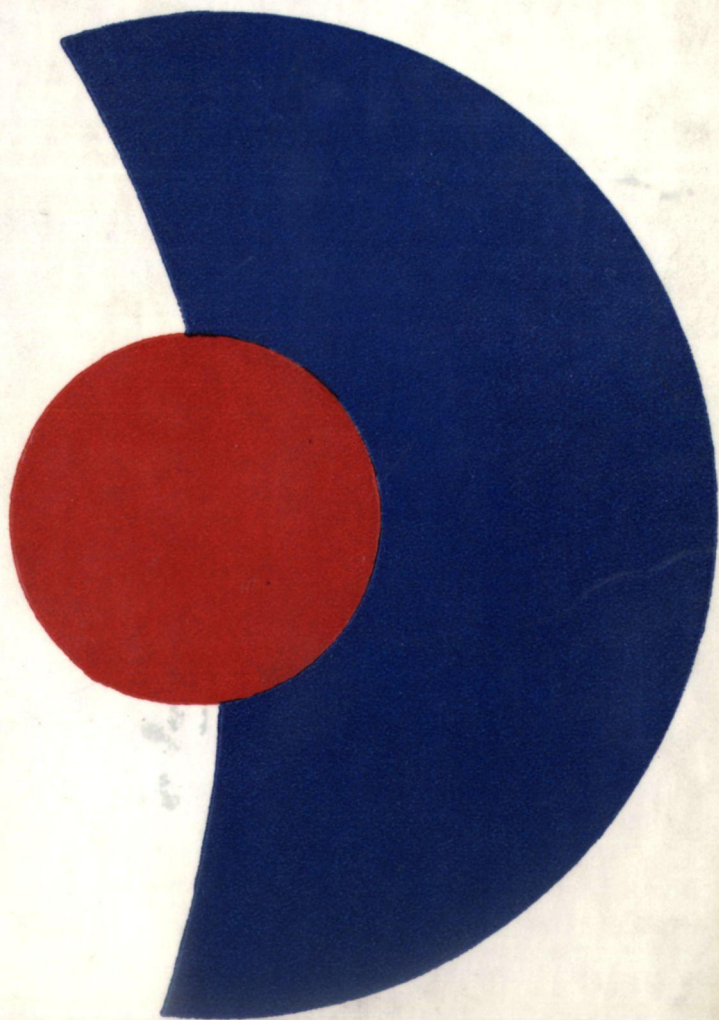


Ч. Пэдхем, Дж. Сондерс

**Восприятие
света
и цвета**

ИЗДАТЕЛЬСТВО
«МИР»



The Perception of Light and Colour

**C. A. Padgham, A.R.C.S., M.SC., PH.D., D.I.C.,
F.INST.P.**
Reader in Physiological Optics

and

J. E. Saunders, M.SC., PH.D., M.INST.P.
Lecturer in Physiological Optics
The Department of Ophthalmic Optics and Visual Science,
The City University, London

Authorised translation from the English language
edition published by G. Bell and Sons Ltd.

London G. Bell & Sons Ltd. 1975

Ч. Пэдхем, Дж. Сондерс

**Восприятие
света
и цвета**

Перевод с английского
Р. Л. Бирновой и
д-ра биол. наук М. А. Островского

Издательство «Мир» Москва 1978

Доступно, но отнюдь не упрощенно и с большой полнотой изложены вопросы, относящиеся к зрительному восприятию света и цвета. Приведен обширный фактический материал по физиологии и психологии зрения, расстройствам цветового зрения, основам цветовых измерений, истории физиологической оптики; затронута весьма интересная тема — цветовое зрение у животных.

Книга предназначена для специалистов (физиологов, психологов, физиков, кибернетиков, гигиенистов, врачей, инженеров), преподавателей и студентов биологических специальностей.

Удачное изложение основ физиологической оптики в сочетании с ясным и образным языком делают книгу доступной широкому кругу читателей.

Редакция биологической литературы

От редактора перевода

Эта небольшая книга заполняет существенный пробел в нашей литературе по физиологии зрения, рассчитанной на достаточно образованного читателя, но вместе с тем доступной и широкому кругу людей. Авторы предприняли попытку почти невозможную: объединить в специальной книге вопросы, находящиеся в настоящее время в компетенции специалистов различного профиля. Однако проблема зрения едина, и, желая ответить на уровне современных знаний на вопрос: «Как мы видим, как воспринимаем свет, цвет, предметы и краски внешнего мира?», мы не можем отделить процессы, происходящие в молекуле зрительного пигмента, от процессов, совершающихся в нейронах-детекторах зрительной системы, разделить вопросы нейрофизиологии и психофизики зрения. Наконец, нельзя ничего не сказать о природе света и цвета, о технических аспектах цветной полиграфии и фотографии или цветного телевидения и уж, конечно, нельзя не коснуться, рассказывая о цветовом зрении, дальтонизма, механизмов нарушения цветовосприятия. Само развитие науки о зрении «виновно» в том, что авторам и даже переводчикам было нелегко объять необъятное. И тем не менее каждый из разнородных вопросов, имеющих отношение к восприятию света и цвета, рассмотрен авторами серьезно, без вульгаризации, часто неизбежной при популярном изложении.

Несколько слов о состоянии проблемы. Не будет преувеличением сказать, что зрение сейчас — «горячая точка» одновременно нескольких научных дисциплин — физиологии и психологии, молекулярной и мембранной

биологии и фотобиологии, свето-, теле-, фототехники и, конечно, офтальмологии. На огромном фронте физиологических наук сенсорная физиология, или физиология органов чувств, занимает, пожалуй, ведущее место.

У современного исследователя — вероятно так же, как и у философа Древнего Востока или Древней Греции, — вызывает чувство восхищения, я бы сказал благоговения, удивительное совершенство глаза и всей зрительной системы. С одной стороны — невероятная тонкость молекулярных, мембранных и клеточных процессов, невообразимая сложность операций, которые совершаются на всех уровнях зрительной системы и обеспечивают передачу, переработку и сверхсложный анализ зрительной информации, и с другой — удивительная простота, отсутствие каких бы то ни было усилий для совершения акта зрения, для видения.

Сто лет назад (в 1876 г.) молодой немецкий исследователь Франц Болл, задавшись вопросом, каким образом свет инициирует зрительные процессы, извлек из темпоадаптированного глаза лягушки сетчатку и увидел, как она из красноватой быстро становится желтоватой, а потом белесой. Сейчас мы довольно много знаем о зрительных пигментах, о процессе их выцветания, о фоторецепторной мембране, основным компонентом которой является молекула зрительного пигмента; нам известно, какова именно электрическая реакция зрительных клеток позвоночных и беспозвоночных животных на свет, но мы, к сожалению, до сих пор окончательно не знаем, как же все-таки свет «запускает» сенсорную реакцию. Следует, однако, признать, что именно этот вопрос в настоящее время интенсивно исследуется во многих лабораториях и что значительная часть пути, по-видимому, пройдена. ■ ■ ■

Что же касается изучения нейрофизиологических механизмов переработки зрительной информации, и особенно «опознавания образов», восприятия цвета, форм и иных свойств предметов внешнего мира, то этот путь только начат, но сделанные в этом направлении шаги весьма обнадеживают. Задача состоит в том, чтобы состыковать все многообразие психофизических наблюдений и закономерностей, о которых довольно подробно рассказывают

авторы этой книги, с их нейрофизиологической основой.

В результате работ выдающихся физиологов, физиков и психологов прошлого и нашего веков феноменология зрения описана достаточно хорошо. Увлекательнейшая задача сегодняшнего и завтрашнего дня — раскрыть механизмы работы глаза и мозга, лежащие в основе поразительного физиологического феномена — зрения.

Можно надеяться, что предлагаемая читателю книга действительно, как того хотят авторы, вызовет у него еще больший интерес к механизмам восприятия света и цвета.

М. А. Островский

Предисловие

к английскому изданию

Я с удовольствием согласился написать предисловие к этой книге, когда д-р Ч. Пэдхем, работавший над ней вместе с д-ром Дж. Сондерсом, попросил меня об этом. На это было две причины. Во-первых, с д-ром Пэдхемом нас связывают долгие годы совместной работы в Имперском колледже и Лондонском университете над проблемами оптики и зрения. Д-р Пэдхем внес весьма существенный вклад в физиологическую оптику как собственными исследованиями, так и руководя научной работой своих младших коллег. Д-р Сондерс был одним из его учеников, и поэтому мне еще приятнее рекомендовать книгу широкому читателю.

Другая причина — то, что речь в этой книге идет о вещах поистине удивительных. Процессы зрительного восприятия столь невообразимо сложны и в то же время так легко, без каких-либо усилий осуществляются, что чем больше мы о них узнаём, тем сильнее становится чувство изумления, которое мы перед ними испытываем.

Авторы не ставили своей целью написать исчерпывающий учебник по зрению. Напротив, они подчеркивают в своем предисловии, что книга задумана как введение в предмет, дабы «разжечь аппетит» читателя. Мне кажется, они преуспели в достижении этой цели, поскольку отразили многие аспекты восприятия света и цвета, не углубляясь в ненужные подробности. Мне остается только заверить тех читателей, которых эта книга вдохновит на более детальное изучение предмета, что они вступят на путь, обещающий много интересного и увлекательного.

У. Д. Райт, профессор
прикладной оптики Импер-
ского колледжа науки и
техники, Южный Кенсинг-
тон, Лондон

Предисловие авторов

Это книга о некоторых аспектах зрительного восприятия, т. е. о том, как мозг расшифровывает информацию, получаемую от глаза. Глаз — поразительный орган с невероятно сложной структурой и, следовательно, сложнейшей функцией. Он может обнаруживать различия в яркости, разрешать (различать) мелкие детали, воспринимать цвет, форму, величину, характер поверхности, движение, мерцание и передавать информацию об этом в мозг таким образом, что человек ощущает, а затем и «воспринимает», т. е. чувственно познает внешний мир — от ближайшего окружения до отдаленных звезд. Поэтому значительная часть этой книги посвящена рассмотрению связей между физическим стимулом и психическим актом восприятия. Эту область знаний обычно называют психофизикой.

Благодаря своей исключительной сложности глаз стал объектом обширных исследований — как структурных, или анатомических, так и функциональных, или физиологических. В эту область науки внесли свой вклад многие видные ученые. К счастью, имеется обширная литература по этому вопросу; кульминационным моментом в изучении зрения был 1866 год, когда Гельмгольц опубликовал свою «Физиологическую оптику». В этом замечательном труде освещена большая часть известных зрительных феноменов; с тех пор мы узнали много новых подробностей, но широта взглядов Гельмгольца по-прежнему поражает и восхищает нас.

За последние 15 лет электронный микроскоп, позволивший получать огромные увеличения, открыл нам удивительные детали в структуре сетчатки и других частей

глаза. И хотя мы знаем теперь гораздо больше, новые, поистине ошеломляющие детали, которые мы увидели, оказались гораздо более сложными, чем это представлялось нам ранее. Очевидно, до тех пор, пока исследования не будут вестись в необходимых масштабах, новых вопросов будет появляться больше, чем ответов на них.

Обилие научных книг и огромный поток статей обескураживают новичка, желающего разобраться в современном состоянии проблемы зрения. Именно по этой причине и написана настоящая книга, цель которой — дать вводные сведения по некоторым аспектам проблемы для широкого круга читателей, в том числе для специалистов, работающих в смежных областях. Мы надеемся, что она будет полезна и для школьника-старшеклассника, желающего расширить свой кругозор. Прочитав эту книгу, он, может быть, захочет в будущем глубже познакомиться с проблемой зрения. В качестве дополнительной литературы книга может быть полезной студентам различных специальностей — физикам, биологам, психологам, строителям, архитекторам или офтальмологам.

Дабы избежать слишком поверхностного рассмотрения предмета и в то же время не превысить допустимого объема, мы решили ограничиться двумя основными и вместе с тем поразительными аспектами зрительного восприятия, а именно — восприятием света и цвета. В книге приведены некоторые сведения по анатомии и физиологии глаза. Поскольку процесс зрения обеспечивается восприятием различий в контрасте, в цвете или в том и другом одновременно, восприятие яркости будет рассмотрено довольно подробно. Остальная часть книги посвящена природе цвета, способу образования цветов, а также методам их идентификации и измерения. Здесь будут описаны процессы восприятия цвета и различные цветовые феномены, а также рассказано о том, какое место в нашей жизни занимает цвет. Кроме того, в одной из глав мы рассмотрим аномалии цветового зрения и их причины.

Поскольку многие положения можно иллюстрировать красивыми и эффектными опытами, мы даем некоторые указания к их проведению, когда это не связано со значительными трудностями и ведет к лучшему пониманию описываемых явлений. Школьникам и студентам, как пра-

вило, превосходно удаются опыты, связанные со зрением, и, быть может, эта книга вдохновит новых учащихся на проведение таких опытов и подскажет им новые вопросы. Мы приводим также краткий список литературы для желающих глубже познакомиться с проблемами зрения.

Мы глубоко признательны всем коллегам и друзьям, оказавшим нам помощь и поддержку при написании этой книги,— настолько многочисленным, что мы лишены возможности упомянуть каждого в отдельности. В особенности мы хотим поблагодарить мисс Дж. Аптон и г-на К. Бишоп за помощь при подготовке фотографий.

Мы благодарны нашим коллегам: г-же Дж. Бёрч за цветное фото 17, д-ру Г. Раскеллу за фото 1 и 2, г-ну С. Хэрри из Брэдфордского колледжа искусств и технологии за фото 14. Фото 16 воспроизводится из книги Ральфа Эванса «An Introduction to Colour» с любезного разрешения издательства John Wiley and Sons, Inc., а фото 10 — с любезного разрешения Munsell Colour Division. Мы выражаем свою признательность г-ну Г. Гоу из Лондонского полиграфического колледжа за помощь в оформлении главы 5.

Мы не можем обойти вниманием поддержку и удивительный энтузиазм проф. Р. Флетчера, который помогал нам по всем разделам физиологической оптики, и многолетнее содействие проф. У. Райта. И наконец, мы хотели бы выразить благодарность нашим женам за поддержку и терпение.

*Ч. Пэдхем
Дж. Сондерс*

Введение

Жизнь — в отличие от простого существования — от начала до конца представляет собой неустанный процесс приема, обработки и оценки информации, получаемой из окружающей среды, а затем выбора: немедленно действовать на основе этой информации, или пренебречь ею, или, наконец, отложить ее в запас для будущего использования. Центром, обрабатывающим информацию, служит головной мозг. Мозг человека — орган величиной с два сжатых кулака и весом от 1300 до 1400 г. Оба его полушария покрыты тонким слоем серого вещества, называемого корой головного мозга. Мозг изрезан бороздами и складками и внешне напоминает грецкий орех; площадь его поверхности достигает 1500 см². Серое вещество содержит около 10 000 млн. нервных клеток, или нейронов. Когда эти клетки получают по нервным волокнам сенсорную информацию, в мозгу возникают ощущения и субъективные «образы» внешнего мира.

Организм человека состоит из множества клеток, и некоторые из них — сенсорные (или рецепторные) — специально предназначены для получения информации из окружающей среды и передачи ее в мозг. Мозг сам по себе не может ни слышать, ни видеть, ни испытывать какие-либо другие ощущения. Фактически существует восемь различных чувств, а именно: зрение, слух, обоняние, вкус, осязание, температурные ощущения, чувство положения и движения, ощущение боли. Источниками информации об окружающем мире, в которой так нуждается организм служат раздражители (стимулы), имеющие физи-

ческую или химическую природу. Так, свет представляет собой электромагнитные волны, звук — волны сжатия, распространяющиеся в воздухе; запах и вкус возникают в результате химических воздействий, а остальные чувства (за исключением боли) связаны с физическими стимулами. Боль могут вызывать как физические, так и химические агенты.

Сенсорные клетки получают энергию от внешних стимулов (т. е. подвергаются раздражению) и затем преобразуют это раздражение и его вариации в нервные сигналы, которые передаются по нервным волокнам в мозг. В современной терминологии о сенсорных клетках можно говорить как о преобразователях, так как они преобразуют специфическую энергию раздражителя в другую форму — в электрические импульсы, на которые может реагировать мозг. Конкретный механизм этого процесса окончательно не выяснен. Таким образом, каждая сенсорная клетка выступает в роли высокоспециализированного детектора физических или химических стимулов определенного типа. Так, светочувствительная клетка не может реагировать на звук, давление или химическое раздражение, а осязательный рецептор не способен отвечать на воздействие света или звука. По-прежнему остается загадкой, как возникает у этих клеток такая избирательность (специфичность).

Интересно отметить, что нервные волокна и нервные импульсы, идущие от сенсорных клеток в мозг, одинаковы для всех чувств и различаются между собой лишь тем, что заканчиваются в разных отделах коры головного мозга. Поэтому активность волокон, несущих сигналы в зрительную область затылочной части мозга, приводит к ощущению света, а активность волокон, проводящих аналогичные сигналы в слуховую область, — к восприятию звука. Функция головного мозга, конечно, гораздо сложнее, чем простое восприятие раздражителей. Ощущения света, звука, тепла и т. д. являются лишь «сырым материалом», который мозг интерпретирует на основе прошлого опыта и создает таким образом восприятия — субъективные образы окружающего мира. В результате, например, маленькое перевернутое изображение на сетчатке глаза воспринимается как стул, стоящий в нормальном

положении на некотором расстоянии от глаза, а такое же, по более крупное изображение — как стул, находящийся в том же нормальном положении, но ближе. Если мы укололи палец, то мышечные рецепторы сообщают в мозг, держим ли мы сейчас палец где-нибудь сбоку от тела или подняли его над головой, ибо мозг воспринимает боль как нечто находящееся в пальце, а не в нем самом. Таким образом, восприятие — процесс и сам по себе очень сложный, но к тому же он еще больше усложняется эмоциями. Конечно, весьма существенна при этом роль памяти, так как с ее помощью мы быстро и легко истолковываем полученные на сетчатке изображения, распознаем значение различных звуков, запахов и многих других ощущений и их комбинаций.

Итак, мы знаем, что восприятия формируются в мозгу, но по существу мы очень мало что знаем о том, как именно мозг преобразует нервные импульсы в ощущения, как он воспринимает и хранит информацию. Все это в основном еще покрыто тайной. Между тем именно размеры и сложная организация нашего мозга дают нам превосходство над всем остальным животным миром. Этому, несомненно, способствовало развитие зрения и языка. Почти всегда нормальная деятельность мозга всецело зависит от поступления в него новой информации. Двумя главными сборщиками информации служат глаз и ухо. Через них поступает в мозг подавляющая часть важной информации, причем первое место занимает глаз.

Современному ученому, вооруженному такими сложными инструментами, как автоматические приборы и электронные вычислительные машины (ЭВМ), зачастую нелегко бывает осознать, что наши органы чувств все еще играют решающую роль в восприятии информации. В наши дни при проведении многих исследований вместо человеческого глаза или уха действуют такие приборы, как фотоумножители и микрофоны, но это всего лишь заменители (часто весьма посредственные), и их характеристики должны быть тщательно приспособлены к свойствам соответствующего органа человека. Поэтому показания приборов с такими устройствами не могут быть адекватнее информации, получаемой невооруженным глазом или ухом, даже если они оказываются более точными; однако

они могут быть получены быстрее и легче. Совершенно ясно, что необходимо располагать обширными сведениями о деятельности глаза и уха в различных ситуациях. Более того, снимая показания со счетчика или ЭВМ, ученый при их оценке должен соотносить их со своим собственным суждением; при этом ему следует учитывать возможные ошибки и ограничения приборов, а также, разумеется, и возможные источники собственных ошибок.

Головной мозг человека достиг такой степени совершенства, что сейчас это уже нечто гораздо большее, чем орган, обеспечивающий выживание и поддержание рода. Результат этого — расцвет спорта, искусства, литературы, музыки и других областей человеческой деятельности, обогащающих нашу современную цивилизацию. Кроме того, человек оказывает существенное влияние на окружающую среду — со всеми вытекающими из этого преимуществами. Однако к самым замечательным достижениям относится, пожалуй, необычайное расширение границ нашего познания. Научившись, например, улавливать радиоволны, мы открыли множество космических источников радиоизлучения (радиозвезд), о существовании которых даже и не подозревали 40 лет назад. Таким образом, мы получаем все больше и больше информации об окружающем нас мире. И мы уже задаемся вопросом, что же представляет собой этот мир в целом, ибо мы можем знать только ту его часть, которая доступна или непосредственно для наших органов чувств, или для имеющихся у нас приборов.

Хотя процесс восприятия изучают уже давно, мы по-прежнему очень мало что знаем о его истинной природе или происхождении. Может быть, мы никогда не узнаем много больше, но исследования будут продолжаться, так как человек превратился бы в ничто, если бы утратил свою необычайную любознательность. Перед смертью сэр Исаак Ньютон произнес следующие слова: «Я не знаю, чем я представляюсь миру, но мне самому кажется, что я был похож на мальчика, который играл на морском берегу и забавлялся тем, что иногда находил особенно гладкий камешек или особенно красивую раковину, в то время как великий океан истины лежал предо мной нераскрытым».

Глаз и мозг

2.1. Введение

Первый этап зрительного процесса происходит в глазном яблоке. Оптику глаза часто сравнивают с оптикой фотоаппарата, хотя такое сравнение сильно упрощает действительную картину. Меняющаяся диафрагма — радужная оболочка глаза — определяет количество попадающего в глаз света. Роговица, глазные среды и эластичный хрусталик образуют эффективную систему фокусировки, создающую изображение на светочувствительной поверхности, называемой сетчаткой. Именно в сетчатке и высших отделах головного мозга извлекается с помощью химических и электрических процессов информация о цвете, размерах, движении и других пространственных и временных характеристиках изображения; эта информация, синтезируясь с другой сенсорной информацией, поступающей в данный момент или хранившейся в памяти, обеспечивает зрительное восприятие. В этой главе мы коротко рассмотрим некоторые свойства глаза и мозга, которые существенны для современных представлений о восприятии света и цвета.

2.2. Глаз человека

На рис. 2.1 представлен горизонтальный разрез глазного яблока человека. Спереди находится роговица — прозрачная оболочка, которая образует почти сферическую выпуклость и занимает примерно $\frac{1}{6}$ поверхности глаза. По краям роговица переходит в склеру (белок глаза), покрывающую остальную поверхность глазного яблока.

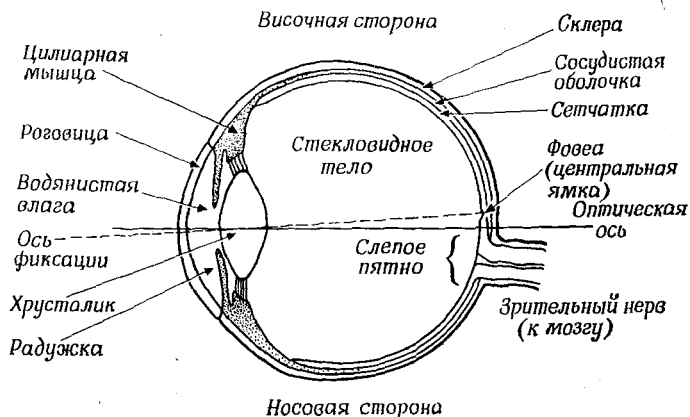


рис. 2.1. Горизонтальный разрез правого глаза человека.

Пространство между хрусталиком и роговицей заполнено так называемой водянистой влагой, которая состоит на 99% из воды и содержит соли и белки. Основное внутриглазное пространство позади хрусталика занято прозрачной студенистой массой — стекловидным телом, которое также состоит главным образом из воды. В глазном яблоке нет жестких частей, и его почти сферическая форма с радиусом кривизны около 12 мм поддерживается за счет давления внутренних жидкостей (внутриглазного давления).

2.2.1. Радужная оболочка и зрачок

Радужная оболочка представляет собой окрашенное волокнистое образование с центральным отверстием — зрачком. Сужение и расширение зрачка контролируют две непроизвольные мышцы — сфинктер и дилатор соответственно. Диаметр зрачка может изменяться в пределах от 2 до 8 мм, регулируя таким образом количество света, падающего на единицу площади сетчатки (освещенность сетчатки). Одна из интересных особенностей сетчатки — то, что при высокой степени освещенности лучи света, входящие через края зрачка, менее эффективны для зрения, чем более центральные лучи. При небольшой освещенности (низких уровнях интенсивности стимула) этот

эффект выражен очень слабо и эффективность всех квантов света, проходящих через зрачок, примерно одинакова. Это явление, открытое в 1931 г. Стайлсом и Кроуфордом, служит одним из важных фактов, подтверждающих теорию двойственности зрения. Согласно этой теории, существует два вида рецепторов: одни эффективно работают при высокой освещенности сетчатки (фотопическое зрение) и обладают направленной чувствительностью к падающему свету; другие функционируют при низких освещенностях сетчатки (скотопическое зрение). Благодаря эффекту Стайлса — Кроуфорда диапазон возможных изменений фотопической освещенности сетчатки при сужении или расширении зрачка фактически ограничивается соотношением $10 : 1$, а не $16 : 1$, как следовало бы ожидать исходя из изменений площади зрачка. Освещенность обычно измеряют в люксах (световой поток в люменах на 1 м^2), но при изучении зрения пользуются единицей, называемой «троланд», которая определяется как произведение площади зрачка (в квадратных миллиметрах) на фотометрическую яркость соответствующего внешнего объекта. На самом деле освещенность сетчатки пропорциональна произведению площади зрачка, яркости объекта и коэффициенту пропускания глазных сред, но, как мы увидим ниже, последний фактор пока еще мало изучен, и поэтому им приходится пренебрегать.

Величина зрачка зависит от многих факторов, особенно от освещенности сетчатки, высокая степень которой вызывает сужение зрачка (речь идет именно о количестве света, достигающего сетчатки, а не об освещенности радужки). Если яркость разных частей изображения на сетчатке различна, то заранее предсказать величину зрачка очень трудно. Величина зрачка зависит также от изменения фокуса и от конвергенции глаз. Если один глаз освещен сильнее другого, оба зрачка будут одинаковыми, но более узкими, чем в том случае, если бы второй глаз был освещен так же, как и первый. Кроме того, на величину зрачка могут влиять психологические и эмоциональные факторы; например, при волнении или при появлении очень интересного зрительного стимула зрачки расширяются. С возрастом зрачок становится меньше и слабее реагирует на раздражение.

2.2.2. Хрусталик и аккомодация

Способность глаза формировать на сетчатке изображение обусловлена кривизной поверхностей, образуемых роговицей, водянистой влагой, хрусталиком и стекловидным телом, и различиями показателей преломления этих четырех сред (приблизительно 1,37; 1,34; 1,42 и 1,34 соответственно). Оптическая сила глаза в основном зависит от роговицы — благодаря ее большой изогнутости и тому, что ее передняя поверхность, обычно соприкасающаяся с воздухом, является той единственной поверхностью раздела, на которой происходит заметное изменение показателя преломления. Однако аккомодация, т. е. способность глаза фокусировать предметы, находящиеся на разных расстояниях от него, всецело обусловлена эластичностью хрусталика. Он имеет кристаллоподобную волокнистую структуру, и форма его может изменяться с помощью цилиарных мышц (рис. 2.1). При расслаблении этих мышц кривизна передней поверхности хрусталика уменьшается и соответственно уменьшается оптическая сила, что позволяет глазу фокусироваться на более отдаленных предметах. Такое же, но не столь сильно выраженное и потому менее существенное для аккомодации изменение претерпевает задняя поверхность хрусталика. Нормальный, или эметропический, глаз в неаккомодированном состоянии способен хорошо видеть предметы в бесконечном удалении, а при полной аккомодации — на расстоянии около 15 см от роговицы; полная оптическая сила глаза колеблется в пределах примерно от 60 до 70 диоптрий. Развитие хрусталика продолжается на протяжении всей жизни, в результате чего он увеличивается в размерах и теряет свою эластичность. Не удивительно поэтому, что у молодых людей пределы аккомодации могут превышать 10 диоптрий, в то время как к 60 годам эта величина понижается в среднем до 2 диоптрий.

