 36б). Иногда пластинки и призмы соединяются и кристаллы приобретают форму маленьких парашютиков (рис. 37). Призмы являются причиной образования гало.

Грани шестигранных призм попарно образуют двугранные углы, которые преломляют свет так же, как двугранные углы трехгранной призмы.

Угол δ , образованный двумя гранями AB и CD шестигранной призмы (рис. 38), составляет 60° . Показатель преломления льда для зеленого луча $n = 1,31$. Пользуясь

формулой
$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \varepsilon}{2}}{\sin \frac{\delta}{2}},$$
 можно определить угол наи-

меньшего отклонения луча ε , проходящего сквозь призму. Он оказывается равным 22° , т. е. точно соответствующим угловому радиусу малого гало. Угол между соседними гранями этой призмы равен 120° , следовательно, луч, падающий на грань шестигранной призмы, не может выйти наружу через соседнюю грань, поэтому эти грани в образовании гало не участвуют.



Рис. 36а. Снежинки
(увеличено в 5—6 раз).

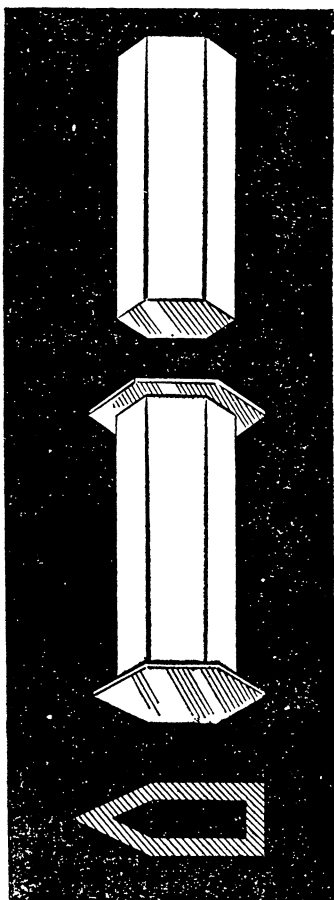


Рис. 36б. Кристаллы льда.

На рисунке 39 изображен ход нескольких лучей света через боковые грани шестигранной призмы из льда ($n = 1,31$). Лучи 1, 3, 5, 7 претерпевают двукратное преломление, лучи 2, 4, 6 — двукратное преломление и однократное отражение. Эти лучи или идут близко к лучу, изображенному на рисунке 38, или создают ореол вокруг основной полосы гало.

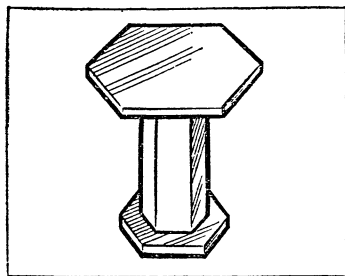


Рис. 37. Кристалл льда с плоскими пластинками на концах (парашютик).

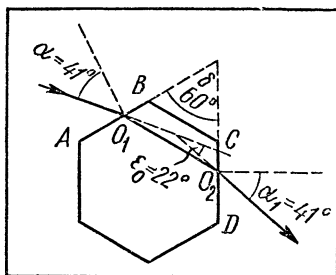


Рис. 38. Преломление света на гранях кристалла льда, пересекающихся под углом 60° .

На рисунке 40 показано преломление света на одной из боковых граней призмы и ее основании, образующих преломляющий двугранный угол 90° . Подсчет, произведенный так же, как и для угла $\delta = 60^\circ$, показывает, что угол наименьшего отклонения луча в этом случае равен 46° ($\epsilon = 46^\circ$), т. е. как раз соответствует угловому радиусу большого гало.

Естественно, что при прохождении сквозь ледяную призму луч света испытывает не только преломление, но и дисперсию.

Рассмотрим образование малого гало, видимого под углом 22° . Кристаллы льда расположены хаотично. Лучи света падают на их грани от Солнца или Луны параллельными пучками под всевозможными углами. Часть из них падает так, что свет после преломления в призмах

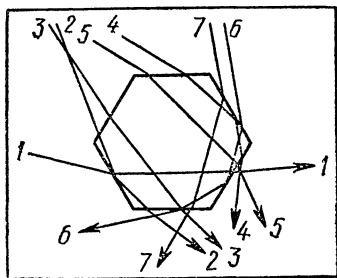


Рис. 39. Возможные преломления света в шестигранной ледяной призме.

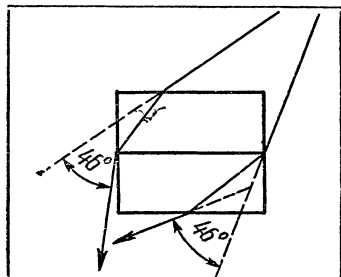


Рис. 40. Преломление света на гранях, пересекающихся под углом 90° .

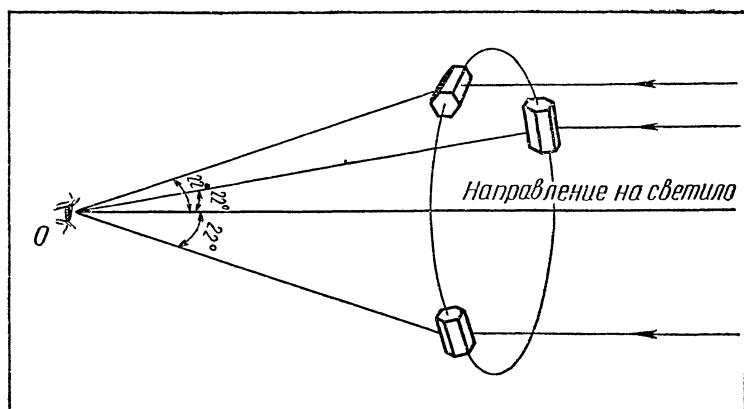


Рис. 41. Образование малого гало.

выходит под углом 22° или близким к нему (рис. 41). Тогда те лучи, которые попадают в глаз наблюдателя, создают впечатление, что они идут от ряда источников, составляющих кольцо, расположенное под углом 22° вокруг светила.

Лучи, падающие на кристаллы, могут преломляться и выходить под углом, отличающимся от 22° . Однако интенсивность света, выходящего под другими углами, значительно меньше. Так как при вращении кристалла изменение углов вблизи угла наименьшего отклонения (22°) происходит медленнее, то вероятность наблюдения лучей и яркость света в этом направлении значительно

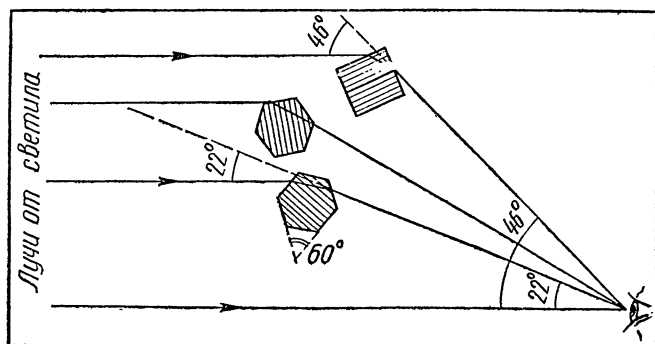


Рис. 42. Образование малого и большого гало.

больше, чем в других. Свет, падающий под другими углами, создает впечатление дымки вокруг кольца.

Если кристаллы имеют плоские правильные основания, то преломление света может произойти и на углах в 90° (рис. 42). В этом случае угол наименьшего отклонения $\delta = 46^\circ$, как это было уже вычислено, и одновременно с малым гало наблюдается большое. Вследствие более сильного разложения света призмой с преломляющим углом 90° большие гало отличаются более насыщенными цветами по сравнению с малыми.

Гало не возникает на облаках, которые состоят из звездообразных снежинок или кристаллов неправильной формы.

ПАРГЕЛИИ

Паргелии (ложные солнца) можно наблюдать в тихую погоду при низком положении Солнца, когда значительное количество призм располагается в воздухе так, что их главные оси вертикальны, и призмы медленно опускаются как маленькие парашютики. В этом случае наиболее яркий преломленный свет поступает в глаз под углом 22° с граней, расположенных вертикально, и создает вертикальные столбы по обе стороны от Солнца по горизонту. Эти столбы могут быть в некоторых местах особо яркими, создавая впечатление ложного солнца.

Кольцевое гало наблюдается значительно чаще, чем ложные солнца, так как беспорядочное расположение кристаллов более вероятно, чем упорядоченное.

На рисунке 43 воспроизведена фотография тройного солнца, помещенная в газете «Комсомольская правда» от 19 декабря 1964 г.



Рис. 43. Тройное солнце.

СВЕТАЯЩИЕСЯ СТОЛБЫ НАД СОЛНЦЕМ, ФОНАРЯМИ И ДРУГИМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

Иногда можно наблюдать, как в тихое морозное утро над ярким Солнцем, поднимающимся над горизонтом, видны в воздухе ледяные иглы, поблескивающие в его лучах, а сверху и снизу Солнца — светящиеся столбы. Наблюдаемый столб сам по себе бесцветен, но когда Солнце становится желтым, оранжевым или красным, столб принимает тот же оттенок.

Это явление известно с давних времен. Еще жрецы древнего мира представляли его как «знамение божье». Иногда столбы принимают форму креста (рис. 44). Появление креста на небе христианское духовенство расценивало как предвещение несчастья. Люди не могли объяснить это оптическое явление и верили в сказки жрецов.

Объяснение световых столбов действительно связано с рядом трудностей. Те объяснения, которые мы приводим ниже, носят лишь качественный характер.

Итак, световые столбы бывают видны в тихую морозную погоду над фонарями и другими источниками света. Появление вертикальных белых столбов связано с отражением света от граней кристаллов льда. Столбы лучше всего наблюдать, когда Солнце находится за горизонтом или низко над ним и скрыто каким-либо строением, деревом и не слепит глаза.

Представим себе облако ледяных кристаллов и пластинок, грани которых строго горизонтальны. Они очень медленно падают. Лучи света отражаются от них, и при этом отраженный свет не попадает в глаз наблюдателя, находящегося на земле. Но как только те же кристаллы и пластинки отклоняются по отношению к горизонту на небольшой угол (рис. 45), то отраженные лучи также испытывают малые отклонения и теперь они уже могут попасть в глаз. Глаз проецирует лучи на свод неба, и наблюдателю кажется, что под Солнцем или над ним возникает световой столб.

Вертикальные столбы могут образоваться также вследствие отражения и преломления света в кристаллах, изображенных на рисунке 36, если они расположены горизонтально и, падая, медленно вращаются вокруг горизонтальной оси.

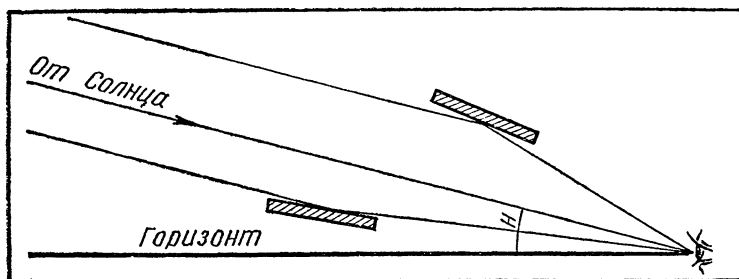


Рис. 45. Объяснение образования светящихся столбов.



Рис. 44. Светящиеся столбы.

Горизонтальные столбы образуются в том случае, когда кристаллы-парашютики (рис. 37), медленно падая, вращаются вокруг своей вертикальной оси.

Подобным образом можно объяснить образование ореолов и колец вокруг ламп и фонарей. Кольца представляют собой малое гало, а ореолы вызваны рассеиванием света на кристалликах снега, капельках тумана или пыли, взвешенных в воздухе.

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ И ДИФРАКЦИЕЙ СВЕТА

ТОНКИЕ ПЛЕНКИ

После дождя, когда мокрый асфальт кажется черным, в местах автомобильных стоянок, где на воду в лужах пролито масло и бензин, особенно отчетливо видны блестящие пятна, отливающие всеми цветами радуги. Больше всего заметны цвета зеленый и желтый, но местами видны голубой, синий и пурпурный.

Такие же пятна можно видеть на поверхности воды в реках, озерах и лужах, если они загрязнены нефтью или ее продуктами.

Кто из нас в детстве не выдувал мыльные пузыри. Тонкая пленка мыльного пузыря, так же как и тонкая пленка нефти на поверхности воды, приобретает цветную окраску, тонкий целлофан отсвечивает цветами радуги. Эти красивые явления имеют одну природу, они являются следствием интерференции света в тонких пленках масла, мыльной пены, целлофана.

ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СВЕТА В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ

В тонких пленках нефти или мыльной воды происходит разделение, а затем соединение световых волн.

На рисунке 46 представлен ход лучей в пленке. Здесь h — толщина пленки (в сильно увеличенном масштабе), S — источник света. Пусть на пленку из точки S падают два монохроматических пучка лучей 1 и 2. Если источник света расположен далеко (а в случае освещения нефтяных пятен на лужах источником является небосвод, т. е. свет, рассеянный воздухом), его можно считать исходящим из бесконечности. Тогда лучи 1 и 2 будут практически параллельны, а фронт световой волны AB перпендикулярен им.

Обозначим абсолютный показатель преломления света среды n_1 , а пленки n_2 .

Пучок лучей света, встретив пленку в точке A , частично преломляется, а частично отражается. Луч, отраженный в данном случае, нас не интересует, так как он не

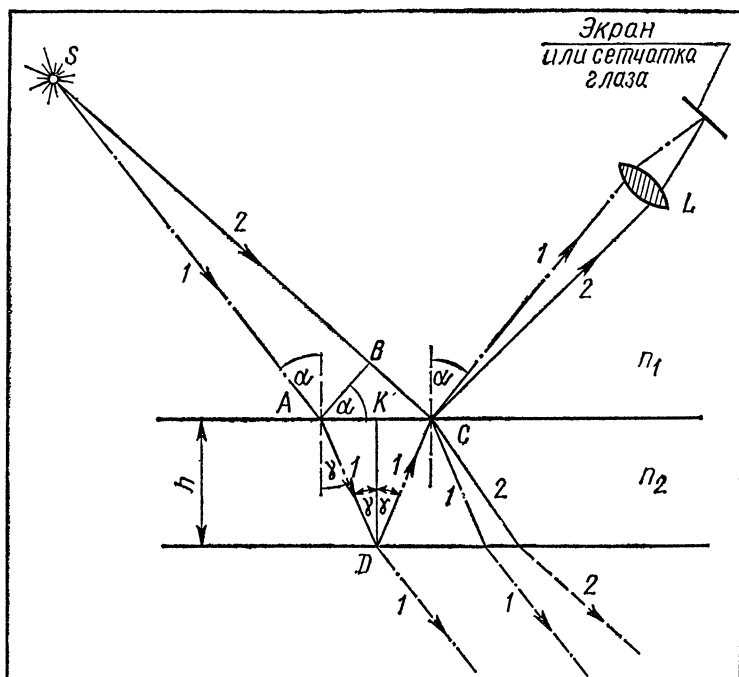


Рис. 46. Ход световых лучей в тонкой пленке.

попадает в глаз. Пучок же преломленных лучей, дойдя до второй поверхности пленки (до точки D), опять частично отражается и частично преломляется. Нас интересует отраженный пучок лучей DC , который в точке C претерпевает частичное преломление и частичное отражение. Пучок лучей 1 , преломленный в точке C , попадает в глаз, пучок лучей 2 , выходящих из того же источника и падающих на пленку в точке C , также частично преломляется, а частично отражается. Отраженный пучок лучей 2 и пучок лучей 1 интерферируют. Оба пучка лучей могут быть сфокусированы при помощи линзы на экране, где и наблюдается результат интерференции, или на сетчатке глаза, где она воспринимается.

Что же получается на экране? Как видно из рисунка, пучки лучей $1, 2$ прошли разные пути до встречи в точке C : первый прошел расстояние $AD + DC = 2AD$ в среде

с показателем преломления n_2 , второй — расстояние BC в среде с показателем преломления n_1 .

Геометрическая разность хода лучей равна $2AD$ — BC ; оптическая же разность¹ составляет:

$$\Delta = 2AD \cdot n_2 - BC \cdot n_1 - \frac{\lambda}{2},$$

где $\lambda/2$ — поправка на потерю полуволны при отражении света от среды, обладающей большим показателем преломления.

Если разность хода равна целому числу волн ($\Delta = N\lambda$), то точка C будет наблюдаться ярко светящейся определенным цветом, соответствующим длине волны, для нее будут выполняться условия максимума освещенности. Если же разность хода равна нечетному числу полуволн, то для данной волны выполняется условие минимума освещенности в точке C .

Разность хода Δ можно выразить как функцию толщины пленки h , угла падения (и наблюдения) α и длины волны λ или как функцию толщины пленки и угла преломления γ .

Эта зависимость выглядит следующим образом:

$$\Delta = 2hn_2 \cos \gamma - \frac{\lambda}{2} = 2h \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \alpha} - \frac{\lambda}{2}.$$

На поверхности пленки всегда найдется много точек, для которых соблюдены одинаковые условия интерференции для данной длины волны. Эти точки расположены цепочками. Их геометрические места представляют полосы светлые или темные в зависимости от длины волны и условий интерференции.

Для светлых полос при данной длине волны выполняется условие:

$$\Delta = 2hn \cos \gamma - \frac{\lambda}{2} = N\lambda,$$

для темных:

$$\Delta = 2hn \cos \gamma - \frac{\lambda}{2} = 2(N + 1) \frac{\lambda}{2}.$$

¹ Оптической разностью хода называют длину пути, который свет проходит в безвоздушном пространстве за то же время, что в данной среде. Так как скорость распространения света в безвоздушном пространстве (c) в n раз больше, чем в данной среде (v), т. е. $n = c/v$, то этот путь l оказывается в n раз больше пути, проходимо-го в данной среде l' ; $l = l'n$.

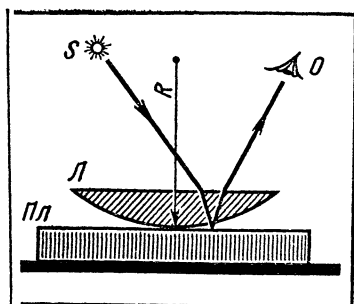


Рис. 47. Схема для получения колец Ньютона.

Если пленка освещена полихроматическим (сложным, многоцветным) светом, например белым, то для каждой длины волны (для каждого цвета) найдутся полосы максимума освещенности, вне которых для данной длины волны имеет место минимум освещенности. В месте минимума данной волны может оказаться максимум другой волны (другого цвета). Таким образом, максимумы раз-

личных длин волн расположены друг за другом рядом. В результате образуется спектр.

Спектров может образоваться несколько порядков в зависимости от толщины пленки и угла наблюдения. Может случиться, что соседние спектры накладываются друг на друга своими крайними цветами. Красный накладывается на фиолетовый, в результате чего получается темно-пурпурный, а иногда коричневый цвет.

Цвета, составляющие середину спектра — желтый, зеленый, голубой, всегда видны хорошо.

Если за освещенной пленкой наблюдать несколько минут, то можно заметить изменение очертаний цветных полос. Это происходит вследствие растекания масла, а следовательно, и изменения толщины пленки.

Если на полированную стеклянную пластинку положить плоско-выпуклую линзу, то между линзой и пластинкой возникнет тонкая воздушная прослойка, в которой при определенном освещении (рис. 47) можно наблюдать светлые и темные кольца, соответствующие одинаковой толщине пленки. Увеличенная картина этих колец, рассматриваемых в зеленом и красном свете, видна на цветной вклейке VII.

Явление интерференции применяется для многих практически полезных целей.

Так, при помощи интерференции можно проверить качество полировки поверхности деталей машины. На явлении интерференции света основано устройство приборов-интерферометров, служащих для измерения длин с точностью до 0,1 длины волны света, определения показателей преломления и др.

ЯВЛЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА. НАБЛЮДЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИИ

В начале книги, говоря о прямолинейности распространения света в однородной среде, мы заметили, что на краю препятствия свет загибается в сторону геометрической тени, а вне ее образуется ряд светлых и темных полос, параллельных краю тени и постепенно переходящих в освещенное пространство. Это явление получило название дифракции света.

Дифракцию света можно наблюдать, например, посмотрев на свет далекого яркого фонаря через капроновый платок, держа его на расстоянии вытянутой руки.

Дифракционные спектры хорошо видны и при рассматривании источника света, например лампы сквозь ресницы.

Если сложить два пальца так, чтобы между ними образовалась узкая щель, и сквозь эту щель смотреть на источник рассеянного света (небо, абажур лампы и т. д.), то можно подобрать такую ширину щели, что в ней явно будет видно несколько темных и светлых полосок. Подобную картину можно видеть в узкой щели открытой двери, если за ней находится лампа или окно. Можно приклеить (парафином или маслом) к картону два лезвия безопасной бритвы и в щели между ними увидеть дифракционную картину.

Дифракционная картина хорошо видна, если в алюминиевой фольге концом иголки (не протыкая насквозь) проколоть маленькое отверстие и смотреть сквозь него на яркий источник света.

Царапины на оконном стекле тоже дают возможность наблюдать дифракцию света. На стекле окон автобусов, троллейбусов имеются царапины. Они возникают при протирании окон, при обдувании их кристалликами песка. Естественно, что большая часть царапин направлена горизонтально или несколько наискось. Стекло с царапинами — это своеобразная дифракционная решетка, на которой дифрагирует свет фонарей, отклоняясь перпендикулярно им. В результате можно видеть два пучка света, исходящих от источника света. Но почему же у них нет спектральной окраски? Это объясняется тем, что период рассматриваемой решетки непостоянен, в

результате чего получается сложение спектральных цветов, дающее, как известно, белый свет.

Иногда, когда вы едете в автобусе, на замерзшем оконном стекле можно наблюдать красивую картину. Ледяной покров на окнах при попадании на них света Солнца или фонаря вдруг начинает сиять удивительно прозрачными и чистыми цветами спектра. Явление это несколько минут длится, а затем исчезает вследствие увеличения толщины слоя льда на стекле.

Это видение происходит вследствие дифракции света на иглах кристаллов льда. Возможно, что при некоторой толщине пластинок льда (≈ 1 *мкм*) и расстояниях между ними около 0,1 *мм* часть света проходит через пластинки, часть — мимо них. Ввиду различия скоростей света в пластинке и в воздухе происходит сдвиг колебаний по фазе. Это приводит к гашению некоторых длин волн вследствие интерференции, а в результате к «окрашиванию» поверхности замерзшего стекла в дополнительный цвет.

ВЕНЦЫ

Полупрозрачные белые облака медленно скользят перед Луной. И каждый раз, когда новое облако закрывает Луну, мы видим вокруг Луны чудесные разноцветные кольца, диаметр которых лишь в несколько раз больше диаметра Луны. Это венцы.

Аналогичные явления можно видеть и вокруг фонарей и Солнца (только при этом нужно позаботиться о том, чтобы Солнце не ослепляло нас, например надеть темные очки). Венцы не следует путать с гало. Диаметр гало 22 или 46°, в то время как диаметр венцов значительно меньше: 1 — 6°.

Объяснение этому явлению природы надо искать в дифракции света. Облака состоят из капелек воды. Проходя через капли, свет претерпевает дифракцию. Расхождение лучей при этом зависит от величины капли. Множество капель не изменяет картину, а только усиливает ее. Ширина ореола зависит от величины капель: чем меньше капельки, тем шире ореол. Возможно, что венцы могут возникнуть и на облаке, состоящем из ледяных игл.

В некоторых случаях световые венцы («глазные») возникают вследствие дифракции света на зернах неоднородностей, имеющихся в роговице глаза. «Глазной» венец по

размеру равен «облачному», и их трудно различить. Однако «облачный» венец можно отличить от «глазного». Если перед глазом поместить непрозрачный предмет, то «облачные» венцы остаются, а «глазные» немедленно исчезают.

ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА И ТЕПЛА

При нагревании тел скорость движения молекул и атомов увеличивается. Характер же их движения обуславливается агрегатным состоянием вещества. При повышении температуры тела интенсивнее становится и его излучение, изменяется также характер его излучения; чем выше температура тела, тем больше излучается коротких волн; при низких температурах более интенсивно длинноволновое излучение. Если излучение нагретого тела разложить при помощи призмы или дифракционной решетки, то можно получить сплошной спектр (см. цветную вставку IV), указывающий на то, что излучаются всевозможные длины волн.

ЗАКОНЫ ТЕМПЕРАТУРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Интенсивностью излучения, светимостью или суммарной излучательной способностью называют количество энергии, излучаемое телом в единицу времени t с единицы поверхности S ,

$$E = \frac{W_{\text{изл}}}{St}.$$

Излучающее тело, расходуя энергию на излучение, естественно, должно ее откуда-то получать: или за счет нагревания при помощи посторонних источников энергии или за счет поглощения энергии, излучаемой другими телами. Если количество полученной энергии больше количества расходуемой, то температура тела растет, в противном случае — наоборот, падает.

Мы будем рассматривать такое состояние, когда поступление энергии равно ее расходу. В этом случае температура тела остается неизменной. Такое излучение называют стационарным; если же при этом поступление энергии обусловлено только излучением других тел — равновесным.

Интенсивность теплового излучения тела зависит не только от его температуры, оно зависит так же от формы тела, состояния его поверхности и химического состава. Очевидно, что если тело получает энергию только за счет излучения других тел, то чем больше оно ее получает, тем больше и излучает при постоянной температуре.

Отношение потока энергии, поглощенной телом, к потоку полученной энергии называют коэффициентом поглощения или поглощательной способностью:

$$A = \frac{\Phi_{\text{погл}}}{\Phi_{\text{пол}}}.$$

Отношение потока энергии, отраженной телом, к потоку полученной энергии называют коэффициентом отражения или отражательной способностью:

$$R = \frac{\Phi_{\text{отр}}}{\Phi_{\text{пол}}}.$$

Аналогично определяют коэффициент пропускания, или пропускательную способность:

$$D = \frac{\Phi_{\text{проп}}}{\Phi_{\text{пол}}}.$$

Все три эти коэффициента — правильные дроби. Очевидно, что:

$$A + R + D = 1.$$

Выше сказано, что больше энергии излучает то тело, которое больше ее поглощает.

Тело, которое поглощает все излучение, падающее на него, называют абсолютно черным. У него: $A = 1$; $R = 0$; $D = 0$.

Так как абсолютно черное тело поглощает больше всех других тел, то оно и излучает больше их. В природе можно встретить почти абсолютно черные тела. Примером может служить зрачок глаза, нефтяная копоть, уголь, черный бархат. Абсолютно черное тело можно изготовить искусственно. Чаще всего его изготавливают в виде замкнутой полости, черной внутри с небольшим отверстием. Отверстие как раз и является абсолютно черным

телом (рис. 48а). Если такое тело накалил в печи до свечения, то его отверстие светит ярче стенок, чем подтверждается положение об излучении абсолютно черного тела. Солнце обычно принимают за абсолютно черное тело с температурой излучения $T \approx 5785^\circ \text{K}$.

