

т. е. точка P' является стигматическим изображением точки P в широких пучках лучей. Иными словами, среда с показателем преломления (20.6) обладает свойствами абсолютного оптического инструмента. Она и была названа Максвеллом «рыбьим глазом».

§ 21. Глаз и зрение

1. На рис. 79 приведен горизонтальный разрез правого глаза человека (вид сверху). Глазное яблоко заключено в плотную белую непрозрачную оболочку w , называемую *склерой*. Через заднюю стенку склеры проходит глазной нерв e и кровеносные сосуды. Передняя часть склеры переходит в прозрачную *роговую оболочку*, или *роговицу* h , более выпуклую, чем склера. Толщина склеры от

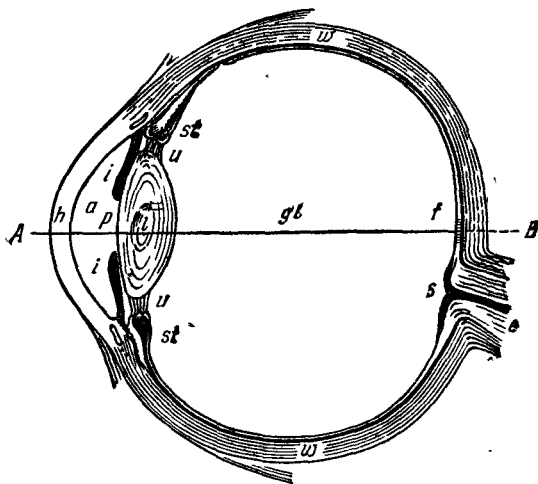


Рис. 79.

0,4 до 1,1 мм, роговицы — около 0,5 мм. За роговицей следуют *передняя глазная камера* a , *хрусталик* l , *задняя глазная камера* gl . Эти части вместе с роговицей составляют *оптическую систему глаза*, дающую при преломлении лучей оптические изображения предметов. Толщина передней глазной камеры, а также хрусталика около 3,6 мм. Передняя глазная камера заполнена прозрачной жидкостью, называемой *водянистой влагой*, задняя — прозрачным студенистым веществом, называемым *стекловидным телом*. Показатели преломления обеих этих сред практически одинаковы и равны 1,336. Показатель преломления роговой оболочки 1,376.

Внутренняя поверхность склеры покрыта *сосудистой оболочкой* (толщиной около 0,4 мм), содержащей разветвления кровеносных сосудов, питающих глаз. Спереди она переходит в утолщенную часть

st, содержащую кольцевидную ресничную мышцу *и*, и далее в радужную оболочку *ii*, не одинаково окрашенную у различных людей и определяющую «цвет глаз». Посередине радужной оболочки имеется круглое отверстие, называемое *зрачком глаза*, которое выполняет роль апертурной диафрагмы. Изображение этого отверстия, даваемое расположенными перед ним водянистой влагой и роговицей, играет роль входного, а изображение, даваемое хрусталиком и стекловидным телом, — выходного зрачков глаза. Оба они практически совпадают с настоящим зрачком. В зависимости от яркости света зрачок может рефлекторно сужаться и расширяться посредством мышцы *и*, с которой связана радужная оболочка. Диаметр его может меняться примерно от 2 до 8 мм. Этим достигается ограничение поперечных размеров пучков света, поступающих в глаз.

2. На внутренней поверхности сосудистой оболочки расположена светочувствительная *сетчатая оболочка*, или *сетчатка* (*рeтiна*), состоящая главным образом из радиально расходящихся разветвлений зрительного нерва *e*, входящего во внутреннюю полость глаза несколько сбоку от линии прямого зрения *AB*, ближе к носовой полости. Около точки *s* толщина сетчатки составляет 0,2—0,22 мм; к периферии она непрерывно уменьшается. Оптическая система глаза дает изображение предметов на сетчатке, где оно вызывает зрительные раздражения, передаваемые в мозг по нервным волокнам.