2.2.3. Поглощение света в глазных средах

Прежде чем свет будет поглощен сетчаткой и вызовет зрительную реакцию, он должен пройти через все глазные среды, где различие поглощения в зависимости от длины

волны может заметно исказить спектральный состав светового стимула. В определенных случаях это существенно влияет на цветовосприятие.

В длинноволновой части спектра (свыше 500 нм) поглощение будет скорее всего зависеть от содержания воды в глазных средах. Практически вся энергия света с длинами волны более 1400 нм поглощается оптическими средами, преобразуется в тепловую энергию и, таким образом, не достигает сетчатки. Некоторые обычные источники света излучают значительную долю энергии в виде инфракрасных лучей (например, вольфрамовая лампочка накаливания — около 70%). Большая часть этой энергии преобразуется в тепло в средах передней части глаза. В некоторых случаях это может вызвать дискомфорт или даже повреждение роговицы и хрусталика; поэтому для защиты от инфракрасного излучения следует носить специальные очки — например литейщикам, у которых глаза в большой степени подвергаются действию такого излучения. При длинах волны менее 500 нм электромагнитная энергия может свободно проходить через водные среды, но поглощение здесь все-таки происходит из-за присутствия других компонентов. В частности, роговица и хрусталик не пропускают в глаз лучи с длиной волны короче 300 нм. Избыточное поглощение ультрафиолетового света роговицей может приводить к «снежной слепоте»; поэтому при работе с источниками сильного ультрафиолетового излучения (например, при дуговой сварке) также следует надевать защитные очки. Хрусталик — единственная среда, которая сильно влияет на спектральное распределение падающего видимого света. При уменьшении длины волны начиная от 500 нм поглощение света хрусталиком все больше и больше возрастает. Поэтому при освещении белым светом хрусталик кажется желтым; с возрастом — начиная примерно с 20 лет — этот феномен становится все более выраженным. Возрастное уменьшение пропускания света в коротковолновой части видимого спектра связано не только с повышением коэффициента его поглощения хрусталиком, но и с тем, что увеличивается его рассеяние в хрусталике — тем больше, чем короче длина волны.

Центральная область сетчатки, где находится ямка (фовеа), покрыта макулярным пигментом, который поглощает свет в синей области видимого спектра (максимум поглощения при длине волны около 450 нм). Пигментированный участок несколько вытянут в горизонтальном направлении и занимает от 5 до 10° зрительного поля. Плотность пигмента в области центральной ямки относительно низка; у разных людей она может варьировать

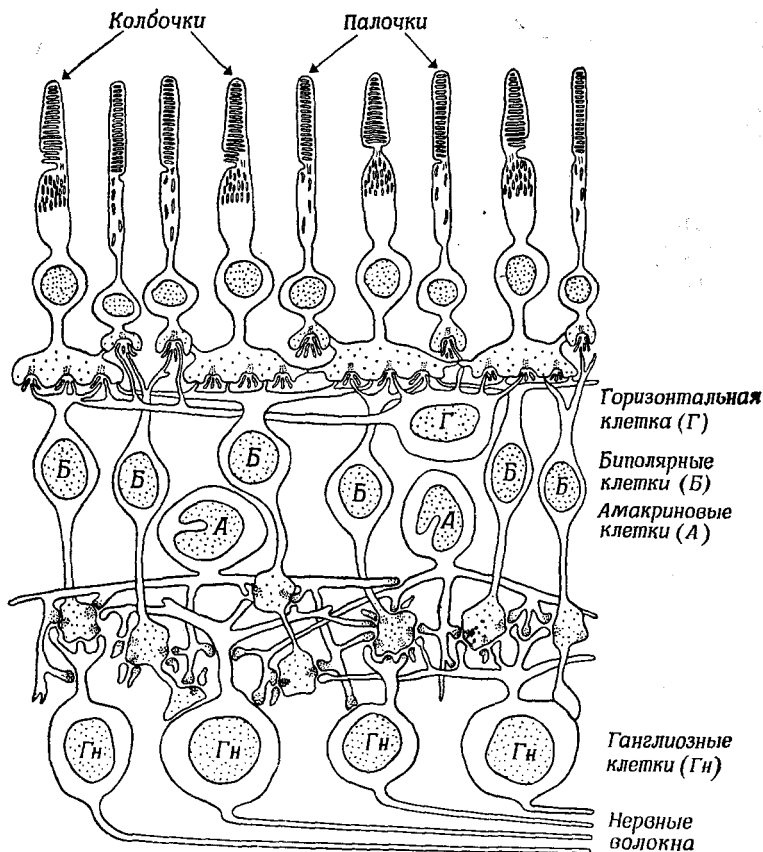


Рис. 2.2. Синаптические связи сетчатки (схема; сетчатка в поперечном разрезе) (по Даулингу и Бойкотту).

в весьма широких пределах, однако с возрастом, по-видимому, не изменяется. Оба обстоятельства — возрастное изменение поглощения света хрусталиком и индивидуальные различия в макулярном пигменте — должны приниматься во внимание при сравнении цветового зрения у разных людей.

2.3. Сетчатка

Вплоть до XVI века считалось, что хрусталик представляет собой рецептор света, однако Кеплер и другие ученые показали, что это всего лишь часть оптической системы, обеспечивающей отображение внешнего мира на сетчатке, которая, вероятно, и содержит истинные рецепторы света. В 1866 г. Шульце удалось идентифицировать в сетчатке различных животных рецепторы двух типов — палочки и колбочки. В настоящее время их считают рецепторами, работающими в условиях низкой и высокой освещенности соответственно.

С помощью световой и появившейся позднее электронной микроскопии было показано, что структура сетчатки необычайно сложна. Здесь было найдено огромное число клеток, располагающихся слоями и соединенных между собой множеством связей как в пределах одного и того же слоя, так и между слоями (рис. 2.2; фото 1 и 2)¹. Как сейчас полагают, поглощенный свет в результате фотохимической реакции возбуждает рецепторные клетки, которые с помощью химических или электрических процессов передают сигнал соседним клеткам, так что зрительная информация передается от клетки к клетке через все слои сетчатки.

В 1852 г. Мюллер классифицировал различные слои сетчатки; упрощенная схема этих слоев приведена на рис. 2.3. Наиболее важными нервными клетками (нейронами), передающими зрительную информацию, являются рецепторы (палочки или колбочки), биполярные и ганглиозные клетки; каждая ганглиозная клетка способна собирать информацию от многочисленных рецепторов, возможно от нескольких сотен. На периферии сетчат-

¹ Все фотографии помещены в конце книги. — *Прим. ред.*

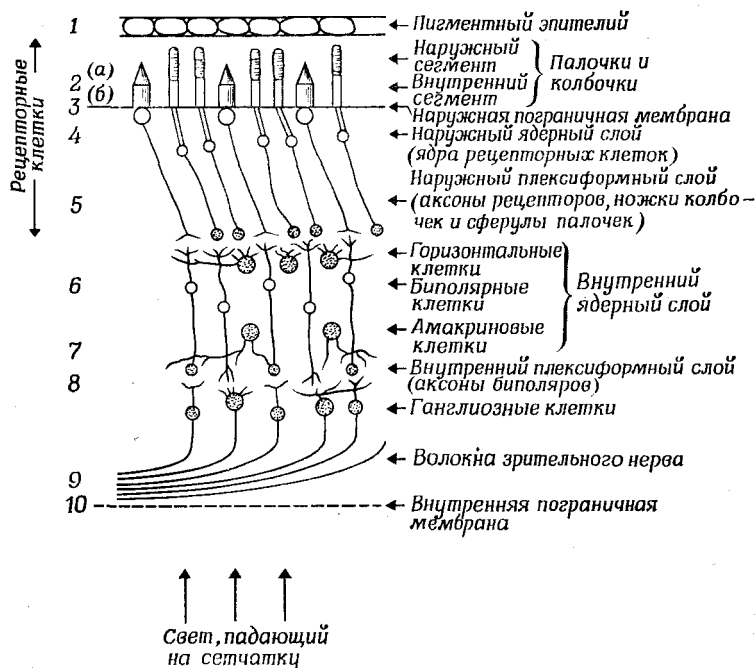


Рис. 2.3. Схема строения сетчатки: показаны 10 ее слоев.

ки такой сбор обеспечивается как латеральными связями через горизонтальные и амакриновые клетки, так и благодаря разветвляющимся афферентным связям каждого рецептора с несколькими биполярными клетками. Распространение сенсорных сигналов по системе таких связей в сетчатке позволяет объяснить эффекты суммации и торможения, описанные в гл. 3.

Центральная (макулярная) зона сетчатки, так называемая ямка, или фовеа, а также фовеола (участок ямки, не содержащий палочек) и точка фиксации схематически представлены на рис. 2.4. На горизонтальном поперечном разрезе этой области хорошо видно центральное углубление, или фовеальная впадина. В фовеоле в глубине этой впадины имеются только колбочки, причем передачу сигнала от каждой колбочки к биполярным и ганглиозным

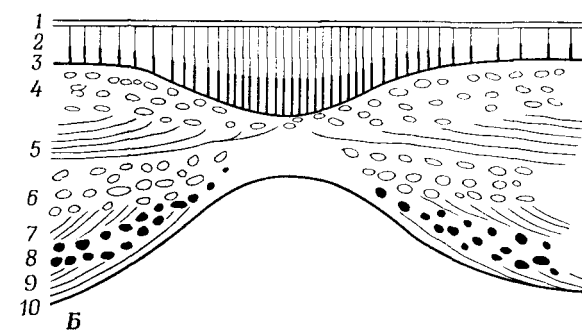
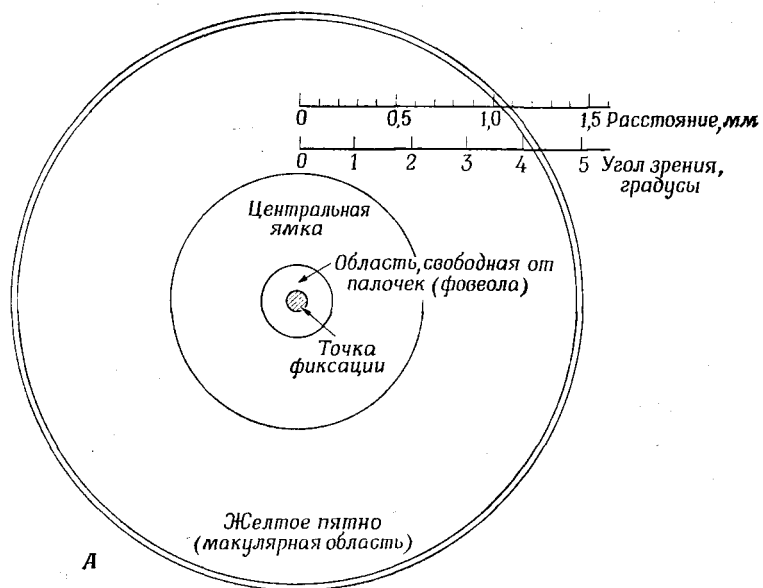


Рис. 2.4. А. Макулярная область сетчатки (схема). Б. Схематический разрез через фовеальную область сетчатки человека (цифрами указаны слои, представленные на рис. 2.3).

клеткам обеспечивают здесь более прямые связи, чем на периферии сетчатки. Кроме того, колбочки в этой области гораздо теснее упакованы и имеют более вытянутую форму, чем в других частях сетчатки; и наконец, биполярные и ганглиозные клетки смещены к краям центральной ямки. Благодаря всем этим особенностям центральная область сетчатки обладает специфическими свойствами. Здесь значительно больше света доходит до рецепторов, так как их не экранируют другие структуры, а соответствующие ганглиозные клетки собирают информацию лишь с небольшого участка сетчатки (от немногих рецепторов); иными словами, у этих ганглиозных клеток очень небольшие рецептивные поля. Поэтому центральная ямка — это область максимальной остроты зрения. Точка фиксации (или наилучшего видения) может быть охарактеризована как область, с помощью которой формируется изображение при движениях глаза и головы, когда детали объекта должны быть рассмотрены с наибольшей точностью.

У человека сетчатка содержит около 120 млн. палочек и 7 млн. колбочек, т. е. около 160 000 рецепторов на 1 мм^2 . В свободной от палочек фoveальной области находится примерно 25 000 колбочек. Каждая колбочка в центральной ямке имеет наружный сегмент толщиной приблизительно 2 мкм, что соответствует примерно половине минуты дуги зрительного пространства. В других местах толщина колбочек увеличивается в три или более раза. Толщина палочек варьирует в пределах от 1 до 3 мкм. По различным оценкам, величина области, лишенной палочек, соответствует $0,5\text{--}1,7^\circ$ зрительного пространства. Тем не менее можно с уверенностью принять, что в центральном участке сетчатки диаметром 1° зрительную функцию всецело обеспечивают колбочки и что палочковым зрением в пределах двух центральных градусов можно пренебречь. Поэтому в большинстве психофизических исследований по цветовому зрению, за которое ответственны колбочки, используются стимулы небольших размеров. Кружок диаметром 17,5 мм, находящийся на расстоянии 1 м, соответствует в глазу дуге в 1° . Согласно Гельмгольцу, ноготь на пальце вытянутой руки будет занимать на сетчатке поле диаметром около 1° .

2.3.1. Фотохимия зрительных пигментов

Прежде чем свет сможет подействовать на глаз, он должен быть поглощен, и это, по всей видимости, происходит в рецепторных клетках сетчатки, в которых, следовательно, должны быть светочувствительные пигменты. В фотохимическом отношении зрительный пигмент палочек гораздо более изучен, нежели пигменты колбочек. На рис. 2.5 представлена весьма упрощенная схема строения палочек и колбочек. Каждая из этих рецепторных клеток имеет наружный сегмент, в котором пигмент находится в многочисленных параллельно расположенных дисковидных структурах. Рецепторы двух типов различаются по форме: палочки имеют цилиндрическую форму, а колбочки — коническую, и они короче палочек. Размеры и форма рецепторов в различных участках сетчатки значительно варьируют. Особенно это относится к колбочкам, находящимся в свободной от палочек фoveальной

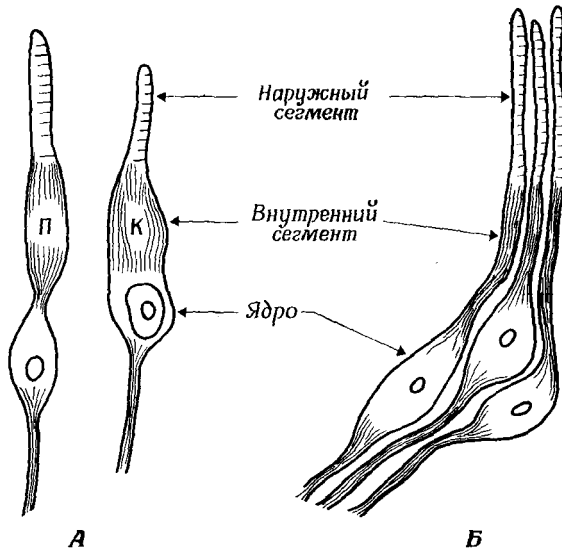


Рис. 2.5. Схематическое изображение рецепторных клеток сетчатки. А. Периферическая палочка (П) и периферическая колбочка (К). Б. Фoveальные колбочки.

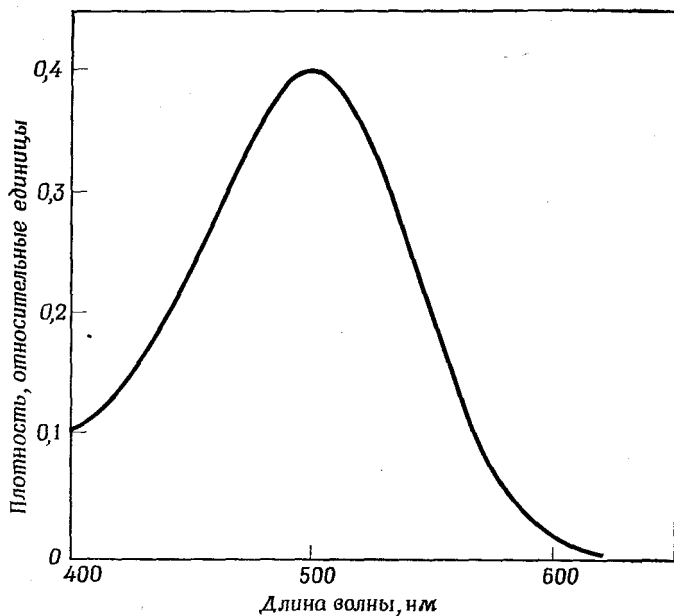


Рис. 2.6. Спектр поглощения зрительного пигмента палочек.

области. Плотность колбочек здесь много выше, чем в других отделах сетчатки, они гораздо более вытянутые и «палочковидные».

Содержащийся в палочках пигмент носит название родопсина, и зрительный процесс инициируется поглощением одного кванта света одной молекулой. Затем молекула изменяет свою структуру и обесцвечивается. В обычных условиях обесцвеченный пигмент через некоторое время возвращается в исходное состояние — иными словами, происходит его регенерация. Когда весь пигмент регенерирован, глаз, как говорят в таких случаях, находится в темноадаптированном состоянии, а при обесцвечивании пигмента под действием света глаз переходит в частично или полностью светлоадаптированное состояние, в зависимости от доли обесцвеченного пигмента. Изучение родопсина позволило сделать важный вывод о том, что при поглощении одного кванта наблюдается

эффект, одинаковый для любой длины волны. Разумеется, кванты света с разными длинами волны поглощаются не одинаково легко, что видно из спектра поглощения родопсина (рис. 2.6). Как мы увидим в гл. 3, этот спектр почти совпадает с кривой спектральной чувствительности глаза, или, точнее, с функцией относительной эффективной яркости; это следует из субъективных или психофизических данных, показывающих, что поглощение кванта света — первая стадия в процессе получения зрительной реакции. В действительности только 60% поглощенного света обесцвечивает родопсин, остальная часть преобразуется в тепло и не влияет на зрительную функцию.

В темноадаптированном глазу цвет родопсина (и соответственно палочек) красноватый, но по мере обесцвечивания он переходит в желтый, а затем окраска совершенно исчезает. Родопсин часто называют зрительным пурпуром («Sehpurpur» немецких авторов). Колбочки же при их визуальном исследовании всегда представляются бесцветными. Если они действительно содержат светочувствительный пигмент, то вряд ли он мог бы быть бесцветным, по крайней мере в исходном состоянии. Оказалось, что экстрагировать колбочковые пигменты чрезвычайно трудно, и до последнего времени можно было только строить догадки об их существовании.

Сейчас имеются три метода выявления пигментов: 1) экстрагирование пигмента и измерение его оптической плотности или поглощения в растворе; 2) измерение поглощения с помощью рефлектометрии (денситометрии сетчатки) в интактном глазу; 3) спектрофотометрия участков сетчатки или даже отдельных рецепторов. Метод экстракции связан с определенными трудностями, но он весьма эффективен в тех случаях, когда экстрагируется только один пигмент; поэтому его широко используют при изучении спектральных свойств родопсина, но он находит лишь ограниченное применение при исследовании колбочковых пигментов. В экстракте из сетчатки человеческого глаза будет, вероятно, содержаться только 1% пигмента колбочек и 99% родопсина. А так как в колбочках, по-видимому, несколько различных пигментов, при денситометрии поглощение таких экстрактов будет практически всецело определяться родопсином.

При рефлектометрии интактного глаза человека в глаз через сетчатку пропускают свет определенной длины волны, собирают свет, отраженный после поглощения сетчаткой, и сравнивают поглощение пигмента при темновой адаптации и после обесцвечивания до определенного уровня. Это связано с большими трудностями, в частности с тем, что только одна десятитысячная часть падающего света отражается от пигментного эпителия. Тем не менее Раштон и Уил независимо друг от друга смогли таким способом выявить различия между палочками и колбочками, прослеживая скорость регенерации пигмента после обесцвечивания в фовеоле (только колбочки) и периферических областях сетчатки (палочки и колбочки). Очевидно также, что в сетчатке имеются колбочки разного типа и что они действительно содержат неидентичные пигменты. Несмотря на трудность осуществления таких измерений и возможность различной интерпретации результатов, этот метод выгодно отличается от других тем, что позволяет проводить исследование *in vivo*.

Спектрофотометрия небольших участков изолированной сетчатки, содержащей 100 и более клеток, тоже весьма полезна, так как пигменты рецепторов по крайней мере остаются в сетчатке, а не подвергаются экстрагированию. Этот метод дает более высокое отношение сигнал/шум в результате удаления пигментного эпителия, но имеет те же недостатки, что и рефлектометрия интактной сетчатки, так как не позволяет отчетливо выявить присутствие различных колбочковых пигментов. Эту трудность можно преодолеть при помощи микроспектрофотометрии, когда одиночный луч света пропускают через один рецептор и таким образом измеряют спектр поглощения индивидуального рецептора. На рис. 2.7 представлены спектры поглощения отдельных колбочек сетчатки человека и обезьяны. То, что колбочки распадаются на три группы с различной спектральной чувствительностью, служит веским доводом в пользу трихроматической теории фовеального (т. е. колбочкового) зрения.

Мы предположили, что существуют пигменты колбочек и что они поглощают свет, обеспечивая фотопическое зрение. Однако мы не объяснили, почему цвет этих пигментов не удается наблюдать, тогда как в случае палочек это не

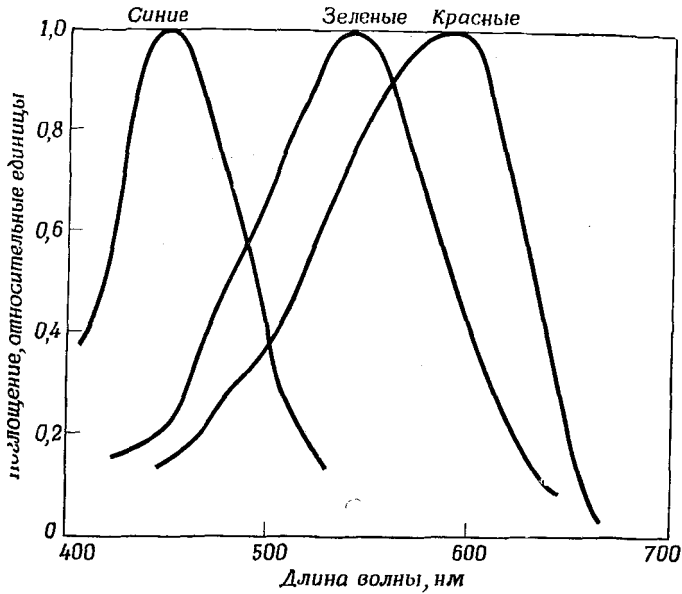


Рис. 2.7. Спектры поглощения одиночных колбочек человека и приматов по данным микроспектрофотометрии. Каждый спектр поглощения нормализован: поглощение в максимуме принято за единицу. Колбочки, у которых максимумы поглощения лежат в коротковолновой, средней и длинноволновой областях спектра, обычно называют соответственно синими, зелеными и красными колбочками, хотя у последних пик находится в оранжевой области спектра.

составляет большого труда. Либман недавно высказал мысль, что энергии, необходимой для освещения одиночной темноадаптированной колбочки в микроскопе (чтобы можно было увидеть ее цвет), вполне достаточно для обесцвечивания ее пигмента менее чем за секунду. Кусочек сетчатки, содержащий в основном палочки, легко может быть извлечен, и его можно рассматривать при меньшем освещении в течение гораздо большего времени до того, как он полностью выпцветет. Такой способ, к сожалению, совершенно непригоден для колбочек. Однако невозможность видеть цвет их пигмента сама по себе еще не доказы-

ваает, что колбочки воспринимают цветовую информацию не за счет фотохимических изменений, а каким-то другим путем, хотя такие теории выдвигались.

2.3.2. Передача нервных сигналов

На рис. 2.8 схематически изображена группа нервных клеток, или нейронов. Каждый нейрон представляет собой независимую клетку, содержащую ядро. У нервных клеток имеются отростки двух типов — дендриты, по которым сигналы поступают в клетку, и аксоны, по которым информация от клетки передается далее. Именно с помощью этих отростков электрические сигналы соответственно принимаются клетками и передаются следующим клеткам. При получении сигнала потенциал клетки изменяется, и при этом обычно возникают электрические импульсы, которые передаются затем по аксону к месту контакта с другой клеткой. Импульс представляет собой быстрое изменение потенциала: отклонение от обычного уровня достигает максимума и снова падает до нуля примерно в течение 1 миллисекунды. Это отклонение всегда имеет одну и ту же величину; поэтому говорят, что импульсы (называемые также потенциалами действия или спайками) подчиняются закону «все или ничего». Таким образом, интенсивность ответной реакции нейрона характеризуется

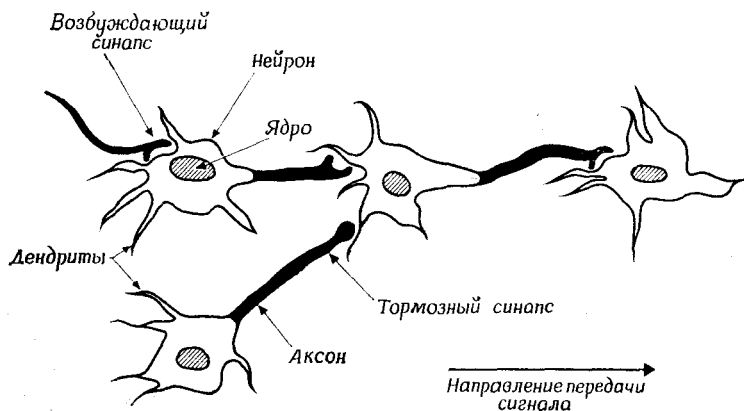


Рис. 2.8. Схема связей между нейронами.

не амплитудой импульсов, а их числом и частотой, с которой они следуют друг за другом. Обычно увеличение числа импульсов или их частоты означает более сильную реакцию нейрона.

Когда потенциалы действия доходят до синапса, т. е. до места контакта с соседним нейроном, через синаптическую щель диффундирует специфическое вещество (медиатор, или передатчик), которое возбуждает следующий нейрон, вызывая в нем возникновение потенциала действия, передающегося по аксону. В некоторых случаях прибытие импульсов ведет не к возбуждению, а к торможению нейрона, и тогда уже его активность будет затухать (т. е. число или частота импульсов будет уменьшаться) или вообще прекратится. Если нейроны расположены близко друг к другу, как, например, в сетчатке, то передача сигнала может осуществляться без помощи аксона: сигнал может непосредственно передаваться в виде медленного, или градуального, изменения потенциала. Отдельное волокно зрительного нерва, по которому сигналы передаются из глаза в мозг — это не что иное как аксон последнего нейрона в проводящем пути сетчатки т. е. аксон ганглиозной клетки. Таким образом, глаз, или по крайней мере сетчатку, можно рассматривать как часть мозга. На рис. 2.8 представлена одиночная цепь нейронов, но следует помнить, что связи в сетчатке имеют трехмерную структуру и что возможно существование обратных связей, с помощью которых клетки какого-то из последующих этапов зрительного пути могут оказывать влияние на ответную реакцию предшествующих клеток (см. рис. 2.2). У человека и некоторых животных связи в сетчатке настолько сложны, что существует множество вариантов подобных влияний.