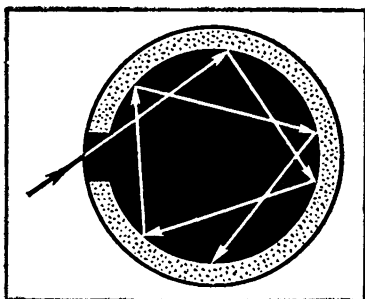


Рис. 48а. Модель абсолютно черного тела.

Установлено, что у абсолютно черного тела излучательная способность $[\epsilon]$ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры (закон Стефана — Больцмана): $\epsilon = \sigma T^4$, где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град}^4)$.

В сказанном выше убеждают нас и некоторые наблюдения и простые опыты.

Если ранней весной, когда начинает таять снег, посыпать нетолстым слоем золы или сажи небольшой участок снега на солнечном месте, то можно убедиться, что грязный снег тает быстрее, так как он больше поглощает энергии.

Пронаблюдайте за свечением раскаленных углей в печке. Бросьте на угли белый фаянсовый черепок и посмотрите, что ярче светит, угли или черепок. Бросьте в печь черепок с темными узорами и наблюдайте за его свечением. Вы придете к выводу, что черное тело излучает больше энергии, чем белое при той же температуре.

ВИДИМОЕ И НЕВИДИМОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Однако не все излучение тела приходится на долю видимого света — только незначительная его часть, лежащая в области длин волн между 400 и 760 нм, видима. Остальное приходится на долю невидимых инфракрасных ($\lambda = 760 \text{ нм} \div 1 \text{ мм}$ и более), а также на долю ультрафиолетовых ($\lambda = 400 \div 10 \text{ нм}$ и менее) длин волн. Группа кривых распределения энергии, излучаемой абсолютно черным телом в зависимости от температуры, показана на рисунке 48б. Кривые построены так, что площадь, заключенная между каждой кривой и осью абсцисс, пропорцио-

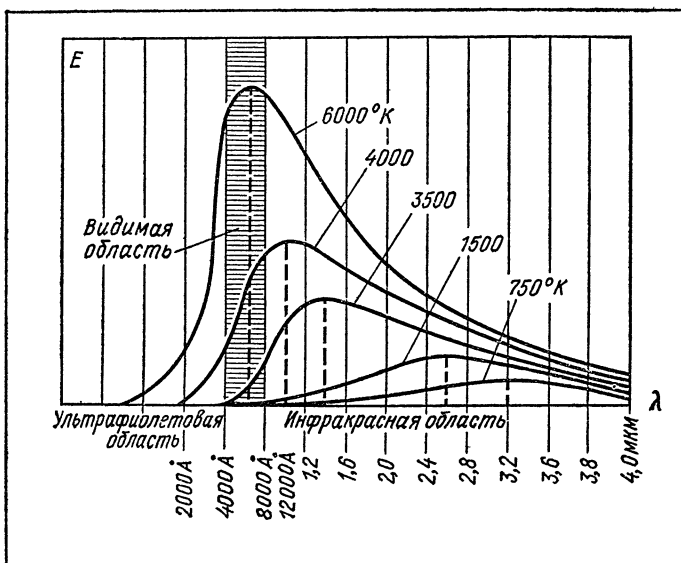


Рис. 48б. Кривые распределения энергии в спектре абсолютно черного тела, получаемого при разных температурах.

нальна всей энергии, излучаемой единицей поверхности черного тела в единицу времени (его светимости), при данной температуре. Из рисунка видно, что с увеличением температуры не только растет эта площадь, т. е. увеличивается общее количество излучаемой энергии, но и максимум излучения перемещается влево, т. е. в сторону более коротких длин волн (закон Вина).

Интересно отметить, что середина видимого спектра, соответствующая длине волны $\lambda = 550 \text{ нм}$, наиболее легко воспринимаемая глазом, совпадает с максимумом излучения при температуре 5500°K . Эта температура близка к температуре поверхности Солнца.

СПЕКТРЫ

Как уже говорилось в предыдущих главах, свет, излучаемый каким-либо источником, может быть при помощи призмы или дифракционной решетки разложен в спектр — это спектр излучения, или испускания. Вид спектра зависит от природы излучающего вещества, его

физического состояния и способа возбуждения излучающих атомов. Так, одноатомные газы и пары, находящиеся в разреженном состоянии, когда атомы не действуют друг на друга, при возбуждении электрическим током излучают наиболее простые линейчатые спектры. Такие же спектры излучают раскаленные пары металлов.

Более сложные атомы и молекулы, будучи возбуждены электрическим током, дают полосатые спектры.

Раскаленные твердые и жидкие тела и сильно сжатые газы дают сплошные спектры. На цветной вклейке IV показаны линейчатые спектры натрия и водорода, дан сплошной спектр.

Если на пути света, дающего сплошной спектр, находится вещества, способные поглощать некоторые волны, то на фоне сплошного спектра мы видим темные, более или менее широкие полосы — это спектры поглощения. Во многих случаях тела поглощают именно те длины волны, которые они сами способны излучать при данной температуре. Спектры поглощения Солнца и натрия изображены на цветной вклейке IV. Там же показано образование спектра на скошенном краю зеркала. Цветной пучок лучей падает на стенку или потолок в виде так называемого цветного зайчика. Подобное явление наблюдается на хрустальных подвесках люстр.

ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ И ИЗЛУЧЕНИЕ

Пропустите луч света через цветное стекло, например красное. Оно поглотит все цвета спектра за исключением красного. Зеленое стекло пропустит зеленый свет и т. д. Эти вещества обладают избирательным поглощением и избирательной прозрачностью. А какой же свет излучает красное или зеленое стекло?

Цвет их излучения зависит от температуры. При комнатной температуре тела излучают только инфракрасные лучи. Видимое излучение начинается только при температуре около 400°C . Но даже при этой температуре максимум излучения находится в темно-красной области. Так что тело не обязательно излучает те же длины волн, которые оно поглощает при данной температуре. Для того, чтобы оно излучало видимый свет, его нужно нагреть до высокой температуры.

Посмотрите на яркий ковер луга, на пестрый цветник, на разноцветные платья. Почему же они цветные? Может быть, они излучают свет различного цвета? Нет. В темноте они не видны, значит, они светят не своим светом, а отраженным. Краски и некоторые вещества органического происхождения в цветах растений обладают избирательным отражением и поглощением. Например, красная краска поглощает все цвета за исключением красного, который она рассеивает.

Прodelайте следующий опыт. На цветной вклейке VII изображены контуры двух собак — один сделан красной краской, другой зеленой. Осветите рисунок белым светом и рассматривайте его сначала через красное, а затем через зеленое стекло. Зеленые лучи, отраженные от контура зеленого цвета, поглощаются красным стеклом и этот контур будет казаться черным. Красные же лучи от красного контура, а также красные лучи от белого фона воспримутся глазом как красный фон, и красный контур окажется почти невидимым.

Если смотреть на чертеж через зеленое стекло, красная собака будет видна в черном цвете, а зеленая исчезнет. Опыт можно видоизменить — освещать рисунок попеременно красным, а затем зеленым светом. При освещении красным светом бумага окрашивается в красный цвет и красный рисунок исчезает на красном фоне. Зато зеленый рисунок виден отчетливо, причем он кажется нам черным. При освещении зеленым светом, наоборот, красный рисунок нам кажется черным, а зеленый исчезает.

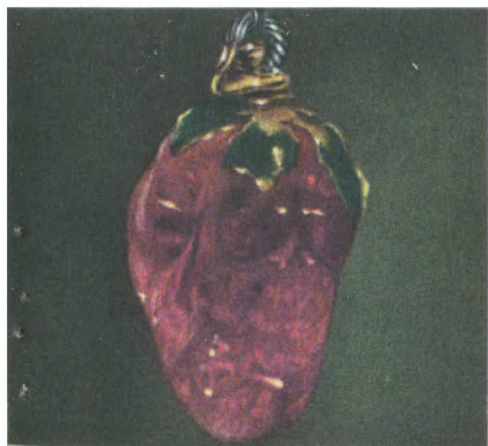
ПОЧЕМУ ЛЕТОМ ТЕПЛО, А ЗИМОЙ ХОЛОДНО?

Некоторые думают, что летом теплее потому, что Земля в это время находится ближе к Солнцу. Это неверно. Когда в северном полушарии зима, Земля ближе к Солнцу и движется быстрее, а летом дальше и движется медленнее. (Вспомните законы Кеплера.) По этой-то причине зима в северном полушарии на три дня короче лета. Это нетрудно проверить по календарю: астрономическое лето длится с 23 июня по 22 сентября — 92 дня, а зима — с 23 декабря по 22 марта — 89 дней.



▲
Алмазы «Мария» (крупный)
и «Мир» (мелкие).

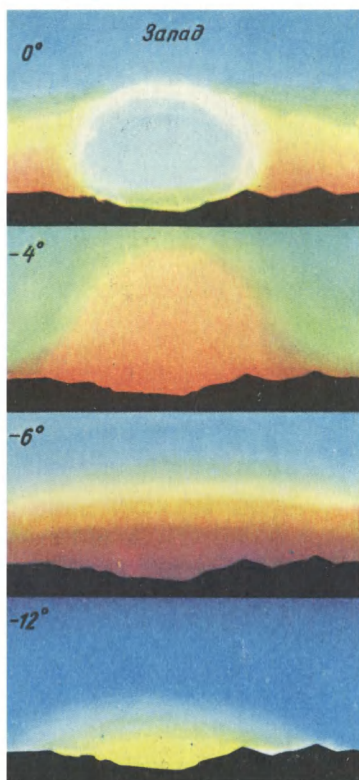
◀ Алмаз «Орлов»



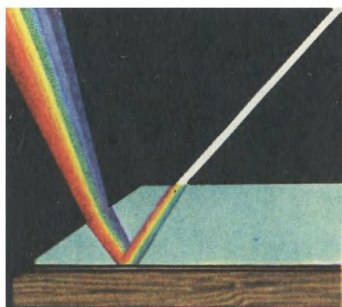
◀ Розовый шерл.

Алмаз «Шах».

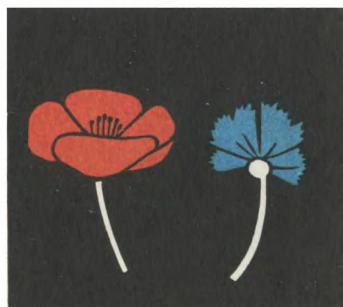




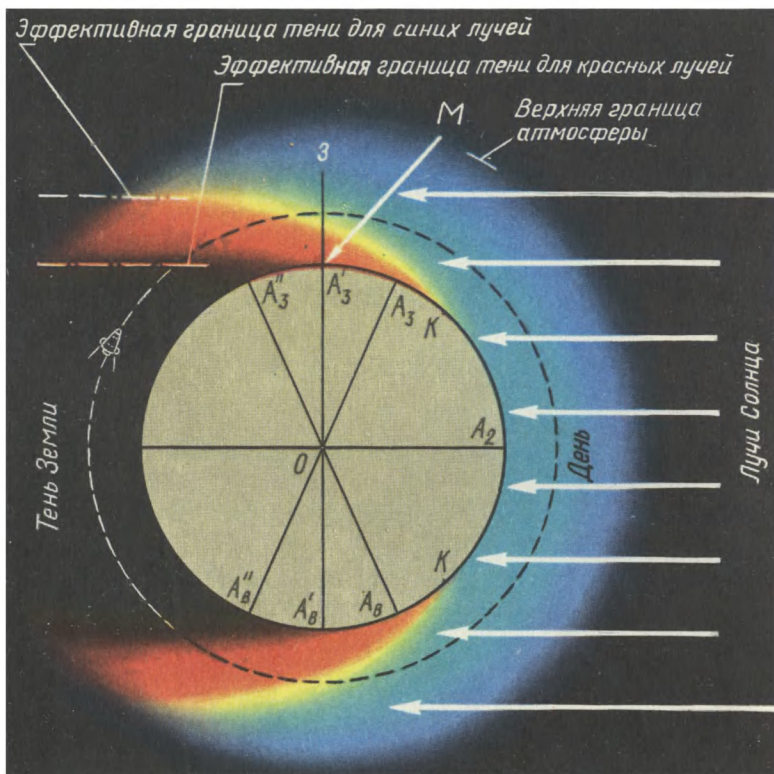
Цвета неба во время заката при ясном небе
(цифры сбоку указывают высоту Солнца над горизонтом,
а знак минус — глубину под горизонтом).



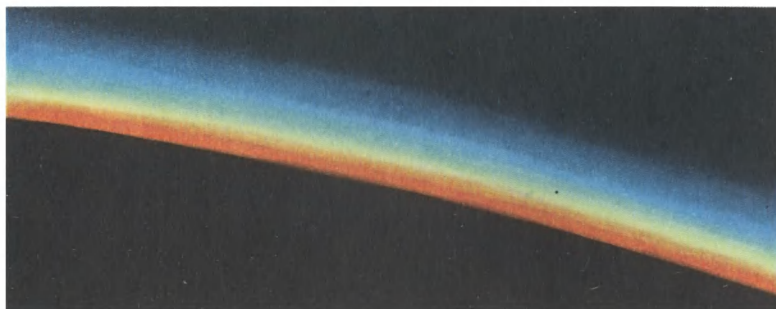
Образование цветного солнечного «зайчика». Луч света падает на зеркало, преломляется и выходит из его скошенного края.



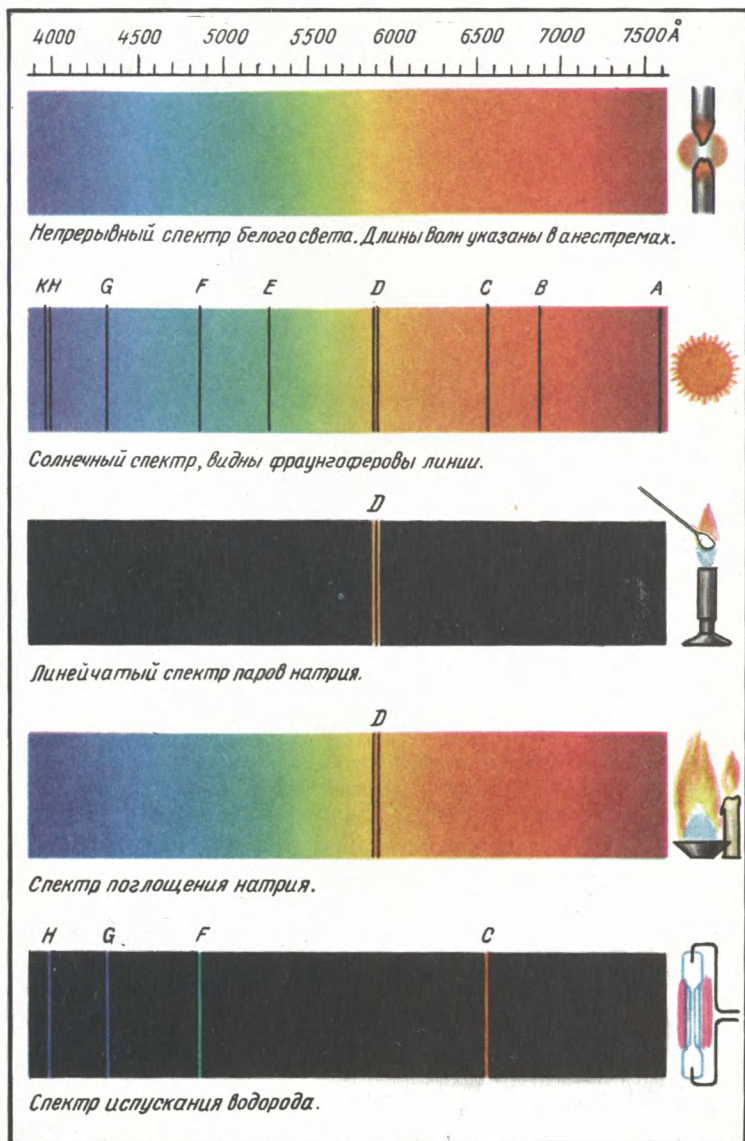
Эффект Пуркинье:
красный цветок лучше виден
на свету, синий — в тени.



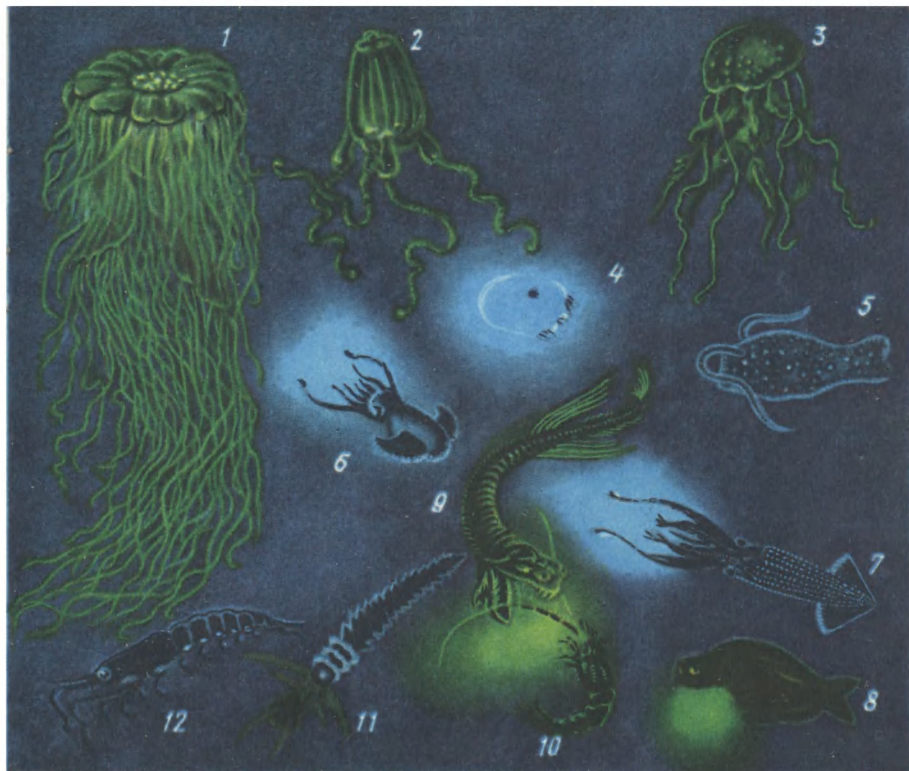
Распределение солнечного света вокруг Земли. Точки A'_B и A'_Z соответствуют положению наблюдателя в момент восхода и заката солнца; точки A''_B и A''_Z — положению за час до восхода и через час после заката; точки A_B и A_Z — через час после восхода и за час до заката.



Так выглядела заря с орбиты космического корабля «Восток-2».



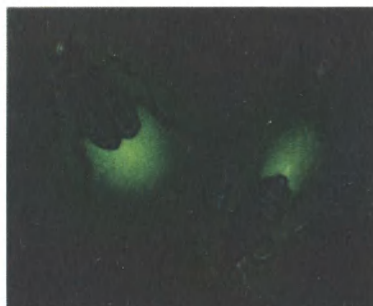
Спектры (справа изображены источники излучения).



Светящиеся обитатели моря: 1, 2, 3 — медузы; 4 — ракушковый рачок; 5 — голожаберный моллюск филлирое; 6 — каракатица; 7 — кальмар-светлячок; 8 — рыба аномалопс; 9, 10 — креветка нотостомус, защищающаяся от рыбы световой завесой; 11 — многощетинковый червь трубкожил; 12 — рачок капшак.



Одноклеточные: 1 — жгутиконосец перидиниум; 2, 3 — лучевики.



Жуки-светляки.



Круг Ньютона для сложения цветов.

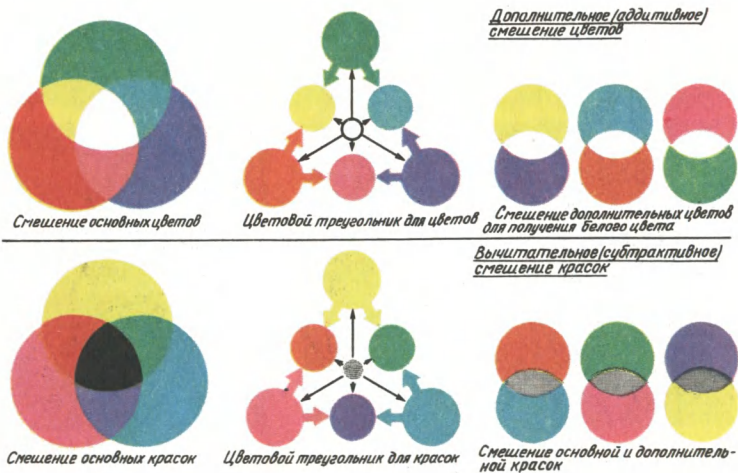
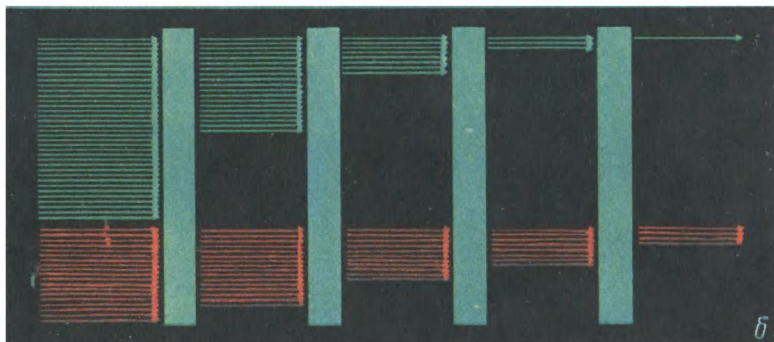
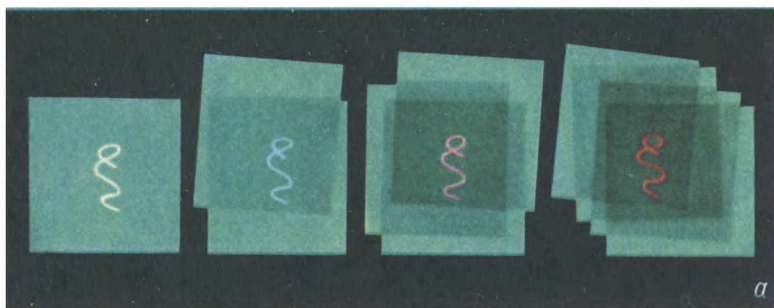


Схема смешения цветов и красок.

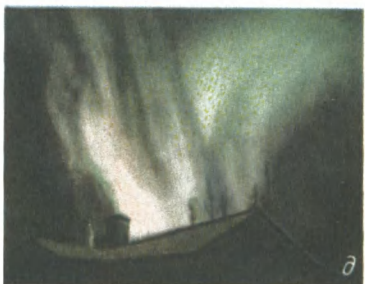
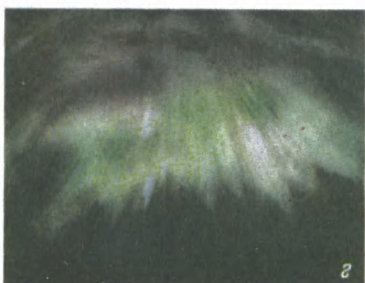


а) Схема помогает объяснить изменение цвета нити лампы накаливания при увеличении числа зеленых стекол.

б) Интенсивность лучей пропорциональна числу стрелок. После прохождения каждого стекла число зеленых стрелок уменьшается в три раза, красных — в два раза. Поэтому после прохождения четырех стекол будут преобладать красные лучи.

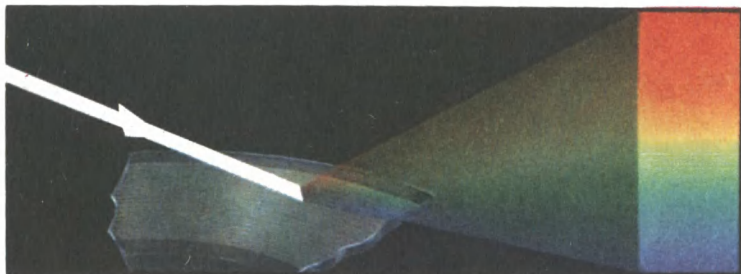


Цветные изображения для наблюдения в зеленом и красном свете. Кольца Ньютона в зеленом и красном свете, полученные при помощи одной и той же линзы.



Полярные сияния:

- а) Спокойная диффузная дуга б) Аналогичная дуга со значительным усилением розового свечения. в) и г) Лучистые полосы. е) Складчатые полосы.



Получение дифракционного спектра при помощи куска патефонной пластинки.

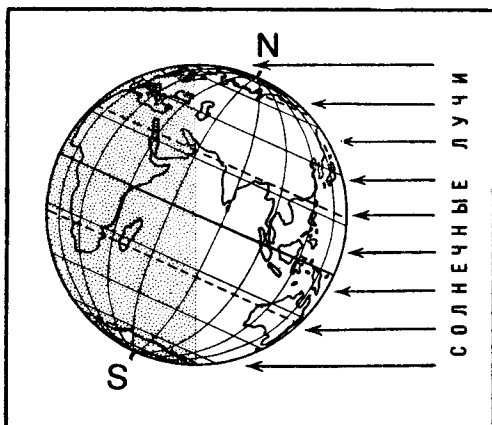


Рис. 49. Падение солнечных лучей на Землю.

Причиной различия температуры летом и зимой является не расстояние, а наклон земной оси (рис. 49). Летом Земля расположена так, что угол падения солнечных лучей на ее поверхность меньше, чем зимой, а вследствие этого больше освещенность (E) земной поверхности, так как $E = E_0 \cos \alpha$, где E_0 — освещенность поверхности при нормальном падении лучей. Следовательно, в этом случае больше энергии солнечного излучения приходится на единицу поверхности Земли в единицу времени (рис. 50).

Различие температуры утром, днем и вечером также зависит от угла падения солнечных лучей. Надо только учесть, что атмосфера и облака, поглощая и рассеивая

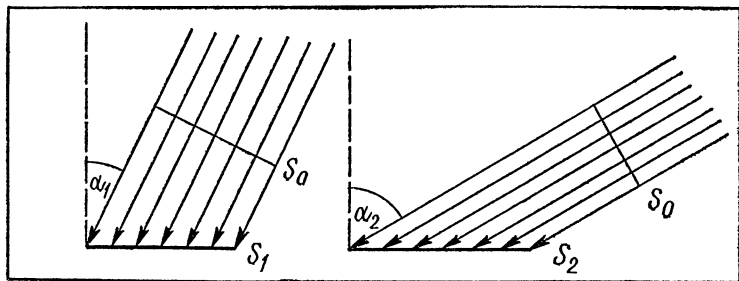


Рис. 50. Зависимость освещенности поверхности от угла падения.