Недалеко от точки *s*, где начинаются разветвления зрительного нерва, со стороны виска, находится так называемое *желтое пятно f* (горизонтальный поперечник 1—3 мм, вертикальный 0,8 мм). В его центральной части (размером $\approx 0,3$ мм по горизонтали и $\approx 0,2$ мм по вертикали) имеется углубление, называемое *центральной ямкой*. Здесь толщина сетчатки не превышает 0,08—0,1 мм. Желтое пятно и в особенности центральная ямка являются наиболее чувствительными местами сетчатки (при дневном зрении). Изображение рассматриваемой точки пространства всегда приводится к середине центральной ямки. Прямая, проходящая через эту точку и заднюю узловую точку глаза, вместе с параллельной ей прямой, проходящей через переднюю узловую точку, определяет так называемую *линию прямого зрения*. Она не совсем совпадает с *осью симметрии глаза*, так как преломляющие поверхности глаза не вполне симметричны и центрированы. Ось симметрии глаза можно провести в некотором смысле только условно. Обычно ее проводят через крайнюю, наиболее выступающую точку выпуклой поверхности роговицы (несколько выше точки *A* на рис. 79) и через центр зрачка. Она встречает заднюю стенку глаза где-то между точками *f* и *s*, образуя с линией прямого зрения *AB* угол около 5° .

3. Хрусталик *l* представляет собой прозрачное бесцветное тело, напоминающее двояковыпуклую линзу, передняя поверхность которой менее выпукла, чем задняя. Он состоит из слоев различной плот-

ности, имеющих волокнистое строение. Наружный слой мягкий и почти студенистый; ядро же более твердое и вполне упругое. Показатель преломления наружного слоя хрусталика 1,405, средних слоев — около 1,429, ядра — 1,454. Мышца *иш*, рефлекторно напрягаясь или расслабляясь, может менять кривизну его поверхностей, главным образом передней. Этим осуществляется *аккомодация*, т. е. изменение оптической силы глаза, позволяющее фокусировать изображения на сетчатке. Так как деформация хрусталика может происходить только в определенных пределах, то для всякого глаза существуют определенные границы, в пределах которых глаз может отчетливо видеть предметы. Эти границы определяют так называемую *область аккомодации глаза*. Наиболее отдаленная граница, которую глаз может видеть отчетливо при вполне ослабленной мышце, называется *дальней*, а ближайшая граница, которую он способен отчетливо видеть при максимальном напряжении мышцы, — *ближней точкой ясного видения*. В ненапряженном состоянии нормальный глаз аккомодирован на рассмотрение бесконечно удаленных предметов, т. е. он собирает параллельные лучи в точке сетчатки. Таким образом, дальняя точка ясного видения для нормального глаза находится в бесконечности. В возрасте до десяти лет ближняя точка нормального глаза лежит впереди на расстоянии 7—8 см от глаза. К 30 годам это расстояние увеличивается примерно до 15 см, к 40—45 годам — до 25 см.

Приближая рассматриваемый предмет к глазу, мы увеличиваем *угол зрения*, а с ним и размеры изображения на сетчатке. Это позволяет рассмотреть более мелкие детали. Однако при максимально возможном приближении усиливается напряжение мышцы, деформирующей хрусталик. Работа глаза становится утомительной. В случае *нормального глаза* оптимальное расстояние для чтения и письма составляет около 25 см. Это расстояние для нормального глаза и принимается условно за *расстояние ясного зрения*. При необходимости рассмотреть (в течение ограниченного времени) более мелкие детали его можно уменьшить, оставаясь в пределах области аккомодации глаза.

4. У *близорукого глаза* оба предела ясного видения находятся ближе, а ближний предел *дальнозоркого глаза* — дальше, чем у нормального глаза. Дальний предел дальнозоркого глаза всегда отрицателен, т. е. дальняя точка ясного видения находится не спереди, а позади глаза. Такой глаз в ненапряженном состоянии может собирать на сетчатке только сходящиеся пучки лучей. При сильной дальнозоркости и ближний предел ясного зрения может сделаться отрицательным. У близорукого глаза в ненапряженном состоянии параллельные лучи сходятся перед, а у дальнозоркого — за сетчаткой.

Близорукость может быть обусловлена большей, а дальнозоркость — меньшей длиной глаза по сравнению с длиной нормального

глаза. Отступления длины глаза от нормальной даже в пределах одного миллиметра уже могут приводить к заметной близорукости или дальнозоркости. Эти, а также другие недостатки глаза могут возникать из-за неправильных значений кривизны преломляющих поверхностей хрусталика и роговицы, несимметричности этих поверхностей, неправильного положения хрусталика и пр.