Ответная реакция нейрона может иметь разный характер. Потенциалы действия могут, например, возникать при включении раздражителя и исчезать при его выключении. Такая реакция называется реакцией на включение или on-ответом. В других случаях возможно отсутствие ответа или ослабление импульсации при включении раздражителя и появление короткой серии импульсов в ответ на выключение стимула. Такая реакция нейрона называется реакцией на выключение или off-ответом. Нередко

нейрон отвечает залпом импульсов и на появление, и на исчезновение раздражителя; это называют реакцией на включение — выключение или «on—off»-ответом. Таким образом, информация передается разнообразными способами, и многие детали этого нервного кода остаются пока невыясненными.

2.3.3. Нервная передача в сетчатке

У позвоночных, в том числе и у человека, сетчатка обращенная, или инвертированная, т. е. рецепторные клетки находятся около ее задней поверхности. Падающий свет проходит через различные слои сетчатки, которые прозрачны, и поглощается в наружных сегментах рецепторных клеток, где находится зрительный пигмент. Большая часть света, не поглощенного рецепторами, уходит в черный пигментный эпителий, который, таким образом, уменьшает помехи от рассеянного света. Вероятно, главная роль пигментного эпителия в зрительном процессе — это его участие в регенерации пигмента рецепторов.

От рецепторов зрительная информация передается к биполярным и ганглиозным клеткам, а от них — по зрительному нерву к наружному коленчатому телу, откуда направляется в зрительную область коры головного мозга (см. рис. 2.13). Большинство сведений, которыми мы располагаем в настоящее время, получено при изучении сетчатки земноводных и рыб, из которых многие обладают хорошим цветовым зрением (см. гл. 11). Вопрос о том, можно ли переносить соответствующие выводы на высших животных и человека, остается открытым. Однако там, где мы находим анатомическое сходство, мы вправе ожидать, что и функциональные механизмы окажутся в общих чертах сходными, хотя, конечно, не идентичными.

Методы, позволившие получить наиболее четкие результаты при исследовании передачи зрительной информации, включали введение микроэлектродов в различные участки зрительного пути и регистрацию электрических реакций как вблизи нейронов изучаемой области (внеклеточное отведение), так и в самих этих нейронах. Микроэлектроды представляют собой тонкие иглообразные электроды с кончиками толщиной меньше 0,1 мкм. По

своей конструкции это или металлическая проволочка с изолирующим покрытием, или тончайшая стеклянная пипетка, содержащая концентрированный хорошо проводящий электрический ток раствор.

В рецепторах и нейронах вплоть до биполярных клеток (см. рис. 2.2) регистрируется градуальный потенциал: разность потенциалов с двух сторон клеточной мембраны изменяется в зависимости от силы раздражителя, а иногда и от длины волны падающего света. Биполярные клетки в известной мере служат просто передатчиками сигналов от рецепторов, хотя в результате конвергенции нескольких рецепторов на одной биполярной клетке, вероятно, создается возможность сбора информации с довольно большого участка сетчатки, а не с одного рецептора. Горизонтальные клетки (см. рис. 2.2) могут выполнять две функции. Во-первых, они могут передавать информацию от рецепторов биполярным клеткам, не имеющим прямой связи с данными рецепторами. Иногда такая латеральная связь оказывает тормозное воздействие, так что биполярная клетка может быть возбуждена при стимуляции рецепторов, с которыми она связана непосредственно, и заторможена при раздражении рецепторов, находящихся на периферии, т. е. более отдаленных. Тогда максимальное возбуждение будет наблюдаться в том случае, если освещены только центральные рецепторы, а окружающие области остаются темными. Во-вторых, горизонтальные клетки могут передавать воздействие с одной рецепторной клетки на другую, тормозя или ослабляя реакцию последней на освещение. Возможно, что оба типа латеральной связи частично обуславливают явление пространственного и временного контраста, описанное в гл. 3 и 8. Биполярные клетки передают сигналы как амакриновым, так и ганглиозным клеткам. Конвергенция нескольких биполяров на одной ганглиозной клетке и горизонтальные связи через амакриновые клетки обеспечивают добавочные возможности для суммации сигналов от нескольких рецепторов, а также для осуществления тормозных воздействий. Только здесь, на уровне амакриновых и ганглиозных клеток, начинается передача сигналов с помощью потенциалов действия вместо медленных градуальных потенциалов. Импульсы регистрируются и в зри-

тельном нерве, т. е. аксонах ганглиозных клеток, и на последующих этапах зрительного пути.

С помощью микроэлектродов была изучена активность ганглиозных клеток у многих животных, в том числе у обезьян, у которых зрительная информация обрабатывается, вероятно, так же, как и в сетчатке человека. Во многих случаях производилась внеклеточная регистрация, результаты которой, по-видимому, отражают распространение потенциалов действия вдоль отдельных волокон зрительного нерва. Мы уже упоминали о суммации электрических реакций рецепторов в отдельной ганглиозной клетке; о такой суммации говорят также данные анатомического изучения сетчатки у приматов: в ней около 7 млн. колбочек и 120 млн. палочек, тогда как в зрительном нерве менее 1 млн. волокон. Поэтому

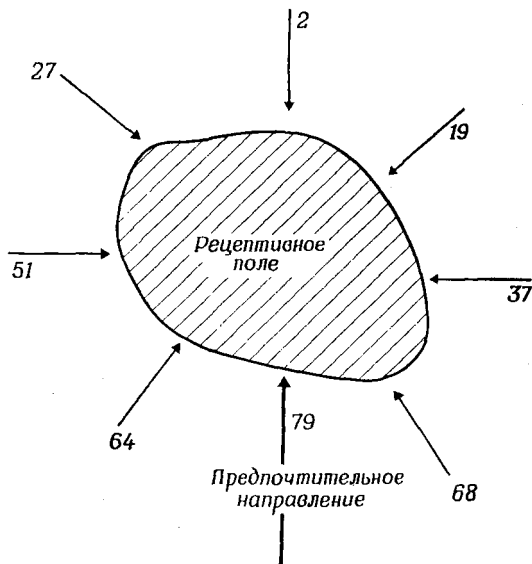


Рис. 2.9. Рецептивное поле ганглиозной клетки, служащей «детектором движения» (в сетчатке кролика). Цифрами около стрелок указана частота нервных импульсов, генерируемых ганглиозной клеткой в зависимости от направления движения небольшого светового пятна по сетчатке: она достигает максимума (79 имп/с), когда пятно движется в направлении, указанном нижней стрелкой.

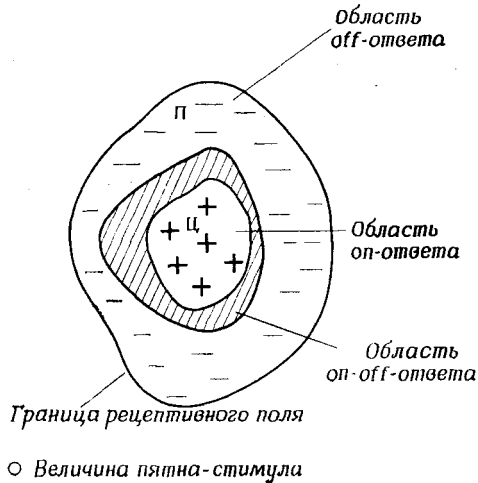


Рис. 2.10. Рецептивное поле ганглиозной клетки, отвечающей оп- или off-реакцией в зависимости от места стимуляции сетчатки небольшим световым пятнышком.

можно думать, что некоторые реакции ганглиозных клеток отражают возбуждение нескольких сотен или еще большего числа рецепторов. Не удивительно поэтому, что встречаются ганглиозные клетки, отвечающие на раздражение любого участка большой области сетчатки. Область, раздражение которой (в любом ее участке) приводит к ответной реакции данной клетки, называют рецептивным полем клетки. Изучение пространственной и временной организации рецептивных полей ганглиозных клеток показывает, что значительная модификация нервных сигналов происходит уже в сетчатке, т. е. до того, как сигнал будет передан в высшие отделы мозга. Например, у кролика были обнаружены приблизительно округлые рецептивные поля, с которых ганглиозная клетка активируется движением небольшого светового пятна в определенном направлении (рис. 2.9). У обезьян и многих других животных были найдены ганглиозные клетки с концентрическими антагонистическими рецептивными полями (в центре оп-реакция, на периферии off-реакция или наоборот). Одно из таких полей изображено на рис. 2.10. Световой стимул небольшого размера, падающий

на сетчатку в центральной области (*Ц*), будет возбуждать ганглиозную клетку, т. е. частота потенциалов действия будет увеличиваться при включении света. Если передвинуть световой стимул из центра к периферии (*П*), реакция будет уменьшаться или же возникать при выключении раздражителя. Наибольшее возбуждение наблюдается при стимуляции одной только центральной области, а наибольшее торможение — при освещении периферической области. Степень возбуждения в первом случае и торможения во втором возрастает с уровнем освещенности. Некоторые ганглиозные клетки реагируют противоположным образом — стимуляция центральной области вызывает торможение, а периферической — возбуждение. Были обнаружены также эффекты цветового антагонизма. Например, в центральной области раздражение красным светом может приводить к возбуждению, а на периферии облучение синим светом — к торможению. Если же на все рецептивное поле воздействовать белым светом, который содержит и длинноволновые компоненты, эффективные в центре поля, и коротковолновые, эффективные на периферии, то возбуждение и торможение будут взаимно гасить друг друга и частота импульсации ганглиозной клетки не изменится. Кажется вероятным, что в таком рецептивном поле возбуждительную реакцию с центральной области обеспечивают только колбочки, наиболее чувствительные к длинноволновой части спектра (т. е. красному свету; см. рис. 2.7), а тормозную реакцию с периферии — только колбочки с коротковолновой чувствительностью (реагирующие на синий свет). Вероятно, оба рассмотренных типа реакции ганглиозных клеток участвуют в создании эффектов светового и цветового контраста, а также, по-видимому, служат основой для последующего зрительного анализа на уровне коры головного мозга (см. разд. 2.7).

2.4. Анализ цвета

Мы уже говорили о том, что сетчатка в глазу человека содержит рецепторы четырех типов, а именно палочки и три типа колбочек, различающиеся по спектральной чувствительности: «синие» колбочки (поглощающие глав-

ным образом коротковолновый свет), «зеленые» колбочки (для средней части видимого спектра) и «красные» колбочки (для длинных волн) (см. рис. 2.7). При небольшой освещенности сетчатки ответная реакция глаза определяется палочками, а поскольку все палочки обладают одинаковой спектральной чувствительностью, два раздражителя с различной длиной волны при надлежащем отношении их интенсивностей будут вызывать одинаковый ответ; иными словами, палочки не обеспечивают распознавания разных цветов, а различают лишь уровни освещенности (или субъективную яркость). Иначе обстоит дело при более высоких уровнях освещенности, когда зрительный ответ инициируется колбочками. В этом случае волны длиной порядка 450 нм будут вызывать более сильный ответ в зрительном канале, контролируемом в основном синими колбочками, и относительно слабый ответ в механизмах, активируемых зелеными и красными колбочками. При длине волны 650 нм будут активироваться главным образом красные колбочки. Поэтому, если в зрительной системе три реакции с колбочек будут оставаться разделенными, мы не сможем получить на эти две разные длины волны одинаковые ответы, просто изменяя уровень стимула. Таким образом, благодаря колбочкам мы способны воспринимать различия как в интенсивности, так и в цвете раздражителя.

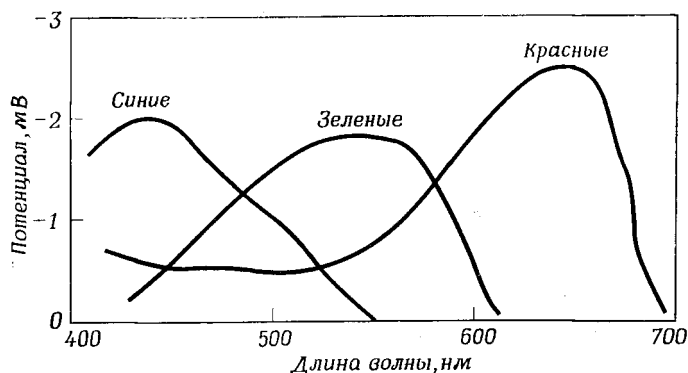


Рис. 2.11. Изменения потенциала во внутренних сегментах одиночных колбочек карпа при стимуляции их монохроматическим светом.

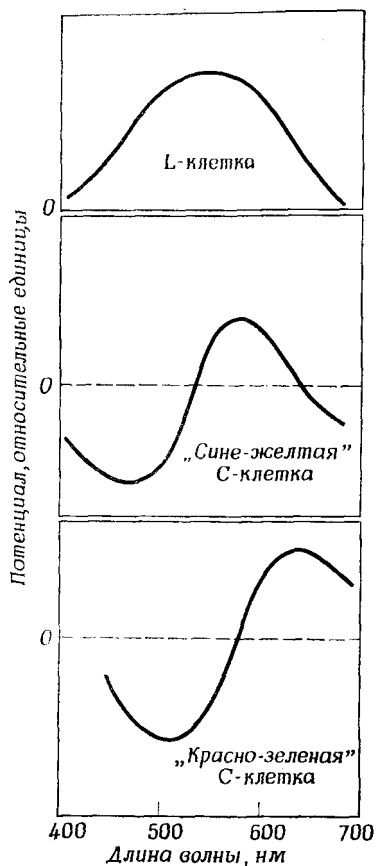


Рис. 2.12. S-потенциалы (медленные потенциалы): простой L-потенциал и два С-потенциала, зарегистрированные в горизонтальных клетках сетчатки рыбы.

Изучение электрических свойств сетчатки рыб и других животных, обладающих хорошим цветовым зрением, показало, что индивидуальные характеристики трех типов колбочек неодинаковы. Микроэлектродная регистрация электрических ответов отдельных колбочек позволила установить, что их спектральная чувствительность хорошо

соответствует спектрам поглощения их наружных сегментов. На рис. 2.11 представлены результаты регистрации электрических реакций отдельных колбочек карпа. Как это и должно быть у рыб, максимум чувствительности каждого типа колбочек сдвинут здесь в сторону большей длины волны по сравнению с колбочками человека (см. рис. 2.7, а также гл. 4). На последующих этапах преобразования сигнала в сетчатке рыбы форма ответа резко меняется; ответы отдельных колбочек, суммируясь, дают так называемые S-потенциалы, впервые зарегистрированные Светихиным (рис. 2.12). Это опять-таки не потенциалы действия, а градуальные ответы. Цветовая информация не теряется: L-потенциал является результатом (суммации трех индивидуальных колбочковых ответов и поэтому идеально приспособлен для отображения интенсивности раздражителя, а два S-потенциала по-прежнему обеспечивают различие реакций на стимулы с разной длиной волны и поэтому превосходно передают информацию о цвете и различиях цвета. У обезьян сходные типы ответных реакций (часто называемые оппонентными реакциями на цвет) были обнаружены в латеральном колленчатом теле. Эти реакции будут подробнее рассмотрены в главах 4 и 10.

2.5. Бинокулярное зрение

Обладание двумя глазами может быть выгодным в двух отношениях: оно либо расширяет поле зрения, либо обеспечивает два отдельных изображения одного и того же предмета, воспринимаемого из двух разных точек. У многих животных глаза расположены по бокам головы, что дает им первое из указанных преимуществ — панорамное зрение. У человека, остальных приматов и ряда других животных глаза расположены в одной плоскости и таким образом обеспечивают бинокулярное зрение: два зрительных поля накладываются друг на друга и в нормальных условиях сливаются в мозгу, образуя один, но теперь уже трехмерный образ окружающего мира. Различие в положении правого и левого глаза ведет к различиям между двумя изображениями на сетчатке, которые могут интерпретироваться мозгом и позволяют воспринимать

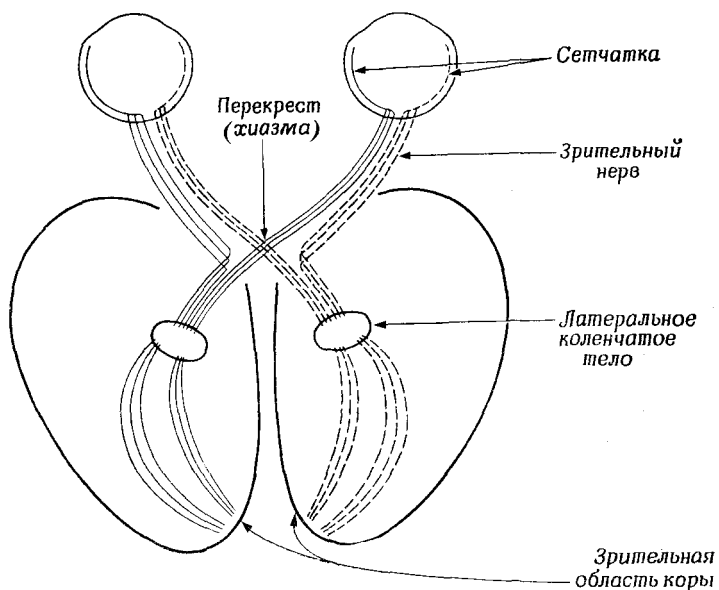


Рис. 2.13. Схема нервных путей от двух глаз. Нервные волокна, идущие от левой стороны каждой сетчатки, представлены сплошными линиями, а волокна, идущие от правых половин сетчаток, — пунктирными линиями.

положение и форму видимых предметов в трехмерном пространстве.

На рис. 2.13 схематически показаны проводящие пути зрительной системы. Часть волокон зрительного нерва, идущих от обоих глаз, пересекается в точке, называемой перекрестом зрительных нервов (хиазмой), причем информация из левых частей обеих сетчаток поступает в левую половину мозга, а из правых частей — в правую. В XVII веке Декарт объяснял слияние двух изображений тем, что все волокна зрительного нерва, как он полагал, объединяются в одном центре головного мозга. Ньютон в начале XVIII века высказал верное предположение, что волокна перекрещиваются и что каждая половина мозга имеет отношение лишь к половине зрительного поля. Хотя нервные волокна, идущие от соответственных частей

обеих сетчаток, приходят в один и тот же участок мозга, называемый латеральным коленчатым телом, весьма вероятно, что сигналы от обоих глаз объединяются только в коре мозга. Электрическая регистрация с помощью микроэлектродов показывает, что одиночные нейроны в зрительной области коры часто отвечают на стимулы,

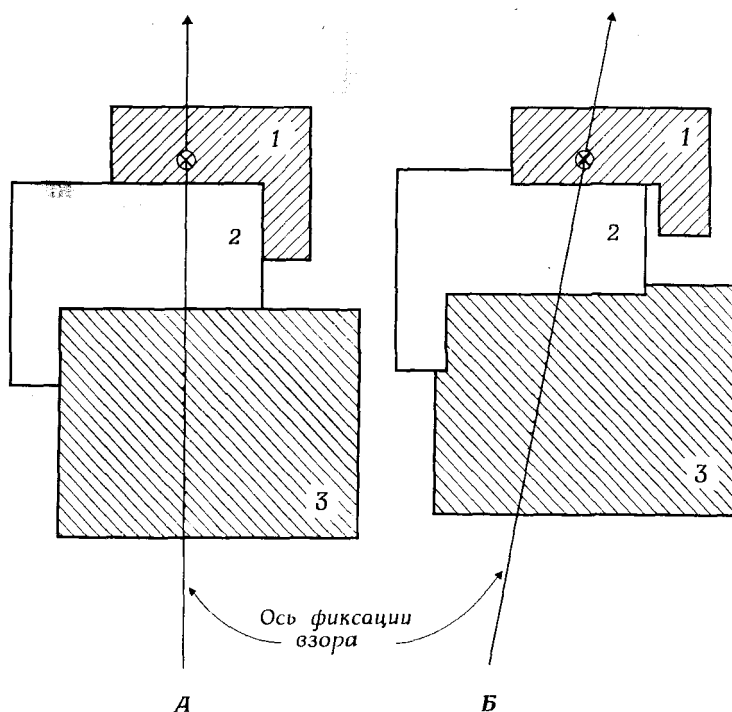


Рис. 2.14. Ошибка в восприятии глубины при использовании монокулярных признаков. Ширина трех карточек уменьшается в последовательности 1—2—3. Карточка 1 — ближайшая к наблюдателю, а карточки 2 и 3 находятся дальше. Когда их рассматривают одним глазом, то при одном направлении взгляда (А) карточка 1 будет казаться самой удаленной от глаза из-за меньшей величины ее изображения на сетчатке; однако при другом направлении взгляда (Б) перекрывание карточек помогает видеть их действительное расположение в пространстве. Для создания этой иллюзии необходимо обеспечить очень точное зрительное совмещение краев карточек в случае А и отсутствие теней.

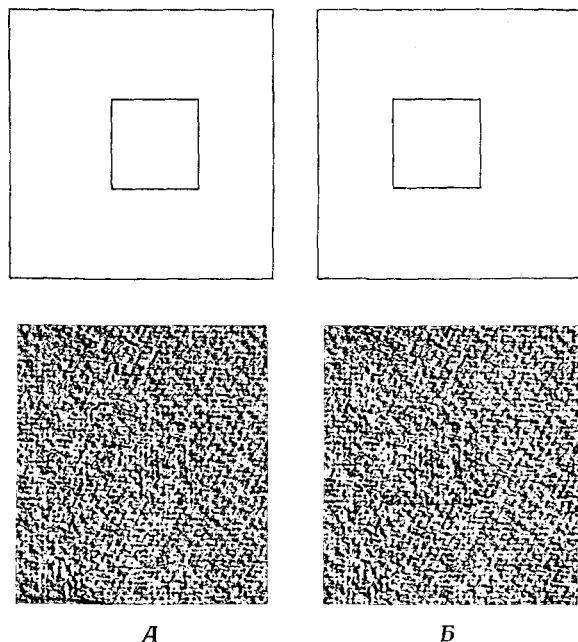


Рис. 2.15. Стереоскопические изображения. Изображения *А* и *Б* предъявляются левому и правому глазу отдельно. В обоих примерах (вверху и внизу) центральные квадратики сдвинуты на 2 мм вправо (*А*) или влево (*Б*). Когда в стереоскопе изображения сольются, квадратик будет казаться «плавающим» впереди фона.

приходящие из обеих сетчаток. В латеральном коллатеральном теле каждый нейрон, по-видимому, получает информацию только от одной сетчатки.

Не следует думать, что одно лишь бинокулярное зрение существенно для восприятия глубины: даже одиночное двумерное изображение на сетчатке дает весьма обширную информацию о положении предметов в пространстве. Определять расстояние помогают такие факторы, как угловая величина видимых предметов, размеры которых известны, относительное смещение предметов, находящихся на различных расстояниях, при перемещении глаза (параллакс), необходимая степень аккомодации, наложение изображений (когда один предмет частично

заслоняет другой) и, наконец, тот факт, что отдаленные объекты кажутся синеватыми из-за рассеяния света в атмосфере. (Иногда такие признаки противоречат друг другу, что может приводить к забавным иллюзиям, но в ряде случаев наблюдаемые явления дают ценную информацию о механизмах восприятия; см., например, рис. 2.14.) Тем не менее наша способность оценивать глубину очень сильно возрастает за счет стереоскопичности — слияния двух образов одной и той же сцены.

Одно время полагали, что для стереоскопического эффекта нужны четкие контуры, однако рис. 2.15 показывает, что это не так. В верхней части рисунка изображены квадраты с резкими контурами на белом фоне, и при их стереоскопическом слиянии создается впечатление, что меньший квадрат находится ближе к глазам. При рассматривании нижнего квадрата возникает аналогичный эффект. Случайное расположение мелких пятнышек здесь в обоих квадратах одинаково, с той лишь разницей, что маленький квадратик в левом изображении смещен на 2 мм вправо по сравнению с правым изображением. Ни в одном из больших квадратов внутри не видно никаких контуров, а значит, не видно и внутреннего квадратика, но если посмотреть в стереоскоп, то маленький квадратик и здесь выступит вперед. Такие произвольные узоры называются узорами Юлеса — по имени их автора, который в последние годы исследовал много зрительных эффектов подобного типа.

2.6. Движения глаз

Движениями глаза управляют шесть мышц (рис. 2.16). При их сокращении и расслаблении глаз может поворачиваться вверх и вниз, влево и вправо, а также около продольной оси таким образом, что при наклоне головы глаза стремятся сохранить горизонтальное положение. Можно считать, что любое движение глаза состоит из одного, двух или трех вращательных движений перечисленных типов. При каждом движении глаза мышцы выполняют сложную работу, на которой мы подробно останавливаться не будем; отметим только, что каждое движение связано с сокращением или расслаблением по

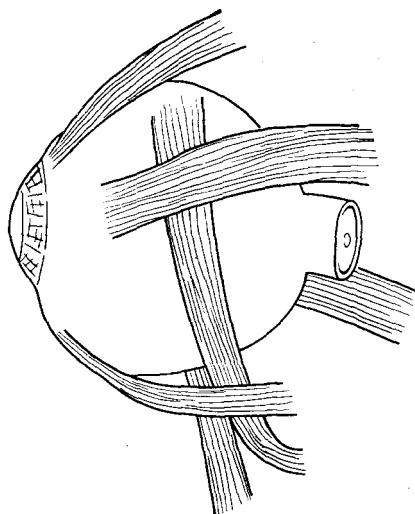


Рис. 2.16. Вид правого глаза сверху: видны шесть мышц, контролирующих положение глазного яблока.

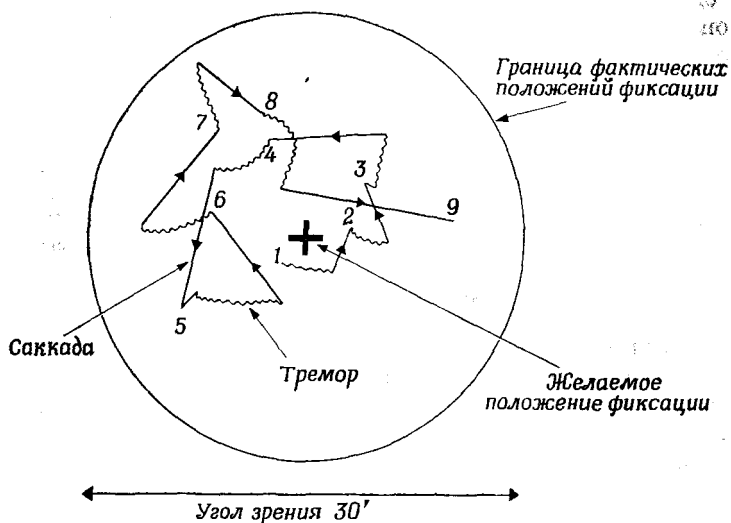


Рис. 2.17. Движения глаза при попытке фиксировать взор на объекте. Фактические точки фиксации указаны цифрами от 1 до 9.

меньшей мере четырех мышц. При бинокулярном движении в работе может участвовать до 12 мышц; при этом способ действия некоторых из них (сокращение или расслабление) может быть на двух сторонах противоположным, как, например, при простом повороте глаз влево (в отличие от конвергенции обоих глаз на близко расположенный предмет, при которой мышцы действуют симметрично).

Глаз почти никогда не бывает совсем неподвижным: небольшие произвольные движения совершаются даже при попытке фиксировать взор на одной точке. На рис. 2.17 показана типичная картина движений глаза при попытке фиксации взора. Здесь можно видеть движения трех типов: во-первых, мелкое дрожание (тремор) низкой частоты (около 50 Гц); во-вторых, скачкообразные, или саккадические, движения (обычно соответствующие дуге в несколько минут), происходящие 1—2 раза в секунду с угловой скоростью порядка сотен градусов в секунду; и наконец, между саккадами наблюдается медленный «дрейф». Все эти движения происходят и при произвольном перемещении взора, например при чтении (рис. 2.18). На рисунке показано также движение глаз в горизонтальном направлении при попытке следить за колебаниями маятника. Оно, как и следовало ожидать, в целом носит синусоидальный характер, но наблюдаются также произвольные корректирующие саккады.