солнечную энергию, особенно в фиолетовой и ультрафиолетовой области, значительно ослабляют прямое действие солнечных лучей. Кроме того, воздух, вода, горы, земля и предметы, находящиеся на ней, «запасают» в жаркие часы дня теплоту и отдают ее вечером и ночью, смягчая при этом переход от дня к ночи и наоборот.

На Луне, где нет атмосферы, переход от невыносимой жары (около $+180^{\circ}\text{C}$) на солнце к жестокому холоду (около -120°C) в тени очень резок.

ТЕМПЕРАТУРА НА СОЛНЦЕПЕКЕ И ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ

1. Часто говорят: «Как жарко сегодня, в тени 30 градусов по Цельсию, а «на солнце» еще больше ...» А сколько же «на солнце» (точнее, на солнцепеке)? Оказывается, что на этот вопрос нельзя ответить, так как различные термометры, дающие одинаковые показания в тени, дадут различные показания на солнцепеке. Термометр всегда показывает свою температуру. В тени его температура равна температуре воздуха. А «на солнце»? «На солнце» его температура зависит не только от температуры воздуха, но и от цвета термометра, и в первую очередь «шарика» с ртутью или спиртом. В этом можно убедиться, если, отсчитав показания термометра на солнцепеке, закоптить слегка его резервуар с жидкостью и опять отсчитать его показания в тех же условиях.

2. *Парниковый эффект.* Всем известно, что под стеклом «на солнце» теплее, чем в окружающем воздухе. Это так называемый парниковый эффект. Им пользуются для выращивания теплолюбивых растений ранней весной, когда воздух еще холоден.

В чем же дело? Почему под стеклом, в закрытом парнике, температура поднимается до $40 - 50^{\circ}\text{C}$, в то время как температура окружающего воздуха $10 - 15^{\circ}\text{C}$?

Световые лучи проникают сквозь стекло, нагревают в парнике землю и другие предметы, которые их поглощают. В свою очередь эти нагретые тела излучают тепловые невидимые лучи, которые не проходят сквозь стекло наружу и нагревают воздух в парнике. Кроме того, воздух нагревается от соприкосновения с нагретыми светом непрозрачными телами.

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ

Огонек горит светлее,
Горбунок бежит скорее,
Вот уж он перед огнем.
Светит поле, словно днем;
Чудный свет кругом струится,

Но не греет, не дымится.
Диву дался тут Иван.
Что, сказал он, за шайтан!
Шапок с пять найдется свету,
А тепла и дыму нету;
Эко чудо-огонек!

(П. П. Ершов)

НАБЛЮДЕНИЯ ЯВЛЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Бывая вечером в лесу, вы, наверное, обращали внимание на возникший вдруг перед вами зеленоватый свет. Это... свет гнилушки. Полугнилой осиновый или березовый пенёк излучает зеленовато-голубоватое слабое свечение. Подойдите поближе, толкните пенёк ногой. Он рассыпается множеством мелких осколков, светящихся в траве. Звезды на Земле!

Это свечение носит название хемилюминесценции. Оно вызвано химическими реакциями окисления фосфора в клетках растений. Хемилюминесценция — один из видов люминесценции — холодного свечения.

Сухие листья березы и дуба, полежавшие толстым слоем и полусгнившие, также излучают свет.

Излучают холодный свет и некоторые насекомые. Их так и называют — светлячками.

В средней полосе СССР распространен большой светляк; его бескрылую самку обычно называют ивановым червяком. На юге встречается мелкий светлячок, а на Черноморском побережье Кавказа — южный светляк, у которого светится летающий самец (см. цветную вклейку V). Свет излучают последние два сегмента брюшка вследствие хемилюминесценции.

После жаркого дня в летние вечера можно видеть великолепное свечение моря. Виновниками свечения являются миллионы ночесветок — простейших существ, принадлежащих к классу жгутиковых и имеющих размеры около 0,2 мм.

Однако светятся не только микроорганизмы и одноклеточные. Светящиеся органы имеют многие более высокоорганизованные животные, особенно морские: рыбы, моллюски, черви, рачки. Одним свет служит для защиты, другим — для нападения, третьи пользуются им

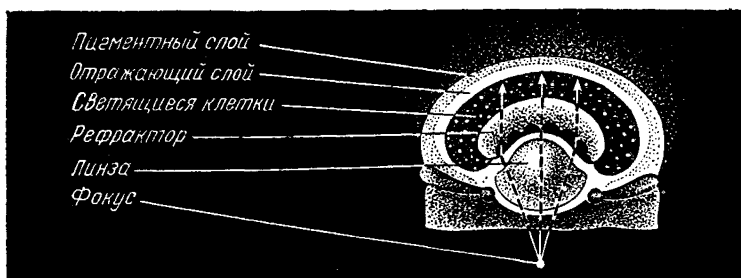


Рис. 51. Фотофора — светящийся орган рыбы поктифанес.

в брачную пору для привлечения или опознания представителей своего биологического вида. Некоторые организмы светятся круглосуточно, некоторые только ночью, у иных яркие вспышки свечения происходят через определенные промежутки времени и сменяются или полным отсутствием свечения, или очень слабым свечением.

На цветной вклейке V изображены светящиеся одноклеточные и морские животные и рыбы, имеющие органы свечения. Рисунок 51 показывает в разрезе светящийся орган зрения рыбы. Он содержит все части совершенного излучателя: источник света, рефлектор, линзу.

Живой свет всегда является результатом окисления. При этом возбуждаются молекулы. Электроны в них переходят с более высоких энергетических уровней на более низкие уровни, излучают фотоны — порции света. Окисляется сложное белковое вещество — люциферин под воздействием тоже белкового вещества — люциферазы¹.

Для окисления должен подаваться кислород. У некоторых организмов окисление происходит за счет связанного кислорода, однако большинство видов светится за счет свободного кислорода. Люцифераза является не только ускорителем реакции, но и поставщиком молекул, которые могут возбудиться энергией, освобожденной при окислении люциферина.

Надо отметить, что свет биолюминесценции очень хорошо воспринимается глазом, так как длина волны его близка к длине волны, к которой глаз наиболее чувствителен ($\lambda \approx 550$ мкм).

¹ «Люцифер» — носитель света, «люкс» — свет, «форо» — несущий.

Установлено, что живые организмы излучают не только видимый свет, но и ультрафиолетовые и инфракрасные лучи.

Живые источники света имеют очень высокую световую отдачу, достигающую 90%.

Наряду с явлением хемилюминесценции встречаются явления турболюминесценции (свечение от удара) и электролюминесценции.

Турболюминесценцию можно наблюдать при раскалывании кусков сахара молотком или тупой стороной ножа, при разрывании изоляционной ленты.

Электролюминесценция знакома нам по ярким лампам цветной рекламы, по освещающим улицы городов ртутным лампам высокого давления, дающим яркий зеленоватый свет, по свечению экрана телевизора.

Необходимо отметить интересный факт. Свет сам может вызывать свечение ряда веществ. Это явление называют фотолуминесценцией. Оно используется в лампах дневного света. Ртутный разряд в лампе излучает плохо видимый свет, богатый фиолетовыми и ультрафиолетовыми лучами, сам по себе непригодный для освещения. Но он возбуждает свечение порошка люминофора (фосфора), которым покрыты изнутри стенки лампы. Фосфоры подбирают так, чтобы они давали спектральный состав света, близкий к дневному.

Явление фотолуминесценции можно наблюдать, налив в бутылку керосин или трансформаторное масло и осветив ее белым светом. Если посмотреть «на просвет», керосин кажется чуть желтоватым, а масло почти не пропускает света. Но если смотреть на бутылку со стороны падающего света, то можно увидеть характерное несильное зеленоватое свечение фотолуминесценции, излучаемое веществом.

При освещении белым светом раствор флуоресцина, часто применяемый для физических опытов, дает зеленое свечение. При освещении светом ртутно-кварцевой лампы ¹

¹ Ртутно-кварцевая лампа дает свет, богатый ультрафиолетом. Источником ультрафиолетового излучения является газовый разряд в парах ртути. Колбу лампы изготавливают из кварца, который пропускает ультрафиолет, в то время как стекло его поглощает. Если лампу прикрыть специальным (увиолевым) черным стеклом, пропускающим ультрафиолет, но не пропускающим видимые лучи, то она становится источником ультрафиолетового невидимого излучения.

ярко люминесцируют: стрептоцид и его эмульсия — оранжевым, тетрациклин — ярко-оранжевым, хлорацин — ярко-желтым, анестезин — сиреневатым, диуретин — ярко-фиолетовым светом.

Белки глаз и зубы ярко светятся в темноте белым, чуть-чуть голубоватым светом.

В последнее время все больше стали применять светящиеся краски. Это краски с примесью люминофоров, излучающие цвета соответствующей окраски при облучении ультрафиолетом.

При дневном или искусственном свете видны обыкновенные краски. Если картину подсветить ртутно-кварцевой лампой, затененной увиолевым стеклом, то ультрафиолетовое излучение вызовет свечение люминофоров, картина начинает сиять насыщенным светом люминесценции. Эти краски очень эффектны в театральных декорациях.

Свечение люминофоров возникает также при облучении их частицами, выделяющимися при распаде радиоактивных веществ (α -, β - и γ -лучами), а также протонами, нейтронами и т. п. На этом свойстве люминофоров основано устройство целого ряда контрольных, измерительных и обнаруживающих приборов в радиологии ¹.

ОБЪЯСНЕНИЕ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ

Рассмотренные выше примеры показывают, что люминесценция по своей природе существенно отличается от теплового излучения. Первое отличие состоит в том, что она происходит при низкой температуре. Если бы излучение люминесценции было тепловым, то для испускания, например, зеленого света температура тела должна была бы быть порядка 5700°K. Люминофоры же обладают температурой окружающих тел (порядка 300°K). При этом они излучают, конечно, как нагретые тела соответствующей (низкой) температуры, невидимые инфракрасные лучи (максимум излучения приходится на $\lambda_m \approx 9700$ нм (см. стр. 62). Следовательно, излучение люминесценции является избыточным, происходящим сверх температурного. Его спектр в большинстве случаев линейчатый или полосатый, откуда можно сделать

¹ Радиология — наука, занимающаяся изучением радиоактивных веществ и продуктов их распада.

вывод, что это излучение отдельных атомов или молекул. Возбудители люминесценции возбуждают отдельные атомы или молекулы, передавая им запас энергии, которая переводит некоторые электроны атомов на более высокие энергетические уровни. Переходя затем на более низкие, устойчивые уровни, атомы излучают избыточную энергию в виде света.

Вторая особенность излучения люминесценции состоит в его инертности. Высвечивание люминофоров после прекращения действия возбудителя происходит в течение некоторого, иногда продолжительного времени.

Третьей особенностью является его локальность. Высвечивают те точки люминофора, которые оказались возбужденными, возбуждение не распространяется на соседние частицы и тела, как это происходит при тепловом излучении.

Все эти особенности свойственны и фотолюминесценции, но основная особенность фотолюминесценции состоит в том, что ее излучение смещено в красную сторону спектра и имеет более длинную волну по сравнению со светом, ее возбуждающим (закон Стокса). Это явление легко объясняется на основе квантовой теории излучения света.

Напомним, что квант (порция) энергии фотона (частицы света) $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$. Пусть на атом или молекулу люминофора падает фотон с энергией $\varepsilon_1 = \frac{hc}{\lambda_1}$. Вся эта энергия поглощается молекулой и возбуждает ее. Часть энергии (A) остается в молекуле и идет на ее нагревание, а остальная энергия $\frac{hc}{\lambda_2} = \frac{hc}{\lambda_1} - A$ излучается.

Отсюда видно, что $\frac{hc}{\lambda_2} < \frac{hc}{\lambda_1}$, т. е. $\lambda_2 > \lambda_1$. Могут быть случаи, когда часть энергии (A), запасенной в молекулах некоторых люминофоров, может присоединиться к следующему кванту, излучаемому молекулой. При этом энергия излученного кванта окажется больше энергии возбуждающего:

$$\frac{hc}{\lambda_1} + A = \frac{hc}{\lambda_3}.$$

Отсюда следует, что $\lambda_3 < \lambda_1$, т. е. волна излученного кванта короче волны возбудителя.

ГЛАЗА ЖИВОТНЫХ НОЧЬЮ

Все мы видели свечение кошачьих глаз в полутемноте. Ярко светят ночью глаза собак, волков, овец, лошадей, но глаз человека не обладает этим свойством. В полной темноте свечение глаз не видно.

Многие думают, что это явление вызвано особым светящимся веществом, покрывающим радужную оболочку глаз.

Это неверно. Глаза кошки не излучают, а направленно отражают свет. Во мраке целевидные зрачки глаза животного расширяются для пропускания внутрь возможно большего потока света. Свет проникает сквозь роговицу и хрусталик, создавая на дне глаза четкое изображение источника. Свет, отраженный от сетчатки, по выходе из глаза распространяется узким пучком. Если указанный пучок попадает в глаз наблюдателя, ему кажется, что свет излучается из глаза животного. Чтобы явление выступало более отчетливо, оптические оси глаз животного и наблюдателя должны совпадать. Этого можно достигнуть, держа лампу на уровне глаз наблюдателя: свечение кошачьих глаз заметно тогда на расстоянии до 80 м.

ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОГЛОЩЕНИЕМ И РАССЕЯНИЕМ СВЕТА

Мы любим голубым цветом неба, румяной зарей и пылающим всеми цветами спектра закатом. А чем объяснить эти явления? Почему днем над нами купол неба иссиня-голубой в зените и белесый над горизонтом? Приходит вечер, и цвет неба на западе становится красным, а в зените и на востоке — темно-или серо-фиолетовым. Солнце зашло, но еще долго сияет небо, постепенно наступает мрак, приходит ночь. Почему голубое небо «вспыхивает» пламенем разноцветной зари? Почему облака белые, тучи черные, а туман серый?

Посмотрите на столб нежного дыма, поднимающегося из трубы дома, особенно ранним утром, когда нет ветра и солнце стоит низко. Часть его видна на фоне темного леса или построек города, она прозрачно-голубая. Верхняя же его часть, пронизанная лучами восходящего солнца, кажется нежно-розовой. Почему это так?

Из заводской трубы поднимаются черные клубы дыма. А вот дым, идущий из трубы паровоза, белый. Почему?

Почему раковины и жемчуг сияют белым переливчатым светом опалесценции ¹?

Наконец, почему стоп-сигналы делают красного цвета?

Все эти явления имеют общее происхождение, все они связаны с рассеянием и поглощением света.

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА

Возьмите кусочки цветного стекла и посмотрите сквозь них на белый свет. Вы еще раз убедитесь, что это стекло поглощает одни лучи и пропускает другие. Например, сквозь зеленое стекло проходит зеленый свет, остальные участки спектра оно поглощает. Красное стекло пропускает красный свет, а зеленый и другие цвета поглощает. Если эти стекла сложить вместе, то они почти не пропускают свет, так как весь спектр оказывается поглощенным тем или другим стеклом.

Поглощение света — это еще один из видов взаимодействия света с веществом, через которое проходят световые волны.

В 1729 г. Бугер установил, что интенсивность света при прохождении через вещество уменьшается в геометрической прогрессии.

Математически эту зависимость (закон Бугера) можно выразить формулой

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

где I_0 — интенсивность света в начале пути (при $x = 0$), а I — интенсивность света в конце пути x в веществе, e — основание натуральных логарифмов, α — показатель (или коэффициент) поглощения, величина которого очень сильно зависит от рода вещества, а для данного вещества может зависеть и от длины волны света. Так, черные и непрозрачные для света среды, т. е. сильно поглощающие свет, обладают большим показателем поглощения. В этих средах интенсивность света падает до нуля в слое, толщина которого не превышает нескольких сотых или даже тысячных долей миллиметра. Есть вещества, для которых α мало ($\alpha \rightarrow 0$) независимо от длины волны. Это прозрачные вещества, такие, как стекло, вода, воздух

¹ Опалесценция — явление рассеяния света мутной средой (например, раковиной, жемчугом).

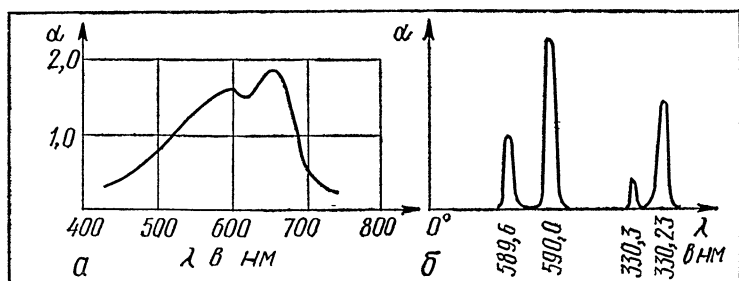


Рис. 52. Зависимость коэффициента поглощения света от длины волны: *а* — широкая полоса поглощения; *б* — узкие полосы поглощения парами натрия.

и т. п. Для безвоздушного пространства $\alpha = 0$. Для газов $\alpha \approx 0$. Поэтому мы имеем возможность видеть звезды, отстоящие от нас на миллионы световых лет. Существуют вещества, обладающие избирательным поглощением. Характер этой зависимости самый разнообразный и зависит от рода вещества. Одни вещества поглощают широкие полосы спектра, другие — узкие полосы, соответствующие узкому диапазону волн. Зависимость α от λ может быть выражена графически. На рисунке 52 для примера приведены кривые зависимости показателя поглощения α от длины волны для мутной среды (*а*) и для паров натрия (*б*).

С. И. Вавилов установил, что показатель поглощения α практически не зависит от интенсивности света.

Закон Бугера применим к жидким растворам и газам. Для растворов показатель поглощения пропорционален концентрации раствора (c^1): $\alpha = Ac$. Здесь A — коэффициент, зависящий от рода раствора, а также от длины волны. Это очень полезная для практики особенность, так как, сравнивая интенсивности света, прошедшего одинаковую толщину растворов разной концентрации одного и того же вещества, можно установить концентрацию (c) вещества в этих растворах.

¹ Концентрацией раствора (c) называют отношение массы растворенного вещества (m_1) к массе раствора ($m_1 + m_2$):

$$c = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \text{ где } m_2 \text{ — масса растворителя.}$$

В том случае, когда раствор имеет окраску, по интенсивности его окраски можно измерить концентрацию раствора. Этот метод получил название колориметрического (от слова *color* — цвет).

Заготовьте несколько пластинок зеленого стекла достаточно густой окраски и попробуйте рассматривать сквозь них раскаленную нить лампы накаливания, накладывая одну пластинку на другую. При малой толщине стекла нить будет казаться зеленой, при достаточной толщине стекла она покажется красной.

Этот опыт наглядно демонстрирует зависимость показателя поглощения света от длины волны. Для зеленых лучей он больше, для красных — меньше.

На цветной вклейке VII это показано наглядно. Интенсивность лучей пропорциональна числу стрелок. После прохождения каждого стекла число зеленых стрелок уменьшается в три раза, а красных — в два раза. Поэтому, несмотря на преобладание зеленых лучей вначале, после прохождения четырех стекол будут преобладать красные лучи.

РАССЕЯНИЕ СВЕТА

Проделайте несложный опыт. Возьмите стеклянную ванну *A* (рис. 53). Заполните ее чистой водой. Сквозь прорезь *B* в картонной ширме *C* пропустите яркий пучок света *BD* от сильной лампы *S*.

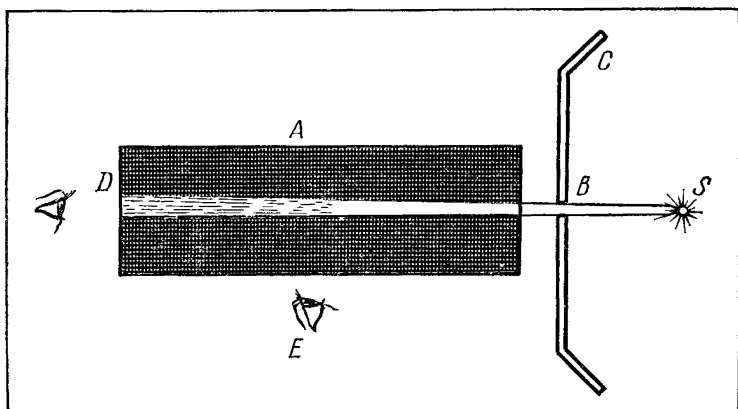


Рис. 53. Рассеяние света в ванне с мутной водой.

Если вода достаточно чистая, то световой луч в ней почти невидим, а на противоположной стороне ванны в точке D видно яркое световое пятно. Налейте в воду немного молока или несколько капель одеколона. Вода станет мутной, и пучок света BD в ней резко обозначится, причем вся жидкость в ванне станет излучать рассеянный свет по всем направлениям (это особенно хорошо видно, если смотреть на ванну из точки E в направлении, перпендикулярном направлению распространения луча). Обратите внимание на цвет и интенсивность луча, прошедшего сквозь мутную жидкость (в точке D). Он стал красноватым и более тусклым. Рассеянный же свет имеет голубоватую окраску. Что произошло? Очевидно, что часть света рассеялась мутной жидкостью, причем больше всего рассеялись голубые и синие лучи, меньше — красные. Они лучше проходят сквозь мутную среду. Проведите тот же опыт с двумя изменениями.

В воду доливайте не молоко, а меловую суспензию (взвесь мела в воде). Обратите внимание на то, как будет вести себя луч света в точке D . Как изменится его окраска? Какого цвета рассеянный свет? Вы, видимо, догадались, что частицы мела, рассеивающие свет, имеют большие размеры, чем частицы молока. В этом случае интенсивность рассеянного света будет меньше зависеть от длины волны — все волны рассеиваются почти одинаково.

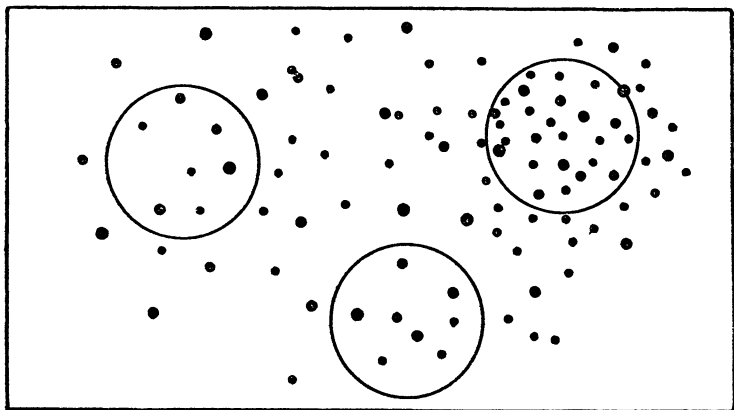


Рис. 54. Хаотическое движение частиц газа приводит к неравномерностям в распределении их по объему — флуктуациям плотности.

Теперь проследите, как будут изменяться интенсивность и окраска проходящего и рассеянного света, если в сосуд долить туши или черной краски. Частицы черной краски тоже рассеивают свет. Но почему же сейчас интенсивность рассеянного света стала меньше? Что происходит со светом, рассеянным частицами туши, находящимися внутри жидкости?

Постепенно доливайте тушь в сосуд *A*. Вскоре светлое пятно в точке *D* исчезнет, и, если убрать экран *C*, светлая ранее стенка *D* на фоне более яркого света покажется совсем темной.

Частицы туши не только рассеивают свет, они его поглощают. Свет, рассеянный одними частицами, поглощается другими и не выходит наружу.

В чем же причины рассеяния?

Рассеянием света называют отклонение световых лучей во все стороны от первоначального направления. Оно возникает в тех случаях, когда среда, в которой распространяется свет, является оптически неоднородной. Неоднородности могут возникнуть по разным причинам: и вследствие внесения в прозрачную среду частиц прозрачного же вещества, но обладающего другим показателем преломления; и вследствие внесения непрозрачных частиц, отражающих и поглощающих свет (пыль, муть и т. п.); и вследствие образования в прозрачной жидкой или газообразной среде пузырьков пара. Неоднородности могут возникнуть и внутри твердого прозрачного вещества при его отвердевании или кристаллизации, а также внутри однородной жидкой или газообразной среды вследствие хаотического движения ее молекул — флуктуации плотности (рис. 54).

Теория рассеяния света начала создаваться в прошлом столетии. Первые попытки качественного объяснения этого явления принадлежат английскому физiku Тиндалю. Он эксперименталь-

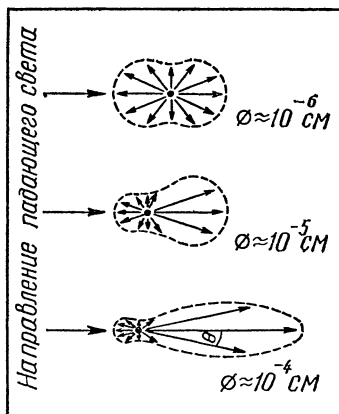


Рис. 55. Индикатрисы рассеяния света частицами разного диаметра.

но установил, что интенсивность рассеянного света, т. е. энергия света, рассеянного в единицу времени с единицы объема мутной среды, обратно пропорциональна четвертой степени длины волны и зависит от рода рассеивающего вещества.

В дальнейшем Д. Релей в 1881 г. показал, что рассеяние света зависит от размера частиц. Малые частицы, размеры которых не превышают 0,1 длины волны, рассеивают свет примерно одинаково по всем направлениям, и интенсивность его обратно пропорциональна четвертой степени длины волны, как на это указал Тиндаль. По мере увеличения размеров рассеивающих частиц интенсивность рассеяния все меньше начинает зависеть от длины волны: она становится обратно пропорциональной третьей ее степени, а затем и второй степени длины волны. При этом все большее количество света начинает устремляться вперед и меньшее — назад (рис. 55).

Рассеяние света вследствие отражения и преломления

Если в прозрачную среду ввести частицы, обладающие отличным от нее показателем преломления, то на границе между средой и частицей произойдет отражение или преломление света. Естественно, что вследствие этого изменится направление его распространения и возникает рассеяние. Если частица непрозрачна, то свет поглощается ею, а энергия света идет на ее нагревание. Впрочем, и прозрачные частицы нагреваются, так как и они частично поглощают свет, а всякая среда не вполне прозрачна. Такая среда является неоднородной и физически, и оптически.