Термин «дальнозоркий» очень неудачен, так как с ним ассоциируется ошибочное представление, что дальнозоркость якобы способствует отчетливо видеть далекие предметы. Никакими преимуществами перед нормальным глазом дальнозоркий глаз не обладает, так как вся область перед глазом, отчетливо видимая дальнозорким глазом, отчетливо видна и нормальным глазом. Но область между ближними точками ясного видения дальнозоркого и нормального глаза недоступна для отчетливого рассматривания дальнозорким глазом. Близорукому глазу, напротив, недоступна область, лежащая за дальней точкой ясного видения нормального глаза ¹⁾.

Как уже отмечено выше, с возрастом (в основном из-за уплотнения хрусталика, теряющего способность достаточно сжиматься) ближняя точка ясного видения удаляется от глаза. Для нормального глаза это удаление к 50 годам составляет около 50 см. Читать на таком расстоянии уже трудно. В дальнейшем указанная точка уходит еще дальше, удаляется в бесконечность и к 60—65 годам перескакивает на противоположную сторону глаза. Затем она начинает приближаться к нему, но уже с противоположной стороны. Это явление называется *старческой дальнозоркостью*.

Дальнозоркость устраняется применением очков с *положительными* (т. е. собирающими), а близорукость — с *отрицательными* (т. е. рассеивающими) стеклами. Положительные стекла приближают, а отрицательные отдаляют ближнюю точку ясного видения.

5. Систематические измерения привели к установлению средних значений всех параметров нормального глаза. Совокупность этих значений определяет так называемый *схематический глаз*. В табл. 3 приведены эти параметры, как они были определены Гульстрандом. Так как показатели преломления пространств предметов ($n = 1$) и изображений ($n' = 1,336$) различны, то переднее f и заднее f' фокусные расстояния не совпадают по величине ($f'/f = -1,336$). Задняя узловая точка K' расположена внутри глаза на расстоянии f от заднего фокуса F' , т. е. от сетчатой оболочки (см. рис. 43). Если линейный размер предмета равен l , то он виден из точки нахождения глаза под углом зрения $\alpha = l/L$. Поэтому линейный размер изобра-

¹⁾ У близорукого глаза есть по крайней мере то преимущество, что он может выявить более мелкие детали, приближая рассматриваемый предмет на меньшие расстояния, чем это возможно для нормального глаза. У дальнозоркого глаза аналогичное преимущество появилось бы, если бы возникла необходимость рассматривать мнимые изображения, образующиеся с задней стороны глаза.

жения на сетчатке будет $l' = fa = fl/L$, или при рассматривании удаленных предметов $\approx 17a$ мм.

Таблица 3

Схематический нормальный глаз по Гульстранду

(Все длины — в миллиметрах, все расстояния — от вершины роговой оболочки)

	При расслабленной глазной мышце	При максимальном напряжении мышцы
Расстояние до задней поверхности роговицы		0,5
Расстояние до передней поверхности хрусталика	3,6	3,2
Расстояние до задней поверхности хрусталика		7,2
Радиус передней поверхности роговицы		7,7
Радиус задней поверхности роговицы		6,8
Радиус передней поверхности хрусталика	10	5,33
Радиус задней поверхности хрусталика	—6	—5,33
Оптическая сила глаза в диоптриях	58,64	70,57
Расстояние до передней главной плоскости	1,348	1,772
Расстояние до задней главной плоскости	1,602	2,086
Расстояние до переднего фокуса	—15,707	—12,397
Расстояние до заднего фокуса	24,387	21,016
Переднее фокусное расстояние	17,055	14,169
Заднее фокусное расстояние	—22,785	—18,930
Расстояние до центральной ямки		24
Расстояние до входного зрачка	3,047	2,668
Расстояние до выходного зрачка	3,667	3,212
Увеличение в зрачках	0,909	0,941
Расстояние до ближней точки		102,3