В последние годы психофизиологи заинтересовались двумя явлениями, связанными с движением глаз. Первое из них — это некоторая потеря зрительной функции во время саккады: в этот короткий период длительностью всего лишь около 20 миллисекунд минимальная яркость стимула, необходимого для его восприятия (пороговый уровень), возрастает. Второй, более интересный феномен — потеря зрения при искусственной стабилизации изображения, когда даже во время произвольных движений глаза изображение на сетчатке остается в точности на том же месте. В этом случае восприятие формы и цвета блекнет в течение нескольких секунд и видно только неотчетливое однородное поле. Зрение может восстановиться только при перемещении изображения на сетчатке, а также при изменении яркости или цвета раздра-

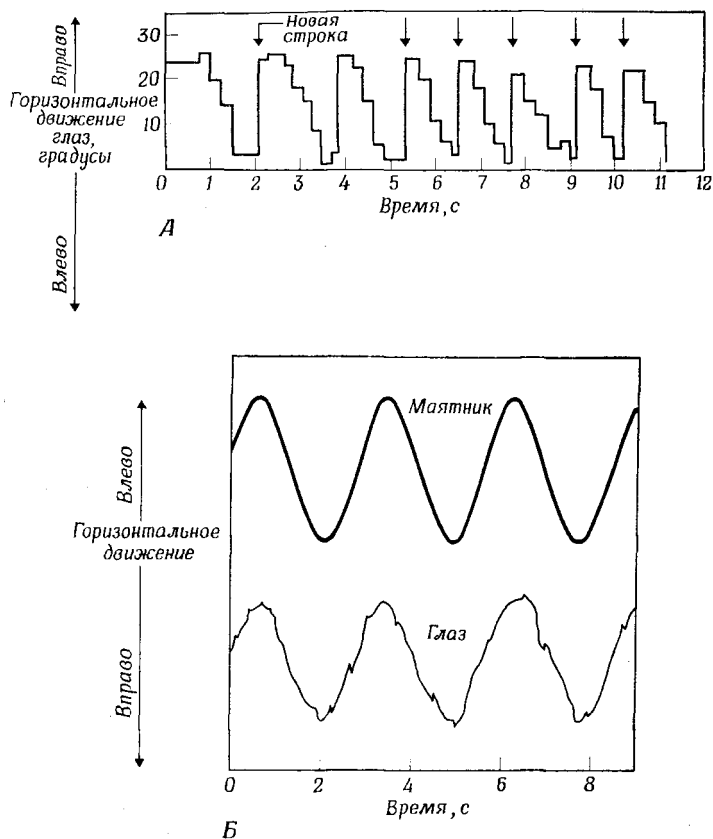


Рис. 2.18. Горизонтальная составляющая движений глаза при чтении (А) и при попытке следить за перемещением груза на маятнике (Б).

жителя. Это говорит о том, что непроизвольные движения глаз — тремор и саккады — составляют важный компонент зрительного процесса и, возможно, играют существенную роль в повышении контраста и в ограничении эффектов утомления на определенных этапах. Иногда (вероятно, в случаях неполной стабилизации) происходит лишь частичное исчезновение зрительного образа. Читатель может попытаться воспроизвести этот феномен, как

можно устойчивее фиксируя в течение минуты центр креста на рис. 2.19. Если затем перевести взгляд на маленький черный кружок в правой части рисунка, то возникнет последовательный образ (см. гл. 9). Этот последовательный образ неподвижен относительно сетчатки и будет каждые несколько секунд то исчезать, то появляться вновь. Иногда будет исчезать то крест, то большой круг; это, возможно, указывает на то, что восприятия отдельных частей сложного раздражителя формируются в мозгу независимо друг от друга.

Есть еще одно явление, которое может заинтересовать читателя, — «дерево Пуркинье». Это картина кровеносных сосудов и капилляров глазного дна. Они расположены очень близко к рецепторным клеткам и образуют резкие тени на значительной части сетчатки. Почему же они в таком случае не видны, когда мы смотрим на какое-нибудь однородное поле, например на лист белой бумаги? Дело в том, что эти тени практически всегда падают на одну и ту же область сетчатки, и их можно рассматривать как превосходный пример стабилизированного изображения. Однако если осветить глаз под необычным углом, то в течение некоторого времени можно видеть эту необычную и довольно красивую картину. Для этого следует

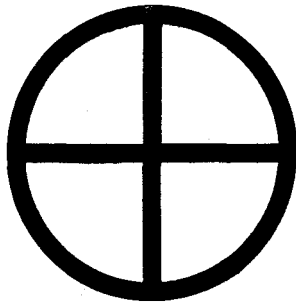


Рис. 2.19. Исчезновение стабилизированного изображения на сетчатке, в данном случае — последовательного образа. Если центр креста фиксировать взором в течение 1 мин, а затем несколько секунд фиксировать пятнышко справа, то возникнет последовательный образ, который вскоре будет полностью или частично исчезать (возможно, будет виден только крест или только круг). Изображение можно восстановить путем движения глаза или мигания.

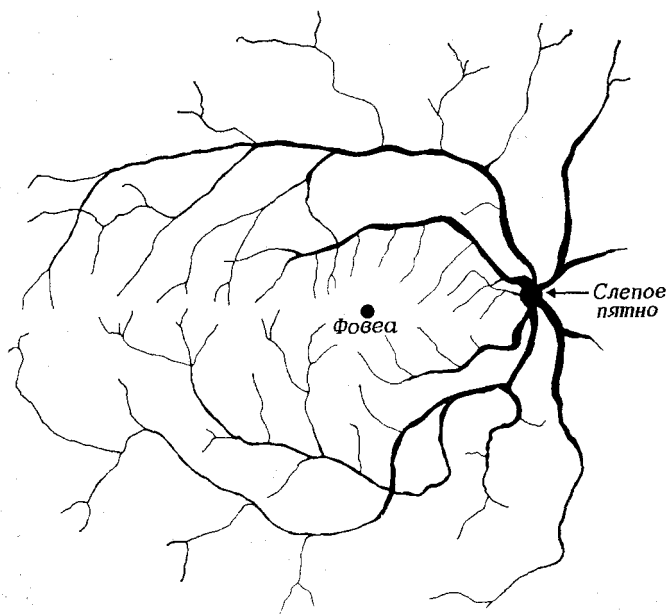


Рис. 2.20. Дерево Пуркинье — изображение капилляров, проецирующееся на сетчатку.

поднести карманный фонарик совсем близко к глазу, сверху или снизу — таким образом, чтобы сетчатка освещалась косо падающим светом, а еще лучше рассеянным светом через склеру. И если испытуемый будет затем смотреть на стену в комнате без каких-либо других источников света и при этом перемещать фонарик туда и сюда (всего на несколько миллиметров), то дерево Пуркинье будет видно довольно долго (рис. 2.20). Как и в случае многих других зрительных феноменов, увидеть дерево Пуркинье повторно значительно легче, чем в первый раз.

2.7. Специфические детекторы на уровне коры головного мозга

Мы уже видели, что на уровне сетчатки ганглиозная клетка не просто передает информацию об интенсивности раздражителя — ее ответная реакция может отражать и более

специфические особенности стимула, например относительную освещенность в различных участках сетчатки. За последние 15 лет были достигнуты значительные успехи в выяснении того, каким образом свойства раздражителя анализируются в зрительной системе. Уже сравнительно давно в результате анализа последствий военных травм мозга было установлено, что определенные области коры больших полушарий ответственны за передачу определенной сенсорной или моторной информации. Однако здесь мы лишь коснемся экспериментов, проведенных в последние 10 лет Хьюбелем и Визелем на кошках и обезьянах, и кратко рассмотрим предложенную этими авторами модель анализа зрительной информации в сетчатке, латеральном колленчатом теле и той области коры головного мозга, которую называют полем 17 или зрительной корой.

Вернемся еще раз к рецептивному полю ганглиозной клетки, состоящему из центральной и периферической областей (см. рис. 2.10). Если эту область освещать не маленьким пятнышком, а узкой полоской света (линейный стимул), то ганглиозная клетка будет давать максимальный ответ в том случае, если ширина этой полоски соответствует диаметру центральной зоны рецептивного поля (рис. 2.21, А). На рис. 2.21, Б показана цепочка из пяти рецептивных полей; все эти поля будут инициировать реакцию при совпадении их центров с линейным стимулом. Если мы теперь начнем медленно поворачивать световую линию вокруг среднего из пяти рецептивных полей, то ганглиозная клетка, соответствующая этому полю, будет по-прежнему возбуждаться, но четыре остальные клетки будут реагировать все слабее и слабее, по мере того как большая часть раздражителя будет попадать в тормозную периферийную зону. В конце концов активной останется только та клетка, которая соответствует среднему рецептивному полю. Таким образом, вся эта система действует как эффективный «детектор линий», в котором общая реакция пяти ганглиозных клеток будет максимальной при совершенно определенном положении светлой линии соответствующей ширины на сетчатке. Хьюбель и Визель обнаружили поля с антагонистическими зонами центр—периферия как у ганглиозных клеток сетчатки, так и у клеток латерального колленчатого тела, хотя в послед-

нем пространственный анализ осуществляется, по-видимому, с большей точностью; поэтому латеральное колленчатое тело не следует рассматривать всего лишь как передаточное звено. Однако в коре Хьюбел и Визель обнаружили клетки с рецептивным полем иного типа, которые они называли «простыми» клетками (рис. 2.22). Такого рода клетка давала максимальную реакцию на линейный раздражитель определенной ширины и ориентации. Можно предположить, что несколько ганглиозных клеток сетчатки или клеток ядра латерального колленчатого тела имеют рецептивные поля, центры которых расположены вдоль этой линии (как на рис. 2.21, Б), и что все они посылают сигналы одной клетке коры. Другие группы ганглиозных клеток поставляют соответствующую инфор-

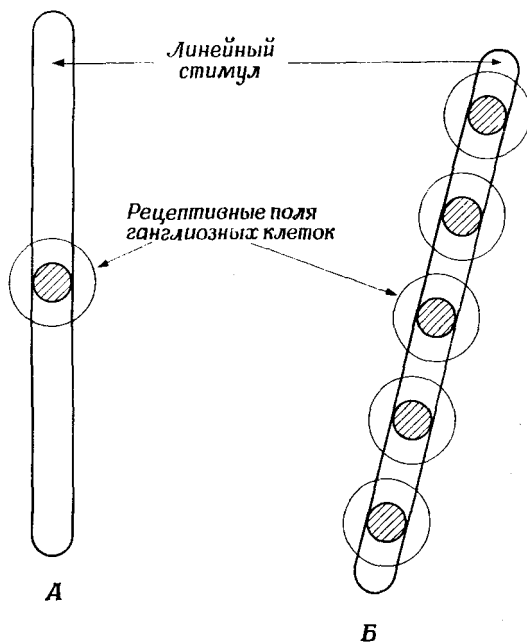


Рис. 2.21. Рецептивные поля и определение ориентации прямой линии. А. Положение линейного стимула, при котором реакция ганглиозной клетки будет максимальной. Б. Положение линейного стимула, обеспечивающее максимальный комбинированный ответ с пяти соседних рецептивных полей.

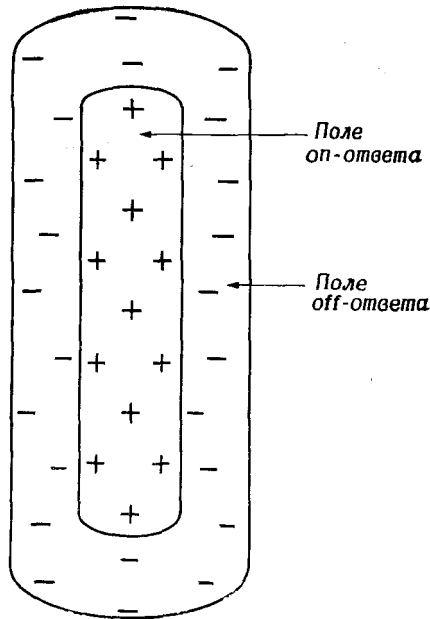


Рис. 2.22. Рецептивное поле «простой» кортикальной клетки. Небольшое пятнышко света, падающее на центральную область (+), вызывает оп-ответ, а падающее на периферическую область — off-ответ. Наибольший оп-ответ возникает, когда линейный стимул соответствующих размеров и ориентации воздействует только на центральную область.

мацию корковым нейронам, максимально реагирующим на темные линии (на светлом фоне) и на «края», т. е. границы между темными и светлыми участками. При выходе линии из рецептивного поля или изменении ее ориентации эти нейроны возбуждаться уже не смогут, но зато будут реагировать другие нейроны, рецептивные поля которых соответствуют новому положению линейного стимула.

В коре мозга были также найдены клетки иного типа («сложные»): они, по-видимому, собирают информацию от нескольких «простых» клеток с одинаковыми свойствами. Например, Хьюбель и Визель обнаружили «слож-

ные» кортикальные клетки, реагировавшие только на линии (или края) с определенной ориентацией, но теперь линия уже не должна была находиться в определенном месте — она могла перемещаться в пределах обширного участка сетчатки, лишь бы ее ориентация оставалась постоянной. Вполне возможно, что такие клетки управляются «простыми» клетками с рецептивными полями той же ориентации, но разбросанными по значительной области сетчатки.

Таким образом, возможно, что восприятие любого предмета основано на объединении сигналов от большого числа клеток, каждая из которых дает информацию о какой-нибудь одной особенности раздражителя. Эти сигналы могли бы сходиться к одной клетке, реагирующей на один сложный раздражитель, даже на такой, как, например, изображение на сетчатке человеческого лица. Однако трудно предположить, что между раздражителем и ответной реакцией существует такая простая причинная связь. Вполне возможно, что свойства «клеток-детекторов» постоянно изменяются и зависят не только от непосредственного раздражителя, но и от других факторов. Свойства таких клеток могли бы формироваться на основе прошлого опыта (памяти), под влиянием ожидания и даже личных симпатий и антипатий. Однако совсем не обязательно, чтобы человеческое восприятие в значительной степени зависело от тех процессов «машинного» типа, которые были обнаружены в описанных выше опытах, хотя эти опыты, несомненно, выявляют одну из важных особенностей начальных этапов зрительного восприятия.

2.8. Вызванные потенциалы в зрительной системе человека

Исследование электрических процессов в зрительных путях, например с помощью микроэлектродов, проводится главным образом на животных; о соответствующих процессах у человека заключают по аналогии, но это возможно только в тех случаях, когда анатомия и поведенческие реакции животного и человека достаточно сходны. Однако такие косвенные заключения могут подкрепляться результатами исследования электрических ответов глаза и мозга с помощью поверхностных электродов,

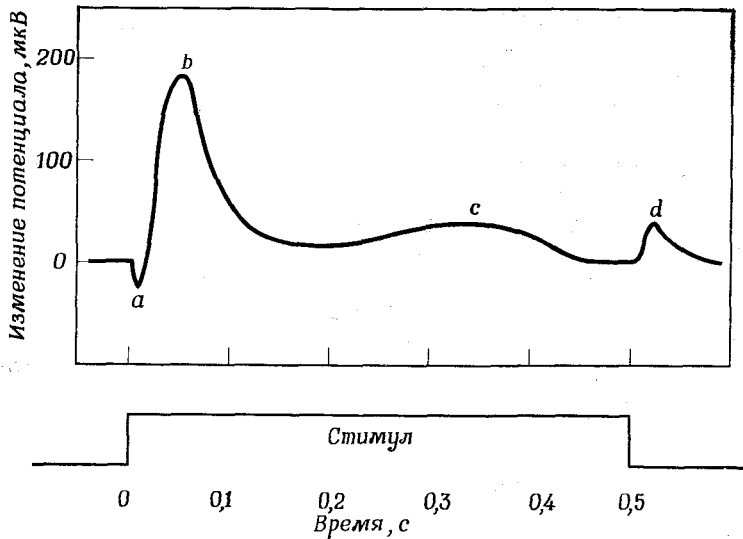


Рис. 2.23. Схематическое изображение электроретинограммы (ЭРГ).

помещаемых вблизи того или иного отдела зрительной системы испытуемого.

Таким способом регистрируют, в частности, суммарный ответ клеток сетчатки, получаемый в виде электроретинограммы (ЭРГ). При световом раздражении глаза происходит изменение потенциала сетчатки, в котором находят свое отражение и характеристики стимула, и особенности самих процессов, происходящих в сетчатке. На рис. 2.23 представлен типичный ответ на кратковременную вспышку света. Сразу же после появления стимула возникает небольшое изменение потенциала, отражающее свойства рецепторов. Этот так называемый ранний рецепторный потенциал (РРП) в действительности очень мал и на рис. 2.23 не показан. РРП сменяется поздним рецепторным потенциалом, или *a*-волной ЭРГ, также связанной со свойствами рецепторов. Затем появляется *b*-волна, которая, вероятно, зависит от состояния биполярных клеток и других нейронов в соответствующем участке сетчатки. Последующее медленное возрастание потенциала

(с-волна) связано с реакцией пигментного эпителия. Накопец, при выключении стимула возникает off-ответ, или *d*-волна. Для записи ЭРГ у человека применяют электрод, фиксируемый около роговицы с помощью специальной контактной линзы, или же фитильковый электрод, смоченный физиологическим раствором (рис. 2.24). Индифферентный электрод, или электрод сравнения, может прикрепляться ко лбу, уху или другой нейтральной области. В клинике такие измерения используют для проверки физиологического состояния сетчатки до или после лечения расстройств зрения. ЭРГ может также использоваться как добавочный показатель при психофизических исследованиях, так как она в известной мере отражает первый этап зрительного процесса, причем отражает объективно, т. е. не требует от испытуемого никаких субъективных высказываний или действий.

Электроэнцефалограмму (ЭЭГ) записывают с помощью поверхностных электродов, укрепляемых на затылочной области головы (рис. 2.24 и 2.25). Как выяснилось, ЭЭГ содержит информацию, касающуюся зрительного стимула. Исходя из предположения, что она отражает суммарный ответ нервных клеток мозга, с ее помощью можно следить за характером зрительной реакции, достигающей коры головного мозга. Наряду с электроретинограммой ЭЭГ используют для объективной оценки зрительных функций как в клинических, так и в психофизических исследованиях. На рис. 2.25, *A* представлена ЭЭГ, снятая у человека с закрытыми глазами, находящегося в состоянии расслабления. Ее самая характерная особенность — почти синусоидальный потенциал с частотой приблизительно 10 Гц, известный как альфа-ритм. Хотя этот ритм очень типичен для затылочной ЭЭГ, особенно при расслабленном состоянии испытуемого, он не обязательно связан со зрением. Компонент ЭЭГ, отражающий изменение зрительного раздражителя (зрительный вызванный потенциал), обычно очень невелик (несколько микровольт). Однако благодаря многократному повторению он может быть зарегистрирован как усредненный ответ, а остальные компоненты ЭЭГ при этом оказываются фоновым шумом. Зрительные потенциалы, вызываемые световыми вспышками, показаны на рис. 2.25, *B* и *B*. Анализ такого

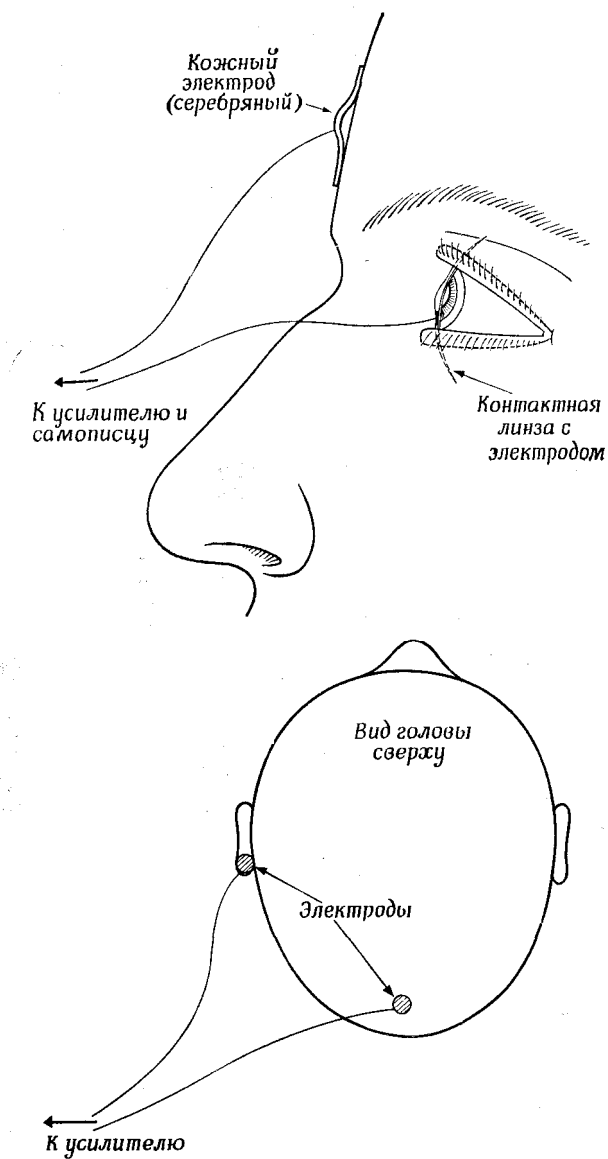


Рис. 2.24. Методы регистрации ЭРГ (А) и ЭЭГ (Б) человека.

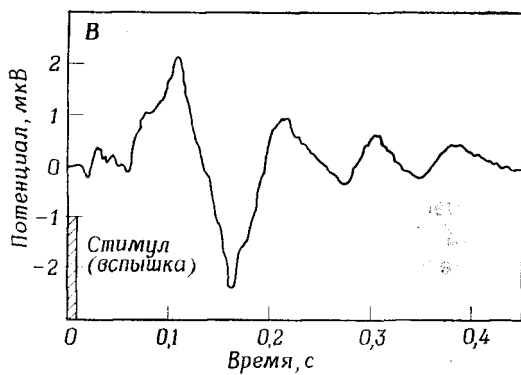
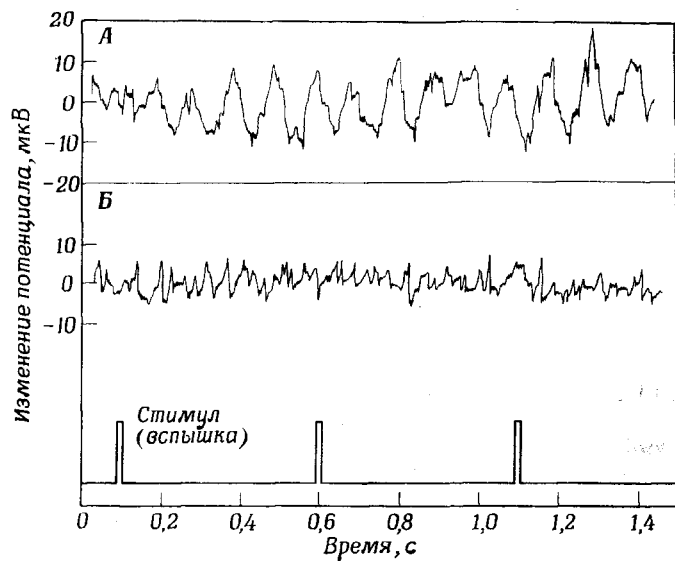


Рис. 2.25. ЭЭГ человека. А. Испытуемый находится в состоянии покоя. Б. Реакция на предъявление вспышек света. В. Усредненная реакция на вспышку света.

типа не ограничен зрительными явлениями; с помощью электродов, укрепленных в надлежащем месте, можно записывать вызванные потенциалы от слуховых и других раздражителей.

Происхождение зрительного вызванного потенциала (ЗВП) и ЭЭГ в целом еще не окончательно установлено, хотя можно предположить, что они представляют собой суммарный совместный ответ очень большого числа мозговых нейронов. Всесторонний анализ должен будет объяснить электрическую и химическую передачу волн ЭЭГ через кожу головы, которая, конечно, существенно искажает исходную информацию. Тем не менее более чем вероятно, что ЗВП — это прежде всего ответ на стимуляцию центральных областей сетчатки, а так как именно там находится фовеа, то ЗВП, вероятно, в первую очередь отражает состояние фотопического, а не скотопического зрения.

Восприятие яркости

3.1. Яркость

Если мы днем окажемся в таком густом тумане, что буквально не сможем разглядеть поднятой к лицу руки, то свет, видимый нами, будет просто бесформенным светом. Это есть ощущение света — воспринимаемая яркость. Элементарное ощущение света может опосредоваться через чрезвычайно простой «глаз», например всего лишь один фоторецептор в какой-нибудь части тела. Однако в этом случае с помощью яркости как таковой удастся передать лишь весьма незначительное количество информации. Поместим наблюдателя в центр равномерно освещенной сферической комнаты с белыми стенами; тогда, просто включая и выключая свет, мы сможем передать лишь весьма ограниченное количество информации. Именно так и происходит при использовании лампы Олдиса для передачи сигналов в азбуке Морзе. Это удобный, но крайне медленный способ передачи сообщения, а основная функция зрения — быстрое получение, передача и переработка информации. Поскольку у людей имеется сложный механизм восприятия цвета, можно использовать также цветовые стимулы; если же к ним не прибегать, а просто включать и выключать белый свет, то количество передаваемой информации будет очень мало.

В действительности глаз способен различать не только свет, но и контрастность; такое его свойство резко увеличивает объем передаваемой информации. Размер маленького предмета можно оценить только тогда, когда он находится на фоне более крупного и если эти предметы различаются по яркости или окраске либо по тому и дру-

гому. Эти различия известны как контрастность; различия в яркости называются световым или яркостным контрастом, а в цвете — цветовым. Многие авторы пользуются термином «контраст» в объективном смысле, например для обозначения относительной разницы в светимости двух соседних пятен (источников) света. Во избежание недоразумения мы будем применять этот термин для обозначения субъективных различий, за исключением тех случаев, когда вместе с ним употребляется какой-либо термин, имеющий объективный смысл, например контраст освещенности (светимости).

Обычно увеличение количества света, отражаемого от поверхности, влечет за собой увеличение контрастности (см. фото 3). Однако в некоторых случаях возникают зрительные парадоксы; примером могут служить эффекты, возникающие при рассмотрении фото 4. Часть серого кольца, окруженная черным фоном, имеет большую воспринимаемую яркость, чем та его часть, которая находится на белом фоне, хотя на самом деле каждая половина кольца отражает одинаковое количество света, попадающего в глаз. Оказывается, что в самом глазу имеется особый механизм, который усиливает воспринимаемый контраст. Этот механизм, по-видимому, частично обусловлен латеральным возбуждением и торможением, вызванными сложными переплетениями связей нейронов в сетчатке, которые могут оказывать влияние на восприятие в ее соседних (смежных) областях (разд. 2.3). Возможно, это связано и с различиями в обработке зрительной информации в мозгу.

3.2. Пороги

Как и в любой области человеческой деятельности, в зрении полезно знать пределы возможностей человека. В спорте (например в легкой атлетике) рекордом считается максимальная высота прыжка или минимальное время, за которое удастся пробежать один километр. Когда говорят об органах чувств, то пользуются понятием «порог». Так, интенсивность самого слабого света, еще видимого в определенной ситуации, будет называться пороговой величиной. Разумно предположить, что если интенсивность света несколько выше пороговой, то мы его

увидим, а если немного ниже, то нет. Конечно, ситуация не так проста, и иногда можно увидеть свет, даже если он значительно слабее порогового, и, наоборот, не увидеть его при том, что его интенсивность значительно выше этой величины. Почему так происходит? Объясняется это двумя причинами. Во-первых, сам свет имеет квантовую природу, т. е. он испускается световым источником не непрерывно, а маленькими порциями — квантами, причем по случайному закону. Хотя для данного источника света среднее число квантов, испускаемых в единицу времени, постоянно, это не означает, что в два равных, следующих один за другим промежутка времени испускается одинаковое число квантов. Здесь можно провести аналогию с грозой, когда число дождевых капель, падающих на два расположенных рядом участка, может незначительно различаться; несмотря на это, если проводить подсчет в течение нескольких минут, количество капель, падающих на каждый участок, будет совершенно одинаковым. Следовательно, для человека порог может оказаться разным из-за случайных отклонений в световом раздражителе, существующих независимо от того, насколько тщательно мы контролируем физические условия.