Если же показатель преломления внесенных частиц равен показателю среды, то при переходе света из среды в частицу и обратно преломление и отражение не происходят. Такая среда, являясь неоднородной физически, окажется однородной оптически¹ и рассеяния света производить не будет.

Теперь уже можно ответить на вопрос о том, почему Солнце в тумане, дыму и пыли кажется нам красным.

¹ Оптически она тоже не будет вполне однородной, так как среда и частицы обладают различной дисперсией.

Красные лучи лучше проникают сквозь завесу из мелких частиц. По этой причине сигналы бедствия, стоп-сигналы, ограничители путей, посадочных дорожек для самолетов делают в виде фонарей с красным светом.

Прозрачный столб дыма на темном фоне, дым от сигареты, утренний туман над рекой кажутся нам голубыми при боковом освещении. В этом случае мы видим не прямой свет, идущий от источника света, а свет, рассеянный мелкими частицами; чем меньше эти частицы, тем более голубым кажется нам взвесь, производящая рассеяние. Дым от папиросы — собрание очень маленьких частиц угля. Но если он побудет во рту, на частицах дыма осядут капельки воды, частицы вырастут, их рассеивающая способность перестанет зависеть от длины волны, они начнут рассеивать все длины волн — белый свет.

По той же причине клубы пара, идущего из трубы паровоза, туман, облака кажутся нам белыми. Они состоят из довольно больших капелек, которые при малом поглощении рассеивают почти все длины волн. Столб дыма, сквозь который проходят к нам лучи солнца, кажется в верхней, освещенной части розовым, так как голубые лучи рассеиваются. Наоборот, в нижней, не освещенной солнцем, находящейся в тени части столба мы видим рассеянные голубые лучи.

Если в прозрачную среду попадут непрозрачные частицы, то они наряду с рассеянием поглощают значительную часть энергии света, интенсивность рассеянного света уменьшается.

Свет, отраженный частицами, находящимися внутри объема мутного вещества, попадая на частицы, или в значительной мере, или полностью поглощается ими. Поэтому среда, заполненная непрозрачными частицами, даже будучи освещенной, кажется нам темной или черной.

Примером может служить дым, представляющий взвесь недогоревших частичек угля, капелек мазута или других недогоревших жидкостей, испарившихся из топлива под влиянием высокой температуры горения. Черными нам кажутся также массивные, толстые дождевые тучи. Большие массы воды, содержащиеся в них, не только рассеивают свет, но и в значительной степени его поглощают.

Черными кажутся густые облака пыли, например черные бури в Средней Азии и Сибири. Их грозный, зло-

веще-черный вид даже в солнечный день наводит ужас на все живое.

Тот, кто побывал зимой у берегов Западной Африки, никогда не забудет огромного красного диска Солнца. Причина его необыкновенной окраски в том, что воздух насыщен тонкой красной пылью, поднятой ветром с пустыни Сахары и выносимой пассатами далеко в Атлантический океан.

Молекулярное рассеяние

Молекулы веществ имеют размеры $2 \cdot 10^{-8} - 6 \times 10^{-8}$ см, что составляет примерно 0,001 длины волны света ($\lambda = 550$ нм $= 5,5 \cdot 10^{-5}$ см). Эти мельчайшие образования не должны были бы рассеивать свет. Однако опыт показывает, что жидкости, газы и твердые тела рассеивают свет. Чем это вызвано?

Ответ на этот вопрос был предложен в 1908 г. польским ученым Марианом Смолуховским. Он высказал мысль о том, что рассеяние происходит не на молекулах, а на флуктуациях молекул.

Флуктуациями называют отклонения от равномерного распределения в пространстве и времени частиц, их кинетической энергии (а вследствие этого скорости и температуры) и давления, вызванные хаотическим движением молекул. На рисунке 54 показаны такие скопления и разрежения частиц газа (они обведены кружками).

М. Смолуховский разработал способ измерения флуктуаций газов, а А. Эйнштейн в 1910 г. построил математическую теорию флуктуаций, выводы которой хорошо совпадают с результатами опытов Смолуховского.

ГОЛУБОЙ ЦВЕТ НЕБА.

Голубой «прозрачный» цвет — источник радости, символ счастья и спутник хорошей погоды! Сколько художников пытались передать голубизну и прозрачность небесной лазури!.. Но как непостоянен цвет неба! Ранним утром или после дождя он «покрывает» все небо. Он становится блеклым или почти белым над горизонтом особенно во время сухой погоды и переходит во все цвета радуги на закате или при восходе Солнца.

Такой серебристый над Азовским морем, он становится синим и фиолетовым при подъеме на высокие горы. Нашим героическим космонавтам небо казалось черным. Среди дня они видели на нем Солнце и звезды.

В чем причина такого разнообразия цвета неба, такой его изменчивости?

Причина не в свете, излучаемом самой атмосферой, ибо в этом случае атмосфера должна была бы светиться ночью, и не в источнике синего света где-то за атмосферой, потому что ночью и днем при подъеме на большие высоты мы видим великолепие черного фона, перед которым располагается атмосфера, а вечером—огненные цвета зари. Причина должна лежать в самой атмосфере.

По-видимому, здесь происходит явление, аналогичное тому, которое мы наблюдаем при прохождении света через очень разреженный дым.

Работы М. Смолуховского и расчеты А. Эйнштейна позволили объяснить голубой цвет неба и цвета зари как следствие рассеяния света на флуктуациях плотности воздуха.

Флуктуации воздуха рассеивают много фиолетового света (к которому глаз мало чувствителен), много синего и голубого (к которому он более чувствителен), немного зеленого и желтого. Сочетание этих цветов и дает небесно-голубой.

Летом после долгой засухи и ветров, поднимающих много пыли, небо кажется белесым, но после сильного ливня, поглощающего эту пыль и как бы промывающего воздух, оно опять становится голубым и прозрачным. Всякий раз, когда в воздухе появляются перистые облака, представляющие собой скопление ледяных кристалликов, небо становится белым. Бледно-белый цвет неба обусловлен рассеянием света на относительно больших частицах пыли и ледяных кристалликах, которые одинаково рассеивают все световые волны.

Солнечный свет такой, каким мы его воспринимаем,—это свет, частично поглощенный и рассеянный атмосферой. До нас доходят лучи Солнца с преобладанием длинных волн. Поэтому оно кажется нам желтоватым, а вечером и утром, когда лучи проходят через значительную толщу атмосферы и рассеяние возрастает,—красным.

СВЕТ И ЦВЕТ В ГОРНЫХ РАЙОНАХ

Горные пейзажи всегда вызывают восхищение чистотой красок. Причиной является прозрачность воздуха. Кроме того, на большой высоте плотность воздуха меньше и вследствие этого его рассеивающая способность значительно ослаблена. Все цвета выступают в полной яркости, создавая при этом впечатление близости. Отсюда понятны те ошибки, которые делают в оценке расстояния в горах неопытные жители равнин и городов. Сами того не сознавая, они склонны хорошую видимость, вызванную малым рассеянием света, объяснять близостью рассматриваемого пейзажа.

Рассматривая долины с большой высоты, мы видим их как бы покрытыми голубоватой вуалью. Такую же вуаль мы видим, наблюдая Землю с высоко летящего самолета.

Это тот же голубой цвет воздуха, который мы обычно видим снизу и который нам кажется голубым небосводом. Теперь мы его рассматриваем сверху. Это солнечный свет, рассеянный флуктуациями воздуха.

Наблюдая Землю с самолета, мы также без привычки делаем ошибки в оценке как расстояний до Земли, так и расстояний на Земле.

Особенно интересно посмотреть фотографии и рисунки Земли и ее атмосферы, сделанные космонавтами. Но на всех этих фотографиях Земля видна сквозь густую дымку. Один из снимков, сделанных Г. С. Титовым, представлен на цветной вклейке III. На нем видны очертания атмосферы и распределения цветов в ней на заре — при восходе солнца.

СВЕТ ОПАЛЕСЦЕНЦИИ

Красивый переливчатый цвет опалесценции, наблюдаемый у жемчуга раковин, перламутра, объясняется также рассеянием света на мельчайших неоднородностях в прозрачной среде вещества.

Наиболее значительные флуктуации плотности в газах возникают в критическом состоянии при критической температуре. При этом наблюдается столь интенсивное рассеяние света, называемое критической опалесценцией, что даже сравнительно тонкий слой вещества полностью рассеивает весь падающий на него свет.

СУМЕРКИ

От лесу до лесу и сзади по длинной пыльной дороге, по сверкающим обгаренным кустам и по реке, стыдливо синевшей из-под редящего тумана, полились сперва алые, потом красные, золотые потоки молодого горячего света...

Всюду лучистыми алмазами зарделись крупные капли росы...

(И. С. Тургенев)

А восток все горит-разгорается.
Птички солнышка ждут, птички песни поют,
И стоит себе лес, улыбается.
Вот и солнце встает, из-за пашен блестит,
За морями ночлег свой покинуло,
На поля, на луга, на макушки раки
Золотыми потоками хлынуло.

(И. С. Никитин)

Плавному переходу от ночи к дню и от дня к ночи мы обязаны рассеянию света в атмосфере Земли. Около полутора часов длятся сумерки, украшенные в ясные дни каскадами света на востоке и западе — утренними и вечерними зорями.

Каким тяжелым был бы переход от ночи к дню и обратно, если бы не было атмосферы. Он был бы мгновенным: абсолютная чернота заменила бы яркое сияние абсолютно белого дня, сияние — черноту. Отсутствие полутени сделало бы границы предметов и цвета исключительно резкими. Такими видели мир Луны посетившие ее космонавты.

Сумерки привлекают не только художников и поэтов, они вызывают большой интерес у ученых, которые используют сумеречные явления для изучения верхних слоев атмосферы.

Правильное объяснение сумеречных явлений на основе идеи о рассеянии света воздухом (см. цв. вклейку II, вверху) дал еще в 1863 г. Бецольд. У него же мы находим красивое описание вечерней зари и сумерек:

«При приближении Солнца к горизонту (5°; 20 мин до заката) нижняя часть западного неба принимает беловатый оттенок, который затем переходит в золотисто-желтый, а у самого горизонта — в красный. Над Солнцем небо кажется как бы прозрачным. В момент захода Солнца (0°) свет делается интенсивнее и переходит в оранжевый,

а прозрачное место увеличивается в горизонтальных размерах. Одновременно с этим на большой высоте появляется розовое, или, правильнее, пурпуровое, пятно, которое чрезвычайно быстро увеличивается и обыкновенно имеет форму круга, который при постоянно увеличивающемся радиусе кажется спускающимся позади желтой части западного неба. Через некоторое время пурпуровая окраска делается весьма интенсивной. Это первый пурпуровый свет. Наибольшей интенсивности он достигает при отрицательной высоте Солнца -4° . Лучи этого света окрашивают стены зданий в розовый цвет. Во время наибольшей интенсивности пурпуровый свет имеет наиболее правильную форму, весьма близкую к кругу, центр которого находится немного выше желтого пятна, имеющего в это время вид немного удлиненного в горизонтальном направлении сегмента. После этого центр пурпурового круга опускается и круг превращается в узкую полосу, ограничивающую сверху желтый сегмент и называемую первой дугой западной зари. Желтый сегмент называется первым светлым сегментом. Постепенно он темнеет, а первая дуга все суживается и, наконец, исчезает у самого горизонта. В это время дневной свет быстро ослабевает и наступает конец гражданских сумерек. Вслед затем заканчивается первая половина астрономических сумерек. Одновременно с западной зарей наблюдается и восточная. При приближении Солнца к горизонту на западе, на востоке небо грязно-желтого, а затем лазурно-пурпурного оттенка. Как только Солнце заходит за горизонт, на востоке показывается пепельно-синий сегмент. Это тень Земли. Сегмент носит название первого темного сегмента. Он все более и более распространяется вверх, а мутно-пурпурный цвет над ним превращается в постепенно суживающийся пояс. Это первая дуга восточной зари. Наконец (-2° ; 8—10 мин после заката) эта дуга исчезает и тогда темного сегмента уже больше не видно, так как он сливается с остальной частью неба. Некоторые наблюдатели, впрочем, утверждают, что за ним можно проследить до самого зенита и даже дальше. Еще до наступления второй половины астрономических сумерек в западной части неба можно наблюдать подготовку этих явлений. Небо начинает окрашиваться в желтый цвет, над ним снова появляется сияние зари, а затем и пурпуровый свет. После наступления второй половины

сумерек (-4 , -5° ; 20—25 мин после заката) интенсивность этих явлений быстро увеличивается, хотя и не достигает, вообще говоря, тех размеров, какие имели эти явления в первую половину.

Таким образом, развивается второе сияние зари, второй светлый сегмент, второй пурпуровый свет (7° ; 30 мин после заката). Нередко второго пурпурного света вообще не бывает, но иногда он гораздо ярче первого. Максимум интенсивности он достигает обычно при отрицательной высоте Солнца (около -9° ; 40 мин после заката). Наконец исчезает и второй пурпуровый свет, а исчезновение желтого сегмента характеризует конец астрономических сумерек (-17° ; 70 мин после заката). Иногда в области пурпурового света бывают видны расходящиеся от Солнца темно-синие и темно-зеленые полосы. Это теневые полосы зари, отбрасываемые облаками, находящимися непосредственно под горизонтом. Случается видеть и самые облака вместе с отбрасываемыми ими тенями.

КАК МОЖНО ОБЪЯСНИТЬ НАБЛЮДАЕМЫЕ ЯВЛЕНИЯ?

Человек впервые увидел свою Землю извне только в 1961 г. Но идея использования зари для измерения толщины атмосферы и изучения процессов, происходящих в ее верхних слоях, возникла гораздо раньше.

В XI в. арабский врач Ибн-эль-Хайсан (известный в Европе под именем Альгазен), основываясь на этой идее, нашел, что глубина воздушного океана равна 5200 шагам. Это совсем неплохо, если учесть, что, по современным данным, выше этого уровня помещается не больше одной тысячной массы воздуха.

В 1863 г. Бецольд предложил правильное объяснение сумеречных явлений, как результата рассеяния света атмосферой.

Вскоре появилась «математическая» теория зари. В. Г. Фесенков в 1915 г. предложил использовать ее для изучения строения верхних слоев атмосферы на основании наблюдений зари. Ниже мы приводим основные идеи этой теории.

Земной шар вращается так, что точки поверхности перемещаются с запада на восток, и поворачивается за сутки на 360° . Один час соответствует повороту на 15° ; на один градус Земля поворачивается за 4 мин.

Солнечные лучи, падающие на Землю, можно считать параллельными. Выходя из-за горизонта, они погружаются в атмосферу, проходят вдоль земной поверхности и затем уходят ввысь. При этом они проходят через различную толщу атмосферы различной плотности. Воздушная оболочка Земли имеет толщину, превышающую 1000 км. Верхние слои ее разрежены и рассеивают свет очень слабо. Рассеяние света происходит главным образом в нижних слоях толщиной около 20 км, при этом самые нижние слои атмосферы практически непрозрачны для скользящих по поверхности лучей. Это можно видеть, наблюдая тень Земли на Луне во время лунных затмений. Края тени всегда размыты.

На цветной вклейке III, вверху изображены различные положения точки наблюдения A на земной поверхности¹, начиная со времени за 1 ч до восхода Солнца (A''_B) и до 1 ч после заката (A''_Z). Точки A'_B и A'_Z соответствуют моменту восхода и заката. Наблюдатели, находящиеся в точках A''_B и A''_Z , не видят Солнца: оно за горизонтом. Здесь сумерки. Только отблески зари напоминают о том, что есть места, где сияет дневное светило.

Как видно из рисунка, пути, проходимые световыми лучами в атмосфере на заре (точки A'_B и A'_Z), больше, чем в полдень (A_2).

Днем, когда Солнце находится вблизи зенита, его лучи пронизывают слой атмосферы толщиной $H \approx 20$ км, на заре, когда они скользят по поверхности Земли, $x = 512$ км, т. е. в 25 раз больше.

Естественно, что свет, идущий ближе к Земле, рассеивается атмосферой больше, причем в первую очередь рассеиваются лучи коротковолновой части спектра. Длинные волны проникают в атмосферу глубже. Область их рассеяния начинается с некоторой точки K и захватывает все большие и большие толщины атмосферы по мере дальнейшего проникновения в нее. Слои атмосферы толщиной 3—5 км, где рассеян только красный свет, отделены от полной тени земного шара некоторой границей, называемой эффективной границей тени для красных лучей.

¹ На рисунке толщина атмосферы представлена в несколько большем масштабе по сравнению с радиусом Земли.

В верхних, разреженных слоях атмосферы толщиной 15—17 км рассеивается только коротковолновая часть спектра — фиолетовые, синие и голубые лучи. Красные пронизывают ее, почти не рассеиваясь. Поверхность, отделяющую область рассеяния синих лучей от остальных, называют эффективной границей тени для синих лучей.

Между областью рассеяния красных и синих лучей лежат области преимущественного рассеяния оранжевого, желтого, зеленого света.

Представим себе спутник Земли, движущийся на некоторой, не очень большой высоте навстречу солнечному свету. Вначале он находится в области полной тени Земли. Его обитатели видят черное небо, а на нем яркие звезды и Луну.

Практически спутник окажется освещенным красным рассеянным светом только тогда, когда он пройдет из полной тени через эффективную границу земной тени для красных лучей и войдет в область их рассеяния. В это время космонавты увидят на горизонте красный диск восходящего дневного светила, полосу зари со всеми цветами спектра, плавно переходящими от одного к другому, а выше черное небо. Постепенно к красному свету прибавится оранжевый, желтый и т. д. до синего, и наконец спутник окажется в лучах белого дневного света Солнца, ярко сияющего на черном небе.

Подобную картину на горизонте видит наблюдатель, находящийся на поверхности Земли, только для него переходы от одного цвета к другому, ввиду большего рассеяния света плотными, нижними слоями атмосферы и более медленного перемещения окажутся более плавными.

Иную картину наблюдатель увидит в зените ($A'_3 Z$). Нижняя часть столба воздуха над головой погружена в тень и не рассеивает свет; верхняя — освещена всеми лучами спектра и рассеивает свет так же, как дневное небо. Промежуточная же часть столба освещена лишь красными лучами и рассеивает только их. Поэтому цвет сумеречного неба краснее дневного.

В каком-либо другом направлении ($A'_3 M$) цвет неба зависит от интенсивности рассеянного цвета в этом направлении.

По мере того как Солнце опускается к горизонту во время заката, явления следуют друг за другом в обратном порядке: сначала видны все цвета спектра, но каждый из них на различной высоте, как это соответствует разрезу цветного слоя на вклейке III, вверху. При опускании Солнца под горизонт поверхность неба, освещенная красными лучами, так же, как и перед восходом, увеличивается, небо краснеет. Если за горизонтом находятся тучи, то эффективная граница тени для красных лучей поднимается (облака их загораживают) и небо синее. Сами же облака, располагаясь ниже эффективной границы тени для синих лучей, освещены только красными лучами, поэтому они так ярко пылают на заре пурпурным светом.

Еще один вопрос может интересовать наблюдателей оптических явлений природы: есть ли различие между зарей рассвета и зарей заката?

Если оно есть, то очень незначительное.

Утром воздух гораздо чище, чем вечером, особенно в густонаселенных местах. Роса, утренний туман содействуют очищению воздуха. Поэтому цвета утренней зари более нежны и прозрачны. Утром больше голубого и розового цвета.

Важно также и то, что глаз, хорошо отдохнувший за ночь, более чувствителен и лучше воспринимает детали цветовых переходов. Кроме того, освещенность постепенно возрастает и это также содействует лучшему видению.

СУМЕРЕЧНЫЕ ЛУЧИ

Если за горизонтом или на горизонте во время восхода или заката солнца имеются облака, то можно часто наблюдать красивые солнечные лучи, выходящие огромным веером из-за горизонта. Они выходят из воображаемой точки за горизонтом, где находится Солнце. Это явление обусловлено контрастом между светом Солнца, рассеянным воздухом и тенью, бросаемой облаками, находящимися за горизонтом на расстоянии от 19 до 700 км от наблюдателя, а поэтому невидимыми.

Подобные лучи можно видеть днем, когда Солнце находится за краем темного облака, а в воздухе имеется достаточно частиц, рассеивающих свет.

ИЗМЕНЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ВО ВРЕМЯ СУМЕРЕК

Глаз — это прибор, который очень хорошо приспособляется как к большой освещенности, так и к малой. Поэтому мы видим довольно хорошо и в сумерки, хотя освещенность уменьшается по сравнению с дневной приблизительно в миллион раз.

Чтобы составить представление о зависимости освещенности от глубины погружения Солнца под горизонтом, можно воспользоваться следующей таблицей.

Т а б л и ц а

Глубина погружения Солнца под горизонтом, °	Освещенность горизонтальной поверхности, $\mu\text{л}$	Некоторые качественные признаки видимости
0	400	
—3	40	
—6	1	Розовые облака исчезают в зените Пепельный свет Луны становится наблюдаемым
—8	0,1	Невозможно прочесть текст, написанный карандашом. Красная бумага кажется черной
—11	0,01	Голубая бумага кажется серой. Желтая бумага кажется серой
—17	0,01	Млечный Путь виден в зените

Несколько изменив известную поговорку, можно сказать: «В сумерках все кошки серы». В сумерки цвета перестают быть различимыми, все предметы становятся серыми, в связи с тем что меняется характер зрения наблюдателя. Зрение переключается с менее чувствительного цветоразличающего органа колбочек на более чувствительный, но не различающий цветов орган — палочки. Люди, у которых поражены палочки, а также птицы и некоторые животные после заката Солнца плохо видят. Этот недостаток зрения называют «куриной слепотой».

УТРЕННЯЯ И ВЕЧЕРНЯЯ ЗОРИ КАК ПРИМЕТЫ ПОГОДЫ

С давних времен люди пользовались наблюдением зари для предсказания погоды.

Многие народы, особенно живущие на равнинах, берегах морей, сопоставляя наблюдения зари с другими

приметами, достигли в деле предсказания погоды большого совершенства. Надо учесть, что погода в Европе чаще перемещается с запада на восток, чем наоборот; поэтому вечерняя заря является более показательной, чем утренняя. Красный закат означает, что воздух чист на западе и на завтра можно ждать хорошую погоду. Если с запада приближается циклон, то темные облака отбрасывают тени на большое пространство и вечернее небо кажется коричнево-желтым. Если к тому же дует западный ветер, на следующий день или через день можно ожидать дождь.

Красный восход означает, что к востоку от нас нет скоплений облаков. Красная окраска неба при восходе Солнца усиливается, если над нами находятся перистые облака, предвещающие возможность нового понижения атмосферного давления. Горизонтальные полосы на горизонте кажутся ярко-красными, когда в воздухе имеется много пыли или капель воды. Утром в воздухе пыли мало, следовательно, в нем есть капли воды.

При высоком давлении и хорошей погоде вечером небо ясно и мы видим пурпуровый свет; утром в таком случае часто бывает туман.

ЦВЕТА ВЛАЖНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Влажные пористые и шероховатые предметы темнее сухих. Так, мокрые земля и асфальт кажутся нам черными, в то время как сухие они серые. Смоченный песок приобретает сочный темно-ореховый цвет, трава — темно-зеленый. Мокрую ткань легко отличить по цвету от сухой.

Очевидно, что при смачивании тел увеличивается их коэффициент поглощения света и уменьшается коэффициент отражения. Но почему?

Каждое из этих тел обладает отражением света двух типов — направленным (зеркальным) и диффузным (рассеянным). Мы видим тела в рассеянном отражении. Направленный отраженный свет может проходить мимо глаз наблюдателя, тогда он невидим, или попадать в глаза, тогда наблюдатель видит блики (вспомните отсветы на классной доске).

Когда на шероховатую поверхность попадает жидкость, то она заполняет неровности. Поверхность тела становится гладкой, и доля зеркального отражения уве-

личивается, зато уменьшается доля рассеянного отражения и тело кажется нам более темным.

Влага, попавшая на пористые тела, покрывает не только поверхность тела, она проникает в поры или щели (например, в траве между листьями), покрывая их поверхность изнутри и уменьшая отражение света от стенок пор и щелей вследствие полного внутреннего отражения.

Таким образом, свет, попавший в пору или щель, поглощается в ней после многократного отражения, пора или щель кажутся нам темными или черными, вследствие чего кажется более темной поверхность всего тела.

СВЕТ И ТКАНЬ

Для различных целей люди применяют ткани, отличающиеся друг от друга материалом, конструкцией, окраской и степенью блеска и матовости.

При окраске ткани частицы краски проникают в промежутки между клетками волокна, а затем при освещении ткани белым светом отражают или поглощают различные цвета спектра в разной степени. Отраженный свет, попадая в глаз, создает впечатление соответствующего цвета. Белые ткани отражают и рассеивают все цвета спектра, цветные — только некоторые, избранные, темные — в большей степени поглощают и мало отражают.

Искусственные волокна приобретают цвет от пластмассы, из которой их изготавливают (вискоза, капрон, лавсан и др., рис. 56, а). Ткани растительного происхождения в необработанном виде сероваты или желтоваты. Их отбеливают различными веществами (хлор, перекись водорода и др.), которые обесцвечивают естественные пигменты, окрашивающие волокна, и ткань становится белой.

Отражение света может быть направленным и рассеянным (диффузным). Поверхности, дающие направленное отражение, отличаются блеском, дающие рассеянное отражение, — матовые. Однако даже очень темные и матовые ткани обладают некоторым блеском, в чем можно убедиться, направив на ткань узкий пучок света.

Наименьшим направленным отражением обладают ворсовые ткани — бархат, плюш и др. Они поглощают почти весь свет, падающий на них, так как лучи света, попадая

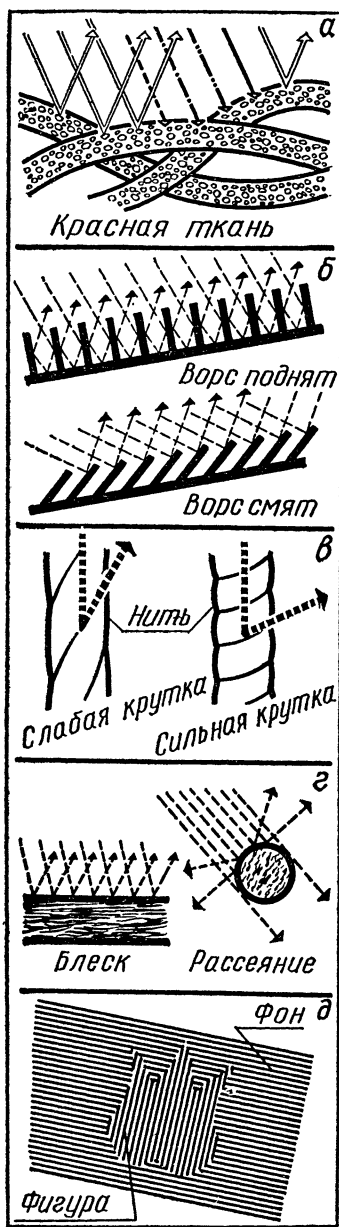


Рис. 56. Окраска и блеск ткани. а) Красная краска поглощает зеленый цвет (штрих-пунктирная линия) и отражает красный (белые линии). б) Свет поглощается в промежутках между ворсинками. Ткань выглядит матовой или темной. Ворс примет. В одну сторону происходит направленное отражение. в) Направление волокон у нити слабой и сильной крутки. г) Вдоль гладкой нити свет отражается направленно, поперек — диффузно. д) Расположение нитей на узорах скатерти.