6. Сетчатка глаза имеет весьма сложное строение. Схематический разрез ее приведен на рис. 80, а (предполагается, что свет падает сверху). Сетчатка состоит из нескольких слоев нервных клеток различного типа и назначения. В последнем слое находятся *светочувствительные рецепторные клетки* — палочки и колбочки (рис. 80, б). В них свет вызывает *первичные раздражения*, превращающиеся в электрические импульсы, которые по волокнам зрительного нерва передаются в кору головного мозга. Общая длина палочки 0,06—0,08 мм, колбочки — около 0,035 мм. Число колбочек в глазу достигает 7 миллионов, палочек — до 130 миллионов. Периферия сетчатки заполнена почти исключительно палочками. Число колбочек на единицу площади возрастает по мере приближения к желтому пятну, достигая максимума в его середине. Число колбочек на площади желтого пятна 13—15 тысяч. В его центральной части, в пределах круга радиуса $\approx 0,2$ мм, палочек нет, есть одни только колбочки. Число их здесь достигает 180 тысяч на квадратном миллиметре, так что среднее расстояние между центрами соседних колбочек $\approx 0,0025$ мм. В том месте, где внутрь глаза входит глазной нерв, т. е. вокруг точки *s* на рис. 79, на сетчатке нет ни палочек, ни колбо-

чек. Это место называется *слепым пятном*. Его легко обнаружить, закрыв левый глаз и смотря правым на крестик рис. 81. Если глаз

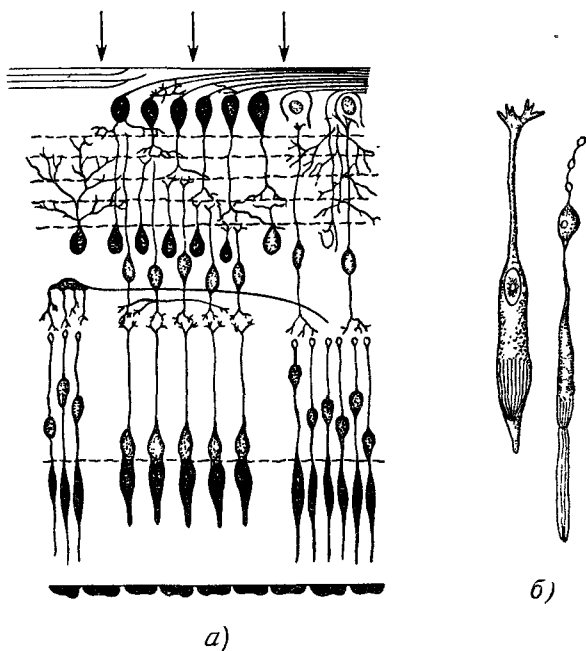


Рис. 80.

приближать к рисунку, то на расстоянии 15—17 см кружок становится невидимым. Это получается тогда, когда изображение кружка попадает на слепое пятно.

Палочки обладают значительно большей чувствительностью к свету, чем колбочки. Ночью и в сумерки (при освещенности меньше 0,01 лк) зрительное ощущение вызывается за счет раздражения одних только палочек. Зато колбочки способны различать цвета, а палочки этой способностью не обладают. Практически цветное зрение начинается с освещенностей ≈ 1 лк. При освещенностях выше 10^2 — 10^3 лк зрение осуществляется почти исключительно колбочками.



Рис. 81.

Детали предмета различаются наиболее отчетливо, когда его изображение получается на желтом пятне и в особенности на цент-

ральной ямке сетчатки. Это — так называемое *фовеальное зрение*, в отличие от *периферического зрения*, при котором изображение предмета получается вдали от центральной ямки. При периферическом зрении человек видит предметы значительно менее четко, различая в них мало деталей. Благодаря наличию на периферии в небольшом количестве колбочек, при периферическом зрении ощущение цветов имеет место, но только при условии, что яркость света достаточно велика, чтобы его воспринимали колбочки.

7. Две близкие светящиеся точки глаз воспринимает отдельно, а не как одну слившуюся точку только при условии, что угловое расстояние между этими точками не меньше определенного предела. Этот предел называется *разрешаемым угловым расстоянием*, а его обратная величина — *разрешающей способностью* или *остротой зрения глаза*. За единицу остроты зрения врачи принимают остроту зрения такого глаза, который разрешает угол в одну угловую минуту. Это — в среднем острота зрения нормального глаза.