Вторым фактором является то, что палочки и колбочки, которые поглощают кванты света, не всегда обладают постоянной чувствительностью. Например, если два кванта света падают на молекулу зрительного пигмента в палочке, очень быстро сменяя друг друга, то второй квант может не вызвать зрительного эффекта, поскольку молекула в палочке не успеет восстановить свою чувствительность за короткий промежуток времени между двумя вспышками. Кроме того, два следующих друг за другом кванта могут попасть на различные участки сетчатки, обладающие разной чувствительностью. Естественно, что какие-то кванты отразятся от прозрачных поверхностей глаза, а некоторые поглотятся внутриглазными средами до того, как достигнут сетчатки. Отдельные кванты не поглощаются ни палочками, ни колбочками даже в тех случаях, когда они попадают на них. В силу всех перечисленных причин в испускании и поглощении света и раздражении световоспринимающего аппарата глаза есть элемент случайности.

Читатель, возможно, удивится, узнав, что ученые часто имеют дело со случайными величинами. Так, например, тепло, давление газа, слияние атомов и т. д. — все это физические понятия и процессы, имеющие случайную природу; их определяют по среднестатистическому поведению сотен тысяч атомов, не зная при этом, что происходит с каждым из них в отдельности. Здесь применяется, как правило, сложный математический аппарат, а все расчеты основываются на законах статистики. Эти факторы имеют важное значение при рассмотрении зрительных порогов, поскольку фоторецепторные клетки часто поглощают очень небольшое количество квантов.

Таким образом, при исследовании зрительных порогов нужно показывать наблюдателю несколько световых стимулов подряд в определенной последовательности. Меняя случайным образом их яркость, просят наблюдателя каждый раз давать ответ «да» или «нет» в зависимости от того, видит он их или нет (это называется методом постоянных раздражителей). Затем строят зависимость количества положительных ответов в процентах от действительной яркости стимула (рис. 3.1). Из рисунка видно, что при очень больших яркостях свет виден всегда, а при очень низких — никогда. При промежуточных значениях число положительных ответов пропорционально продолжительности сигнала. Пороговой яркостью обычно считают такую яркость, когда число положительных ответов составляет 50%; на рис. 3.1 эта величина равна L_T . График, изображенный на рис. 3.1, называют кривой совокупности частот или огибающей.

Часто говорят о том, что глаз обладает предельной чувствительностью; другими словами, он в состоянии зарегистрировать одиночный квант света. Это не совсем верно. На самом деле вспышка света может восприниматься лишь в том случае, если площадью сетчатки, соответствующей дуге в 10 угловых минут, в течение примерно 0,1 с будет поглощено около 10 квантов. По оценкам эта поверхность содержит около 500 палочек; поэтому вероятность поглощения одной палочкой более одного кванта весьма невелика. Это значит, что одиночный квант действительно может активировать палочку, но тем не менее одиночная палочка, поглотившая квант, сама по

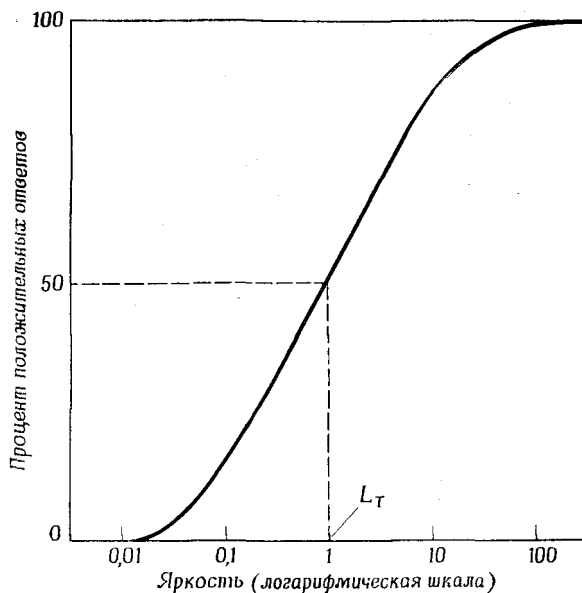


Рис. 3.1. Распределение частот ответов испытуемых при раздражении стимулом, яркость которого близка к пороговой.

себе не способна вызвать зрительный сигнал. Зрительной системе необходимы почти одновременные ответы более чем одной палочки (возможно, сразу до 10). Эти рецепторные ответы должны просуммироваться в каком-нибудь отделе зрительной системы, и только тогда наблюдатель сможет воспринять вспышку света.

До сих пор речь шла об абсолютном пороге зрения, т. е. минимальном количестве света, необходимом для формирования зрительного ответа при определенных условиях. Существуют также зрительные пороги, связанные с различением двух соседних полей зрения. Так, например, если тщательно выровнять яркости двух таких полей, то они будут восприниматься наблюдателем как одно большое однородное поле. Если теперь увеличивать яркость одного из них до тех пор, пока мы наконец не увидим разницу между ними, то эта дополнительная

яркость и будет представлять собой так называемый дифференциальный порог. Речь о нем пойдет в разд. 3.7. Дифференциальные пороги для полей, различающихся по цвету, будут обсуждаться в разд. 10.4.1. Значения порогов, получаемые упомянутым выше способом, всегда имеют большой разброс.

3.3. Темновая адаптация и абсолютные пороги большого поля

При изучении чувствительности глаза широко используются понятия порогов. Классическим примером может служить представленная на рис. 3.2 функция темновой адаптации: изменения абсолютного порога используются для количественного описания возрастания чувствительности глаза по мере его адаптации к темноте. При изме-

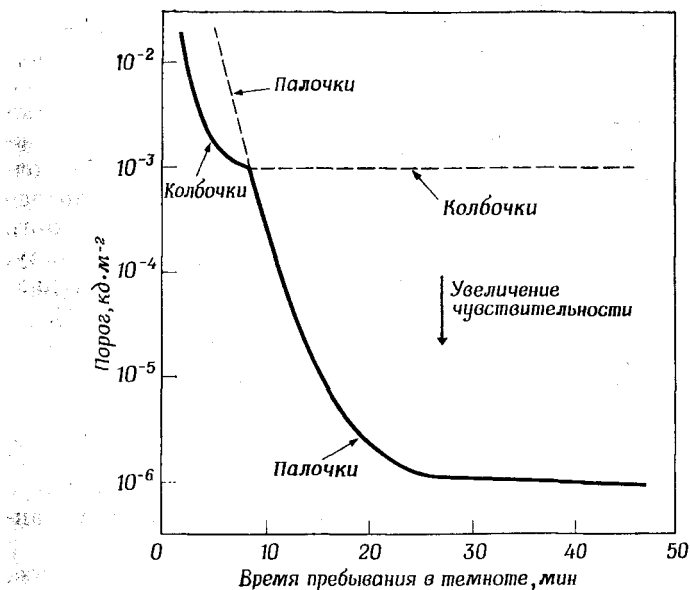


Рис. 3.2. Кривая темновой адаптации (сплошная линия) светоадаптированного наблюдателя. Пунктирные линии представляют собой продолжение гипотетических кривых палочковой и колбочковой адаптации в отдельности.

рении функции глаз сначала адаптируют к полю средней или высокой яркости; для полной адаптации требуется приблизительно 5 мин. Если затем поместить наблюдателя в темноту, его глаз из-за обесцвечивания зрительных пигментов рецептора сначала будет относительно нечувствителен к свету. Измеряя абсолютные пороги поля, можно следить за увеличением чувствительности глаз в темноте со временем. Часто чувствительность определяют как величину, обратную пороговой яркости (или энергии).

Обычно кривая темновой адаптации состоит из двух частей; это обусловлено, вероятно, разной скоростью регенерации пигментов палочек и колбочек (рис. 3.2). Участки кривой, обозначенные пунктиром, удается измерить лишь в особых условиях. Это объясняется тем, что наблюдатель может варьировать только пороговое поле до тех пор, пока оно не станет видимым. Поскольку он не в состоянии различать пороги палочек и колбочек, яркость понижают до тех пор, пока не останутся функционировать только самые чувствительные из них. Следовательно, измеряется только та часть функции, которая изображена на рис. 3.2 сплошной линией. Разумные приближительные значения пороговой яркости для дневного, или фотопического (колбочкового), и ночного, или скотопического (палочкового), зрения составляют: для большого колбочкового поля размером 1° или более -10^{-3} кд·м $^{-2}$, для ночного палочкового зрения -10^{-6} кд·м $^{-2}$. Следует иметь в виду, что эти числа зависят от размера раздражителя и диаметра зрачка глаза.

В строгом смысле функция темновой адаптации отражает изменение чувствительности в области порога зрения. Однако она по крайней мере качественно указывает еще и на то, каким образом глаз реагирует на более высокую яркость или на надпороговые раздражители.

Итак, свет будет казаться ярче в тех случаях, когда он воспринимается темноадаптированным, а не светоадаптированным глазом.

Что же представляет собой зрительный процесс, характеризующийся функцией темновой адаптации? Раньше считалось, что порог представляет собой меру количества зрительного пигмента, который находится в обесцвеченном состоянии. Денситометрия сетчатки частично под-

твердила эту точку зрения, хотя количеству обесцвеченного пигмента пропорционален логарифм порога. Данный метод показал также, что зрительный пигмент колбочек регенерирует гораздо быстрее, чем пигмент палочек. Это видно из рис. 3.2; функция светочувствительности колбочек выходит на плато в течение приблизительно 7 мин, в то время как палочек — в течение 30 мин. Раптон обнаружил, что при обесцвечивании световым раздражителем каждых 5% пигмента палочек порог увеличивается на 1 логарифмическую единицу, в то время как для колбочек соответствующая величина составляет 0,15 логарифмической единицы. Увеличение чувствительности при темновой адаптации по мере регенерации зрительных пигментов частично обусловлено изменениями в нервных слоях сетчатки.

3.4. Пороги различения малых полей зрения: различение звезд

Очень часто возникает вопрос о том, насколько слабым может быть свет маленького объекта, чтобы мы еще в состоянии были его различить. Этот вопрос, например, встает тогда, когда хотят узнать, как далеко распространяется свет маяка ночью или на каком расстоянии можно увидеть навигационный свет самолета, и, конечно, в том случае, когда определяют, насколько слаб свет самой слабой звезды.

Порог для точечных объектов зависит от количества света, поступающего в глаз, и поэтому его часто определяют как такую освещенность зрачка глаза, когда вероятность обнаружения источника света равна 50%. Это количество света называется *единичной освещенностью*, а пороговая величина составляет приблизительно $3,4 \cdot 10^{-9}$ лк, или $1,4 \cdot 10^{-11}$ Вт·м⁻². При нормальном диаметре зрачка (8 мм) в этих условиях в глаз поступает $7 \cdot 10^{-16}$ Вт. Необычайную чувствительность глаза можно проиллюстрировать на следующем примере: лампа в 100 Вт излучает в виде света лишь около 1,5 Вт; значит, такая лампа способна создать пороговый стимул у $2 \cdot 10^{15}$ людей. Это приблизительно в 600 000 раз больше, чем число всех ныне живущих на Земле людей. Если мощность

в $7 \cdot 10^{-16}$ Вт употребить на нагревание 1 г воды, то для повышения ее температуры на 1°C понадобится около 200 млн. лет. Пороговую освещенность в $3,4 \cdot 10^{-9}$ лк можно интерпретировать и по-другому: это освещенность глаза, создаваемая точечным источником силой света в 1 кд на расстоянии 17 км. Чтобы уверенно воспринимать свет от маяков и бакенов, приходится применять яркости, в 100 раз превышающие пороговые. Это значит, что источник света в 1 кд можно наверняка увидеть на расстоянии около 1,5 км.

Поразительная чувствительность глаза позволяет нам видеть очень слабые звезды, хотя число звезд, которые мы можем видеть невооруженным глазом в ясную ночь в отсутствие какого-либо дополнительного источника света, не так велико, как можно думать. Число звезд, видимых из одной точки на Земле, составляет около 2000, а число звезд, видимых на всем небе при самых благоприятных условиях, — около 6000. Величина звезд определяется по числовой шкале в порядке уменьшения их яркости. Величина, равная 1,0, соответствует средней яркости двух звезд — Альтаира и Альдебарана, а величина 6,0, — зрительному порогу. Шкала является логарифмической, поэтому отношение интенсивности излучения звезд, различающихся по величине на единицу, равно $2,512 : 1$, а звезд, различающихся на 5 единиц, — $100 : 1$.

В ясную безлунную ночь с помощью звездного атласа и шкалы величин звезд легко проделать опыт по определению скорости темновой адаптации. Выберите место, где нет уличных огней, и вооружитесь карманным фонариком с темно-красным фильтром. (Это позволяет видеть время и читать атлас и таблицы с минимальным обесцвечиванием зрительного пурпура палочек, поскольку он малочувствителен к свету в дальней красной области спектра.) Для проведения опыта необходимо лишь через равные промежутки времени, 1—2 мин, находить созвездие, расположенное на достаточно большой высоте, и выделять из него самую слабую звезду. Типичные результаты такого опыта приведены на рис. 3.3; они получены на юге Англии в сентябре (обратите внимание, что этот метод недостаточно чувствителен для определения начальной адаптации колбочек; см. рис. 3.2). Хотя считается, что

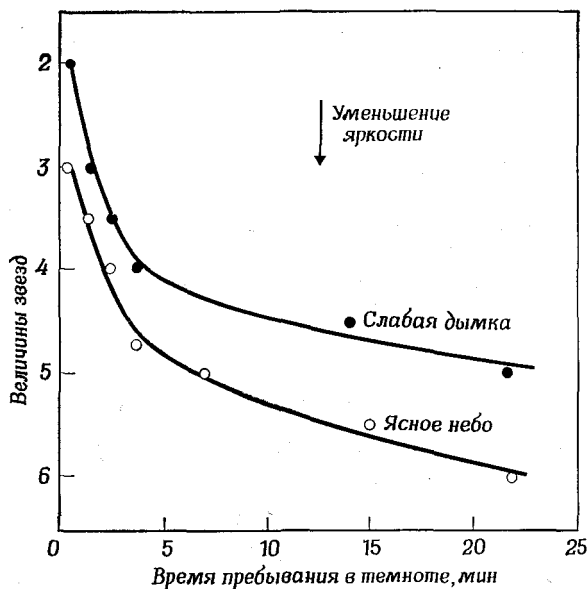


Рис. 3.3. Величины звезд, различных первоначально светоадаптированным наблюдателем, в зависимости от времени его пребывания в темноте.

можно видеть звезды до шестой величины, не всегда указывается, что для этого необходимо предварительно пробыть в темноте около 25 мин. Из рис. 3.3 видно также, что при другом наблюдении, когда была легкая дымка, порог снижался примерно на единицу.

Астрономы показали, что, находясь в темной комнате, можно через очень маленькое отверстие, обращенное к ночному небу, обнаруживать звезды даже 7-й и 8-й величины. Это значит, что фоновая освещенность ночного неба достаточна в этих условиях для существенного снижения порога. При данном способе наблюдения, конечно, возникают практические трудности распознавания нескольких звезд, наблюдаемых через такое узкое отверстие.

Естественно, что порог резко снижается при уменьшении разницы в яркости между объектом и окружающим его фоном. Именно поэтому яркие звезды, хорошо видные

ночью, быстро исчезают на рассвете и никогда не видны невооруженным глазом днем. Кроме Солнца и Луны, единственное исключение в этом отношении — планета Венера, которая бывает достаточно яркой при дневном свете и видна невооруженным глазом; нужно только точно знать, куда смотреть.

Принято считать, что, когда глаз находится в состоянии темновой адаптации и зрительные пигменты полностью регенерированы, палочки проявляют гораздо большую чувствительность к свету, чем колбочки. В полной мере это относится лишь к протяженным источникам света, которые возбуждают большое количество рецепторов. Ответы отдельных рецепторов могут суммироваться, давая гораздо больший ответ; следовательно, в случае очень маленьких источников (например, звезды), возбуждающих лишь несколько рецепторов, порог становится намного выше. Эта суммирующая способность гораздо очевиднее для групп палочек, чем колбочек, и для точечных или подобных звездам стимулов порог для палочек лишь немногим ниже, чем для колбочек. Таким образом, основной вклад в увеличение чувствительности палочек в ходе темновой адаптации глаза, как это можно видеть и для большого по размерам источника света (рис. 3.2), вносит суммирование рецептивных полей. Это суммирование, по-видимому, осуществляется на уровне горизонтальных клеток сетчатки (рис. 2.2) и не обусловлено различиями в ответных реакциях отдельных рецепторов — палочек и колбочек.

Порог можно существенно понизить с помощью небольшого астрономического телескопа. Нетрудно убедиться, что телескоп при этом не увеличивает яркости наблюдаемого объекта. И действительно, в телескоп Луна, например, кажется несколько тусклее, в чем легко убедиться, если одним глазом смотреть на нее в телескоп и одновременно другим, невооруженным глазом — просто так. Объясняется это тем, что в телескопе изображение Луны увеличено и приходящий свет распределяется по этому увеличенному изображению. Оба фактора компенсируют друг друга, остается лишь небольшая распыленность, обусловленная потерей света в линзах и отражением от их поверхности. Однако при наблюдении за

звездами возникает совсем другая ситуация. Звезды настолько удалены от Земли, что увеличение уже не играет какой бы то ни было роли. Оно только не должно быть столь большим, чтобы в результате дифракции возникало ложное изображение диска. При условии, что оптическая сила достаточно велика, чтобы весь выходящий из окуляра свет попадал в глаз, яркость звезды увеличивается в зависимости от соотношения площади объектива телескопа и площади зрачка глаза. Так как площадь зрачка ночью составляет примерно 50 мм^2 , увеличение освещенности сетчатки будет равно (Площадь объектива в мм^2)/50. Таким образом, если диаметр объектива равен 75 мм, то увеличение будет в 88 раз. Это соответствует разнице в величине, равной 4,9, и, принимая во внимание, что в телескопе может происходить некоторое поглощение света, позволяет наблюдать звезды десятой величины.

Более яркие звезды и планеты (в том числе и плохо различимый Меркурий) можно увидеть днем при помощи небольшого ориентированного по направлению к экватору телескопа диаметром 60 или 70 мм при условии, что небо безоблачно и нет дымки, а объект не слишком близко находится к Солнцу. Это возможно потому, что звезды и планеты — маленькие объекты и в телескоп они кажутся гораздо более яркими, в то время как создающее фон небо представляет собой протяженный объект и поэтому кажется несколько темнее. Таким образом, контрастность между ними намного возрастает.

3.5. Чувствительность к цветному свету

Глаз человека чувствителен только к очень узкой полосе электромагнитного спектра — несколько больше октавы (соотношение частот — 2 : 1), расположенной от длин волны около 380 нм в фиолетовой области до 760 нм в красной области спектра. (Отметим, что ухо чувствительно к длинам волн с диапазоном частот около 7 октав.) На рис. 3.4 показано изменение с длиной волны относительных порогов для протяженных источников как для дневного, или фотопического, зрения (с участием колбочек),

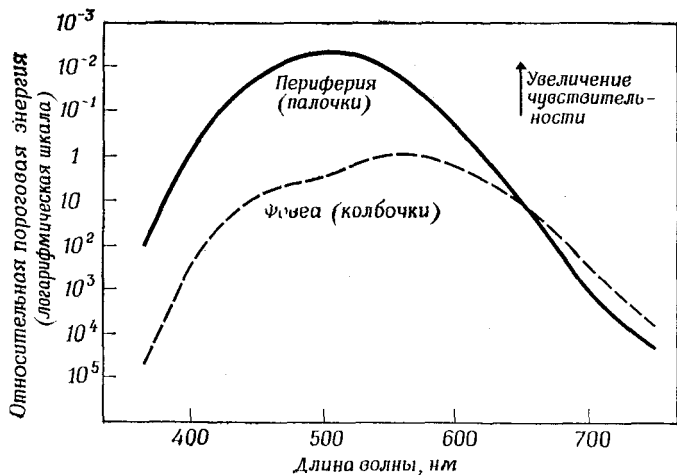


Рис. 3.4. Функции относительной видности для палочкового и колбочкового зрения, измеренные при абсолютном пороге.

так и для ночного, или скотопического, зрения (с участием палочек).

Чувствительность этих двух видов рецепторов при разных длинах волн можно измерить, используя обратные пороговые функции для периферического (палочкового) и фовеального (колбочкового) зрения, как это показано на рис. 3.4. Они известны как функции относительной видности (V_λ) для фотопического и скотопического зрения. Часто эти функции нормируют, приравняв V_λ к единице при длине волны, соответствующей максимальной чувствительности (555 нм для колбочек и 505 нм для палочек), но в таком виде график обычно не строят. Например, из него не видно, как это непосредственно следует из рис. 3.4, что для больших рецептивных полей, за исключением длинноволновой части спектра, палочки обладают большей чувствительностью, чем колбочки. Аналогичные функции можно получить на надпороговых уровнях, если вместо пороговой энергии при каждой длине волны измерять энергию, необходимую для достижения данного уровня яркости. При большой яркости

будут работать только колбочки, а при малой — только палочки.

Следовательно, в дневное время глаз наиболее чувствителен к желто-зеленому свету с длиной волны 555 нм, а ночью пик смещается в сине-зеленую область, к длине волны 505 нм. Такое смещение максимума цветовой чувствительности известно как эффект Пуркинье, названный в честь его первооткрывателя, который в 1825 г. обнаружил, что части дорожных столбов, окрашенные в красный и синий цвета, днем выглядят одинаковыми по яркости, а на рассвете выглядят по-иному: синий цвет кажется ярче, чем красный.

Интересно, что солнечный свет имеет максимальную энергию при той длине волны, к которой глаз наиболее чувствителен. Это свидетельствует о решающей роли эволюции в приспособлении глаза к спектральному составу солнечного света. Этот эволюционный момент особенно ярко выражен у глубоководных рыб, у которых пик спектральной чувствительности смещен в синюю область спектра, поскольку солнечный свет, проходящий через толщу океанской воды, имеет голубую окраску.

3.6. Физиологическая основа восприятия яркости

Прежде чем переходить к дальнейшему рассмотрению вопроса о яркости, целесообразно обратиться к физиологическим данным. Многие опыты были выполнены с помощью введения электродов в простые глаза, например глаз мечехвоста, и в сетчатку кошек, обезьян и многих других видов. Хотя довольно хорошо известно, что поглотившие свет рецепторы генерируют медленные электрические потенциалы, определенным образом связанные с интенсивностью падающего света, истинные зрительные сигналы, посылаемые в мозг, закодированы по двоичной системе. Серия электрических потенциалов действия или импульсов посылается по аксонам ганглиозных клеток, т. е. по зрительному нерву, при любом раздражении сетчатки. По мере того как интенсивность света, падающего на рецепторы, увеличивается, генерируется все большее и большее число импульсов. Другими словами, частота импульсов возрастает и может достигать 120 в 1 с

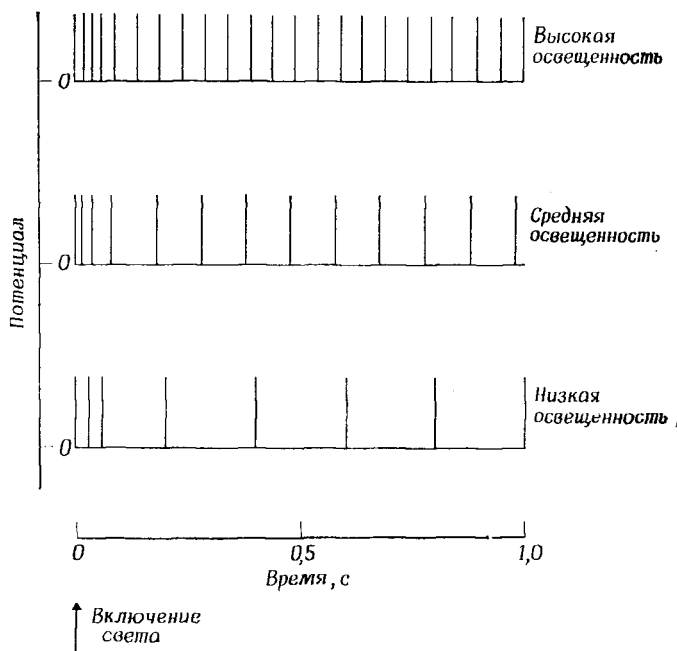


Рис. 3.5. Импульсная активность, зарегистрированная в глазу мечехвоста при трех уровнях освещенности.

(рис. 3.5). Следовательно, яркость закодирована частотой, и мозг, таким образом, расшифровывает высокую частоту импульсов как свет большой интенсивности. Частота импульсов примерно соответствует логарифму освещенности сетчатки. Как уже говорилось в разд. 2.3.2, эти потенциалы действия распространяются по нервным волокнам без затухания, что является большим преимуществом канала, по которому передается информация. Кроме того, как известно из распространения модулированных по частоте радиоволн, при их приеме происходит гораздо меньшая интерференция, чем когда они модулированы по амплитуде.

Однако картина не так проста, как кажется на первый взгляд, и хотя некоторые ганглиозные клетки генерируют импульсы при включении света, другие возбуждаются

лишь при его выключении. Интересно на минутку отойти в сторону и обратиться к другим чувствам, например слуху. Громкость кодируется в слуховой системе аналогичным образом и передается в мозг в виде потенциалов действия точно так же, как из глаза. Достигая мозга, они попадают в разные участки, а это вызывает совершенно разные ощущения.

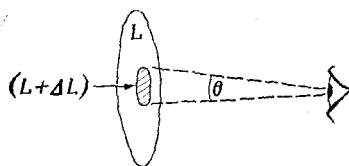
3.7. Дифференциальные (разностные) пороги яркостей

Как мы уже говорили, восприятие деталей изображения и передача информации основаны на различиях в контрасте и глаз обладает внутренним механизмом для увеличения видимых контрастов. Поэтому нам интересно знать пороговые значения различий в яркостях, которые глаз в состоянии воспринимать в разных условиях. Это позволит установить, виден объект на фоне или нет.

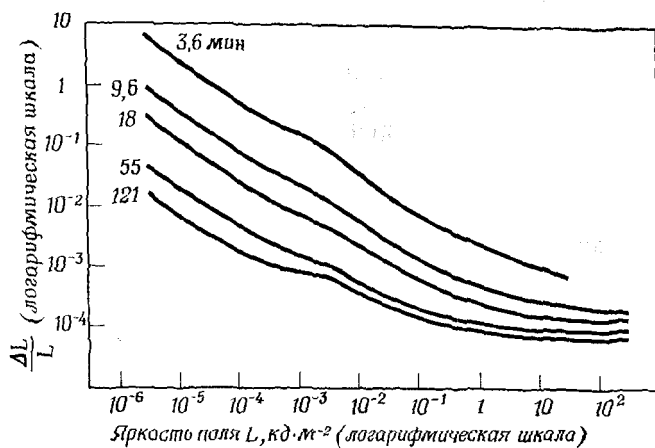
Кроме того, это даст нам возможность оценить, насколько далеко можно видеть объект на фоне неба. Если черный предмет удаляется от нас, его воспринимаемая яркость увеличивается благодаря попаданию на глаз света, рассеиваемого на молекулах воздуха и пылевых частичках, находящихся между нами и объектом. В конечном счете яркость предмета станет такой же, как и неба на горизонте. Когда объект находится на таком расстоянии, при котором между ним и небом существует пороговый контраст, это значит, что он находится на расстоянии минимальной видимости.