между ворсинками, многократно отражаются от их поверхностей, теряя при каждом отражении значительную долю энергии вследствие поглощения. В результате интенсивность отраженного света составляет ничтожную долю от интенсивности света, упавшего на ткань. Так, например, черный бархат отражает не более 0,2% энергии упавшего на него света и поэтому является почти абсолютно черным телом.

Но если ворс приглажен или измят (рис. 56, б), то в некоторых направлениях от него идет свет, отраженный один только раз, а в других — отраженный многократно. Свет, отраженный однократно, оказывается более интенсивным, чем отраженный многократно. Рассеянно отраженный свет обладает окраской, соответствующей цвету ткани (ворсинок), а направ-

ленно отраженный несет преимущественно окраску того света, который падает на ткань. Например, если зеленую атласную ленту освещать дневным светом, то в местах, где она рассеивает свет (не блестит), она выглядит зеленой, блестящие же ее участки — белого, чуть зеленоватого цвета. Это происходит потому, что часть света, отраженная от поверхности нитей, не проникает в глубь ткани, не взаимодействует с веществом краски и не теряет при отражении своего относительного содержания цветов. Другая же, небольшая часть света проникает внутрь вещества, частично поглощается веществом, частично отражается, частично рассеивается крупинками красителя примерно одинаково по всем направлениям, в том числе и в направлении отраженного света, придавая ему свою окраску.

Какой же должна быть поверхность ткани, чтобы она давала направленное отражение, т. е. блеск? Она должна быть по возможности гладкой. Для этого ее надо было бы отполировать, как полируют поверхность металла, дерева или других тел. Но это невозможно. Для того, чтобы поверхность ткани приблизить к полированной, нити, из которых она состоит, стараются расположить по возможности параллельно друг другу. В этом случае элементарные волокна, из которых состоят нити, будут тоже параллельны друг другу и станут давать направленное отражение. Особенно желательно, чтобы нити были слабо скручены. Тогда длинные отрезки волокон, видимые на поверхности материи, будут иметь направление, близкое к направлению нитей (рис. 56, в, слева). При высокой же крутке отрезки волокон на поверхности нитей будут короткими и сильно отличающимися по направлению от самих нитей. Ткани из таких нитей окажутся матовыми (рис. 56, в, справа).

Рассмотрим одну нить (или волокно), которую представим себе цилиндрической. Это может быть нить искусственного волокна, получаемого продавливанием жидкой окрашенной пласмтассы через цилиндрические отверстия фильеров¹. Вдоль этой нити свет отражается направленно, поперек нее — рассеянно (рис. 56, в). То же будет при рассмотрении ряда параллельных нитей. Смотря вдоль них, мы увидим блестящую поверхность, поперек —

¹ Фильерами называют тончайшие, в несколько микрон диаметром, отверстия, сквозь которые продавливается жидкая пластмасса. Выходя из фильера, она затвердевает, образуя волокна.

матовую. Так, у сатина или атласа нити на лицевой стороне уложены параллельно друг другу длинными участками через несколько нитей утка, и эта сторона блестит. На обратной же стороне, где нити утка переплетены одна через одну с нитями основы¹, ткань выглядит матовой.

Особый эффект переливающихся цветов можно получить, если уток сделать из нитей одного цвета, например зеленого, а основу из другого, например красного.

Часто можно видеть льняную белую скатерть с узором, который кажется темнее, чем окружающий его фон, если смотреть на скатерть с одной стороны, и светлее фона, если смотреть с другой стороны. Причина этого указана выше, блеск ткани зависит от расположения волокон. Вдоль волокон ткань кажется более блестящей (рис. 56, *б*). Блеск ткани также зависит от рода вещества, из которого состоят волокна. Так, например, шелковая нить более блестяща, чем хлопчатобумажная или шерстяная. Это связано с формой самого волокна. Гладкое волокно придает блеск нити и ткани. Иногда умышленно снижают блеск волокон, добавляя в раствор, из которого делают искусственные волокна, нерастворимые тонкие порошки (например, двуокись титана), крупинки его увеличивают рассеяние света.

«НИВА, МОЯ НИВА!..»

...Нива, моя нива,
нива золотая,
зреешь ты на солнце,
колос наливая.
По тебе от ветра,
Словно в синем море,
волны так и ходят,
ходят на просторе.

(Ю. В. Жадовская)

В ветреный день выйдите в поле. Оно раскинулось до горизонта. Растения еще не вполне зрелы, колосья наливаются под знойным солнцем, хлеб созревает. Стебли растений имеют желтоватый оттенок. Если смотреть на изогнутый стебель вдоль него, то он кажется еще светлее. Колосья чуть-чуть потемнее. Спокойная нива представ-

¹ Основу составляют продольные нити, натянутые на ткацком станке; уток — поперечные нити, протягиваемые при помощи челнока между нитями основы.

ляется равниной светло-орехового цвета. Словно кто-то обмакнул огромную кисть в краску и провел ею по этим просторам.

Но вот порыв ветра — и все ожило, изменилось. По соломистой равнине, словно по морю, пошли волны. Причем в одном и том же месте цвета меняются непрерывно.

Откуда же взялось это богатство оттенков от светло-соломенного, почти белого, до темно-орехового, почти коричневого?

Учитывая сказанное в предыдущем параграфе, нетрудно понять, что цвета данного участка, волнующегося под дуновением ветра хлебного поля, зависят от расположения стеблей и колосьев растений относительно луча зрения наблюдателя.

Если свет отражается вдоль согнутых стеблей, то преобладает направленное его отражение по сравнению с рассеянным и мы видим участок поля блестящим, светло-желтым, как солома.

Если же мы смотрим поперек стеблей, то наблюдаем диффузное (рассеянное) отражение света, менее яркое. Участок поля кажется светло-ореховым.

Но вот стебли с колосьями направлены навстречу нам. Свет сильно поглощается пространством между стеблями, как в ворсе ткани. В этом месте поле покажется темно-ореховым или почти коричневым.

Под влиянием ветра растения качаются. Расположение светлых и темных пятен непрерывно меняется, создавая впечатление бегущей волны.

ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ

Глаз обязан бытием своим свету. Из безучастных животных вспомогательных органов свет вызывает орган, который стал бы ему подобным; так образуется глаз на свету, для света, чтобы внутренний свет встречал внешний.

(Гете)

В своей замечательной книге «Глаз и Солнце»¹ академик С. И. Вавилов сопоставляет Солнце и глаз и показывает, что в самой природе человека заложено единство

¹ С. И. Вавилов. Глаз и Солнце. М., 1961.

представлений о свете, Солнце и глазе. Естественно, что глаз должен нас интересовать как одно из замечательных явлений природы.

ЭВОЛЮЦИЯ ГЛАЗА

Путем длительного естественного отбора и эволюции природа создала у теплокровных животных очень тонкий орган зрения. У более простых животных существ этот орган значительно менее совершенен. Так, у дождевого червя светочувствительные клетки расположены по всей коже. Он может чувствовать свет, но не может определить его направления (рис. 57, а). У моллюска строение глаза напоминает камеру-обскуру (рис. 57, б). Он уже способен приблизительно установить не только направление

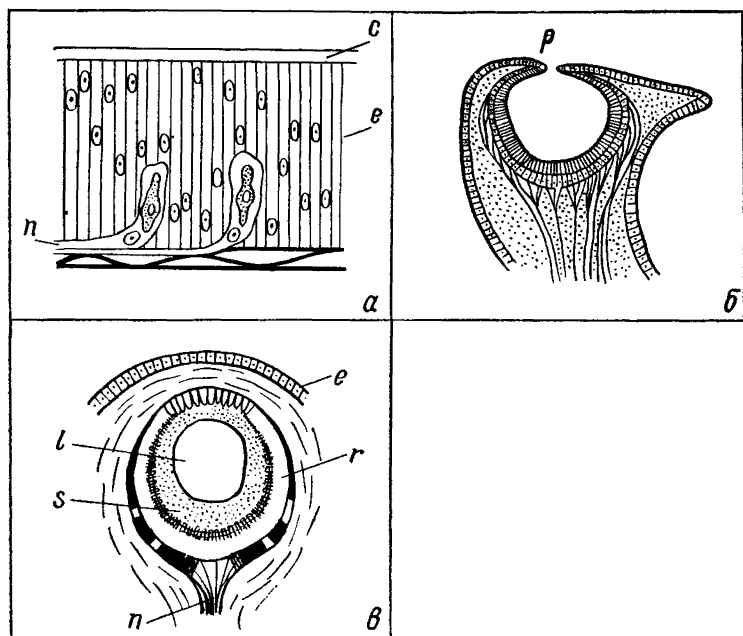


Рис. 57. Различные способы зрительного восприятия в животном мире. а) Светочувствительные клетки, расположенные по всей коже дождевого червя. б) Глаз в виде камеры-обскуры у моллюсков. в) Глаз улитки мурекс. Здесь *c* — кожа, прикрывающая эпителий; *e* — эпителий, *l* — линза, *n* — нервные волокна, *r* — сетчатка, *s* — внутренняя прозрачная среда.

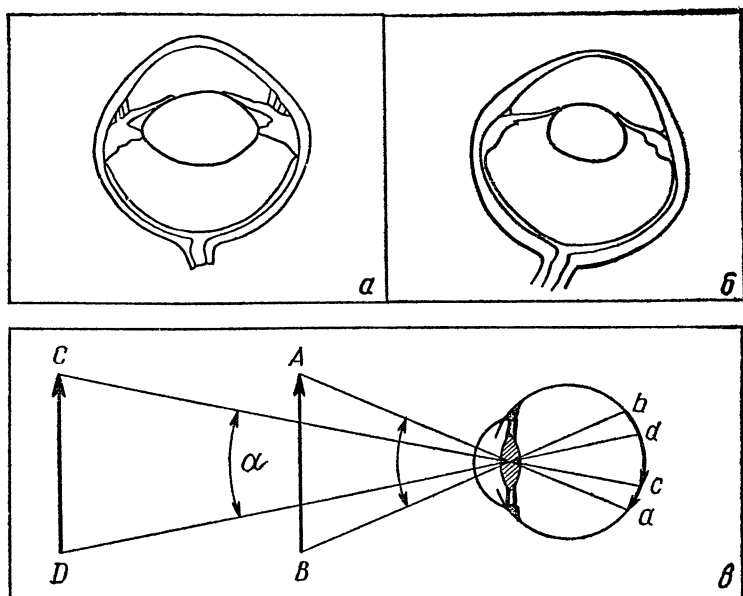


Рис. 58. Разрез глаз позвоночных: а — рыси, б — собаки, в — человека.

света, но даже и очертание предметов. Глаз улитки еще более совершенен (рис. 57, в), он снабжен линзой.

На рисунке 58 показаны разрезы глаз ночного позвоночного животного — рыси (а), дневного — собаки (б) и человека (в). Здесь мы убеждаемся, что глаза эти заметно отличаются друг от друга, однако у них есть нечто общее. Это сложные оптические системы, обладающие линзой с меняющимся фокусным расстоянием и диафрагмой.

Очень интересны и поучительны с точки зрения приспособления живого организма к среде особенности глаз рыб, живущих на больших глубинах, куда почти не проникает солнечный свет. Казалось бы, что существа, обитающие в темноте, должны быть безглазыми, как крот. Однако природа иногда идет по другому пути — не уничтожения, а совершенствования того или иного органа. Видимо, поэтому глаза рыб очень чувствительны, хотя в то же время весьма близоруки. Многие рыбы и глубоководные животные освещают окружающее пространство

при помощи люминесцирующих органов, помещающихся у них около глаз или на других частях тела. Но это для рыбы бывает опасно. Свет может привлечь более сильного врага. Для маскировки света у них есть нечто вроде век, которыми в случае опасности они прикрывают свои «фонарики».

СТРОЕНИЕ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

Глаз человека по своему оптическому действию напоминает фотоаппарат (рис. 59). Глазное яблоко шарообразно. Его диаметр у новорожденного составляет примерно 16 мм, у взрослого — 24 мм.

Глазное яблоко находится в глазной впадине черепа и при помощи двух пар мышц может поворачиваться в пределах довольно больших углов.

Стенка глазного яблока состоит из трех оболочек (рис. 60). Снаружи глаз обложен толстой (толщиной 0,5—1 мм) белой прочной роговой оболочкой (склерой). Спереди она прозрачна и сильно выпукла, а сзади — белая непрозрачная. Внутри склера выстлана сосудистой оболочкой, представляющей переплетение кровеносных сосудов, питающих глаз. Внутренняя оболочка, называемая сетчаткой или ретиной, представляет соединение нервных клеток и волокон, воспринимающих и проводящих световое ощущение.

Впереди сосудистая оболочка переходит в ресничное тело и радужную оболочку. Гладкие мышцы ресничного тела прикреплены к прозрачной капсуле, внутри которой находится хрусталик — прозрачное линзообразное тело с показателем преломления 1,41. Сокращение ресничных мышц вызывает натяжение стенок капсулы, вследствие чего

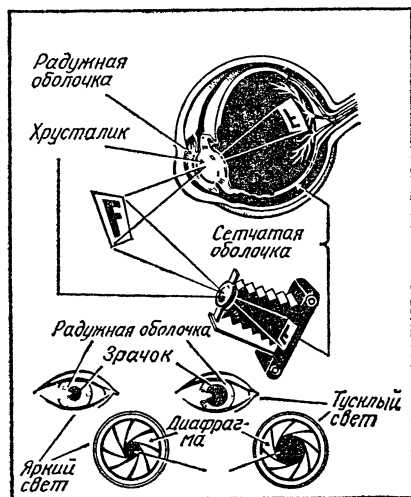


Рис. 59. Сравнение человеческого глаза с фотоаппаратом.

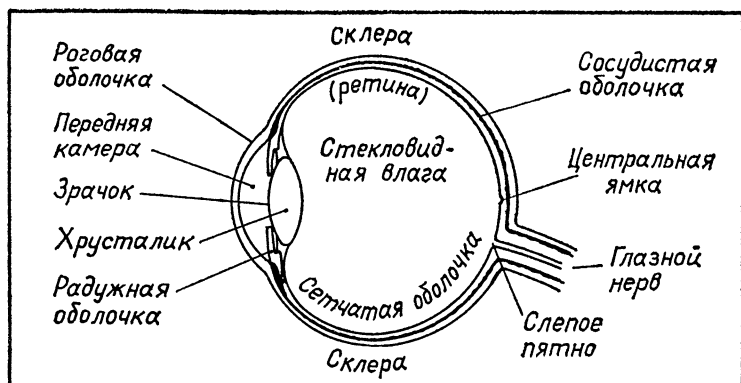


Рис. 60. Схема строения человеческого глаза.

хрусталик становится более плоским. При расслаблении мышц выпуклость хрусталика увеличивается, что приводит к изменению фокусного расстояния глаза (в пределах от 23 до 19 мм) и фокусировке изображения на сетчатке. Наличие красящего пигмента в радужной оболочке придает ей различную окраску у различных людей (глаза карие, голубые, зеленые и т. п.). У некоторых людей и животных пигмент отсутствует, и глаза у них бесцветны (альбиносы). Внутри радужной оболочки имеется почти круглое отверстие — зрачок, ограничивающий поступление света в глаз (диафрагма). Радужная оболочка снабжена кольцевыми и радиальными мышцами. Сокращение первых уменьшает диаметр зрачка (до 1 мм), сокращение вторых растягивает его (до 8 мм). Пространство между роговой и радужной оболочками называют передней камерой глаза, оно заполнено водянистой влагой, а полость между хрусталиком и сетчаткой глаза заполнена стекловидным телом. Показатель преломления обеих оболочек близок к показателю преломления воды ($n = 1,336$).

СТРОЕНИЕ РЕТИНЫ

Зрительная часть сетчатки имеет сложное строение. Она содержит рецепторные клетки, оканчивающиеся так называемыми палочками и колбочками.

Число колбочек и палочек велико (около 9 миллионов колбочек и более 100 миллионов палочек). Палочки вос-



Рис. 61. Рисунок для нахождения слепого пятна.

принимают свет и тень, колбочки чувствительны к цветам. Длина палочек около 0,06 мм (60 мкм), диаметр 2 мкм. Длина колбочек около 35, а диаметр около 6 мкм.

Распределены колбочки и палочки по поверхности сетчатки очень неравномерно. В центре сетчатки, где находится так называемое желтое пятно овальной формы (2—2,9 мм), преобладают колбочки, палочек здесь совсем нет. Это наиболее чувствительное место цветного зрения. На расстоянии 4 мм от желтого пятна находится слепое пятно, в котором отсутствуют и палочки, и колбочки. Оно соответствует месту выхода нервных и кровеносных сосудов в глаз.

Наличие слепого пятна может быть проверено следующим образом. Если, закрыв левый глаз, фиксировать зрение правого глаза на знак плюс (рис. 61), то, изменяя расстояние от рисунка до глаза, можно найти такое его положение (примерно 20 см от книги), при котором черный диск будет не виден, так как его изображение падает на слепое пятно.

Дальше от желтого пятна колбочки и палочки расположены менее густо, и они имеют более крупные размеры.

МЕХАНИЗМ ЗРЕНИЯ И АККОМОДАЦИИ

Глаз можно рассматривать как оптическую собирающую систему, дающую действительное обратное уменьшенное изображение внешних предметов на сетчатке.

Основной преломляющей свет поверхностью глаза является передняя поверхность роговицы, граничащая с воздухом. Здесь свет переходит из воздуха, обладающего показателем преломления $n_1 = 1$, в среду с показателем преломления $n_2 = 1,336$. Хрусталик только помогает передней линзе в фокусировке света. Изменяя свою кривизну, он осуществляет точную настройку системы.

Настройка глаза на наилучшее восприятие предмета называется аккомодацией. Это сложный процесс, требующий некоторого времени, в нем участвуют все части глаза. Приспосабливаясь к рассмотрению предмета, глаз поворачивается таким образом, чтобы уменьшенное изобра-

жение предмета упало вблизи наиболее чувствительного места сетчатки — желтого пятна. Затем происходит настройка на резкость изображения и диафрагмирование. Первое достигается изменением кривизны хрусталика, второе — уменьшением или увеличением зрачка. Рефлекторно изменяющееся отверстие зрачка регулирует поступление в глаз света и силу раздражения нервных волокон, а также улучшает фокусировку изображения, уменьшая сферическую аберрацию¹. Уменьшению сферической аберрации содействует и то, что хрусталик в середине обладает большей плотностью, чем по краям.

На сетчатке глаза получается обратное уменьшенное изображение предмета, дающее представление о его форме и размерах. Кроме того, по напряжению мышц, вызывающих аккомодацию хрусталика, человек может судить о расстоянии до предмета, смотря даже одним глазом.

Для многих чисто оптических задач преломляющая система глаза может быть заменена приведенным глазом, имеющим следующие постоянные:

Преломляющая сила	58,48 дптр
Фокусное расстояние	17 мм
Радиус кривизны передней преломляющей поверхности	5,7 мм
Показатель преломления среды	1,33
Радиус кривизны сетчатки	9,7 мм
Диаметр глазного яблока	24 мм

Рассматривая предмет, мы поворачиваем наши глаза, стремясь совместить изображение предмета на сетчатке с наиболее чувствительным местом сетчатки — желтым пятном. Поворот глаз осуществляется глазными мышцами произвольно или непроизвольно, однако глаз всегда поворачивается не плавно, а скачками, даже в том случае, если нам кажется, что его движение происходит плавно. Это судорожное перемещение глаз называется

¹ Сферическая аберрация — искажение изображения, возникающее вследствие неодинакового преломления света краями и центром линзы. Край линзы преломляют свет более сильно, и краевое изображение получается ближе к линзе, чем созданное центральными лучами. Для уменьшения сферической аберрации применяется диафрагмирование, благодаря которому крайние лучи обрезаются, а изображение создается только приосевым пучком лучей. У глаза роль диафрагмы выполняет радужная оболочка, уменьшающая или увеличивающая отверстие зрачка автоматически в зависимости от освещенности ретины.

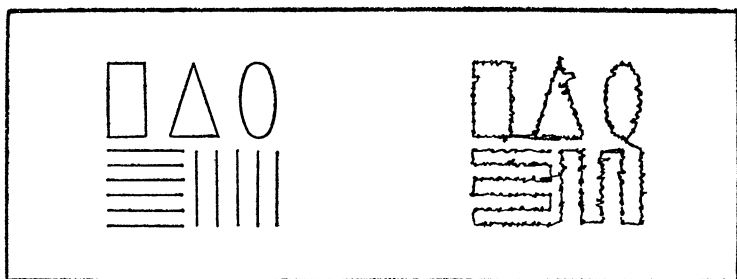


Рис. 62. Слева показаны рассматриваемые геометрические фигуры и линии; справа — запись движения глаза.

нистагмом. На рисунке 62 показано, как перемещается глаз при рассмотрении фигур, изображенных слева.

Продолжительность скачков очень мала. Так, смещение оси зрения на угол 1° продолжается $0,02 \text{ сек.}$ Это значит, что за один скачок глаз поворачивается на $25'$. Интересно, что время поворота глаза на один и тот же угол одинаково для всех людей.

Исследования показали, что движение глаз вообще является необходимым условием видения.

Если бы глаза остановились, то через несколько секунд прекратилось бы образование нервных импульсов

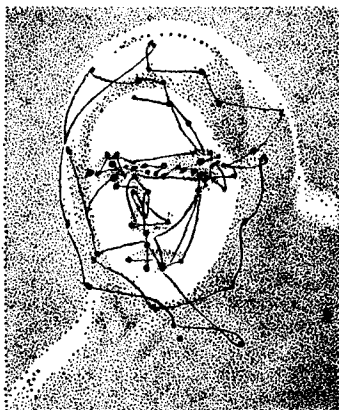


Рис. 63. Запись движения глаза, рассматривавшего лицо девушки в течение 1 мин.

и передача их от сетчатки в мозг. Оказывается, образование нервных импульсов возможно только при постоянном изменении освещенности отдельных рецепторов (нервных окончаний), что и осуществляется благодаря нистагму глаз. Вот почему поражение глазных мышц приводит к слепоте даже при полной исправности глаза.

На рисунке 63 помещен портрет девушки. Здесь же даны записи на фотобумаге движений глаза, рассматривающего это изображение. Портрет девушки воспринимался 1 мин. Обратите вни-

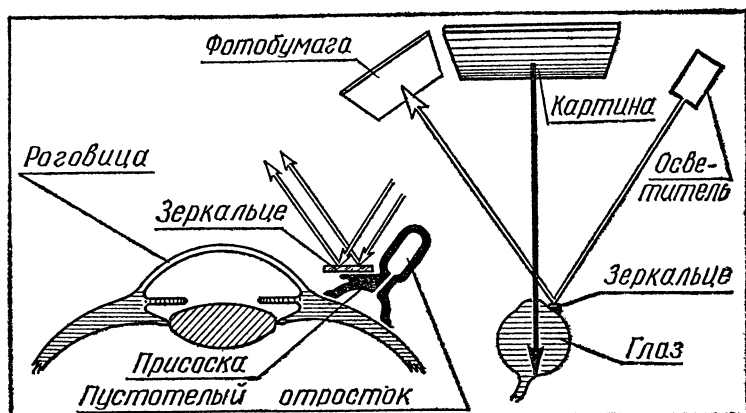


Рис. 64. Справа—схема установки для записи движения глаза при рассмотрении картины. Слева — схема крепления зеркальца к главному яблоку при помощи присоски.

мание на места, которые особенно внимательно изучал зритель.

На рисунке 64 показана схема установки для записи на фотобумаге движения луча зрения.

ОСТРОТА ЗРЕНИЯ. УГОЛ ЗРЕНИЯ

Величина изображения на сетчатке зависит от угла зрения, а следовательно, от расстояния до рассматриваемого предмета. Поэтому предмет, расположенный дальше, кажется нам меньше. Это впечатление учитывается в живописи и называется перспективой. Чувство перспективы у нас очень прочно, и там где оно нарушено, зрение отказывается воспринимать картины.

На рисунке 65 показаны два человека одинакового роста, идущие по коридору. Задний человек кажется великаном по сравнению с передним из-за нарушения на рисунке правил перспективы.

Если угол зрения мал или вследствие малости предмета, или вследствие его удаленности, то изображение его на сетчатке оказывается весьма малым, раздражаются очень близко расположенные нервные окончания, детали предмета сливаются, и мы видим предмет как точку, а

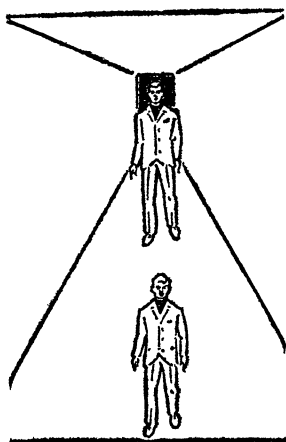


Рис. 65. Нарушение закона перспективы. Люди одинакового роста кажутся неодинаковыми.

при очень малых углах зрения он становится совершенно невидимым. Опытom установлено, что нормальный глаз способен различать объекты, видимые под углом зрения около $1'$. В этом случае величина изображения объекта высотой 1 м на сетчатке составляет около 0,007 мм, т. е. покрывает одну колбочку. Чем меньше предельный угол зрения, при котором человек уже не может различать детали предмета, тем острее его зрение.

Для увеличения угла зрения применяют различные оптические приборы: лупу и микроскоп—для наблюдения малых предметов, телескопы разных конструкций—для наблюдения далеких предметов.

ВИДЕНИЕ ДВУМЯ ГЛАЗАМИ

Оценка расстояния до предмета уточняется при наблюдении двумя глазами (рис. 66). Бессознательная оценка напряжения мышц, необходимая для того, чтобы направить оси глаз на одну точку, служит мерой расстояния до предмета. Кроме того, каждый глаз видит предмет с другой точки, вследствие этого оба глаза получают несколько различные изображения. Сложение их в мозгу создает стереоскопичность картины, впечатление глубины.