Острота зрения максимальна, когда изображение приходится на центральную ямку сетчатки. Здесь плотность расположения колбочек максимальна, а каждая колбочка соединена с отдельным волокном зрительного нерва (число этих волокон — несколько миллионов). Мозг реагирует на раздражение каждой колбочки. Когда изображения двух близких светящихся точек приходятся на одну и ту же колбочку, эти точки действуют как одна светящаяся точка. В этом случае разрешения не получается. Для разрешения необходимо, чтобы изображения этих двух точек приходились на *разные колбочки*. На периферии плотность распределения светочувствительных рецепторов — колбочек и палочек — меньше, а каждое волокно зрительного нерва соединено с большим числом этих рецепторов. Вот почему максимальная разрешающая способность глаза получается при фовеальном зрении, когда изображение получается на центральной ямке сетчатки. Зрение же при помощи палочек предназначено не для повышения разрешающей способности глаза, а для *увеличения его чувствительности* в условиях работы при слабой освещенности. Для этого выгодно, как это и есть на самом деле, чтобы с каждым волокном зрительного нерва была соединена не одна палочка, а *большая группа* их. От этого усилится сигнал, передаваемый по этому волокну.

С изложенной точки зрения разрешаемое угловое расстояние глаза $\delta\theta$ равно углу, под которым видно из задней узловой точки глаза среднее расстояние δx между двумя соседними колбочками на центральной ямке, т. е. $\delta\theta = \delta x/f$, где f — переднее фокусное расстояние. Подставив числа, приведенные выше, получим $\delta\theta \approx 30''$. И действительно, наблюдения показали, что для нормального глаза $\delta\theta$ несколько меньше одной угловой минуты. Приведенная оценка совпадает с той, которая получается на основе *дифракционных соображений* (см. § 56).

Поле зрения, соответствующее желтому пятну, невелико. На это пятно одновременно может проектироваться картина с угловыми размерами около 6° по горизонтальному направлению и около 4° по вертикальному. Поле зрения центральной ямки еще меньше — около 1° по горизонтали и вертикали. Такая ограниченность поля ясного зрения компенсируется, однако, тем, что живой глаз обладает способностью быстро поворачиваться в глазной впадине, за очень короткое время обегая все точки видимой поверхности рассматриваемого большого предмета. Благодаря этому поле ясного зрения глаза расширяется приблизительно до 150° по горизонтали и 120° по вертикали. Вместе с тем отмеченная подвижность глаза позволяет быстро концентрировать внимание на наиболее важных деталях предмета.

8. Глазу присущи все аберрации обычных оптических систем: и геометрические, и хроматические, и дифракционные. Однако геометрические и хроматические аберрации очень мало заметны, так как глаз использует особые средства снижения их вредного действия. Теперь выяснено, что колбочки имеют форму волноводов. Устройство каждого волновода таково, что лучи, проходящие через периферийную зону зрачка, воздействуют на колбочку слабее центральных лучей. В глазу используются асферические преломляющие поверхности, а хрусталик представляет собой линзу, показатель преломления которой непрерывно возрастает к центру. Это приводит к концентрации света преимущественно вблизи центров кружков рассеяния. Поэтому при не очень ярком освещении края кружков рассеяния мало интенсивны. При ярком же освещении зрачок глаза сильно сужен, а от этого кружок рассеяния уменьшается еще сильнее. Все это ослабляет сферическую аберрацию и кому. Астигматизм косых пучков и дисторсия почти незаметны, так как при подвижности глаза изображение каждой точки бессознательно приводится в наиболее выгодное место сетчатки — центральную ямку. Искривление поверхности изображения компенсируется сферической формой сетчатки. Хроматическая аберрация почти незаметна, ввиду чувствительности сетчатки только к сравнительно узкой части спектра.

9. Остановимся теперь схематически на теории *цветного зрения* Юнга — Гельмгольца (1821—1894), которая лучше других теорий согласуется с наблюдаемыми фактами. Она исходит из того экспериментально установленного факта, что ощущение любого цвета можно получить смешением спектрально чистых излучений красного, зеленого и сине-голубого цветов. На этом основании теория предполагает, что в глазу есть только *три* типа светочувствительных приемников. Они отличаются друг от друга областями спектральной чувствительности. Красный свет воздействует преимущественно на приемники первого типа, зеленый — второго, сине-голубой — третьего. Сложением излучений таких трех цветов в различных коли-

чествах можно получить любую комбинацию возбуждений всех трех приемников, а это физиологически эквивалентно получению любого цветового ощущения. Еще не установлено, имеются ли приемники всех трех типов в каждой колбочке или существуют три различных типа колбочек.

Встречаются люди (более 1% среди мужчин и около 0,1% среди женщин), зрение которых характеризуется отсутствием приемников одного из трех указанных типов. Они называются *дихроматами*. Дихромат не различает цвета всех излучений, которые для людей с нормальным зрением различаются по степени возбуждения приемника, недостающего у дихромата. Еще реже (примерно раз на миллион людей) встречаются *монохроматы*, у которых есть приемники только одного типа. Такие люди совсем не различают цвета.