Для измерения дифференциального порога возьмем большое круглое поле с яркостью L (рис. 3.6, А), в центре которого находится круглое тестовое пятно, также имеющее яркость L . Поскольку это пятно имеет ту же яркость, что и окружающий его фон, мы увидим сплошное большое поле. Однако, если постепенно увеличивать яркость центра до $L + \Delta L$, при достаточно большом ΔL пятно станет различимым. Разницу в яркостях можно связать с общей яркостью (которую часто называют уровнем световой адаптации) с помощью следующего соотношения, определяющего контрастность яркости C :

$$C = \frac{(L + \Delta L) - L}{L} = \frac{\Delta L}{L}.$$



А



Б

Рис. 3.6. Отношение Вебера $\Delta L/L$ для полей разного размера. Закон Вебера, по-видимому, справедлив только при высоких уровнях яркости.

Величина ΔL определяет пороговый контраст яркостей. В действительности не так-то просто повысить яркость центрального пятна точно до такого уровня, когда оно становится видимым. Имеет смысл начинать с больших ΔL и уменьшать его до тех пор, пока пятно не исчезнет, а затем брать среднеарифметическое этих двух величин. Этот метод называется методом пределов. Более точный, но зато и значительно более трудоемкий психофизический способ — это метод постоянных стимулов, рассмотренный в разд. 3.2. Наблюдателю последовательно показы-

вают несколько раздражителей (примерно 10 или 12), имеющих различную яркость. Часть этих раздражителей имеет более высокую яркость, чем пороговая, а часть — более низкую, и показываются они в произвольном порядке. В зависимости от того, видит наблюдатель раздражитель или нет, он отвечает «да» или «нет». На основании этих данных строят график частоты ответов и на нем отмечают точку, соответствующую вероятности восприятия 50%. Блэквелл получил очень подробные сведения о центральных полях, имеющих различную величину, используя бинокулярное зрение и фоновое адаптирующее поле диаметром 10° . Полученные им результаты представлены на рис. 3.6, Б. Как видно из рисунка, при оптимальных условиях (поле диаметром в 2° и фоновая яркость около $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$) S равно 0,008, или 0,8%. Чтобы получить абсолютную достоверность зрительного восприятия, эту величину S нужно умножить на множитель порядка 100. Перегиб кривой при яркости около $10^{-3} \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$ соответствует переходу от палочкового к колбочковому зрению.

3.8. Закон Вебера

Величину $\Delta L/L$ часто называют отношением Вебера. Приблизительное постоянство ее при больших яркостях (почти горизонтальные участки на рис. 3.6, Б) было обнаружено Бугером в 1760 г., когда он ставил опыты со свечами. Вебер в 1834 г. распространил эти наблюдения на другие органы чувств. Так называемый закон Вебера является одним из самых «старых» в экспериментальной психофизике и гласит, что $\Delta L/L$ является постоянной величиной. Это значит, что порог составляет постоянную часть раздражителя. Примерно так и бывает при высоких уровнях яркостей, и это подтверждается всем чувственным опытом человека. Внесенная в темную комнату свеча дает очень большое изменение в яркости, однако в сильно освещенной комнате она незаметна. Применяемые в быту электрические лампочки накаливания распределены по мощности (25, 40, 60, 100, 150 Вт) таким образом, что их яркости относятся между собой как 1 : 1,5.

Зрительная фотометрия зависит от способности человеческого глаза различать яркость. Это неплохой метод, но он связан с большими затратами времени и менее точен (т. е. измерения имеют большой разброс по сравнению с методами, использующими фотоэлектрические приборы). Последние, однако, фактически имитируют глаз и должны быть калиброваны по своей спектральной чувствительности с учетом зрительных измерений (рис. 3.4). Они никак не могут быть более *точными*, чем глаз. С этой точки зрения зрительные фотометры для светотехнических измерений существенно лучше.

В настоящее время считается, что зрительное различение ограничено «шумами» сетчатки (речь идет о случайном возбуждении зрительных клеток даже в отсутствие света). Заметный эффект такого рода легко обнаружить, просидев около 30 мин в совершенно темной комнате. Со временем наблюдатель отмечает у себя появление мерцающей серости (так называемый «собственный свет» сетчатки).

3.9. Факторы, влияющее на восприятие яркости

Оценивая любую зрительную ситуацию, мы прежде всего интересуемся тем, насколько яркими нам кажутся рассматриваемые поверхности. На видимую яркость того или иного участка зрительного поля могут влиять разные факторы; рассмотрим некоторые из них.

Воспринимаемую яркость иногда рассматривают как субъективный коррелят освещенности сетчатки. Это верно в том смысле, что при прочих равных условиях воспринимаемая яркость изменяется параллельно действительной. На рис. 3.7 изображена гипотетическая функция такого типа, которую мы можем назвать шкалой восприятия яркости. При яркости ниже пороговой видимая яркость поля постоянна и соответствует темновому свету глаза; при яркости выше пороговой она увеличивается. Однако наиболее интересным является вопрос о том, как изменяется восприятие, когда меняется не только яркость поля, но и другие факторы. Для очень больших полей наиболее важные факторы — это яркость, к которой наблюдатель предварительно адаптировался, и цвет поля.

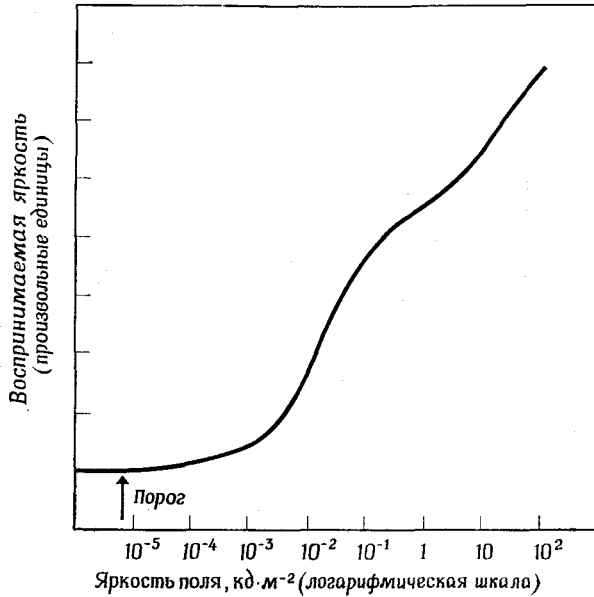


Рис. 3.7. Гипотетическая функция, изображающая зависимость видимой яркости от действительной.

3.9.1. Преадаптация

Действие предварительной световой адаптации прослеживается при рассмотрении функции, о которой шла речь в разделе 3.3. Как мы видели, адаптация к свету понижает чувствительность к тестовому полю, наблюдаемому в темноте в течение нескольких минут после удаления раздражителя, вызвавшего предварительную световую адаптацию. Поэтому на подпороговых уровнях воспринимаемая яркость понижается. На рис. 3.8 показано влияние различных преадаптационных яркостей на восприятие фовеального тестового поля при пороговой освещенности и выше порогового уровня сразу же после преадаптации. Каждая кривая была получена для одного уровня видимой яркости и показывает, насколько нужно изменять тестовое поле, чтобы поддерживать постоянство восприятия при соответствующем изменении пре-

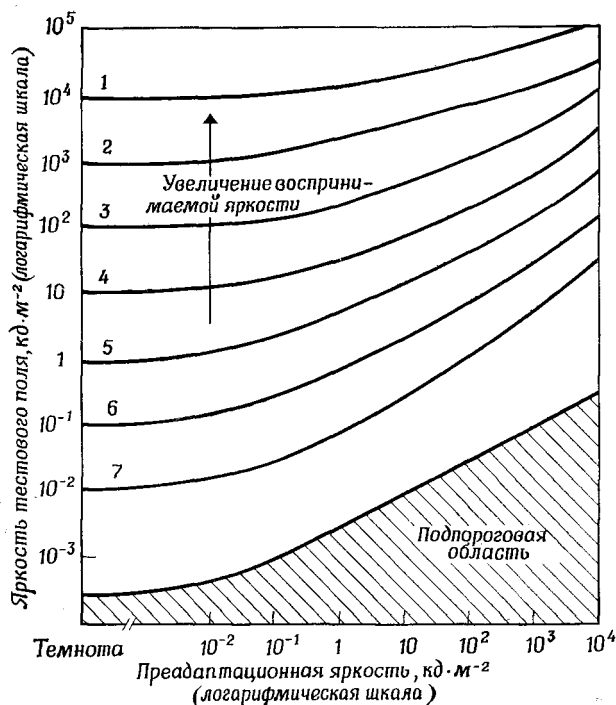


Рис. 3.8. Семейство кривых постоянной воспринимаемой яркости, измеренных при темном фоне, для наблюдателя, преадаптированного при разных уровнях яркостей.

адаптационной яркости. По мере увеличения уровня преадаптации чувствительность глаза в общем снижается и яркость тестового поля приходится повышать. Чем выше расположены кривые, тем большей видимой яркости они соответствуют.

3.9.2. Индукция и фоновые поля

Как мы видели (разд. 3.1), прилегающий или окружающий фон может оказывать влияние на восприятие тестового поля. На рис. 3.9 изображены кривые, полученные для фовеального зрения, которые демонстрируют подобные влияния при различных уровнях яркости. Они аналогичны кривым рис. 3.8, но при более внимательном рассмот-

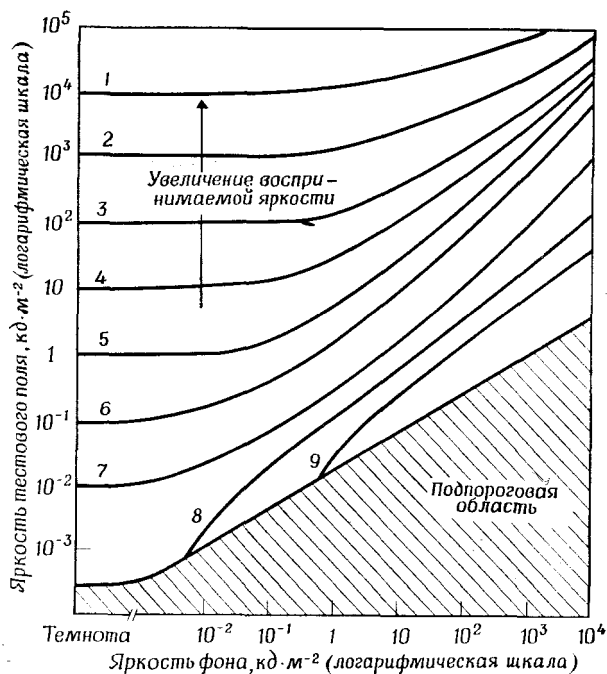


Рис. 3.9. Кривые постоянной воспринимаемой яркости, измеренные в широком диапазоне яркостей фона.

рении видно, что влияние окружающего фонового поля больше, чем преадаптационного поля той же яркости. Рассмотрим, например, условия, при которых определены кривые 4 на каждом из рисунков. Обе они относятся к одному и тому же уровню воспринимаемой яркости — примерно такому же, как у листа белой бумаги при обычном дневном освещении. Темновая адаптация и темный фон дают одинаковый эффект. Если наблюдатель преадаптировался к яркости $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, то для того, чтобы достичь такого же ощущения, яркость тестового поля должна быть повышена до $180 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Однако если яркость фона поднять до $100 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$, то придется тестовое поле уве-

личить до гораздо большей яркости, а именно до $550 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$.

Часто яркость при преадаптации и яркость фона одинаковы; что же происходит в тех случаях, когда они существенно различаются? Так бывает, например, если смотреть в окно с ярко освещенной солнцем улицы на предмет в слабо освещенной комнате. Можно сказать, что воспринимаемая яркость определяется яркостью окружения, если только она не слишком мала по сравнению с уровнем преадаптации (вероятно, не более чем в 100 раз). Второй вопрос: что происходит, когда яркость окружающего фона в разных его частях разная? (Представим себе, например, что читатель сидит за письменным столом и в поле его зрения находится много предметов, которые все вносят свой вклад в суммарный окружающий фон.) Во многих случаях колебания в яркости носят не такой уж сложный характер, как это может показаться на первый взгляд. Отражательная способность разных предметов, по-видимому, различается не более чем 20:1, и при одинаковом освещении их яркости будут различаться примерно так же. В этом случае данные рис. 3.9 будут адекватно определять воспринимаемую яркость, если яркость фона считать равной средней яркостью окружающих предметов. Однако, если яркость окружения колеблется очень сильно, этот простой, пусть даже условный, подход не правомерен. Распространенным примером является эффект, производимый светом фар приближающегося ночью автомобиля. В этом случае имеется поле высокой яркости, находящееся на противоположном, почти темном фоне. Любой другой объект окружающей обстановки, например дорожный указатель, из-за присутствия этого источника будет казаться менее светлым. Отчасти это происходит благодаря тормозным процессам на рецепторном уровне сетчатки, а частично — из-за рассеяния в глазу света от очень яркого источника, который затем поглощается всеми частями сетчатки и, следовательно, понижает чувствительность всех рецепторных путей. В общем случае это тормозное действие наиболее сильно выражено для ярких источников больших размеров, которые ближе всего расположены к тест-объекту в поле зрения.

3.9.3. Различение контуров и пространства

Наличие контура или резко очерченной границы между двумя полями исключительно важно, если мы хотим различить эти поля. Постепенный переход от высокой яркости к низкой не должен замечаться глазом. Однако, как уже говорилось в разд. 3.1, любая существующая граница в результате процессов, происходящих, по-видимому, в сетчатке, будет усиливаться, способствуя тем самым различению. Такое подчеркивание границы (фото 5) часто называют полосами Маха, открывшего и исследовавшего множество подобных явлений.

3.10. Цвет и воспринимаемая яркость

Основное влияние длин волн света на воспринимаемую яркость уже было продемонстрировано на рис. 3.4. На этом рисунке изображены кривые одинаковой воспринимаемой яркости для палочек и колбочек, которые показывают, насколько нужно изменить энергию монохроматического тестового поля с изменением длины волны, чтобы получить одинаковое восприятие яркости. Эти кривые получены при пороговых значениях яркости, однако функции, имеющие аналогичную форму, были получены и при более высоких уровнях яркости. Для дневного зрения нужно рассматривать только функцию, соответствующую колбочкам, поскольку глаз в этом случае светoadaptирован и, как следует из рис. 3.2, порог для палочек слишком высок, чтобы вызывать сколько-нибудь заметный ответ от этих рецепторов. На периферии зрительного поля и ночью будут работать только палочки. Для мезопического зрения, т. е. при уровнях освещенности между фотопическим (колбочки) и скотопическим (палочки) зрением, следует принимать во внимание оба типа рецепторов.

Как рассчитать яркость поля, на которое падает свет нескольких длин волн, например дневной свет или свет от лампы накаливания? В этом случае для получения полной яркости просто суммируют вклады всех длин волн и считают, что влияние составляющих яркости на восприятие аддитивно. Яркость предмета определяется

уравнением

$$L = k \sum E_{\lambda} V_{\lambda},$$

где k — постоянная, а E_{λ} — энергия, испускаемая в каждой полосе при длинах волн λ , которые имеют относительную эффективность V_{λ} . Следовательно, яркость аддитивна по определению, а предположение о том, что одинаковые объективные яркости создают одинаковые ощущения, близко к действительности. На самом деле, однако, чем ближе тестовое поле к монохроматическому, тем более ярким оно кажется. Это явление, состоящее в том, что белое поле (которое содержит смесь волн различной длины) представляется нам менее светлым, чем монохроматическое поле той же яркости, известно как эффект Гельмгольца—Кольрауша (см. также разд. 8.4).

3.11. Измерение воспринимаемой яркости

Поскольку видимая яркость представляет собой атрибут восприятия, имеющий определенную величину, ее можно проградуировать, как это показано на рис. 3.7. Например, можно расположить ряд источников света или освещенных поверхностей в определенном порядке — от самого тусклого до самого яркого. Однако вопрос о том, можно ли установить какие-то количественные соотношения — например, сказать, что воспринимаемая яркость одного поля выше, чем другого, — остается спорным вопросом психофизики вот уже более столетия.

Фехнер, считающийся основоположником психофизики, попытался решить эту проблему, предположив, что единицей видимой яркости является восприятие порогового различия между двумя полями (часто называемое едва заметным различием или дифференциальным порогом). Следовательно, если мы увеличим яркость поля на некоторую величину и подсчитаем соответствующее число пороговых приращений, то получим меру изменения яркости в субъективных единицах. Предположив, что закон Вебера (разд. 3.8) справедлив, Фехнер показал, что ощущение увеличивается пропорционально логарифму яркости. Однако, как следует из рис. 3.6, B , закон Вебера при низких яркостях не выполняется, поэтому

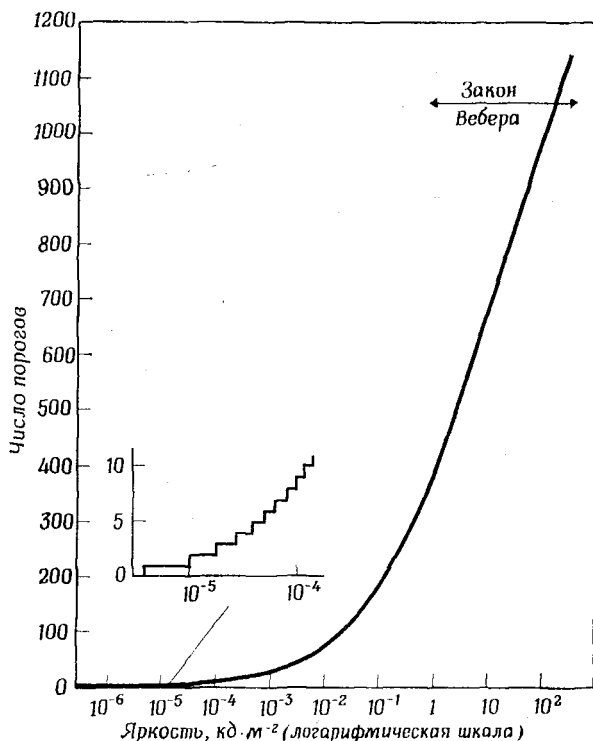


Рис. 3.10. Функция Фехнера, полученная исходя из нижней кривой рис. 3.6. Как можно видеть, фехнеровский логарифмический закон, который предсказывает прямолинейную зависимость, справедлив там, где выполняется закон Вебера. Вставка показывает ступенчатый подъем воспринимаемой яркости при каждом увеличении действительной яркости на пороговое значение.

логарифмическая зависимость может иметь место лишь при высоких уровнях яркости. На рис. 3.10 изображена функция Фехнера с использованием параметров нижней кривой рис. 3.6, Б. Приведенная здесь же ступенчатая зависимость показывает, что ощущение увеличивается ступенчато, по достижении каждый раз пороговой разницы. В той области, где приблизительно выполняется закон Вебера, функция подчиняется логарифмическому закону.

Логарифмический закон Фехнера никогда не был полностью принят, поскольку порог варьирует от наблюдателя к наблюдателю и зависит также от цвета, размера и формы тестового поля. Один из путей, позволяющих обойти эту трудность, — это брать разные единицы видимой яркости для разных наблюдателей или полей разной величины, формы или цвета. Многие исследователи считают такую операцию неправомерной, но на это можно возразить, что мы ведь не отказываемся от использования единицы «килограмм», хотя единица массы свинца занимает другой объем, чем такая же масса воды. Фехнера критиковали также за то, что для вывода логарифмического закона он суммировал пороги, однако можно ответить, что закон используется для выяснения общего характера функции, а не ее детальной формы. Наконец, существует мнение, что порог, возможно, не соответствует единичному изменению восприятия.

Второй метод градуировки — это метод распределения. Его впервые применил Плато 100 лет назад. Он предложил нескольким художникам нарисовать серую поверхность промежуточного между черным и белым цвета. К его удивлению, все художники выбрали серый цвет одной и той же светлоты. Подобный прием был использован для получения шкалы Величин Мензелла (более подробно об этом см. в разд. 6.3.3). Наблюдателю предлагается подобрать образцы (например, набор серых карточек от черной до белой), которые, с его точки зрения, отличаются друг от друга по яркости в одинаковой степени, причем последовательные образцы различаются между собой гораздо больше, чем на 1 порог яркости. Затем из 50 или более карточек отбирают 10 и располагают их в порядке возрастания на одну и ту же величину видимой яркости. Эти выбранные карты нумеруются от 1 до 10. Разница между двумя номерами является, таким образом, мерой различия в видимой яркости соответствующих карт, хотя, например, карта № 4 не является вдвое ярче, чем карта № 2. Особенно интересно отметить, что число порогов между следующими друг за другом картами постоянно, как это и следует из закона Фехнера, если он справедлив.

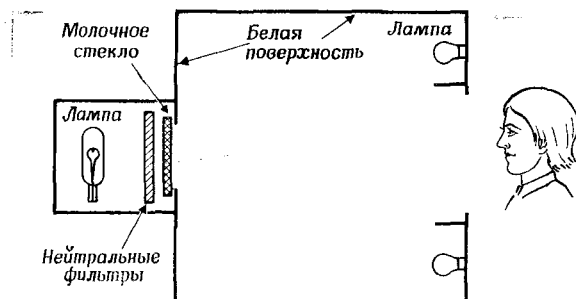


Рис. 3.11. Простая установка для оценки яркости.

Третий метод измерения видимой яркости, который благодаря усилиям Стивенса из Гарвардского университета получил особенно большую популярность в последние годы,— это метод прямого определения. Этот метод совсем не нов и применялся к источникам света уже 2000 лет назад: еще во втором веке до н. э. греческий астроном Гиппарх разделил видимые невооруженным глазом звезды на 6 классов, или порядков, в зависимости от их яркости, самая яркая звезда стала звездой первой величины, а самая слабая, но вполне различимая в безлунную ночь,— шестой. К счастью, его расчеты были сохранены Птолемеем, который в своем труде «Альмагест» описал положение и величину более чем 1000 звезд. Соотношения, приведенные Гиппархом, хорошо укладываются на логарифмическую зависимость, полученную с помощью точных современных приборов. Таким образом, равные отношения интенсивностей соответствуют одинаковым различиям в величинах звезд. Стивенс предположил, что наблюдатель в состоянии не только просто разделять яркости на группы, но и непосредственно определять их.

Такое прямое определение можно осуществить с помощью очень простого прибора, изображенного на рис. 3.11. Для регулирования яркости раздражителя используют нейтральные фильтры. Их изготавливают, например, из светло-серой киноплетки № 60 (см. приложение), имеющей оптическую плотность около 0,5.

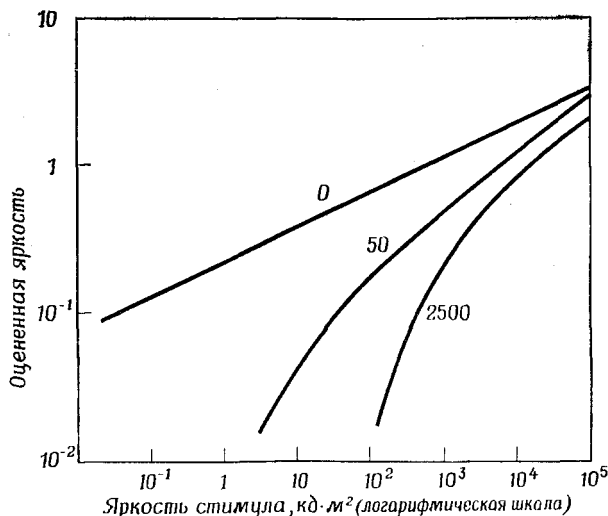


Рис. 3.12. Кривые, полученные из оценок яркостей трех фонов равных 0, 50 и 2500 $\text{кд} \cdot \text{м}^2$.

Для увеличения плотности пленки налагают друг на друга; при наложении двух пленок плотность становится равной 1,0, трех — 1,5 и т. д. Наблюдателю в произвольном порядке показывают несколько поверхностей разной яркости и просят охарактеризовать их каким-нибудь числом. При этом номер первой поверхности неважен, но последующим он должен присвоить относительные номера, так что если вторая поверхность вдвое меньше по видимой яркости, чем первая, то она должна получить вдвое меньший номер. Лучше всего показывать каждую поверхность 5—10 раз, а затем усреднять данные. Для приведения в соответствие данных, полученных разными наблюдателями, обычно делят все показания на средний показатель для стандартного стимула (например, 500 $\text{кд} \cdot \text{м}^2$), видимого в темноте. На рис. 3.12 представлены результаты опытов, проведенных на 200 наблюдателях; они обнаруживают поразительное соответствие, несмотря на то что по точности такое определение значительно уступает фотометрическим методам. В условиях темновой

адаптации результаты можно приблизительно представить степенной функцией типа

$$M = S^n,$$

где M — определяемая величина, S — величина раздражителя, а n — показатель, равный по Стивенсу 0,33, а по подсчетам автора 0,26. Иногда результаты лучше представлять в следующем виде:

$$M = k(S - S_0)^n,$$

где k — постоянная, а S_0 — величина абсолютного порога стимула. Правильность такой записи подвергается сомнению, поскольку, подобно логарифмическому закону Фехнера, характер зависимости сильно варьирует от наблюдателя к наблюдателю.

Какой же вывод из всего вышесказанного может сделать читатель? Удастся ли хотя бы одним из перечисленных методов проградуировать видимую яркость? И дадут ли номера какое-либо представление о ней или только позволяют расположить объекты в правильной последовательности? Даже если на все эти вопросы мы будем вынуждены ответить отрицательно, тем не менее методы могут оказаться полезными для регистрации изменений в восприятии, особенно при сравнении восприятия яркости в разных условиях, например при разных уровнях адаптации, как это показано на рис. 3.12. Предпринимались попытки проверить результаты, получаемые этими методами, путем сравнения шкалы ощущений с электрической активностью глаза и мозга. Иногда регистрируемые потенциалы повышались пропорционально логарифму яркости (или освещенности сетчатки), иногда — по степенному закону. Во всяком случае, эти ответные реакции имеют место, по-видимому, на ранней стадии зрительного анализа, а затем до того, как произойдет окончательное восприятие, они модифицируются.

3.12. Константность восприятия светлоты

Глаз устроен таким образом, что независимо от того, приближаемся мы к поверхности или удаляемся от нее, яркость остается постоянной. Это происходит потому,

что когда мы приближаемся к предмету, то, хотя в глаз поступает большее количество отраженного от него света, этот свет распределяется по большей площади сетчатки. В результате при нашем перемещении видимая яркость предмета не меняется.

Другой случай постоянства восприятия — так называемая константность восприятия светлоты, проявляющаяся, например, в том, что лист белой бумаги остается для нас одинаково белым и на солнечном свету, и в умеренно освещенной комнате. Уголь в этих же условиях выглядит черным, даже если яркость его на солнечном свету будет в 100 раз выше, чем яркость бумаги в комнате. Если бы видимая светлота определялась только яркостью, то мы должны были бы ожидать обратного эффекта. Одна из причин этого явления — то, что, меняя освещение, мы изменяем освещенность как предмета, так и его непосредственного окружения. С достаточно хорошим приближением относительная яркость объекта и окружения остается постоянной. Если мы снова обратимся к рис. 3.9, то увидим, что при умеренной и высокой яркости окружения кривая постоянного восприятия имеет наклон, близкий к единице. Следовательно, если яркость тестового поля по отношению к фоновой яркости остается постоянной, видимая светлота не будет зависеть от абсолютного уровня яркости. Явление константности восприятия светлоты по крайней мере отчасти можно объяснить тормозным влиянием окружения, которое подавляет реакцию сетчатки на яркость объекта. Как указано в разд. 3.9.2, тормозное действие, по-видимому, осуществляется в горизонтальных связях нейронов.