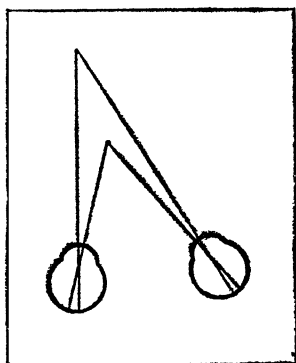


Рис 66. Зрение двумя глазами.

На этом основано устройство приборов, носящих название стереоскопов, при помощи которых рассматривают две фотографии,

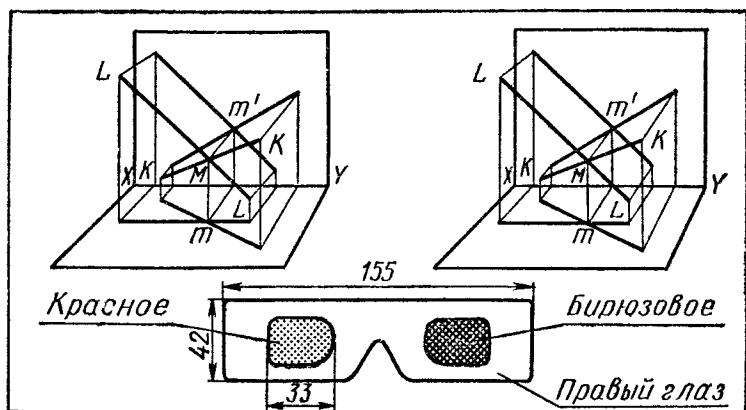


Рис. 67. Стереоскопические очки для англифического наблюдения

снятые двумя фотоаппаратами с различных точек зрения, через две линзы, и получают глубинное впечатление.

Если две фотографии или два чертежа сделать так, как они видимы правым и левым глазом в различном свете, например правый в красном, а левый в бирюзовом свете, то при рассмотрении их сквозь цветные очки воспринимается черно-белое объемное изображение. Левый глаз, смотрящий сквозь красное стекло, видит бирюзовое изображение черным, а красного не видит, а правый, смотрящий сквозь бирюзовое стекло, видит красное изображение черным. Картины складываются в мозгу, создавая объемное впечатление. Такой метод стереографии называют англифическим. Его применяют в стереометрии для передачи объемного представления о телах (рис. 67).

НЕДОСТАТКИ ЗРЕНИЯ

Здоровый глаз взрослого человека видит хорошо на расстоянии, начиная с 14 см и дальше. Расстояние наилучшего видения для нормального глаза считается равным 25 см.

Однако могут возникнуть отклонения от нормы. Причин этого в основном три: изменение формы глаза, ослабление ресничных мышц, деформирующих хрусталик, изменение упругости хрусталика.

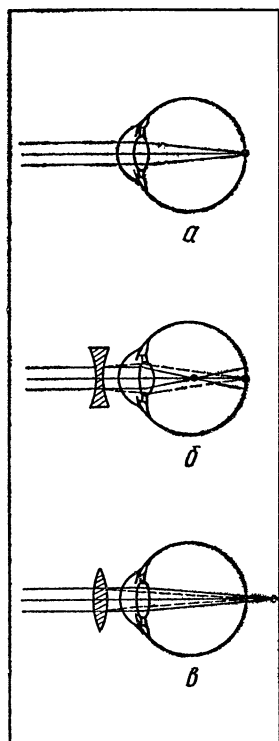


Рис. 68. Нормальный (а), близорукий (б) и дальнозоркий (в) глаза и исправление их недостатков при помощи линз.

Если глаз вытянулся вдоль оси, то фокусировка лучей происходит перед сетчаткой, глаз слишком сильно преломляет лучи, вследствие чего далеко расположенные предметы не видны. Этот недостаток называют близорукостью и исправляют рассеивающими очками.

Если, наоборот, дно глаза приблизилось к хрусталику или хрусталик стал слишком плоским, то фокусировка лучей происходит за сетчаткой. Такой глаз хорошо видит далеко расположенные предметы и плохо — близко расположенные. Недостаток называют дальнозоркостью и исправляют собирающими очками.

Действие очков для близорукого и дальнозоркого глаза видно из рисунка (рис. 68).

У древних римлян острота зрения воина проверялась по звездам Мицар и Алькор из созвездия Большой медведицы (рис. 69). Зрение воина считалось хорошим, если он мог видеть эти звезды раздельными.

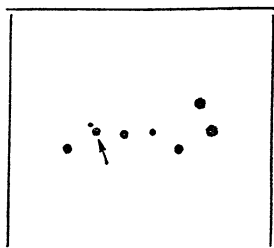


Рис. 69. Положение звезд Мицар и Алькор в созвездии Большой медведицы.

ГЛАЗ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СВЕТА

Известно, что глаз воспринимает свет в диапазоне длин волн от 400 до 760 нм. Однако и эти волны при одинаковой интенсивности воспринимаются неодинаково.

На рисунке 70 показана кривая дневной видимости I для среднего глаза. Из нее мы видим, что лучше всего воспринимается глазом зеленый свет с длиной волны 550 нм, близкой к максимуму интенсивности солнечного спектра. Видимо, за долгое время существования человека глаз приспособился к этому. Кривая II — сумеречной видимости. В ней максимум приходится на более короткие волны.

Но почему в глаз не допускаются более короткие и более длинные волны?

Ультрафиолетовые лучи, обладающие длиной волны менее 400 нм, опасны для глаза, так как они разрушают живые ткани. Препградой в их проникновении к сетчатке глаза служат верхние оболочки глаза и хрусталик, которые поглощают эти лучи. Опытным путем установлено, что глаз способен воспринимать и более короткие волны, вплоть до 250 нм. При большой интенсивности ультрафиолетового излучения глаз видит слабое свечение, но это не прямой свет, а свет флуоресценции хрусталика и оболочек, вызванный этими лучами.

Почему же глаз не видит инфракрасных лучей?

Видимо, причина этого кроется в самом механизме зрения. Восприятие света нервными окончаниями может базироваться или на фотохимическом, или на фотоэлектрическом его действии на вещество нервов. Оба эти процесса требуют достаточной энергии фотона

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

а такой энергией фотоны с большой длиной волны не обладают.

Есть еще одно обстоятельство, которое требует, чтобы глаз не был чувствителен к длинным волнам. Дело в том, что внутренняя оболочка глаза не только поглощает, но и излучает свет как нагретое тело. Можно показать, поль-

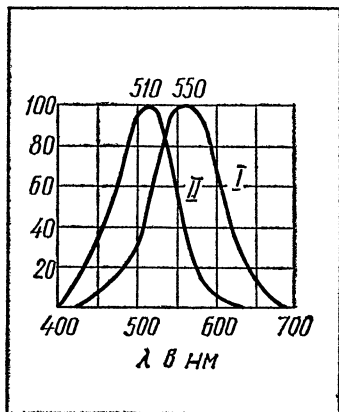


Рис. 70. Кривые видимости нормального глаза: I — дневного зрения, II — сумеречного зрения.

зуюсь законом Вина, что при температуре $37^\circ \text{C} = 310^\circ \text{K}$ (температура тела человека) максимум излучения приходится на 9 мкм :

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{0,0029 \text{ м} \cdot \text{град}}{310 \text{ град}} \approx 9 \cdot 10^{-6} \text{ м} =$$

$= 9 \text{ мкм}$ (см. главу «Излучение света и теплоты»).

Вычислим интенсивность излучения внутренней оболочки глаза, рассматривая ее как черное тело при температуре $t = 37^\circ \text{C}$, и общий поток излучения.

По закону Стефана — Больцмана (см. главу «Излучение света и теплоты»):

$$\begin{aligned} \epsilon &= \sigma T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^4} \cdot (310)^4 \text{ град}^4 \approx \\ &\approx 510 \frac{\text{вт}}{\text{м}^2} \approx 0,012 \frac{\text{кал}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}. \end{aligned}$$

Общий световой поток, излучаемый оболочкой глаза в секунду, учитывая, что его поверхность составляет примерно 17 см^2 , равен:

$$\Phi = \epsilon S = 0,012 \cdot 17 \approx 0,2 \text{ кал/сек.}$$

Если бы это был поток видимого излучения, например зеленого, то, учитывая, что «зеленая свеча» посылает на 1 см^2 на расстоянии 1 м поток $38 \cdot 10^{-9} \text{ кал/см}^2$, поток, излучаемый глазом, соответствовал бы силе света источника в $5\,000\,000 \text{ св.}$ Так как оболочка глаза не только излучает, но и поглощает, то, естественно, глаз ослепил бы сам себя. «По сравнению с этими миллионами свечей потухло бы Солнце и все окружающее. Человек видел бы внутренность своего глаза и ничего больше, а это равносильно слепоте»¹.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЛАЗА И ЕЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Посмотрим, как влияет изменение отверстия зрачка на поток проходящей в глаз световой энергии. Диаметр зрачка меняется в пределах от 2 до 8 мм , т. е. в 4 раза, а площадь отверстия — в 16 раз. В таком же отношении ($1 : 16$) изменяется световой поток, попадающий в глаз.

¹ Данные для этого параграфа и цитата взяты из книги С. И. Вавилова «Глаз и Солнце». М., 1961.

Между тем человек способен видеть при солнечном освещении, когда освещенность достигает 90000 лк, и в темноте, когда она равна 10^{-5} лк. Глаз воспринимает световые потоки от 200 до $2 \cdot 10^{-10}$ эрг/(см² · сек), т. е. потоки, отличающиеся в 10^{12} раз.

С. И. Вавилов произвел опыт, при помощи которого удалось установить, что глаз способен воспринимать такие ничтожные порции света, как 2—10 квантов, что соответствует энергии $4 \cdot 10^{-12}$ эрг. Значит, сужение зрачка не является основным регулятором чувствительности глаза. Видимо, существует еще другой аппарат. Очевидно, с уменьшением освещения глаз переключается на восприятие более чувствительным органом — палочками. При большей освещенности палочки выключаются и свет воспринимают колбочки.

ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА

Как уже говорилось, наличие двух органов восприятия света — палочек и колбочек—важно в том отношении, что при слабом освещении, когда цвета неразличимы, глаз переходит на восприятие палочками, колбочки же при ярком освещении воспринимают всю гамму цветов. Как это происходит? Неужели у нас имеется такое же разнообразие колбочек, как цветов в природе? По-видимому, нет.

Предполагается, что сетчатка имеет три различных вида светочувствительных элементов, каждый со своей особенной шириной полосы возбудимости (рис. 71). Если,

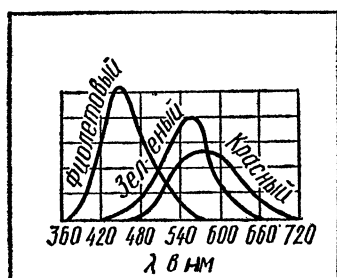


Рис. 71. Кривые трех «основных возбуждений». По оси абсцисс отложены длины волн, по оси ординат — чувствительность в относительных единицах.

например, в глаз попадает свет красного цвета, то затрагиваются все три элемента колбочек, все они поглощают этот свет, но в разной степени. Глаз чувствует разницу, что и сопровождается ощущением красного цвета. Ощущение суммы возбуждений во всех трех элементах соответствует восприятию яркости падающего света, а ощущение отношений возбуждений в трех разных элементах — ощущению цвета.

Если бы остался один элемент, об отношении нечего было бы и говорить, не было бы ощущения цвета, хотя впечатление яркости осталось бы по-прежнему. Такое представление о механизме восприятия цвета хорошо объясняет возможность сложения любого цвета из трех других (наподобие цветной печати или цветного кино) и случаи цветовой слепоты (дальтонизма), когда глаз теряет способность различать цвета в некоторых участках спектра (например, не может отличать красный цвет от зеленого, синий от желтого).

Цветовое зрение имеет очень много преимуществ, давая возможность различать много свойств предметов, которые без того были бы скрыты. В последнее время на основании анатомических гистологических¹ исследований доказано наличие трех видов колбочек.

РОЛЬ МОЗГОВОГО КОРРЕКТИРОВАНИЯ И ОШИБКИ ЗРЕНИЯ

На основании предыдущего опыта, запечатленного в памяти, мозг вносит много исправлений в восприятие зрения. Например, одинаковые предметы, находящиеся

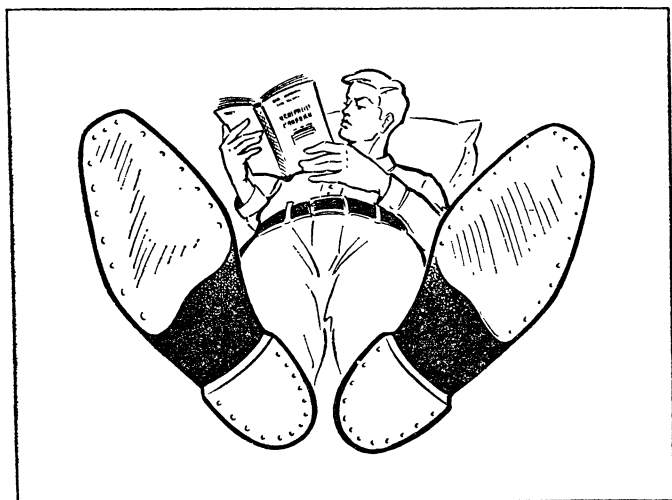


Рис. 72. Рисунок с фотографии лежащего человека. Пример расхождения оптической и мозговой правильности.

¹ Гистология — наука о клетках, составляющих живые ткани, и процессах, в них происходящих.

от нас недалеко, но на разном расстоянии, не кажутся нам различного размера. Люди, находящиеся на расстоянии 10—50 м, не кажутся разными по росту. Только на больших расстояниях размеры предметов кажутся уменьшенными.

Большое влияние на «мозговые поправки» оказывают окружающие предметы, с которыми мозг сравнивает воспринятое изображение.

На рисунке 72 приведено изображение человека, правильное физически, но совершенно абсурдное с точки зрения «мозговой правильности». Если бы мозг не вносил поправок в работу глаз, нас постоянно преследовали бы подобные карикатуры.

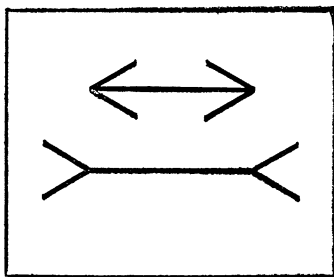


Рис. 73. Обман зрения.

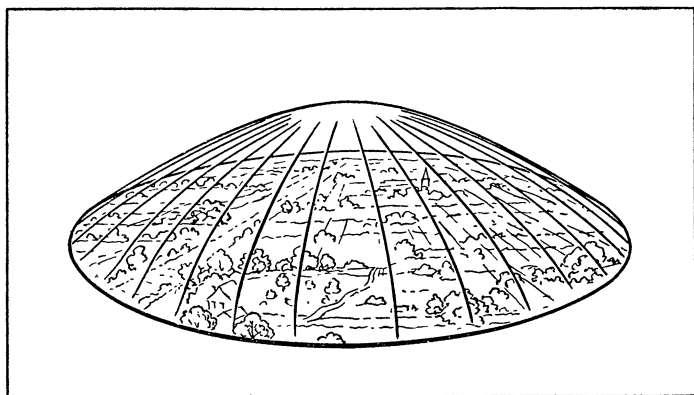


Рис. 74а. Небо кажется куполом, покрывающим Землю.

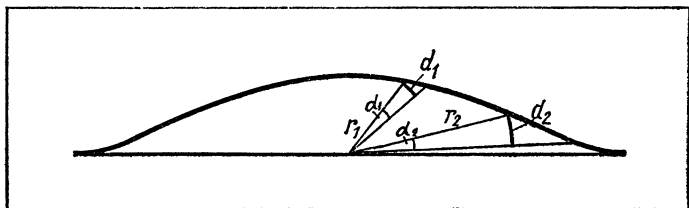


Рис. 74б. Солнечный диск d кажется больше там, где граница рассеяния света более удалена d_2 : $d_1 = r_2 \cdot \alpha_1$.

Но мозговое корректирование может приводить к ошибкам и обманам зрения, особенно когда привычные предметы находятся в неправильной обстановке. Так, например, две линии (рис. 73), одинаковые по длине, кажутся неодинаковыми из-за различным образом расположенных наклонных отрезков.

Таких ошибок много указано в книге С. Толанского «Оптические иллюзии» («Мир», 1967). По той же причине небесный свод кажется нам приплюснутым сверху (рис. 74). Это приводит к кажущемуся увеличению размеров Солнца и Луны на горизонте, хотя фотографии этих светил, сделанные при нахождении их высоко и низко над горизонтом, одинакового размера.

ИРРАДИАЦИЯ

Под этим названием известно кажущееся увеличение размеров ярко светящихся тел. Например, накалившаяся спираль электрической лампочки кажется нам толще, чем та же спираль в холодном состоянии.

При закате Солнца нам кажется, что горизонт под ним «прогибается» (рис. 75). Разглядывая серп Луны, мы замечаем, что дуга, охватывающая полумесяц, является частью окружности большего радиуса, чем дуга, охватывающая остальную часть Луны, покрытую пепельным светом. Отношение кажущегося радиуса серпа к истинному равно примерно $6 : 5$ (рис. 76).

Посмотрите на два провода, пересекающиеся на фоне неба под очень малым углом. В точке пересечения провода



Рис. 75. Явление иррадиации при закате Солнца (прогибание горизонта).

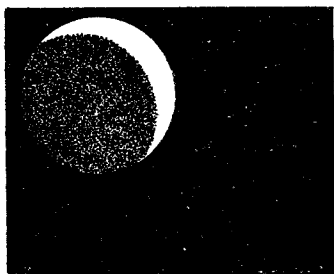


Рис. 76. Явление иррадиации, наблюдаемое на серпе Луны.

как будто исчезли (рис. 77). Если при этом ветер качает провода, то просвет перемещается вдоль проводов. Совсем иначе выглядят места пересечения проводом группы параллельных линий, натянутых проводов, рубцов на крыше и т. п. В этом случае в местах пересечения наблюдается утолщение и искривление провода, а он сам кажется изломанным. Этот эффект сохраняется, если провод пересекает край массивного предмета, например конек крыши или угол стены дома.

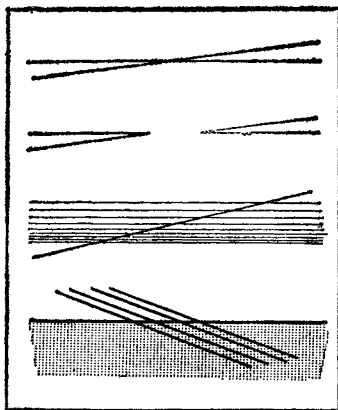


Рис. 77. Иррадиация, наблюдаемая на проводах.

Точно так же в темных платях мы кажемся более худыми, чем в светлых. В своих записях Леонардо да Винчи говорил об этом явлении: «Когда Солнце видимо за безлиственными деревьями, все их ветви, находящиеся против солнечного тела, настолько утоньшаются, что становятся невидимыми, то же самое произойдет и с деревом, помещенным между глазом и солнечным телом. Я видел женщину, одетую в черное, с белой повязкой на голове, при чем последняя казалась вдвое больше, чем ширина плеч женщины, которые были одеты в черное. Если с большого расстояния рассматривать зубцы крепости, отделенные друг от друга промежутками, равными ширине этих зубцов, то промежутки кажутся много большими, чем зубец».

Причины явления иррадиации можно указать две. Во-первых, это дифракция света. На границе света и тени свет вследствие дифракции загибается в область тени. Второй причиной является раздражение нервных окончаний вне геометрических очертаний изображения яркого предмета на сетчатке, вследствие чего светлый предмет кажется больше за счет уменьшения размеров его темного фона или соседа.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ОБРАЗЫ

Возбуждение, возникшее в органе зрения, не проходит сразу с исчезновением раздражителя, а держится еще некоторое время. В этом убеждают нас появляющиеся

после прекращения действия раздражителя так называемые последовательные образы или зрительные следы. Различают положительные образы. Это те образы, которые точно совпадают с реальным раздражителем, и отрицательные, представляющие обратные отношения света и тени.

Рассматривайте долгое время лепной узор на потолке, а затем переключите свое внимание на гладкую поверхность потолка. Вы увидите на нем узор, который рассматривали ранее, только с обратным расположением теней и светлых участков. Если смотреть некоторое время на светящуюся электрическую лампочку, а затем закрыть глаза, то можно еще долгое время видеть ее образ.

И в первом и во втором случае утомленные окончания зрительных нервов посылают сигналы в мозг после исчезновения причин, вызвавших их раздражение.

ЭФФЕКТ ПУРКИНЬЕ

Леонардо да Винчи отмечал, что «зеленый и голубой усиливают свой цвет в полутени, а красный и желтый выигрывают в цвете в своих освещенных частях, и то же самое делает белый».

Обратите внимание на цветочную грядку днем. Желтые и красные георгины горят на солнце и кажутся ярче листьев. Но как они меркнут в сумерках! Теперь листья ярче цветов. Наоборот, голубые незабудки и лиловые флоксы во мраке видны лучше листьев.

Это эффект Пуркинье. Причина явления станет понятна, если рассмотреть рисунок 70. Кривая видимости сумеречного зрения (II) заметно смещена в сторону коротких волн (у нее максимум соответствует 510 нм) по сравнению с кривой видимости дневного зрения (у которой максимум соответствует 556 нм) (I), а это значит, что голубой цвет во мраке виден лучше, чем красный (см. цветную вклейку II).

ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СВЕТОВЫХ ОЩУЩЕНИЙ

Всем известно, что глаз способен сохранять зрительные ощущения в течение примерно $0,1 \text{ сек}$. Когда мы едем в поезде, а мимо нас проносится встречный поезд, мы ви-

дим сквозь его окна почти не мигающую картину ландшафта. Если считать, что ширина окон и промежутки между окнами равны 1 м, а поезда идут со скоростью $v = 72 \text{ км/ч} = 20 \text{ м/сек}$, то их относительная скорость $v_{\text{отн}} = 40 \text{ м/сек}$. Это значит, что картина прерывается 20 раз в секунду на $\frac{1}{40} = 0,025 \text{ сек}$. В течение этого времени зрительное впечатление не исчезает. Аналогичную картину мы видим, проходя мимо дощатого забора, в котором имеются щели.

Перемещая в темноте раскаленный уголек, мы видим красную черту. Если капли дождя или снежинки падают вблизи нас, то они кажутся линиями, так как зрительные впечатления от различного положения их прикладываются одно к другому. Капли же дождя и снежинки, падающие далеко, кажутся точками, так как скорость (угловая скорость) их движения мала.

На эффекте сохранения зрительных ощущений основано получение движущихся изображений в кинематографии. В кино изображения с изменениями следуют через $\frac{1}{25} \text{ сек}$ (рис. 78).

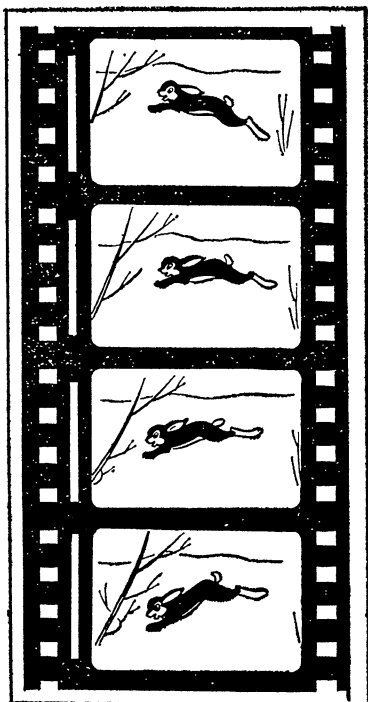


Рис. 78. Несколько кадров из киноленты. (Видно постепенное смещение животного).

КТО КАК ВИДИТ

Известно, что лягушка не видит неподвижных предметов. Самая лакомая пища остается незамеченной, если она не движется. Причиной является неподвижность глаз лягушки.



Рис. 79. С точки зрения ка-
рая: рыболовы, обступившие
пруд.

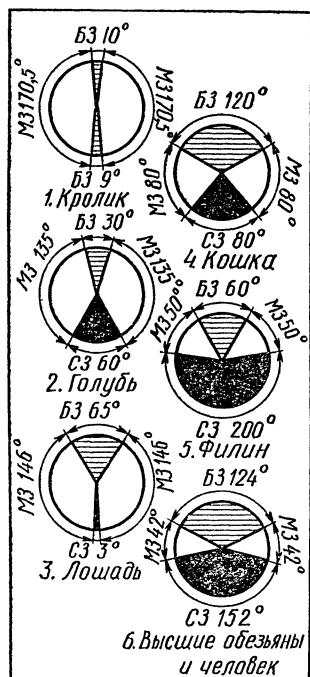


Рис. 80. Поле зрения неко-
торых животных и птиц.
(БЗ — бинокулярное зре-
ние; МЗ — монокулярное
зрение; СЗ — слепая зона.)

Кальмары видят инфра-
красное излучение. Способ-
ностью воспринимать ультра-
фиолетовые лучи природа на-
делила пчел. По-видимому,
пчелы не знают красного цвета.
Алые цветы они воспринимают
по другим признакам.

Дальтонизмом страдают ноч-
ные и глубоководные животные.
У них в сетчатке либо вовсе
нет колбочек, либо они имеют-
ся в очень незначительном ко-
личестве. Радужная оболочка
со зрачком им тоже не нужна.
Зато глаза у других обитателей
водных бассейнов большие. Они
работают как широкоугольные
объективы. Карась в состоянии
одним глазом одновременно ви-
деть обе стороны улицы или
оба берега пруда в области
конуса с углом у вершины в
 $97,6^\circ$ и с вершиной в глазу
(рис. 79).

Фокусировка глаза у рыбы
производится изменением вы-
пуклости роговицы или пере-
мещением хрусталика в глубь
глаза.

Многим животным мир ка-
жется плоским, так как косое
расположение глаз не позво-
ляет им видеть один и
тот же предмет одновремен-
но двумя глазами. Так, если
у человека и обезьян оси обо-
их глаз параллельны, то у
льва они образуют угол 10° , у
кошки — $14-18^\circ$, у собаки —
 $30-50^\circ$, у оленя — более 100° ,
у зайца — 170° .

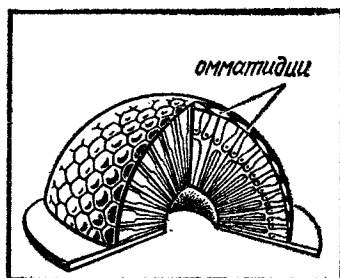
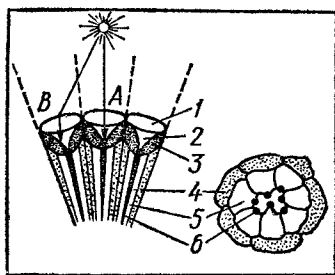


Рис. 81. Фасеточный глаз в разрезе. Слева — продольный разрез, справа — поперечный разрез омматидия.