10. Чувствительность глаза к излучениям различных длин волн характеризуется *кривой видности*. На этой кривой по оси абсцисс откладывается длина волны, а по оси ординат — *видность* V_λ , т. е. величина, обратная энергетической мощности излучений, которые при оценке глазом воспринимаются как одинаково яркие. Визуальное сравнение яркостей излучений далеких друг от друга длин волн затруднительно. Поэтому для построения кривой видности обычно применяют *метод малых ступеней*, т. е. сравнивают попарно по видимой яркости излучения столь близких длин волн, что разница в цвете не затрудняет такое сравнение. Несмотря на субъективность этого метода, воспроизводимость результатов достаточно хороша, а кривые видности для различных людей не сильно отличаются друг от друга.

Кривая видности среднего нормального глаза при дневном зрении, утвержденная Международной осветительной комиссией, приведена на рис. 82. Она имеет максимум в желто-зеленой части спектра при $\lambda = 555$ нм, условно принимаемый за единицу. При сумеречном зрении, когда работает только палочковый аппарат, кривая видности сохраняет свой общий вид, но смещается в сторону коротких волн с максимумом около 510 нм. При этом область максимальной чувствительности сетчатки смещается на $10\text{--}20^\circ$ в сторону от центральной ямки.

Еще в 1825 г. Пуркинье (1787—1869) наблюдал, что излучения различного цвета, воспринимаемые глазом как одинаково яркие, меняют свою видимую яркость не одинаково, если их ослаблять в одно и то же число раз. Яркость излучений с большей длиной волны уменьшается быстрее, чем с более короткой длиной волны. Если ограничить поле зрения, чтобы оно не превосходило $1,5^\circ$, и сконцентрировать сравниваемые излучения в пределах центральной ямки, то свет будет восприниматься только колбочками. Исследования показали, что в этом случае явление Пуркинье не наблюдается. Все это хорошо согласуется с двойным механизмом восприя-

тия света: посредством колбочек и посредством палочек, которым соответствуют различные кривые видности.

11. Область, доступная зрительному восприятию глаза, конечно, не обрывается резко на длинах волн 400 и 760 нм. При $\lambda = 400$ нм видность V_λ примерно в 2500 раз, а при $\lambda = 760$ нм — в 20 000 раз меньше, чем в максимуме. В условиях темновой адаптации глаз может видеть в очень слабой степени интенсивные инфракрасные лучи с длинами волн до 950, а ультрафиолетовые — до 300 нм.

Границы видимой области, а также сама форма кривой видности человеческого глаза не случайны. Глаз сформировался в процессе длительной эволюции, приспособившись к условиям освещения

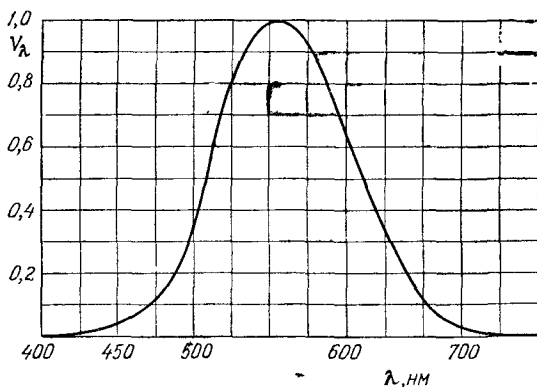


Рис. 82.

земных предметов солнечным светом, а также к условиям сумеречного и ночного освещения. На эту мысль наводит уже то обстоятельство, что на видимую область спектра приходится более 40% энергии излучения Солнца, хотя она и занимает интервал менее одной октавы. Далее, солнечный спектр вблизи поверхности Земли практически обрывается на длине волны 290 нм. Более короткие волны задерживаются слоем озона в атмосфере. Было бы биологически нецелесообразно, если бы глаз обладал способностью принимать излучение с длинами волн короче 290 нм.