Существует ряд других сенсорных механизмов, которые обеспечивают постоянство ощущения или восприятия. Наиболее известные из них — механизмы константности восприятия формы и величины предметов. Так, круглый стол воспринимается как круг, хотя в перспективе он чаще всего имеет форму эллипса. Предмет, находящийся на некотором расстоянии, не выглядит вдвое меньше предмета, находящегося вдвое ближе, хотя размеры их изображений на сетчатке относятся между собой как 1 : 2.

Аналогичным образом если мы посмотрим на потолок комнаты, то, хотя та его часть, которая находится вблизи

окна, будет выглядеть несколько более светлой (т. е. иметь большую яркость), чем по углам, мы воспримем потолок гораздо более константным по яркости, чем это можно измерить фотометром. Таким образом, константность восприятия светлоты означает, что мы автоматически оцениваем отражательную способность поверхностей по их яркости с учетом освещения. Это помогает нам воспринимать всю ровно окрашенную стену или потолок как целое и свести до минимума влияние изменения освещенности. Все эти стабилизирующие механизмы сенсорной системы направлены на то, чтобы уменьшить огромное, быстро меняющееся количество информации, которую человек постоянно получает из окружающей среды. Достаточно устойчивое восприятие окружающей среды помогает оценивать обстановку. В противном случае человек не в состоянии был бы нормально ориентироваться даже несколько мгновений.

Что такое цвет?

4.1. Опыты Ньютона

Природа цвета впервые была объяснена Исааком Ньютоном (1642—1727), и хотя этот факт хорошо известен, о деталях его работы мало кто знает, а их весьма поучительно было бы вспомнить. В отличие от других, более ранних философов Ньютон, несмотря на свою гениальность, всегда с удовольствием проводил опыты и мастерил необходимые предметы собственными руками, если это было нужно.

С 1661 по 1701 г. Ньютон работал в Тринити-колледже в Кембридже. Оптикой он заинтересовался около 1663 г., когда стал заниматься шлифованием линз и начал работать над созданием телескопа. В 1666 г. на стаурбриджской ярмарке вблизи Кембриджа он купил несколько призм, «чтобы пронаблюдать с их помощью знаменитые явления цветов». Образование разных цветов при прохождении света через призму было к тому времени уже известно, но объяснялось это явление совершенно неправильно. По-видимому, поначалу Ньютон не сделал никаких открытий, и только в 1672 г. он направил в Королевское общество работу под названием «Теория цветов», в которой сообщил о результатах своих опытов с призмами.

Он продолжал ставить оптические опыты, и по завершении их написал в 1692 г. книгу. Однако произошло хорошо известное и часто приукрашиваемое событие: все его заметки и рукописи погибли во время пожара. Была ли его последующая болезнь результатом этого — неизвестно; мы знаем только, что он не переписывал свою книгу и ничего не опубликовывал вплоть до 1704 г.,

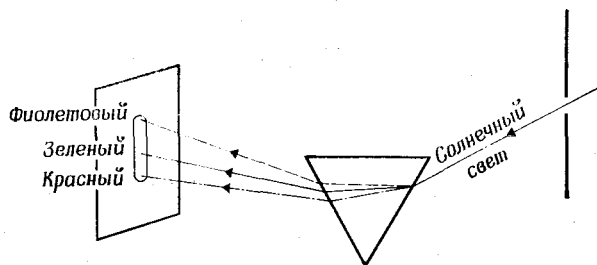


Рис. 4.1. Эксперимент Ньютона.

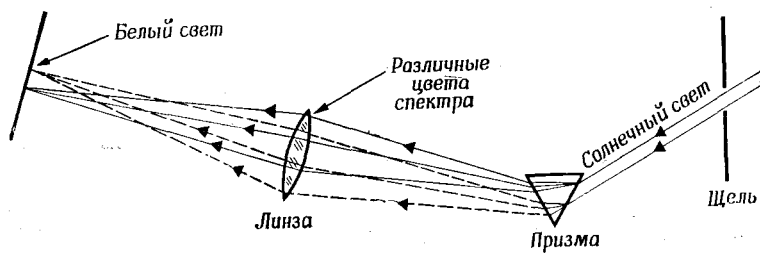


Рис. 4.2. Образование белого света из цветного с помощью линзы.

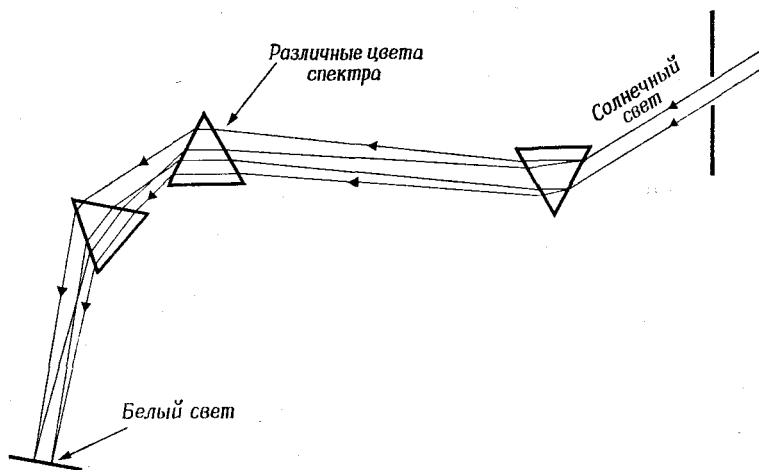


Рис. 4.3. Образование белого света из цветного с помощью призмы.

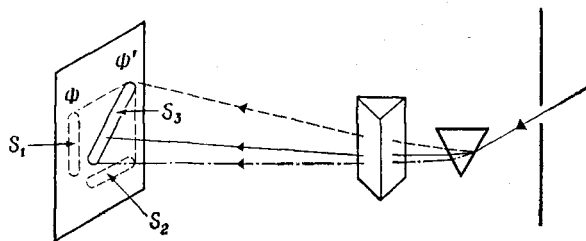


Рис. 4.4 Эксперимент Ньютона с двумя призмами.

когда вышел его монументальный труд — книга под названием «Оптика».

Свои опыты Ньютон начал с того, что поместил призму перед отверстием в ставне затемненной комнаты. Луч солнечного света проходил через отверстие, затем через призму и падал на лист белой бумаги в виде цветной полосы — спектра (рис. 4.1). По собственному высказыванию Ньютона, «появился спектр, состоящий из слегка окрашенных полос: фиолетовой, индиго (сине-фиолетовой), голубой, зеленой, желтой, оранжевой, красной, непрерывно переходящих одна в другую и дающих множество цветовых оттенков, как если бы существовало множество лучей, различающихся по преломляемости».

Ньютон был убежден, что эти цвета изначально присутствовали в исходном белом свете, а не появились в призме, как считалось в то время. Чтобы проверить это положение, он сначала собрал вместе цветные лучи, образованные призмой, с помощью двух совершенно различных методов: сначала линзой (рис. 4.2), а затем — с помощью двух призм (рис. 4.3). В обоих случаях получился белый свет, совершенно такой же, как до разложения его первой призмой. Затем Ньютон непосредственно за первой призмой под прямым углом к ней поместил вторую таким образом, что свет проходил через обе призмы (рис. 4.4). Если использовалась только одна призма, то на экране появлялся вертикальный спектр S_1 , в то время как вторая призма давала горизонтальный спектр S_2 . При прохождении через две призмы спектр располагался в направлении S_3 , под углом к вертикальному спектру. Это вполне убедительно показывало, что белый свет

с помощью призмы можно разложить на свет различных цветов, но последние уже не могут разлагаться дальше. Если бы это было возможно, фиолетовый цвет Φ в спектре S_1 , образованный первой призмой, после прохождения через вторую призму разложился бы на новые цвета вдоль прямой $\Phi\Phi'$. Вместо этого фиолетовый свет преломляется без изменений в точку Φ' .

Ньютон, таким образом, пришел к выводу, что белый свет представляет собой сложную смесь различных видов лучей. Теперь мы, конечно, знаем, что это электромагнитные волны разной частоты. Глаз чувствителен к свету различных частот и воспринимает их как разные цвета. В табл. 4.1 приводятся частоты и длины волн света и их цветовые эквиваленты.

Таблица 4.1

Цвет	Длина волны, нм	Частота, Гц 10^{14}
Фиолетовый	{ 400 450	7,5 6,7
Синий	480	6,2
Сине-зеленый	500	6,0
Зеленый	540	5,6
Желто-зеленый	570	5,3
Желтый	600	5,0
Оранжевый	630	4,8
Красный	750	4,0

Ньютон ясно понимал, что цвет есть атрибут восприятия, для которого нужен наблюдатель, способный воспринять лучи света и интерпретировать их как цвета. Сам свет окрашен не больше, чем радиоволны или рентгеновские лучи, но он несет сведения, или информацию, способные вызвать ощущение цвета. Это становится понятным из следующего отрывка из «Оптики»:

«Однородный Свет и Лучи (т. е. монохроматический свет), которые кажутся красными, или скорее заставляют Предметы казаться таковыми, я называю Красно-образующими; те цвета, которые заставляют Предметы казаться желтыми, зелеными, синими

и фиолетовыми, я называю Желто-, Зелено-, Сине-образующими и так далее. И когда я говорю о Свете и Лучах как о цветных или вызывающих Цвета, следует понимать, что я говорю не в философском смысле, а так, как говорят об этих понятиях простые люди. По существу же лучи не являются цветными; в них нет ничего, кроме определенной Способности и Предрасположения вызывать Ощущение того или иного Цвета. Так же как Звук в Колокольчике, в Струне музыкального инструмента или в любом другом звучащем Телe есть не что иное, как колебание этого тела, в Воздухе — не что иное, как Движение, распространяемое от Предмета, а Органами чувств это Движение воспринимается в виде Звука, так и Цвет Предмета есть не что иное, как Предрасположение отражать тот или иной вид Лучей в большей степени, чем остальные; цвет Лучей — это их Предрасположение тем или иным способом воздействовать на Органы чувств, их ощущение принимает форму Цветов».

4.2. Источники света и образование цветов путем избирательного отражения и поглощения

Основополагающий вывод, следующий из работ Ньютона, заключается в том, что цвета присутствуют в исходном белом свете и что призма служит не для образования цветов, а лишь для их разделения. Восприятие цвета

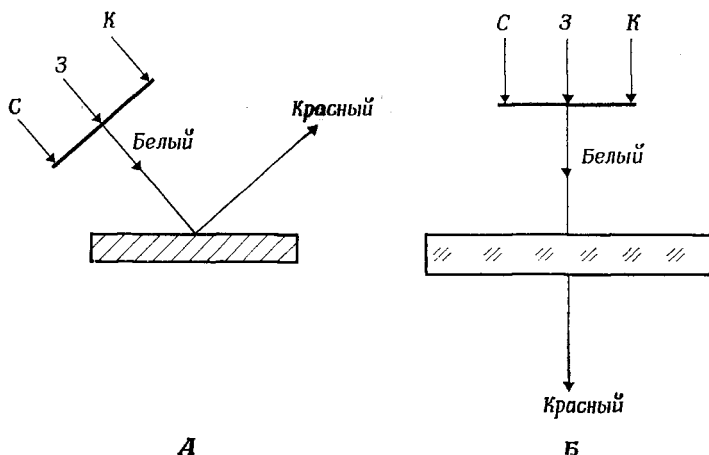


Рис. 4.5. Избирательное отражение (А) и избирательное поглощение (В). Для простоты белый свет представлен как совокупность красного (К), зеленого (З) и синего (С), хотя на самом деле присутствуют все цвета.

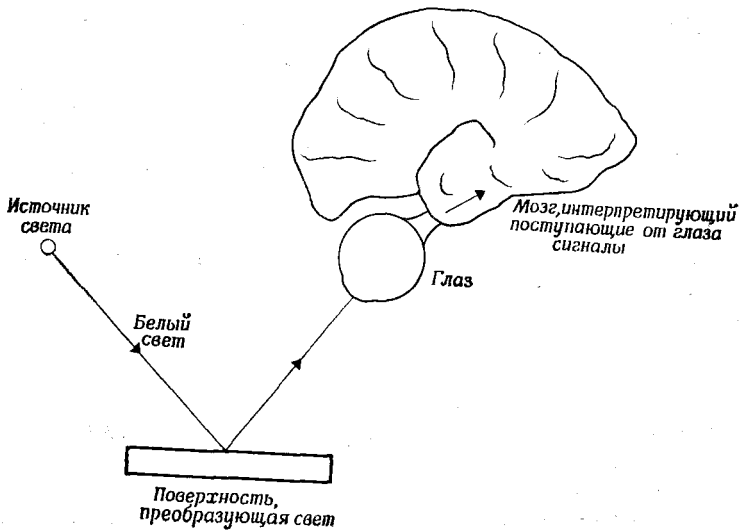


Рис. 4.6. Процесс восприятия цвета.

можно представить в виде цепочки нескольких последовательных событий. Во-первых, имеется лампа или какой-либо другой источник, испускающий свет, скажем белый (т. е. смесь всех цветов). Конечно, в повседневной жизни мы имеем дело не с цветным светом, образованным призмами, а с цветными поверхностями или стеклами. Они содержат краситель или пигмент, которые по-разному взаимодействуют со светом разной длины волны. Например, если белый свет падает на «красную» поверхность (рис. 4.5, А), то последняя сильно отражает красный свет и поглощает все остальные цвета спектра. Этот процесс называется избирательным отражением. Аналогично этому красный фильтр (рис. 4.5, В) поглощает все цвета, кроме красного, который он полностью пропускает. Это явление называется избирательным поглощением. Теперь мы можем рассмотреть всю цепочку событий, обуславливающих восприятие цвета (рис. 4.6). Испускание света, его преобразование путем избирательного отражения и распространение к глазу представляют собой чисто физические явления, и на этих этапах самого цвета еще нет.

По выражению Ньютона, «лучи не окрашены». Но когда этот преобразованный свет поступает в глаз, он падает на колбочки сетчатки, они частично его поглощают, что приводит к возникновению нервных сигналов, которые интерпретируются мозгом как цвет. Механизм всего этого процесса очень сложен; мы остановимся на нем несколько ниже. Теперь же уместно перейти к рассмотрению вопроса о том, почему мы обладаем цветовым зрением, и в связи с этим рассмотреть зрение человека и сравнить его со зрением, характерным для различных представителей животного мира.

4.3. Цветовое зрение у животных

Установить, видит ли животное предметы в цвете, конечно, очень непросто, и хотя уже проведено множество трудоемких и кропотливых исследований на разных животных, многое остается невыясненным. Соответствующие методы основываются на выработке определенных поведенческих реакций и состоят, как правило, в следующем: животное выпускают в клетку, на одной стенке которой имеется два разных по цвету листа бумаги или панель с лампочками, а также одинаковые вознаграждения в виде вкусных кусочков пищи. Если животное идет по направлению к красному цвету, оно получает легкий электрический удар и не может добраться до пищи; его пытаются приучить идти на синий свет, давая за это пищевое вознаграждение. Затем расположение красного и синего цветов с сопровождающими их ударом и вознаграждением произвольно меняют местами, дабы избежать простого заучивания направления движения. Не исключено, однако, что в таких опытах животное просто приучается идти на более яркий, как ему кажется, источник света и при этом не способно различать разницу в цвете. Чтобы проверить правильность этого предположения, яркость двух источников света в ходе большого количества опытов варьируют. Если можно найти точку, при которой животное путается, она и будет для него точкой равных яркостей. Эта точка вовсе не обязательно соответствует точке, в которой цвета кажутся одинаково яркими также и человеку или другим животным. Такой опыт доказывает, что

животное не способно отличить красный цвет от синего при условии, что они одинаково яркие. Если же точку найти не удастся, значит, животное в состоянии различать красный и синий цвета, и это показывает, что у него есть предпосылки к цветовому зрению. Далее аналогичный опыт следует поставить при другой комбинации цветов. Само собой разумеется, что опыты эти очень длительны и требуют терпения. В экспериментах с менее высокоорганизованными животными, например лягушками, применяют вращающийся барабан, на котором чередуются цветные полосы. Реакцию лягушек определяют, наблюдая за движениями головы или глаз.

Известные нам факты о наличии цветового зрения у животных можно суммировать следующим образом. У земноводных цветовое зрение или очень слабое, или отсутствует вообще. Это и не удивительно, поскольку они являются в основном ночными животными. Среди пресмыкающихся у змей, по-видимому, цветовое зрение отсутствует, в то время как у ящериц оно, вероятно, имеется; в какой-то степени есть оно и у черепах. Длительное пребывание на дневном свете не характерно для млекопитающих, и большинство из них не обладает цветовым зрением; исключение составляют приматы. Кошки также, по-видимому, лишены цветового зрения, в то время как у собак имеется слабо развитое ощущение цвета. У крупного рогатого скота цветового зрения не наблюдается, и кусок красной материи вовсе не кажется быку красным. Все рыбы обладают либо очень развитым, либо умеренным цветовым зрением. Это в равной мере относится и к дневным птицам. Низшие приматы — преимущественно ночные животные, лишены цветового зрения. Однако если мы перейдем к высшим приматам, то окажется, что ситуация здесь иная — высшие приматы обладают цветовым зрением, механизм которого почти такой же, как и у человека. К таким приматам относятся шимпанзе, павиан, свиноголовый макак, макак-резус, белочья обезьяна, паукообразная обезьяна, темно-коричневый мангобей. Очевидно, что наличие цветового зрения сочетается с хорошо развитым органом зрения, обладающим совершенным механизмом аккомодации для четкого фокусирования. Другими словами, оно развито у тех животных,

которые по условиям своего существования, поведения и окружения нуждаются в хорошем зрении и получают от него ряд преимуществ. Глаз, способный воспринимать цвета, позволяет животному не только различать предметы, различающиеся по яркости (что возможно и с помощью простого черно-белого механизма), но и предметы с одинаковой яркостью, но разные по цвету. Простым, но убедительным примером является способность животных различать спелые и неспелые плоды (например, красные и зеленые помидоры); имея только монохроматическое зрение, этого сделать было бы нельзя. Следовательно, животные, обладающие цветовым зрением, могут получать больше информации об окружающей их среде.

Нетрудно понять, почему птицам необходимо получать как можно больше информации — во время полета они очень быстро перемещаются и при этом должны высматривать себе пищу и охотиться с большой высоты.

Насекомые и птицы ведут борьбу за существование с помощью маскировки, и гусеница, замаскированная под лист, очевидно, имеет больший шанс на выживание, чем гусеница, не приспособленная к этому.

Рыбам цветовое зрение нужно в основном потому, что в сумерках, характерных для их среды обитания, предметы различаются по яркости лишь весьма незначительно, и разница в цвете становится более важной, нежели при отчетливом восприятии окружающих предметов на суше. Несомненно также и то, что для некоторых видов рыб узнавание цветных пятнышек на теле самца играет важную роль при спаривании.

Если перейти теперь к высшим приматам и человеку, то станет ясно, что своим преимуществом получать значительное количество информации с помощью чувствительного к цвету глаза они обязаны более крупному и развитому головному мозгу. То, что для человека цвет имеет огромное эстетическое значение, является, естественно, дополнительным фактором, по-видимому чисто случайным. Цвет для большинства людей играет очень важную и зачастую приятную роль, и в силу своей любознательности человек уделяет много времени выяснению его природы и значения. Интересен уже сам факт восприятия цвета, но детали этого механизма еще более интри-

гующи. Прежде чем перейти к теории цветового зрения, ознакомимся с некоторыми свойствами восприятия цвета человеком.

4.4. Дополнительные сведения о цветовом зрении у человека

Магическое число для нормального цветового зрения у человека — три; этот факт был впервые установлен Томасом Юнгом (1773—1829), ученым гениальным и разносторонним. Он работал практикующим врачом в Лондоне и никогда не учился в университете. Теперь каждый студент знает о модуле Юнга, щелях Юнга и его волновой теории света, но, вероятно, далеко не так хорошо известно, что он был также знаменитым египтологом и внес большой вклад в расшифровку египетских иероглифов.

Его имя и по сей день упоминается одним из первых, когда речь идет о цветовом зрении; по иронии судьбы он мечтал добиться признания и прославиться как врач, а не как ученый. Его знаменитый опыт по смешению цветов — один из самых красивых научных экспериментов; его стоит провести каждому. Для этого требуется три проектора диапозитивов, а также красный, зеленый и синий фильтры (подробности см. в приложении). Проекторы устанавливаются таким образом, что на экран проецируются накладывающиеся друг на друга круги света (цветная табл. 4). При наложении происходит сложение цветов; поэтому там, где перекрываются красный и синий цвета, мы, просуммировав их с помощью нашего глаза, видим пурпурный цвет. Аналогично синий и зеленый цвета при наложении друг на друга дают голубой цвет. Эти смешанные цвета напоминают одновременно оба составляющих их компонента; так, пурпурный цвет кажется красновато-синим, а голубой — синевато-зеленым. Однако если смешать красный цвет с зеленым, то мы совсем неожиданно получим **желтый** цвет, казалось бы, не имеющий ничего общего ни с красным, ни с зеленым. Более того, при наложении друг на друга всех трех цветов мы получим белый цвет, который не имеет ни одного из трех перечисленных оттенков. Другими словами, при наложении друг на друга трех ярких цветов они «исчезают», свет становится белым.

Если теперь изменять интенсивность света проекторов, то в том месте, где совмещаются все три изображения, мы сможем воспроизвести большинство цветов. Путем соответствующего сочетания красного и зеленого цветов можно даже получить монохроматический желтый цвет. Это значит, что одно и то же зрительное ощущение может создаваться совершенно различными физическими раздражителями. И хотя Ньютон проводит аналогию между цветом и звуком (разд. 4.1), в данном случае связь между ними слабая, за исключением того, что и там и здесь мы имеем дело с колебаниями и восприятием. Если одновременно взять две ноты на музыкальном инструменте, мы услышим аккорд; при этом, однако, различаются оба звука, а профессиональный музыкант может даже назвать их. Таким образом, мы слышим не одну ноту некоторой промежуточной частоты, что имело бы место в том случае, если бы ухо функционировало подобно глазу, а созвучие (аккорд).

Согласно Юнгу, существуют три компонента любого цветоощущения, которые являются аддитивными основными цветами: это красный, зеленый и синий. На самом деле имеется бесчисленное множество основных цветов, но, чтобы получить максимальный диапазон смешанных цветов, следует пользоваться красным, зеленым и синим. Единственное условие правильного выбора основных цветов состоит в том, что при смешении двух из них мы не должны получать третьего. Три монохроматически чистых спектральных цвета так же пригодны в качестве основных, как и цвета, получаемые с помощью фильтров, только в этом последнем случае цвета получаются более тусклыми.

Еще один факт, обусловленный цветовым зрением, состоит в том, что наблюдатель, обладающий им, при поле зрения диаметром 2° может различать свыше 150 различных оттенков цветов; с увеличением диаметра число оттенков соответственно увеличивается. Весь диапазон воспринимаемых цветов необычайно широк, так что фактически мы в состоянии различать несколько миллионов различных цветов.

4.5. Теория цветового зрения Юнга

Само собой разумеется, что число различных нервных путей, идущих из глаза в мозг, по которым могут передаваться сигналы о каждом наблюдаемом цвете в отдельности, ограничено. Томасу Юнгу было ясно, что, поскольку трехкомпонентность цвета не имеет обоснования в теории света, это должно быть свойством самого глаза. В 1802 г. он постулировал, что глаз анализирует каждый цвет в отдельности и передает сигналы о нем в мозг по трем различным типам нервных волокон: один тип передает сигнал о наличии красного цвета, второй — зеленого, а третий — фиолетового. Восприятие пурпурного цвета возникает, по-видимому, благодаря одновременному раздражению «красных» и «синих» нервных волокон, желтого — «красных» и «зеленых» и т. д. Когда одновременно и в одинаковой степени раздражаются все три типа нервных волокон, воспринимаемый цвет будет белым.

4.6. Возражение Гельмгольца

Сначала теория Юнга была отвергнута и на 50 лет предана забвению до тех пор, пока в 1852 г. к ней одновременно не обратились сразу два ученых — немецкий физик и физиолог Герман фон Гельмгольц (1821—1894) и шотландский физик Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879). Гельмгольц провел несколько опытов по смешению цветов и пришел к выводу, что для объяснения цветового зрения необходимо постулировать наличие более чем трех первичных процессов. Трудность, с которой он столкнулся, заключалась в том, что, хотя большинство цветов можно воспроизвести путем аддитивного сложения трех основных, взятых в соответствующих пропорциях цветов, существуют цвета, для которых это сделать не удастся. Например, при попытке получить сине-зеленый цвет с длиной волны 500 нм смешением синего и зеленого цветов всегда образуется белесая (менее насыщенная) по сравнению со спектральным цветом смесь. Термин «насыщенность» здесь употребляется в том смысле, что спектральные цвета являются самыми насыщенными (с физической точки зрения они являются самыми чистыми), а добавление

к ним белого цвета образует пастельные тона, которые менее насыщены (или, другими словами, менее чистые). (Нейтральный серый или белый цвета имеют нулевую насыщенность). Из собственных опытов Гельмгольц сделал вывод, что для получения цветов требуется 4 или более основных цвета, и, естественно, полагал, что трехкомпонентная теория Юнга несостоятельна.

4.7. Принятие Гельмгольцем теории Юнга

Гельмгольц придерживался этих взглядов примерно в течение 10 лет, пока не понял, что результаты опытов можно объяснить и на основе трех основных механизмов, исходя из предположения о том, что они обладают спектральной чувствительностью в широком, частично перекрывающемся диапазоне; другими словами, хотя «красно-чувствительная» система максимально реагирует на красный цвет, она чувствительна также и к зеленой и зелено-голубой областям спектра. Теперь мы знаем, как выглядят кривые спектральной чувствительности (рис. 4.10). Ясно, что монохроматический желтый свет с длиной волны 585 нм будет возбуждать не только «красные» рецепторы, но и в значительной степени «зеленые». Таким образом, даже если раздражитель чистый (в оптическом смысле), ответная реакция глаза таковой может не являться.

4.8. Аналогия Райта

Райт из Королевского колледжа в Лондоне воспользовался следующей аналогией из области металлургии, которая помогает понять приведенные выше рассуждения. Пусть мы имеем ряд сплавов, содержащих цинк, олово и медь в разных пропорциях. Тогда, чтобы получить один из таких сплавов, мы можем смешать чистые цинк, олово и медь, подобрав соответствующие пропорции. Однако при попытке получить латунь (Cu, Zn) — сплав, не содержащий олова, если имеющиеся в нашем распоряжении «высокочистые» медь и цинк содержат его в небольшом количестве, мы потерпим неудачу: нам никогда не удастся подобрать такой состав смеси, поскольку любой сплав будет содержать некоторое количество олова.

В этом случае нам придется добавить немного олова и к образцу латуни, а затем к нему подбирать смесь путем сочетания загрязненных меди и цинка. Спектральные цвета в этом смысле являются чистыми, но обычно из-за перекрывания кривых спектральной чувствительности рецепторов монохроматический спектральный цвет возбуждает по меньшей мере два типа рецепторов, давая, таким образом, смешанный «загрязненный» ответ.

4.9. Теория Юнга—Гельмгольца

Когда Гельмгольц осознал очень важный момент о возможном перекрывании кривых спектральной чувствительности рецепторов цветового зрения, он безоговорочно принял гипотезу Юнга. С этого времени так называемая теория Юнга—Гельмгольца получила очень широкое распространение. Она нашла математическое обоснование, и вплоть до последнего времени ею руководствовались большинство исследователей зрения. Но, с другой стороны, эта теория подвергалась самой резкой критике.