1 — хрусталик; 2 — стекловидный конус; 3—4 — пигментная оболочка, 5 — зрительные клетки; 6 — светочувствительные волокна. (Штриховыми линиями показан угол зрения каждого из трех омматидий. Лучи попадают главным образом на рецепторы (приемники) того омматидия, напротив которого находится источник света. В соседних омматидиях лучи поглощаются несветочувствительными пигментными клетками.

Однако животные могут поворачивать глаза так, чтобы одновременно видеть двумя глазами предметы, расположенные спереди, а иногда и сзади.

Заяц, например, не может видеть двумя глазами предмет, находящийся сбоку. Зато он видит каждым глазом одновременно в некотором узком секторе и спереди, и сзади. Если учесть, что глаза зайца поворачиваются в орбитах, то поле зрения каждого глаза превосходит 200° по горизонту. Не поворачивая головы, он видит дорогу спереди и преследователя сзади. Насколько это важно для безоружного зайца, — ясно без объяснения (рис. 80).

Способностью к бинокулярному зрению обладают все кошачьи породы, а также многие птицы.

В сетчатке птиц имеется до трех желтых пятен. У сокола, чайки, гуся, курицы по два желтых пятна: первое — для рассматривания предметов двумя глазами, второе — одним. Вспомните, как курица поворачивает голову, рассматривая лежащее на земле зерно.

Зрение насекомых принципиально отличается от зрения позвоночных животных. В то время как у позвоночных глаз имеет одну линзу, которая фокусирует изображение предметов на мозаику зрительных клеток, у

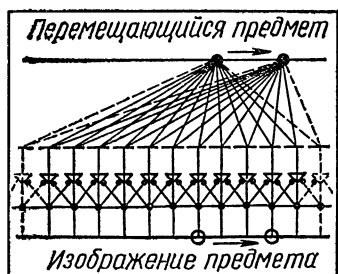


Рис. 82. Несмотря на множество изображений в фасеточном глазе мозг насекомого воспринимает лишь один предмет — тот, который находится напротив ближайшего омматидия.

насекомых таких линзочек (омматидиев) до 10 000 в каждом неподвижном глазу. Столько же изображений созерцаемого предмета воспринимается глазом.

Под каждой линзой 6—8 зрительных клеток, т. е. всего насекомое имеет 60—80 тысяч светочувствительных клеток (в то время как у позвоночных их около 100 миллионов). Группа зрительных клеток одного омматидия воспринимает изображение как одно целое, но разные

клетки по-разному реагируют на свет. Одни отличаются его по яркости, другие — по цвету, третьи — по направлению плоскости поляризации. Способность отличать плоскость поляризации света, рассеянного небосводом, помогает насекомым ориентироваться в пространстве.

Глаз насекомого хуже воспринимает неподвижные предметы, чем наш глаз, однако он лучше видит движущиеся предметы. Там, где человек видит мелькнувшую тень, насекомое различает и форму, и размеры предмета. Человек различает до 30—40 мельканий в секунду, насекомое — в 10 раз больше.

На рисунке 81 представлена схема разреза глаза насекомого: слева — продольный разрез, справа — поперечный. Пунктирными линиями отмечены углы зрения каждого омматидия. Зрительные клетки находятся в глубине конических колодцев и поэтому воспринимают свет только тогда, когда он падает на омматидий вдоль его оптической оси или под небольшим углом к ней (луч OA). Свет, падающий под большим углом к оси, фокусируется на стенке конуса и не воспринимается (луч OB). Поэтому насекомое может точно определить направление источника света.

Расстояние до источника определяется на основании того, сколько омматидиев одновременно воспринимает свет, излучаемый источником. Чем больше, тем, следовательно, предмет дальше, так как лучи, исходящие от отдаленного источника, идут под меньшими углами друг

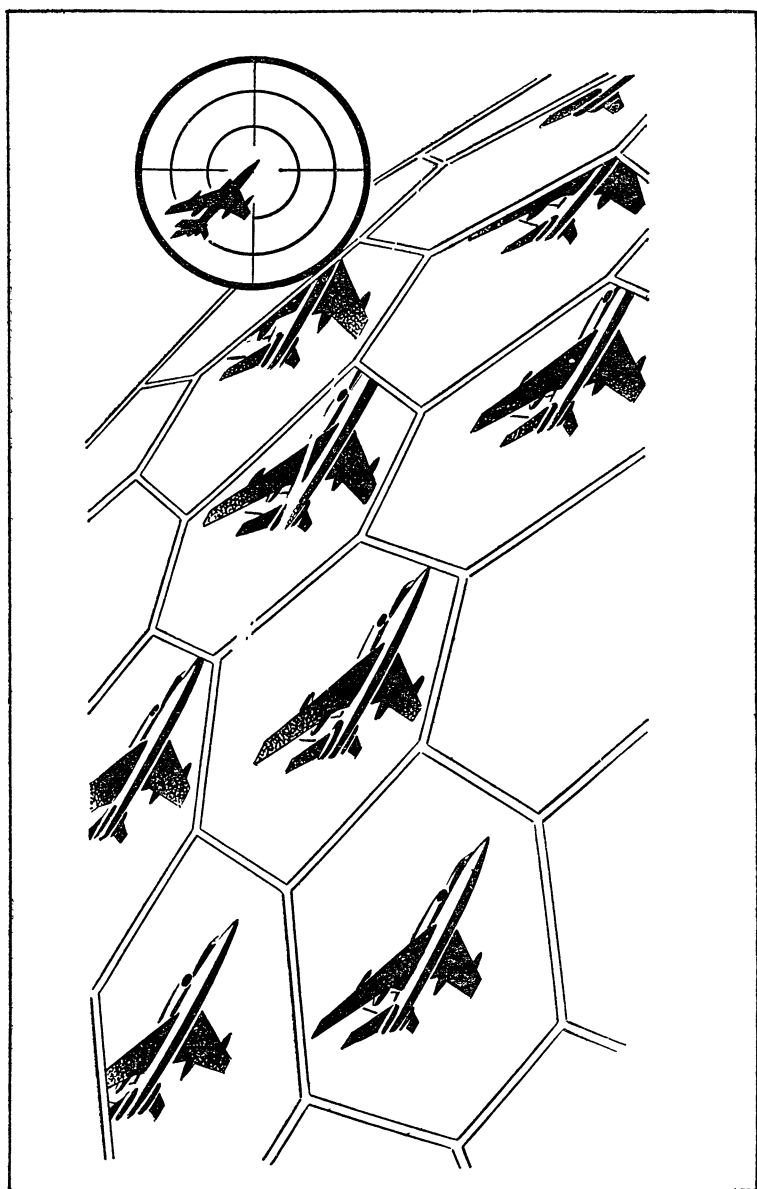


Рис. 83. Изображения сверхзвукового истребителя в шестиугольных ячейках прибора, служащего для определения скорости самолетов.

к другу. Система омматидиев может с большой точностью определить скорость перемещения предметов относительно глаза. Из рисунка 82 можно понять, как это происходит.

Фасеточный глаз послужил прообразом для построения небольшого и недорогого прибора, служащего для быстрого определения скорости самолета. На рисунке 83 показаны изображения летящего самолета в ячейках этого прибора, напоминающих омматидии глаза насекомого.

ЦВЕТ И ЕГО ВОСПРИЯТИЕ

ПРИРОДА ЦВЕТА

Каким бы серым показался нам мир, если бы его лишили цвета! Ощущение цвета, как и ощущение яркости, отражает связь между объективным свойством света (длинной волны) и субъективной стороной его восприятия. По этому поводу В. И. Ленин писал:

«Если цвет является ощущением лишь в зависимости от сетчатки (как вас заставляет признать естествознание), то, значит, лучи света, падая на сетчатку, производят ощущение цвета. Значит, вне нас, независимо от нас и от нашего сознания существует движение материи, скажем, волны эфира определенной длины и определенной быстроты, которые, действуя на сетчатку, производят в человеке ощущение того или иного цвета. Так именно естествознание и смотрит. Различные ощущения того или иного цвета оно объясняет различной длиной световых волн, существующих вне человеческой сетчатки, вне человека и независимо от него. Это и есть материализм: материя действуя на наши органы чувств, производит ощущение»¹.

Субъективная сторона восприятия света основана на особом строении органа дневного зрения — колбочек, разные виды которых способны по-разному воспринимать три основных цвета. Диаграмма спектральной чувствительности колбочек показана на рисунке 71.

Все языки имеют специальные слова для названия цветов, происходящих от названий предметов, окрашенных в данный цвет, чаще всего названий цветов и растений, например, васильковый, вишневый, розовый и т. п. Это чисто качественное и неточное определение цвета. Однако

¹ В. И. Ленин. Полн. собр. соч., т. 18, стр. 50.

к цвету неприменимы такие методы измерения, как для расстояния или температуры. Нельзя сказать, что такого-то цвета больше или меньше.

Чистый (монохроматический) цвет можно выразить при помощи длины волны, сравнивая его со спектром солнечного света или цвета электрической дуги.

Области длин волн, соответствующие определенным цветам, показаны в таблице.

Т а б л и ц а

Цвет	Пределы, нм	Ширина участка, нм
Фиолетовый	390—450	60
Синий	450—480	30
Голубой	480—510	30
Зеленый	510—550	40
Желто-зеленый	550—575	25
Желтый	575—585	10
Оранжевый	585—620	35
Красный	620—800	180

Монохроматический свет мы видим в редких случаях, обычно в наш глаз попадает смешанный свет различных цветов. Но вследствие смешения цветов мы видим один какой-либо новый цвет. Так, например, смешение красного и синего дает пурпурный, желтого и красного — оранжевый и т. д. Часто одно и то же зрительное впечатление может возникнуть от смешения различных цветов.

Можно подобрать ряд цветов, смешение которых дает белый цвет. К ним относятся красный и зеленый, желтый и синий, оранжевый и голубой и т. п. Такие цвета называют взаимно дополняющими друг друга. Для их более легкого отыскания Ньютон предложил, дополнив спектр пурпурным цветом и разбив его на 16 частей, расположить их по кругу (см. цв. вклейку VI, вверху). Цвета, расположенные друг напротив друга, являются дополнительными.

Смешение цветов на опыте производят разными способами, например наложением световых лучей различной окраски друг на друга. Для этого два или несколько лучей разной окраски направляют на одно и то же место

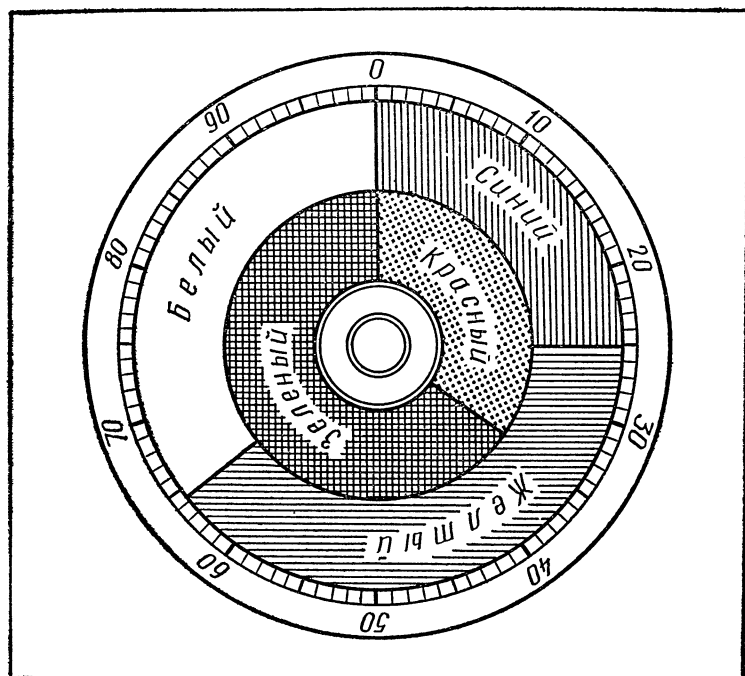


Рис. 84. Круг для сложения цветов.

белого экрана. Можно произвести сложение света на сетчатке глаза. Это произойдет, если смотреть на белый лист, на котором попеременно наложены мелкие пятнышки разного цвета. Такое сложение цветов осуществляют в трехцветной печати. Можно, например, на диск наложить сектора из бумаги тех цветов, которые мы желаем складывать (рис. 84), и привести его во вращение. Изменяя площадь секторов, можно изменять долю участия соответствующих цветов в смеси.

Нельзя путать смешение света определенной цветности со смешением красок. Как уже говорилось ранее, цвет краски определяется цветом, который она отражает или рассеивает; остальные цвета спектра краска поглощает.

Если поверхность покрыть смесью красной и зеленой красок, то при освещении ее белым светом зеленая краска поглотит красную часть спектра, а красная — зеленую.

Остальные участки спектра поглощаются в той или другой степени обеими красками и частично ими отражаются. В результате мы получим коричневый цвет, интенсивность которого будет зависеть от качества красок (см. цв. вклейку VI, внизу).

Однако в ньютоновом круге, мы не найдем многих широкоизвестных цветов. Там нет, например, черного и серого и огромного многообразия их оттенков, а также розового, рыжего, беж, цвета морской воды, коричневого, кирпичного и др. Все эти тусклые или блеклые цвета, которые мы чаще всего встречаем вокруг себя, можно получить, разбавляя соответствующий спектральный цвет белым. Чем больше белого, тем менее насыщенный цвет мы получим, и наоборот.

Можно даже установить количественное выражение степени насыщенности цвета. Еще М. В. Ломоносов высказал идею получения всех цветов при помощи смешения трех основных: зеленого, красного и синего (в разных соотношениях). На этом принципе смешения цветов основаны цветное кино, трехцветная печать.

Получение производных цветов от основных — красного, зеленого и синего — показано на диаграмме (см. цветную вклейку VI).

ОКРАСКА РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА

Если в каком-либо веществе не происходит ни заметного рассеяния, ни поглощения, то свет проходит сквозь такой материал и материал выглядит бесцветным (вода, воздух, стекло в малой толщине). Если происходит заметное рассеяние, но нет поглощения, то вещество выглядит белым (молоко, бумага, мел, туман). В противном случае при большом поглощении и малом рассеянии вещество кажется серым и даже черным.

Необходимым условием для хорошо выраженной окраски является надлежащее сочетание рассеяния с поглощением. Рассеяние содействует яркому выражению данного цвета, поглощение — изъятию ненужных цветов.

Если рассеяние велико, то свет рассеивается на верхних слоях вещества, некоторые цвета не успевают поглотиться и накладываются на рассеянный цвет. В результате цвет получается блеклым.

Если же, наоборот, рассеяние слабое, то поглощение преобладает и вещество выглядит слишком темным, черноватым и цвет его выявляется плохо.

Налейте в колбу густой раствор красной краски (туши или чернил) и посмотрите на просвет. Краска имеет красный цвет. В отраженном свете она черная. Налейте в краску немного молока. Она приобретает красивый красный цвет, так как частицы молока увеличивают рассеяние.

На восприятие цвета влияет не только абсолютная освещенность, но и относительная. Если яркость предмета хотя и достаточная для восприятия цвета, но значительно меньше яркости окружающего фона, то объект кажется нам тусклым.

Если на какой-либо ярко окрашенный предмет, например крыло семафора, смотреть со стороны Солнца (стоя к Солнцу спиной), то крыло кажется ярко-красным. Если же смотреть с другой стороны, напротив Солнца, то крыло на фоне яркого неба кажется темным, цвет его трудно определить.

Цвет распознается хорошо, если яркость объекта равна (хотя бы приблизительно) яркости фона.

На восприятие некоторых цветов влияет цвет фона, на который наблюдатель смотрел до того.

Накроем стол красным кумачом и будем смотреть на него долгое время. Маленькая серая бумажка, положенная на середину стола, покажется нам зеленой. Эта же бумажка на зеленом фоне покажется нам розовой, на желтом — синеватой, на синем — желтоватой. Если же на красный фон положить зеленую бумажку, то она покажется еще более зеленой.

ЦВЕТОВАЯ АДАПТАЦИЯ

Наше зрение обладает способностью приспособляться к условиям цветности освещения. Так, мы видим определенную гамму цветов на картинке и при дневном освещении, и в ясную погоду, и в пасмурную погоду, и при освещении лампой накаливания, свет которой богат желтыми лучами. Это свойство зрения называют цветовой адаптацией.

Благодаря цветовой адаптации в качестве белого воспринимается некоторый средний цвет панорамы, рассмат-

риваемой достаточно долгое время. Этот средний цвет чаще всего бывает близок к цвету, соответствующему спектральному составу лучей, освещающих окружающие предметы.

Поэтому те предметы, которые отражают все лучи видимого спектра в одинаковой мере и потому направляют в глаз наблюдателя лучистый поток неизменного спектрального состава, кажутся нам белыми или серыми.

Однако цветовая адаптация осуществляется не при всяком освещении. Ртутные лампы, богатые зелеными, синими и фиолетовыми лучами, очень искажают цвета. Лицо человека в свете ртутной лампы имеет фиолетово-зеленый оттенок.

Люди, работавшие в фотолaborатории при красном свете, знают, что белый предмет при этих условиях всегда кажется красным, сколько бы времени ни находился человек в лаборатории.

Цветовая адаптация возможна к цветам невысокой насыщенности.

СВЕТ И МОРЕ

Человека всегда интересовали многие вопросы, связанные с морем, и одним из них был вопрос о цвете моря. Цвет моря — видимо, одна из наиболее ярких его характеристик, которая обращает на себя внимание в первую очередь. Недаром моря получили названия, связанные с цветом воды: Белое море, Черное море, Желтое море, Красное море.

Все разнообразие свето-цветовой гаммы водоемов объясняется преломлением и отражением, поглощением и рассеянием света на поверхности воды и внутри нее, а также в веществах, растворенных и взвешенных в воде.

Температура воды в водоемах, все богатство растительной и животной жизни в них обязано своим существованием свету. Это его энергия производит синтез белка внутри фитопланктона¹, которым затем питаются представители зоопланктона, являющиеся в свою очередь пищей для более крупных представителей фауны водных глубин — рыб и морских животных.

¹ Фитопланктон — мельчайшие растительные организмы в воде, зоопланктон — мельчайшие живые организмы — рачки, инфузории и др.

Солнечный свет приносит на 1 м^2 внешней стороны земной атмосферы примерно 80 кдж энергии в минуту. Часть этой энергии поглощается атмосферой. Остальная часть падает на поверхность суши и океана, нагревая их.

Свет, попавший на поверхность воды, частично отражается от нее, частично преломляется, причем доля отраженной и преломленной энергии зависит от угла падения. Отразившийся свет входит обратно в атмосферу, частично поглощается ею, а частично уносится в мировое пространство.

В воде свет поглощается ею, причем его энергия идет на увеличение внутренней энергии воды, а следовательно, ее температуры. Как известно, от температуры и солености воды зависит ее плотность. Различие в плотности, а также ветер и другие причины вызывают перемешивание масс воды — морские течения. На различных глубинах в различных морях устанавливаются разные температуры.

Вода океанов, морей и пресных водоемов в свою очередь излучает энергию в соответствии с законами Вина и Стефана — Больцмана. Ввиду низкой температуры ($T = 300^\circ \text{ К}$) излучение находится в инфракрасной части спектра ($\lambda \approx 10^4 \text{ нм}$), и поэтому оно невидимо, но хорошо ощутимо. На берегу моря ночи и зимы бывают теплее, чем внутри континента.

Часть световой энергии Солнца, лежащая в коротковолновой части спектра (зеленые, голубые, синие, фиолетовые лучи), слабо поглощается водой и проникает на довольно большие глубины в зависимости от прозрачности воды, рассеиваясь многократно по дороге. Рассеянный свет в свою очередь частично поглощается водой, а частично высвечивается. От спектрального состава этого света, а также света, отраженного от поверхности воды, с которым он смешивается, зависит цвет водоема.

Так как степень отражения, рассеяния и поглощения света водой зависит от состава растворенных в ней веществ и условий освещения, то и цвет воды в водоеме также зависит от этих факторов и изменяется вместе с ними. Во всяком случае, ввиду того, что рассеивается главным образом коротковолновая часть света, вода морей кажется нам зеленой, голубой, синей и даже фиолетовой (в Черном море).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЧАСТЯХ СВЕТОВОГО ПОТОКА, ПРОНИЗЫВАЮЩЕГО ВОДУ

Распределение энергии в различных частях светового потока, пронизывающего воду, зависит от состава воды и от положения Солнца над горизонтом. Когда Солнце находится в зените, его лучи преодолевают небольшую толщину атмосферы (около 20 км). По мере его приближения к горизонту толщина (масса) атмосферы увеличивается.

В соответствии с этим увеличивается рассеяние света атмосферой и меняется состав его, доходящий до поверхности воды. Это видно из таблицы, где указана доля соответствующего излучения в процентах.

Т а б л и ц а

Излучение, нм	Высота солнца над горизонтом, °					
	5	10	20	30	50	90
Ультрафиолетовое, 295—400	0,4	1,0	2,0	2,7	3,2	4,7
Видимое, 400—760	38,6	41,0	42,7	43,7	43,9	45,3
Инфракрасное, более 760	61,0	58,0	55,3	53,6	52,9	50,0

Из таблицы видно, что на заре доля ультрафиолетового излучения ничтожна, на высоте 20—90° видимое и инфракрасное излучение меняется незначительно, а ультрафиолетовое возрастает более чем в 2 раза.

Но море и суша получают не только прямой солнечный свет. Значительная часть света поступает в виде рассеянного атмосферой света соответствующей цветности — на заре богатого красными лучами, днем голубыми. Вклад света, рассеянного атмосферой, в общее излучение, которое падает на поверхность моря, показан в следующей таблице.

Т а б л и ц а

Высота солнца	5	10	20	30	40	50
Рассеянное излучение, %	73,4	42,9	29,0	21,0	18,0	15,4

О каком же свете идет речь, когда говорят об освещении поверхности моря? Целесообразнее всего рассматривать суммарную радиацию, т. е. сочетание прямого и рассеянного излучения.

ПОГЛОЩЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ СВЕТА ВОДОЙ. ПРОЗРАЧНОСТЬ ВОДОЕМОВ

Поглощательная способность воды количественно описывается законом Бугера: $I = I_0 e^{-\alpha x}$. Надо отметить, что в воде красный свет поглощается больше, чем синий и фиолетовый.

В морской и речной воде процесс поглощения усложняется, так как свет поглощается не только молекулами воды, но и молекулами растворенных и взвешенных в ней веществ. А растворены в морской воде практически все элементы, имеющиеся на Земле. Кроме солей, в море растворены и органические вещества, которые поглощают больше энергии света, чем растворы солей.

О рассеянии света в воде можно сказать то же, что и о рассеянии света в воздухе. Кроме того, в воде свет рассеивается на микроорганизмах, взвесах нерастворимых пород, на флуктуациях плотности воды, частицах эмульсии жира и др. Интенсивность рассеянного света подчиняется закону Рэлея: $I \propto I_0 \frac{1}{\lambda^n}$, причем величина показателя рассеяния n уменьшается по мере того, как диаметр частиц растет. Эта зависимость выражена в приведенной ниже таблице.

Т а б л и ц а

Диаметр рассеивающей частицы, $\mu\text{м}$	0,07	0,1	0,15	0,23	0,30	0,35
Показатель степени	4,0	3,5	3	2,5	2,0	1,5

Все описанные явления относятся к рассеянию отдельными частицами в параллельном световом пучке, исходящем от источника света. В воде все это происходит гораздо сложнее, так как здесь лучи света, проникая в воду, в поверхностном слое сохраняют еще свое направление, но затем, после нескольких актов рассеяния, свет идет

уже в разных направлениях и опять испытывает рассеяние, пока не станет полностью рассеянным.

В зависимости от того, какое количество световой энергии рассеялось и поглотилось в ней, зависит прозрачность воды. Чем больше рассеяние и поглощение, тем меньше прозрачность. Поэтому наличие взвесей, а также растворенных солей уменьшает прозрачность воды. Для измерения степени прозрачности воды русский ученый Коцебу опускал в нее столовые тарелки. По глубине, на которой тарелка переставала быть видимой, он судил о прозрачности воды. Чем больше глубина, тем больше прозрачность воды.

Глубина погружения белого диска диаметром 30 см до полной потери его видимости в течение долгого времени служила мерой прозрачности вод океана.

В настоящее время прозрачность воды измеряется при помощи фотоэлектрических прозрачномеров. Прозрачность воды морей и океанов в разное время далеко не одинакова. Северные воды летом свободны ото льда, однако благодаря обилию планктона, который «цветет» в это время, их прозрачность мала. После окончания цветения планктона прозрачность увеличивается. Воды, расположенные вблизи экватора, наоборот, очень прозрачны, так как благодаря слабому перемешиванию воды из-за тихой погоды в них мало питательных веществ и солей, следовательно, мало планктона. Интересно Саргасово море, расположенное в Атлантическом океане. На 1 км² в нем приходится по 10 000—20 000 кустов водорослей размером 20—40 см; в то же время планктона в нем в 30—70 раз меньше, чем в Норвежском море, и прозрачность воды велика. Его вода по своим оптическим свойствам почти не отличается от дистиллированной. В августе — сентябре обильно цветет планктон в Азовском море. Воды его вообще малопрозрачны, так как в них взвешено большое количество ила, и море в обычное время кажется белесо-серым. Во время же цветения планктона оно ярко-зеленое. Из-за обилия планктона вода его зелена и в малом объеме, например в ведре.

ЧЕМ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ЦВЕТ МОРЯ?

Ответ на этот вопрос в основном уже дан в предыдущих параграфах этой главы. Оттеним здесь дополнительно некоторые его стороны.

Цвет воды определяется в первую очередь светом, отраженным от ее поверхности. Так как коэффициент отражения почти одинаков для всех длин волн видимого спектра, то отраженный свет имеет окраску источника света — неба: днем он голубой, вечером оранжевый или розовый, в пасмурную погоду серый. Но он смешивается, как уже говорилось, со светом, излучаемым морем вследствие рассеяния. Спектральный состав этого света беден красными, оранжевыми и желтыми цветами — в нем преобладают цвета коротковолновой части спектра. Кроме того, ввиду дисперсии при преломлении интенсивность цветов, выходящих из воды, зависит от угла, под которым они наблюдаются. В результате световой поток, вышедший из моря, в чистых океанских водах имеет насыщенную синюю окраску (например, в Индийском океане). В мутных водах, содержащих большое количество взвешенных частиц, поверхность моря кажется серо-зеленой.