Более того, глаз должен защитить себя от ультрафиолетовых лучей. Они в большинстве случаев химически разлагают органические вещества и могут убивать живые микроорганизмы и клетки. Особенно вредно попадание ультрафиолетовых лучей на сетчатку глаза. Чувствительность сетчатки к ультрафиолетовым лучам довольно велика и, как показал С. И. Вавилов, имеет резкий максимум при $\lambda = 380$ нм. Однако от длинноволновых ультрафиолетовых лучей ($290 < \lambda < 400$ нм), пропускаемых земной атмосферой, глаз защищен собственными средствами. Такие лучи сильно погло-

щаются внутри глаза, особенно в хрусталике, и лишь ничтожная доля их доходит до сетчатки. С этим и связан сильный спад кривой чувствительности глаза на границе и в области ультрафиолета. При хирургическом удалении хрусталика, если только глаз продолжает функционировать, его чувствительность к ультрафиолетовым лучам заметно повышается¹⁾.

Высокая чувствительность к инфракрасному излучению, если бы глаз обладал таковой, была бы не только нецелесообразна, но и сделала бы невозможной работу глаза в условиях солнечного освещения. Причина этого — в тепловом излучении глаза. При низкой температуре глаза (310 К) все его тепловое излучение приходится на инфракрасную область. Мощность, излучаемую 1 см² стенки глаза внутрь глазной полости, нетрудно оценить, пользуясь законом Стефана — Больцмана (см. § 115). Она составляет около 0,105 Вт/см². Общая внутренняя поверхность глазной полости ≈ 17 см², так что полная мощность излучения глаза внутрь глазной полости будет $\approx 1,7$ Вт. Оценим теперь мощность прямого солнечного излучения, попадающего через зрачок глаза, пользуясь значением солнечной постоянной (0,139 Вт/см²), приведенным в задаче к § 5. Получим $0,139\pi r^2 \approx 0,017$ Вт (радиус r зрачка глаза принят равным 2 мм). Эта величина примерно в 100 раз меньше мощности собственного теплового излучения глаза. Если бы чувствительность глаза в инфракрасной области спектра была столь же велика, что и в желто-зеленой, то собственное тепловое инфракрасное излучение глаза затмило бы не только рассеянное излучение неба, но и прямой солнечный свет. Работа глаза как органа зрения стала бы абсолютно невозможной. В этом, по мнению С. И. Вавилова (1891—1951), одна из причин, почему нет зрения в инфракрасных лучах. Другая причина заключается в малости энергии инфракрасных квантов света. Процесс зрения должен начинаться либо химическими, либо фотоэлектрическими действиями, а они вызываются отдельными квантами света и не могут происходить, если энергия кванта меньше некоторого минимального предела.

12. Для возбуждения светочувствительных рецепторов необходимо, чтобы они поглощали свет. Как правило, чувствительность рецептора к свету определенной длины волны должна быть тем выше, чем сильнее поглощает он свет той же длины волны. Это обстоятельство уже давно побудило исследователей искать в сетчатке глаза

¹⁾ Ультрафиолетовые лучи, попадая в глаз, вызывают его флуоресценцию, преобразуясь в синеватый свет, воспринимаемый сетчаткой. Такое косвенное воздействие ультрафиолета проявляется, например, в следующем опыте. Если посмотреть на мощную ртутную кварцевую лампу, излучающую ультрафиолет, через специальное темное стекло, задерживающее видимые, но пропускающее ультрафиолетовые лучи, то благодаря флуоресценции внутри глаза окружающий воздух покажется наполненным синеватым туманом, напоминающим табачный дым.

светочувствительные пигменты. Такой пигмент (*родопсин*, или *зрительный пурпур*) был обнаружен в палочках человеческого глаза. Это — вещество розоватого цвета, разлагающееся (выцветающее) на свету и снова восстанавливающееся в темноте. Спектральная кривая поглощения родопсина близка к сумеречной кривой видности. Извлечь светочувствительные пигменты из колбочек сетчатки человека пока не удалось, хотя наблюдения живого глаза через зрачок, по-видимому, подтверждают, что в центральной части сетчатки имеются пигменты, выцветающие на свету.

Глаз человека обладает способностью приспосабливаться к освещенностям, меняющимся в необычайно широких пределах. Прямые солнечные лучи создают освещенности $\sim 10^5$ лк, а в полной темноте глаз способен отличать от темноты предметы с освещенностью 10^{-6} лк. Глаз способен воспринимать световые потоки в интервале 10^{-17} — 10^{-5} Вт. Процесс приспособления глаза к тому или иному уровню яркости света называется *адаптацией*. При повышении яркости происходит *световая*, при понижении — *темновая адаптация*. При переходе от яркости ~ 1000 кд/м² к темноте чувствительность глаза возрастает в течение часа примерно в 10 миллионов раз. Сначала чувствительность возрастает очень быстро, затем ее рост замедляется и после часа пребывания в темноте уровень чувствительности почти не меняется. Световая адаптация происходит много быстрее. При средних яркостях она продолжается 1—3 минуты. Изменение чувствительности к световому восприятию в столь широких пределах свойственно палочкам. Темновая адаптация колбочек происходит значительно быстрее, причем чувствительность колбочек возрастает всего в 10—100 раз. В состоянии максимальной световой адаптации глаз может без вреда переносить сравнительно большие яркости (например, яркости белых матовых поверхностей, освещаемых прямым солнечным светом). При больших яркостях необходима искусственная защита глаза. Так, наблюдение солнечного затмения можно вести только через закопченное стекло или другой сильно ослабляющий светофильтр. При пребывании на ледниках и в горах на большой высоте необходимо пользоваться темными или цветными очками. Здесь очки необходимы также для защиты от ультрафиолетовых лучей, достигающих на больших высотах значительных интенсивностей и вредно действующих на глаз.

Адаптация глаза происходит автоматически, но механизм ее выяснен не совсем. При резком увеличении яркости света почти мгновенно сужается зрачок. При уменьшении яркости до прежнего уровня зрачок вновь расширяется. Происходит также изменение чувствительности самих рецепторов. Долгое время считалось, что такое изменение чувствительности связано с изменением количества родопсина в палочках. Когда яркость света повышается, родопсин выцветает, и чувствительность глаза понижается. При уменьшении яркости происходит восстановление родопсина и свя-

занное с этим повышение чувствительности. Однако работы последнего времени поставили под сомнение эту точку зрения. Наблюдения показали, что чувствительность глаза к свету меняется всего сильнее, когда уменьшение родопсина еще очень невелико. Наоборот, когда концентрация родопсина резко уменьшается, чувствительность уменьшается незначительно. С изложенной точки зрения это понять трудно. Возможно, играет роль перестройка корковых центров головного мозга, воспринимающих свет, т. е. повышение и понижение их чувствительности.

§ 22. Фотометрические понятия и единицы

1. Излучение в пространстве или в прозрачной однородной среде можно характеризовать *интенсивностью*, *спектральным составом* и *поляризацией*. При этом надо иметь в виду, что пучки строго параллельных лучей являются идеализацией и никогда не встречаются в действительности. Конечной энергией могут обладать лучи, направления которых заполняют *конечные телесные углы*, хотя величина этих углов и может быть очень малой.

Заметив это, возьмем в поле излучения произвольную малую площадку ds . Она должна быть настолько мала, чтобы характеристики излучения практически не изменялись при переходе от одной точки площадки к другой. В то же время линейные размеры площадки ds должны быть велики по сравнению с длинами волн излучения, чтобы к излучению можно было применять понятия и законы геометрической оптики. Проведем через площадку ds лучи, заполняющие какой-то телесный угол Ω . Энергия, переносимая этими лучами в единицу времени, называется *лучистым потоком* Φ , проходящим через площадку ds в телесный угол Ω . Если телесный угол $d\Omega$ бесконечно мал, а площадка ds перпендикулярна к его оси, то лучистый поток можно представить в виде $d\Phi = I ds d\Omega$. Величина I есть лучистый поток, отнесенный к единичной площадке, перпендикулярной к излучению, и к единице телесного угла. Она называется *интенсивностью лучистого потока*, или *лучистостью излучения* в направлении оси телесного угла $d\Omega$. Если нормаль к площадке ds образует с направлением излучения угол ϑ , то

$$d\Phi = I ds \cos \vartheta d\Omega,$$

так как лучистые потоки через площадку ds и ее проекцию $ds_{\perp} = ds \cos \vartheta$, перпендикулярную к излучению, одинаковы. Для краткости проекцию $ds \cos \vartheta$ называют *видимой величиной площадки* ds , если ее рассматривать под углом ϑ к нормали. При выполнении принципа суперпозиции лучи, проходящие в данный момент времени через определенную точку среды, совершенно независимы друг от друга. Поэтому для полной характеристики состояния излучения необходимо указать интенсивность лучистого потока по лю-