Надо отметить еще один фактор, который может влиять на видимый цвет моря, — это отражение света от морского дна. Если для глубин в несколько сотен метров им можно пренебречь, то на мелководье окраска дна оказывает существенное влияние на цвет поверхности водоема. Кроме того, в мелких водоемах вода всегда взмучена, так как волнение поднимает со дна ил. Например, Азовское море, глубина которого не превышает 14 м, имеет бледный серо-зеленый цвет.

ПОЧЕМУ В ВОДЕ ВИДНО ХУЖЕ, ЧЕМ В ВОЗДУХЕ?

В воде видно хуже, чем в воздухе. На некотором относительно небольшом расстоянии уже невозможно определить очертания даже большого предмета. Это происходит по двум причинам: вследствие сильного уменьшения преломляющей способности глаза, погруженного в воду, и вследствие рассеяния света водой.

Показатель преломления жидкостей, заполняющих глаз, близок к показателю преломления воды. Только у хрусталика он несколько больше. Поэтому если роговица глаза непосредственно соприкасается с водой, на ее поверхности почти не происходит преломления. Изображение предмета получается не на сетчатке, а гораздо дальше. Для того чтобы изображение могло получиться на

сетчатке, глаз должен обладать оптической силой около 100 *дптр*. Поэтому необходимым условием видения под водой является изоляция глаза от воды слоем воздуха при помощи масок, употребляемых аквалангистами, или шлемов водолазных скафандров.

В этом случае свет из воды проходит в воздух, а затем в глаз, нормально преломляясь и фокусируясь.

Однако и при хорошей фокусировке мы не всегда видим предмет. Для того чтобы он был видим на каком-то фоне, должно существовать различие в яркостях фона и предмета (яркостный контраст) или различие в их окраске (цветовой контраст).

Рассеяние света водой не только уменьшает контрастность, но и создает между наблюдателем и предметом некоторую световую дымку, очень затрудняющую видение. Дымка создает особенно большие трудности при работе в воде с искусственным источником света. Сильные прожекторы улучшают освещенность предмета, но одновременно увеличивают дымку. Видимость же при этом не улучшается. Поэтому для работ под водой используют обычно источники света мощностью не более чем 1—3 *квт*, причем стараются приблизить источник света к рассматриваемому предмету.

Во всяком случае расстояние, на котором можно видеть большой предмет, освещенный источником света, находящимся рядом с наблюдателем, не превышает 50—60 *м*.

КАК ВИДЯТ РЫБЫ?

Но почему же рыбы видят в воде хорошо? Объясняется это строением глаз рыбы. На рисунке 85 представлен разрез глаза рыбы. Первое, что обращает на себя внимание,—это шарообразный хрусталик, который сильнее преломляет свет, чем линзообразный у человека. Во-вторых, при аккомодации передняя часть глаза вместе с хрусталиком смещается и занимает положение, указанное на рисунке штрихами. При этом рыба видит на более дальнее расстояние, но все же не превышающее 15 *м*.

Восприятие света у рыб производится также при помощи палочек и колбочек. Однако у глубоководных рыб колбочки отсутствуют, но палочки расположены более

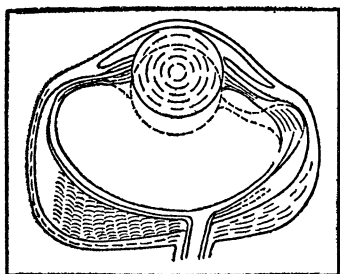


Рис. 85. Разрез глаза рыбы.

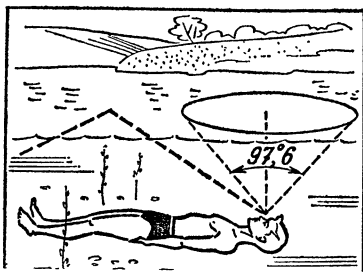


Рис. 87. Так мы видим, находясь в воде.

густо (на 1 мм^2 поверхности сетчатки расположено до 20 миллионов палочек).

Интересно, что размер глаз рыб тем больше, чем в более глубоких местах они обитают. Диаметр глаза у некоторых глубоководных рыб достигает 40 — 50% длины головы, глаза ряда рыб обладают светящимся органом, постоянно раздражающим сетчатку, что повышает ее чувствительность.

Но у многих сверхглубоководных рыб, проживающих в вечной темноте, глаза маленькие или вовсе отсутствуют. В этой зоне, где источником света является свечение тела самого животного, глаз должен получить световой сиг-

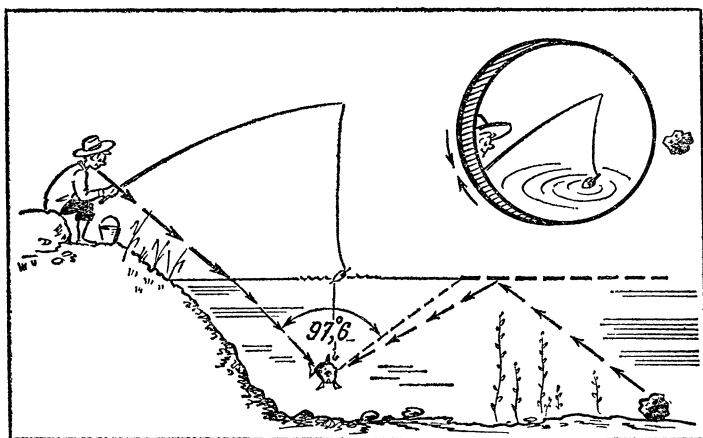


Рис. 86. Так видит рыба из-под воды.

нал, а не изображение формы предмета. Поэтому вместо глаза световое ощущение часто воспринимается окончанием зрительного нерва, выходящего наружу.

Может ли видеть рыба то, что происходит в воздухе?

Есть рыбы, глаза которых разделены на две части: одна из них предназначена для видения в воздухе, другая — для видения в воде. Обычно рыба видит воздушное пространство, содержащееся в конусе с углом у вершины, не превышающим 98° . Лучи от предметов, расположенных вне этого конуса, вследствие преломления на поверхности воды в глаз не попадают. Зато в глаз рыбы вследствие полного внутреннего отражения от поверхности воды попадают лучи, исходящие от предметов, которые находятся под водой (рис. 86). Узнать, как видно из-под поверхности воды, можно погрузившись в тихий день в воду, как указано на рисунке 87.

ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ

Одним из красивейших оптических явлений природы является полярное сияние. Невозможно передать словами красоту полярных сияний, переливающихся, мерцающих, пламенеющих на фоне темного ночного неба в полярных широтах.

В большинстве случаев полярные сияния имеют зеленый или сине-зеленый оттенок с изредка появляющимися пятнами или каймой розового или красного цвета (см. цв. вклейку VIII).

Полярные сияния наблюдают в двух основных формах — в виде лент и в виде облакоподобных пятен. Когда сияние интенсивно, оно приобретает форму лент. Теряя интенсивность, оно превращается в пятна. Однако многие ленты исчезают, не успев разбиться на пятна. Ленты как бы висят в темном пространстве неба, напоминая гигантский занавес или драпировку, протянувшуюся обычно с востока на запад на тысячи километров. Высота занавеса составляет несколько сотен километров, толщина не превышает несколько сотен метров, причем он так нежен и прозрачен, что сквозь него видны звезды. Нижний край занавеса довольно отчетливо и резко очерчен и часто подкрашен в красный или розоватый цвет, напоминающий кайму занавеса, верхний — постепенно теряется в

высоте, и это создает особенно эффектное впечатление глубины пространства.

На рисунке 88 схематически изображены различные виды сияний в зависимости от высоты, на которой они возникают.

Различают четыре типа полярных сияний (рис. 89): однородная дуга — светящаяся полоса имеет наиболее простую, спокойную форму. Она более ярка снизу и постепенно исчезает кверху на фоне свечения неба (рис. 89, а);

лучистая дуга — лента становится несколько более активной и подвижной, она образует мелкие складки и струйки (рис. 89, б);

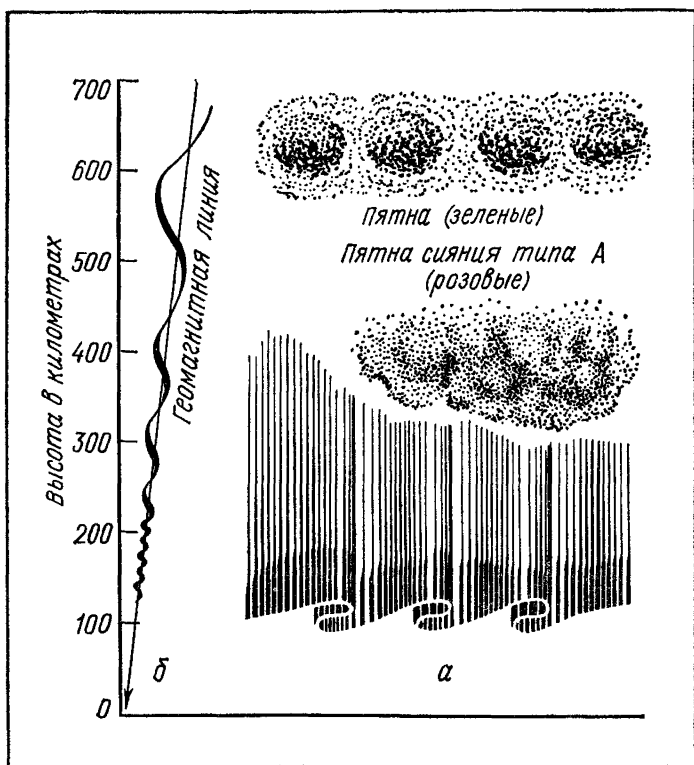


Рис. 88. Типичные формы полярных сияний показаны в зависимости от их высоты.

лучистая полоса — с ростом активности более крупные складки накладываются на мелкие (рис. 89, в);

при повышении активности складки или петли расширяются до огромных размеров (до сотни километров), нижний край ленты ярко сияет розовым светом (рис. 89, г). Когда активность спадает, складки исчезают и лента возвращается к однородной форме. Это наводит на мысль, что однородная структура является основной формой полярного сияния, а складки связаны с возрастанием активности.

Часто возникают сияния иного вида. Они захватывают весь полярный район и оказываются очень интенсивными. Происходят они во время увеличения солнечной активности. Эти сияния представляются в виде беловато-зеленого свечения всей полярной шапки (рис. 90). Такие сияния называют шквалами.

По яркости сияния разделяют на четыре класса, отличающиеся друг от друга на один порядок (т. е. в 10 раз). К первому классу относятся сияния, еле заметные и приблизительно равные по яркости Млечному Пути, сияние же четвертого класса освещает Землю так ярко, как полная Луна.

Надо отметить, что возникшее сияние распространяется на запад со скоростью примерно 1 км/сек. Верхние слои атмосферы в области вспышек сияний разогреваются и устремляются вверх, что сказалось на усиленном торможении искусственных спутников Земли, проходящих эти зоны.

Во время сияний в атмосфере Земли возникают вихревые электрические токи, захватывающие большие области. Они возбуждают дополнительные неустойчивые маг-

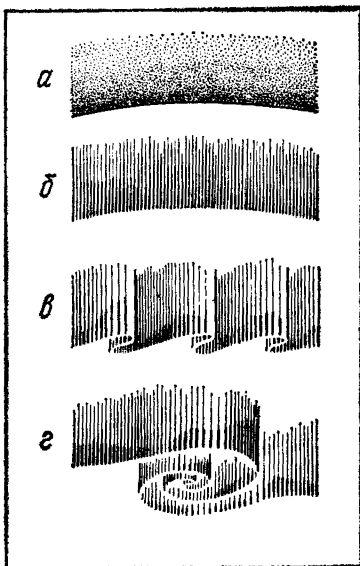


Рис. 89. Лентообразные формы полярных сияний.

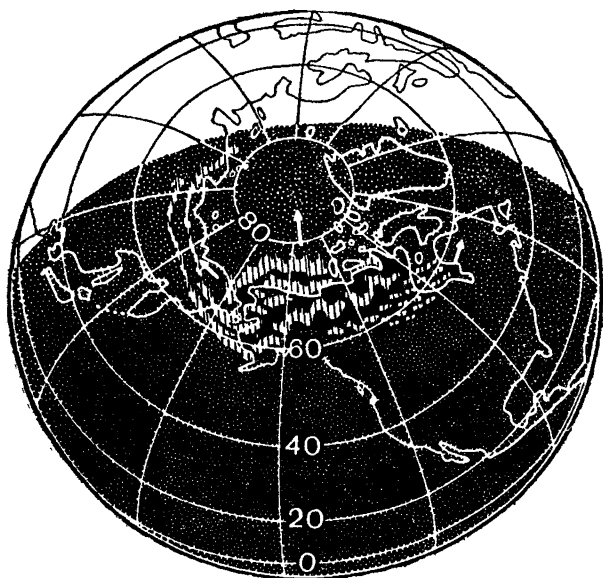


Рис. 90. Полярная область Земного шара, занятая шквалом полярных сияний. Она распространяется с востока на запад. В центре наиболее интенсивная ленточная форма, вперед на запад продвигаются спокойные дуги, сзади остаются светящиеся пятна.

нитые поля, так называемые магнитные бури. Во время сияний атмосфера излучает рентгеновские лучи, которые, по-видимому, являются результатом торможения электронов в атмосфере.

Интенсивные вспышки сияния часто сопровождаются звуками, напоминающими шум, треск. Полярные сияния вызывают сильные изменения в ионосфере, что в свою очередь влияет на условия радиосвязи. В большинстве случаев радиосвязь значительно ухудшается. Возникают сильные помехи, а иногда полная потеря приема.

КАК ВОЗНИКАЮТ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ?

Земля представляет собой большой магнит (причина земного магнетизма не выяснена), южный полюс которого находится вблизи северного географического полюса (71° с. ш., 96° в. д.), а северный — вблизи южного (173°

ю. ш., 156° в. д.). Силовые линии магнитного поля Земли, называемые геомагнитными линиями, выходят из области, прилегающей к северному магнитному полюсу Земли, охватывают Земной шар и входят в него в области южного магнитного полюса, образуя тороидальную (бубликовидную) решетку вокруг Земли (рис. 91, 92).

Долго считали, что расположение магнитных силовых линий симметрично относительно земной оси. Теперь выяснилось, что так называемый «солнечный ветер» — поток протонов и электронов, излучаемых Солнцем (особенно активно во время вспышек на Солнце), налетая на геомагнитную оболочку Земли с высоты около 20 000 км, оттягивает ее назад, в сторону от Солнца, образуя у Земли своеобразный магнитный «хвост» (рис. 92). В результате магнитное поле приобретает форму, о которой можно судить по рисункам 91—93.

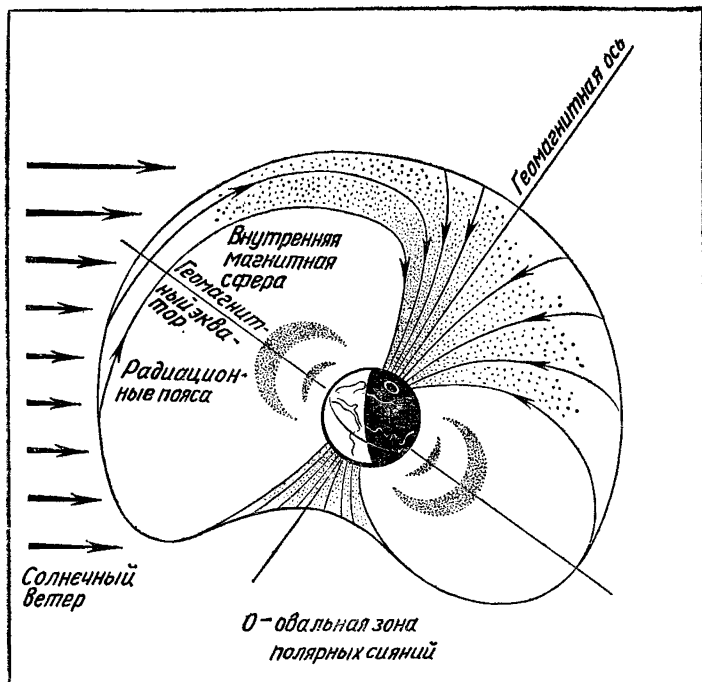


Рис. 91. Магнитосфера Земли — тороид, искаженный под влиянием солнечного ветра.

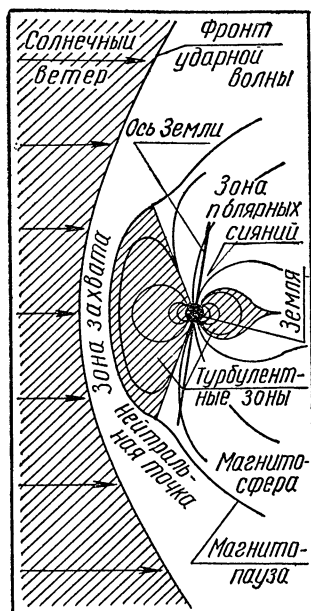


Рис. 92. Магнитное поле Земли.

вдоль магнитных силовых линий сразу стекает в полярные области Земли; другие попадают внутрь тороида и движутся внутри него, как это можно установить по правилу левой руки, вдоль замкнутой кривой ABC (рис. 93, e). (Электроны движутся в обратную сторону.) Эти протоны и электроны в конце концов по геомагнитным линиям также стекают в область полюсов, где возникает их увеличенная концентрация. Протоны и электроны производят ионизацию и возбуждение атомов и молекул газов. Для этого они имеют достаточно энергии, так как протоны прилетают на Землю с энергиями $10\,000 - 20\,000$ эв ($1\text{ эв} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ дж), а электроны — с энергиями $10 - 20$ эв. Для ионизации же атомов нужно: для водорода — $13,56$ эв, для кислорода — $13,56$ эв, для азота — $14,47$ эв, а для возбуждения и того меньше.

Возбужденные атомы газов отдают обратно полученную энергию в виде света, наподобие того, как это происходит в трубках с разреженным газом при пропускании через них токов.

Для понимания дальнейшего надо вспомнить, как движется заряженная частица в магнитном поле: а) в случае, если она летит перпендикулярно магнитным силовым линиям (рис. 93, a); б) под углом к силовым линиям (рис. 93, b). В последнем случае она движется по спирали, тем более вытянутой, чем меньше угол α между линиями индукции поля B и скоростью частицы v_0 .

Отсюда следует, что электрон или протон, попавшие в магнитное поле Земли, движутся по спирали, как бы навиваясь на геомагнитную линию (см. рис. 88). Электроны и протоны, попавшие из солнечного ветра в магнитное поле Земли, разделяются на две части. Часть из них

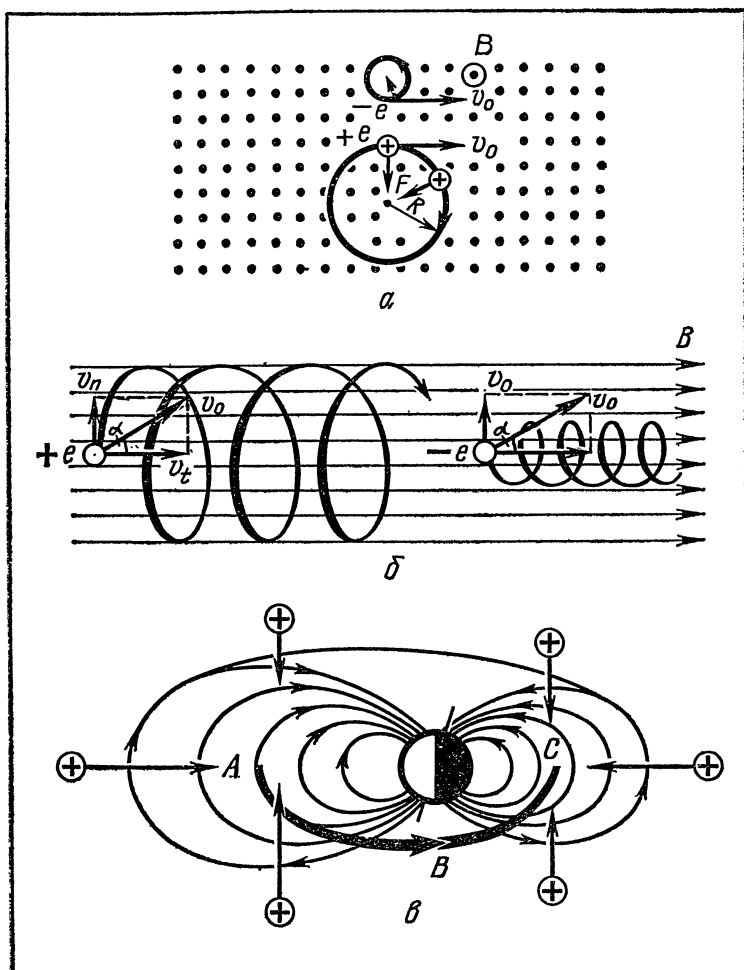


Рис. 93. Движение заряженных частиц в различных магнитных полях: а) в однородном $-\vec{v} \perp \vec{B}$; б) в однородном, но частица влетает под углом α ; в) движение протонов в тороидальной магнитной ловушке.

Спектральное исследование показывает, что зеленое и красное свечение принадлежит возбужденным атомам кислорода, инфракрасное и фиолетовое — ионизованным молекулам азота. Некоторые линии излучения кислорода и азота образуются на высоте 110 км, а красное свечение кислорода — на высоте 200—400 км (см. рис. 88). Другим слабым источником красного свечения являются атомы водорода, образовавшиеся в верхних слоях атмосферы из протонов, прилетевших с Солнца. Захватив электрон, такой протон превращается в возбужденный атом водорода и излучает красноватый свет. Это излучение на рисунке 88 изображено как слабое свечение типа А.

Вспышки сияний обычно происходят через день-два после вспышек на Солнце. Это подтверждает связь между этими явлениями. Исследования при помощи ракет показали, что в местах большей интенсивности сияний имеется более значительная ионизация газов электронами.

В последнее время советские ученые установили, что полярные сияния более интенсивны у берегов океанов и морей. Это, видимо, связано с электрическими токами, протекающими в водах вблизи их берегов.

Однако научное объяснение всех явлений, связанных с полярными сияниями, встречает ряд трудностей. Например, неизвестен точно механизм ускорения частиц до указанных выше энергий, не вполне ясны их траектории в околоземном пространстве, не все сходится количественно в энергетическом балансе ионизации и возбуждения частиц, не вполне ясен механизм образования свечения различных видов, неясно происхождение звуков. Все эти вопросы требуют объяснения, а поэтому многие полярные станции в СССР и других странах ведут тщательные наблюдения, накапливают факты, разрабатывают их теоретически.

Большую помощь в этом оказывают искусственные спутники, автоматические станции и космонавты, наблюдающие атмосферу и полярные сияния из космоса.

СЕВЕРНОЕ СИЯНИЕ НАД МОСКВОЙ

8 марта 1970 г. в Москве наблюдалось редкое для этих широт величественное полярное сияние.

В городе и на его окраинах вечером бывает светло, так как свет многих городских светильников рассеивается

атмосферой. Однако на этот раз около 22 часов весь северный участок неба сиял необыкновенно нежным, ярким, зеленоватым, прозрачным светом. Свечение занимало около четверти горизонта и поднималось на $40—50^{\circ}$ в высоту. Сверху оно было ограничено слабо-пурпурной каймой, а справа и слева располагались вертикальные пурпурные столбы, медленно меняющие свои очертания. Сквозь свечение видны были звезды. Минут через 30 вся картина стала тускнеть, а затем совсем исчезла. Стрелка компаса во время сияния вела себя беспокойно. Телевизор работал с помехами, магнитная буря, сопровождающая сияние, продолжалась еще некоторое время после того, как свечение исчезло.

ЛИТЕРАТУРА

- А к а с о ф у С. Полярные сияния. «Успехи физических наук», 1966, № 89.
- Б р а й е н Б. О. Явления, связанные с полярными сияниями. «Успехи физических наук», 1966, № 89.
- Б р э г г У. Мир света. Мир звука. М., Наука, 1967.
- В а в и л о в С. И. Глаз и солнце. О «теплом» и «холодном свете». М., Изд-во АН СССР, 1961.
- Г р е г г Дж. Опыты со зрением в школе и дома. М., Мир, 1970.
- М и н н а р т М. Свет и цвет в природе. М., Физматгиз, 1958.
- Н о в и к о в а Н. Г. «Необыкновенные» небесные явления. М., Гостехтеориздат, 1961.
- О ч а к о в с к и й Ю. Е., К о п е л е в и ч С. В., В о й - т о в В. И. Свет в море. М., Наука, 1970.
- Т о л а н с к и й С. Оптические иллюзии. М., Мир., 1967.
- Ш а р о н о в В. В. Свет и цвет. М., Физматгиз, 1961.
- Ш а ф р а н о в с к и й И. И. Алмазы. М.— Л., Наука, 1964.

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>От автора</i>	3
<i>Введение</i>	4
СВЕТ И ТЕНЬ	8
ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ОТРАЖЕНИЕМ СВЕТА	13
ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ СВЕТА	20
ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПРЕЛОМЛЕНИЕМ СВЕТА	25
ГАЛО	44
ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ И ДИФРАКЦИЕЙ СВЕТА	53
ИЗЛУЧЕНИЕ СВЕТА И ТЕПЛА	59
ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ	67
ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ПОГЛОЩЕНИЕМ И РАССЕЯНИЕМ СВЕТА	72
ГЛАЗ И ЗРЕНИЕ	95
ЦВЕТ И ЕГО ВОСПРИЯТИЕ	120
СВЕТ И МОРЕ	125
ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ	133
<i>Л и т е р а т у р а</i>	142

ВИКЕНТИЙ ЛЮЦИАНОВИЧ БУЛАТ

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ПРИРОДЕ

Редактор *А. Ф. Раева*

Художественный редактор *Т. А. Алябьева*

Технический редактор *З. Б. Хамидулина*

Корректор *Н. М. Данковцева*



Сдано в набор 26/III 1974 г.

Подписано к печати 19/IX 1974 г.

84×108¹/₃₂. Бумага типографская №2.

Печ. л. 4,5+вкл. 0,5. Услов. л. 7,56+вкл. 0,84.

Уч-изд. л. 7,24+вкл. 0,48.

Тираж 100 тыс. экз. Заказ 4—947. А 11585.



Издательство «Просвещение»
Государственного комитета Совета Министров РСФСР
по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли.
Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Головное предприятие республиканского
производственного объединения «Полиграфкнига»
Госкомиздата УССР, г. Киев, Довженко, 3.

Цена 27 коп.

27 коп.