Главных возражений было два. Во-первых, до последнего времени не удавалось обнаружить никаких различий между колбочковыми рецепторами сетчатки, а следовательно, теория была лишена анатомических доказательств. Во-вторых, теорию трудно было согласовать с существующими в действительности цветовыми ощущениями. Мы в состоянии различить по меньшей мере четыре качественно разных цветовых ощущения, а именно ощущение красного, желтого, зеленого и синего цветов; если к ним добавить белый, то их будет пять. Ни одно из этих цветоощущений, взятое в отдельности, не похоже на другое. Поэтому возникает вопрос: как могут пять психологически разных первичных цветов сочетаться с тремя физиологическими процессами?

4.10. Работы Максвелла

Джеймс Клерк Максвелл, несмотря на свою раннюю кончину (в возрасте 48 лет) является одним из величайших физиков-теоретиков XIX в. Наиболее известен он своей электромагнитной теорией света и предсказанием суще-

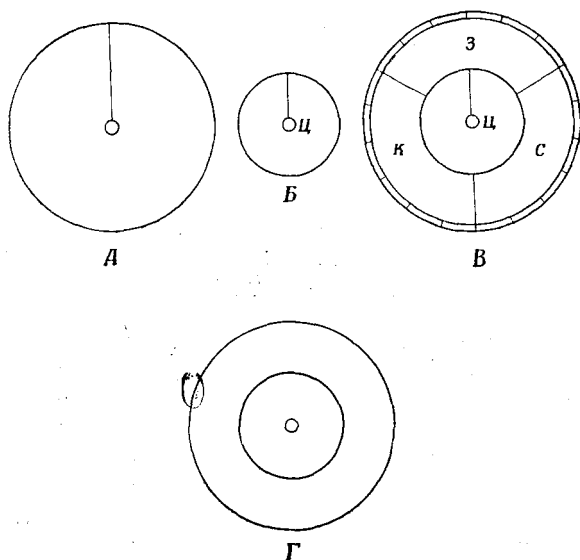


Рис. 4.7. Цветные диски Максвелла.

ствования радиоволн за 19 лет до того, как они были открыты Герцем. Однако его интересы были весьма разнообразны, и сегодня, в век чрезвычайной специализации, это кажется поистине удивительным. Максвелл написал крайне интересные оригинальные работы о кольцах Сатурна, по геометрической оптике, теории приборов и оптических приборов, сопротивлению материалов; будучи гениальным теоретиком, он в то же время много времени уделял постановке исключительно изящных опытов по цвету. Одним из первых Максвелл признал теорию Томаса Юнга, однако он не развивал, подобно Гельмгольцу, его теоретических представлений, а занялся разработкой точных методов измерения цветов; эти методы оставались без изменения до сравнительно недавнего времени. Изящество некоторых из этих опытов заключается в простоте; их можно легко воспроизвести, потратив минимум усилий. Одно из его изобретений — это вращающаяся юла для смешения цветов, которую он использовал прямо в том виде, как она есть, — в виде игрушки; в современной модификации

юла приводится в движение небольшим электромоторчиком.

К оси моторчика прикрепляют разноцветные бумажные диски, в каждом из которых прорезана радиальная щель (рис. 4.7, А). Три больших диска вырезают из красной, синей и зеленой бумаги (основные цвета), а диск меньшего диаметра Π (рис. 4.7, Б) — из бумаги того цвета, который мы желаем получить. Большие диски налагают друг на друга таким образом, чтобы открытыми оставались разные по площади секторы каждого из них. Изменяя площадь сектора, можно менять относительное количество каждого основного цвета. Максвелл обнаружил, что очень быстро вращая диски (когда изображения сливаются), можно получить результаты, аналогичные тем, которые наблюдаются при аддитивном проецировании цветов на экран.

Если теперь поверх больших цветных дисков поместить маленький тестовый диск (рис. 4.7, В) и быстро вращать юлу, то мы увидим кружок, а вокруг него — кольцо (рис. 4.7, Г). Открытые части больших дисков можно подобрать таким образом, что круг и кольцо будут совпадать по цвету. При этом, возможно, придется добавить некоторое количество черного или нейтрального серого цвета, чтобы они совпадали и по яркости. Для демонстрации своих смешанных цветов Максвелл использовал цветовой треугольник Юнга, поместив основные цвета — красный (K), синий (C) и зеленый ($З$) — в вершины равностороннего треугольника (рис. 4.8). Результирующий цвет Π любой смеси K , $З$ и C располагается при этом в центре тяжести трех масс, величины которых соответствуют площадям открытых секторов дисков, что можно проверить экспериментально. Ясно также (и это легко можно показать с помощью юлы), что результирующая аддитивной смеси двух цветов Π_1 и Π_2 находится в их центре тяжести Π_3 и поэтому лежит на прямой, соединяющей их. Этот закон центра тяжести является свойством всех плоских цветовых диаграмм.

В 1860 г. Максвелл описал также свой знаменитый «цветовой ящик», который был первым приспособлением для измерения цвета. С его помощью спектральные цвета весьма оригинальным образом можно использовать в каче-

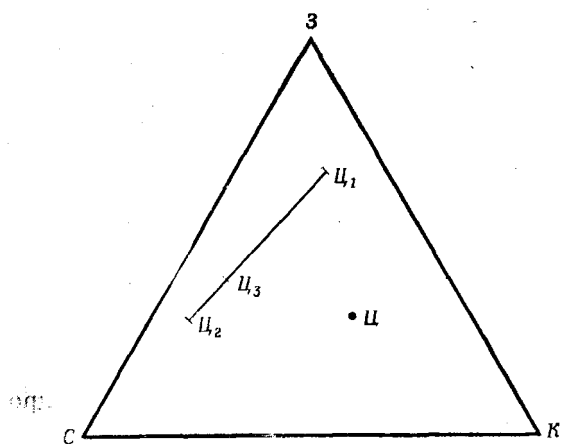


Рис. 4.8. Цветовой треугольник Юнга — Максвелла.

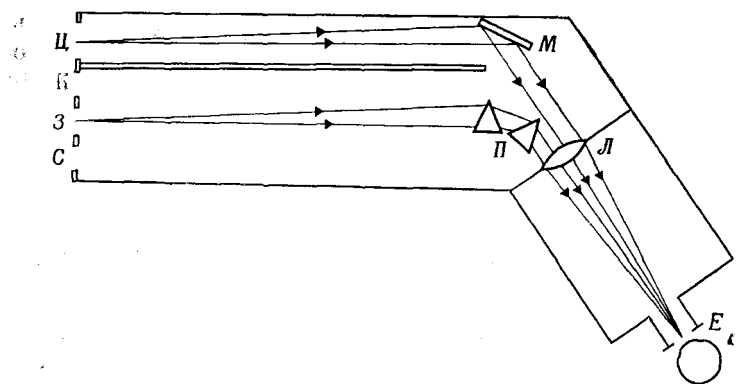


Рис. 4.9. Цветовой ящик Максвелла.

стве первичных (основных) цветов. Нетрудно и очень полезно воссоздать модель этого прибора. Он представлял собой вытянутый в длину деревянный ящик (рис. 4.9) с двумя призмами *П* и линзой *Л*. Предположим, что часть света, проходящего через отверстие *Е*, падает на зеркало *М* и, отражаясь от него, попадает в точку щели *Ц*, а другая часть образует спектр вдоль линии *КЗС*. Если мы теперь изменим направление света на противоположное, поместим щели перед красным, зеленым и синим лучами и будем смотреть в отверстие *Е*, то увидим в нижней части линзы смешанный свет, образованный входящими через щели пучками. Другая половина линзы будет освещаться светом, попадающим через щель *Ц*. Таким образом, подбирая ширину щелей, т. е. меняя количество света, можно воспроизвести любой цвет *Ц*. В своих опытах Максвелл использовал белую поверхность, освещенную солнечным светом, который освещал также и щель *Ц*. С помощью элементарных алгебраических выкладок он нашел пропорции, в которых нужно взять основные цвета, чтобы получить цвета всех областей спектра. Основные цвета он обозначал через *x*, *y* и *z*; эти обозначения и сейчас используются в соответствующих уравнениях.

4.11. Оппонентная теория цвета Геринга

В 1870 г. немецкий физиолог Эвальд Геринг (1834—1918) сформулировал так называемую оппонентную теорию цветового зрения. Он опирался не только на существование пяти психологических ощущений, описанных выше, но также и на тот факт, что они, по-видимому, действуют в противоположных парах, одновременно дополняя и исключая друг друга. Красный и зеленый цвета являются противоположными и не смешиваются: красновато-зеленого цвета, подобного, например, синевато-зеленому или красновато-желтому, не существует. Аналогичным образом антагонистами являются желтый и синий — вы никогда не встретите желтовато-синего цвета. Геринг предположил, что, вероятно, должен существовать и третий, черно-белый механизм. Такая теория, конечно, объясняет существование пяти психологически первичных цветов и дополнительность отрицательных последовательных образов. На-

пример, последовательный образ ярко-красного раздражителя, расположенного на белой поверхности, является зеленым, а последовательный образ желтого раздражителя — синим. До последнего времени, однако, ни анатомических, ни физиологических доказательств этой теории не получено.

4.12. Теория полихроматизма и другие теории

В 1947 г. Хартридж разработал полихроматическую теорию, согласно которой теория Юнга—Гельмгольца представляет собой лишь приближение к истине и по которой помимо трех основных рецепторов (оранжевого, зеленого и сине-зеленого) существует четыре или пять других дополнительных, или вторичных, включая желтую и синюю пару, действующую как единое целое. Эта теория не получила большого распространения и была признана слишком субъективной и чересчур сложной.

Был выдвинут и ряд других теорий, в том числе теория доминаторов и модуляторов Гранита; согласно этой теории, рецепторы одного типа передают сигналы только об освещенности, в то время как другие рецепторы передают информацию о цвете. Все эти теории, однако, не получили особого признания.

4.13. Современные исследования и теории

Интересно отметить, насколько неравномерно развивается наше познание: после Геринга был перерыв примерно в 100 лет, пока произошел какой-то прогресс в понимании механизмов цветового зрения.

Из опытов по смешению цветов на испытуемых как с нормальным, так и нарушенным цветовым зрением был получен ряд психофизических данных в пользу того, что в сетчатке человека имеется три типа рецепторов цвета. В 1953 г. Томсон и Райт опубликовали кривые, представляющие собой функции спектральной чувствительности, лежащие в основе трехцветного механизма (рис. 4.10). (Обратите внимание, что «красная» кривая имеет пик фактически в желтой области, но, несмотря на это, соответствующий рецептор проявляет значительную чувстви-

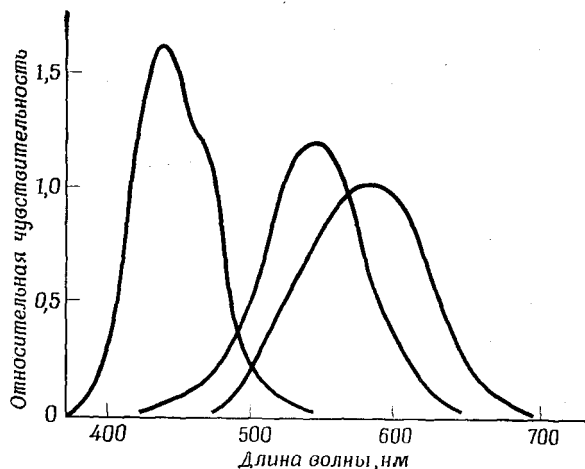


Рис. 4.10. Кривые спектральной чувствительности (по Томсону и Райту).

ность к красному цвету). Другие данные в пользу трехцветной теории были получены Раштоном в опытах по отражению света зрительными пигментами сетчатки *in situ*. Однако прямое подтверждение этой гипотезы удалось получить лишь в 1964 г. Это сделали две группы американских ученых — Маркс, Добелл и Мак-Никол в опытах на сетчатке серебряного карася, обезьяны и человека и Браун и Уолд на сетчатке человека. Основная трудность в такого рода опытах состоит в том, что препарат сетчатки должен быть получен и исследован в течение нескольких часов после смерти животного. Тем не менее обе группы исследователей провели виртуозное микроспектрофотометрическое исследование одиночных рецепторов — колбочек, обнаружили три типа колбочек, поглощающих свет в различных частях спектра, и получили кривые, аналогичные тем, которые изображены на рис. 4.10. На первый взгляд кажется очевидным, что тем самым теория Юнга—Гельмгольца получила полное подтверждение. Однако ранее, в 1953 г., Мотокава и Светихин, работавшие независимо друг от друга, в опытах на сетчатке рыб обнаружили, что существуют определенные клетки, отве-

чающие на раздражение медленным изменением потенциала, который зависит от силы раздражителя, а кроме того, имеются другие клетки, в которых потенциал становится более отрицательным по мере смещения цвета светового стимула в синюю область, но меняет знак и становится положительным под действием желтого света с большей длиной волны. Были также обнаружены клетки, которые изменяют знак потенциала на противоположный при переходе от красного стимула к зеленому. Это наблюдение было сделано в 1958 г. де Валуа и сотрудниками, работавшими с макаками, механизм цветового зрения которых почти такой же, как и у человека; кроме того, макаки очень умные животные и легко поддаются дрессировке. В некоторых опытах электрическая активность регистрировалась в латеральном колленчатом теле (подкорковом зрительном центре). Эта электрическая активность скорее всего просто отражает ответы, генерируемые в ганглиозных клетках сетчатки, или, возможно, является следствием обработки этих ответов ганглиозных клеток на уровне латерального колленчатого тела.

Клетки латерального колленчатого тела генерируют импульсную активность спонтанно, и некоторые из них увеличивают или уменьшают частоту этой импульсации в зависимости от того, какой свет падает на сетчатку — красный или зеленый. Другие клетки аналогичным образом реагируют на желтый и синий свет. Они называются оппонентными клетками, поскольку определяют относительную силу противоположных пар цветов. Другой тип клеток называется неоппонентным и, по-видимому, дает информацию лишь о яркости раздражителя.

Это последнее чрезвычайно интересное исследование по крайней мере дало достаточно обоснованные данные о возможном механизме цветового зрения человека. Согласно этим данным, на рецепторном уровне свет регистрируется тремя различными типами колбочек, как это постулировано в теории Юнга—Гельмгольца, и эти рецепторы обладают чувствительностью к красной, зеленой или синей областям спектра. Однако поступающая от них информация, по-видимому, преобразуется в импульсные разряды и до передачи в мозг кодируется в сетчатке. Эта закодированная информация посылается в виде

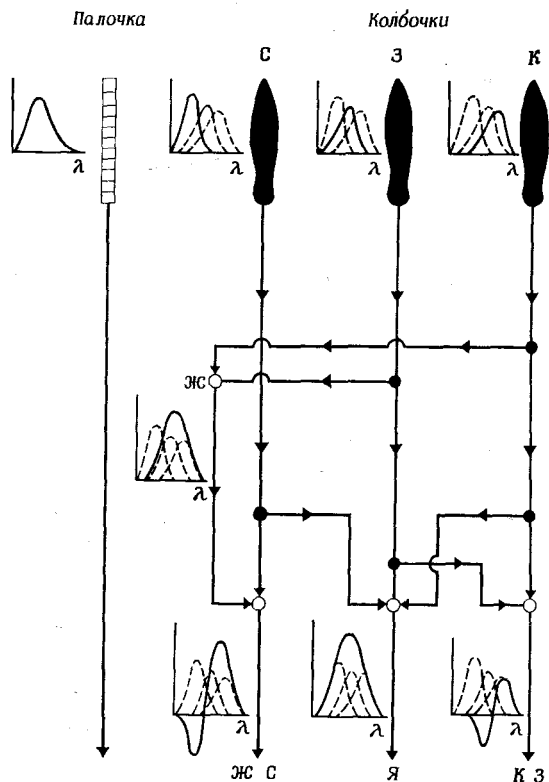


Рис. 4.11. Кодирование информации с помощью сигналов яркости и разностных цветовых сигналов. На всех стадиях показана относительная чувствительность каждого механизма [палочки, «синие» (С), «зеленые» (З) и «красные» (К) колбочки, яркость света (Я) и цветовые дифференциальные (желтый против синего, ЖС, и красный против зеленого, КЗ) механизмы]. Пунктирные кривые относятся к одиночным колбочковым ответам; они соответствуют кривым на рис. 4.10 (см. также разд. 10.2).

сигнала о яркости из всех трех типов колбочек, а также в виде разностных сигналов каждой двух цветов (рис. 4.11). Сюда подключается также и второй яркостный канал, берущий начало, вероятно, от независимой палочковой системы. Первый разностный цветовой сигнал представляет собой сигнал «красный против зеленого». Он формируется

красными и зелеными колбочками. Образующийся сигнал является результатом взвешивания сигналов этих колбочек и зависит от их относительной силы. Второй сигнал представляет собой сигнал «желтый против синего», который получается аналогичным образом, за исключением того, что информация о желтом цвете получается при сложении входных сигналов из «красных» и «зеленых» колбочек. Таким образом, оказывается, что и теория Юнга—Гельмгольца и теория Геринга верны — первая на уровне рецепторов, а вторая на более поздней стадии, в сетчатке, после того как рецепторные сигналы закодированы. Любопытно, что после всех ожесточенных споров и нападок современные ученые провозгласили обоих противников победителями!

Теперь с высоты наших знаний можно проследить, почему же возникла эта путаница. Психофизические опыты по смешению цветов, естественно, дали результаты, имеющие непосредственное отношение к фотохимии рецепторных клеток — колбочек. С другой стороны, мозг воспринимает только переработанную, закодированную информацию о яркости и разностные цветовые сигналы. Поэтому на уровне психофизиологического восприятия цветовое зрение, работающее по принципу «да — нет» или алгебраического суммирования, представляет собой, по-видимому, оппонентный процесс.

Здесь вполне уместно задать вопрос: как же появилась такая сложная система? Ведь гипотеза Юнга в чистом виде, если она верна, может опосредоваться гораздо более простой анатомией и физиологией. Весьма интересно, однако, что телеинженеры при создании системы передачи и приема цветного изображения пришли к почти аналогичному методу. Они разложили изображение на три основных цветных компонента, а затем передали информацию в виде дифференциальных сигналов о различии между двумя цветами и сигнала о яркости. Существует несколько технических и научных оснований для того, чтобы отдать предпочтение этому методу; они будут рассматриваться ниже при обсуждении вопросов, связанных с цветным телевидением (разд. 5.10).

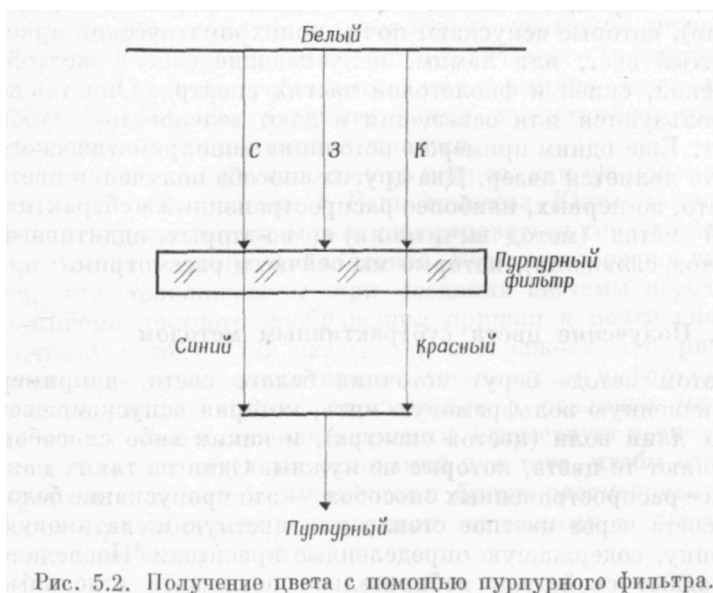
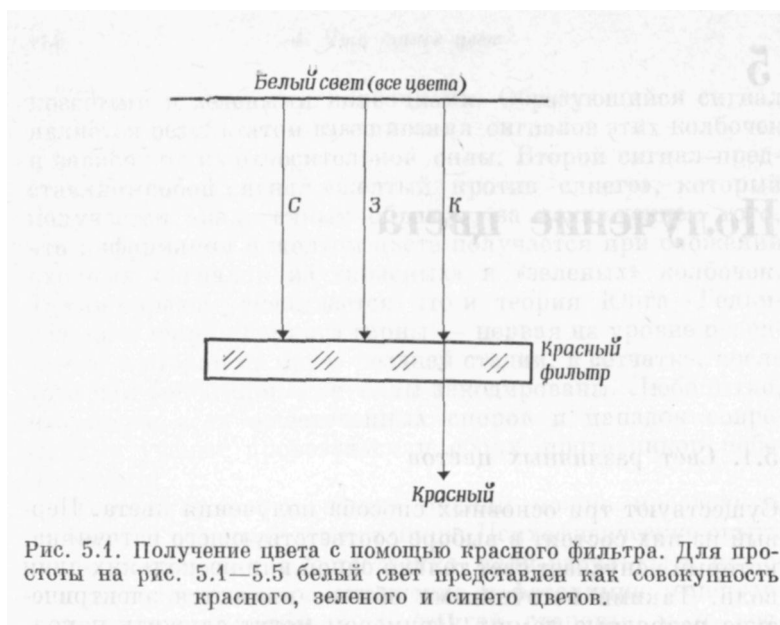
Получение цвета

5.1. Свет различных цветов

Существуют три основных способа получения цвета. Первый из них состоит в выборе соответствующего источника, который испускает свет только одной или нескольких длин волн. Такими источниками обычно являются электрические разрядные лампы. Примером могут служить наполненные парами Na лампы (использующиеся для освещения улиц), которые испускают почти монохроматический ярко-желтый свет, или лампы, испускающие свет в желтой, зеленой, синей и фиолетовой частях спектра. Они также используются для освещения и дают зеленовато-голубой свет. Еще одним примером источника монохроматического света является лазер. Два других способа получения цвета — это, во-первых, наиболее распространенный субтрактивный метод (метод вычитания) и, во-вторых, аддитивный (метод сложения), которые мы сейчас и рассмотрим.

5.2. Получение цвета субтрактивным методом

В этом методе берут источник белого света, например раскаленную вольфрамовую нить, которая испускает свет всех длин волн (цветов спектра), и каким-либо способом удаляют те цвета, которые не нужны. Один из таких наиболее распространенных способов — это пропускание белого света через цветное стекло или цветную желатиновую пленку, содержащую определенные красители. Последние обладают свойством избирательно поглощать отдельные цвета, практически не поглощая другие. Этот процесс,



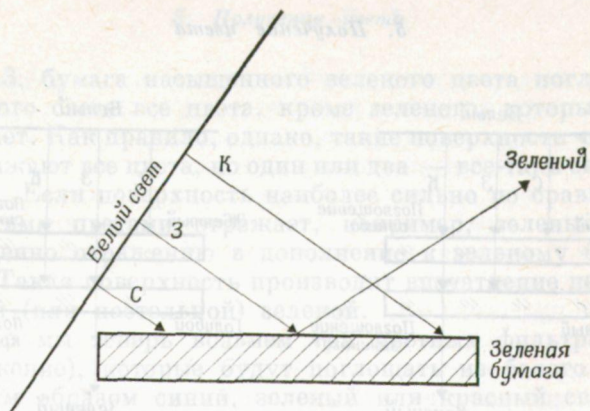


Рис. 5.3. Получение цвета при отражении света от зеленой бумаги.

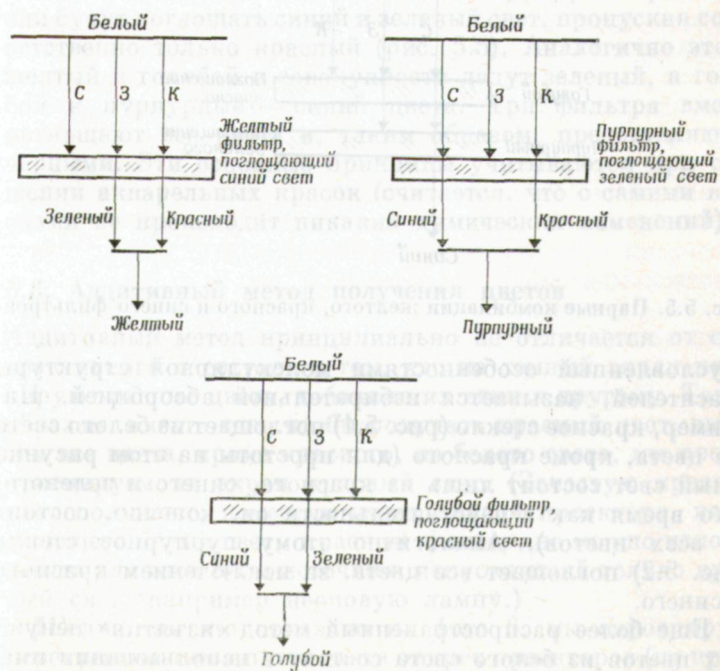


Рис. 5.4. Получение цвета с помощью желтого, пурпурного и голубого фильтров.

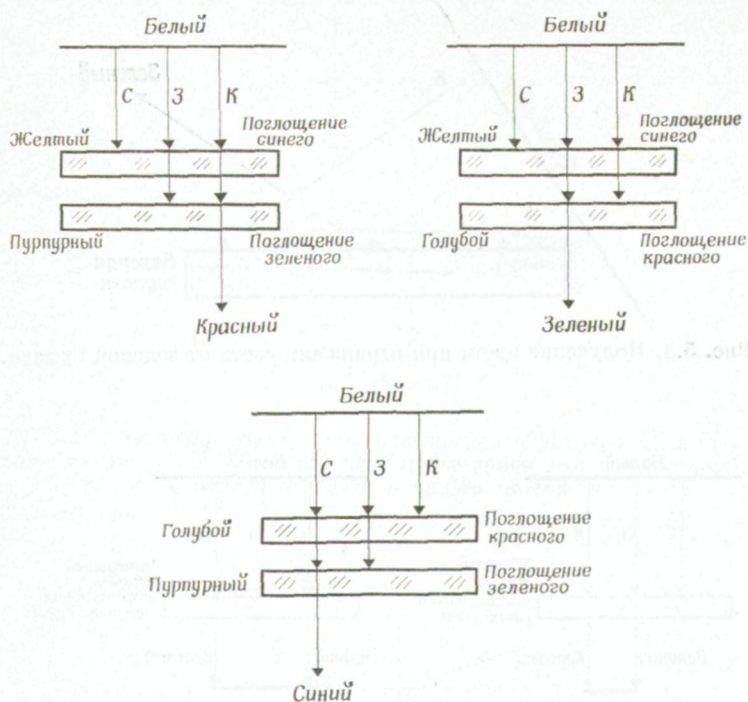


Рис. 5.5. Парные комбинации желтого, красного и синего фильтров.

обусловленный особенностями молекулярной структуры красителей, называется избирательной абсорбцией. Например, красное стекло (рис. 5.1) поглощает из белого света все цвета, кроме красного (для простоты на этом рисунке белый свет состоит лишь из красного, синего и зеленого, в то время как в действительности он, конечно, состоит из всех цветов). Аналогично этому пурпурное стекло (рис. 5.2) поглощает все цвета, за исключением красного и синего.

Еще более распространенный метод «изъятия» ненужных цветов из белого света состоит в использовании пигментов и окрашенных материалов (например, пластмасс), которые избирательно отражают свет. Как показано на

рис. 5.3, бумага насыщенного зеленого цвета поглощает из белого света все цвета, кроме зеленого, который она отражает. Как правило, однако, такие поверхности частично отражают все цвета, но один или два — все-таки сильнее других. Если поверхность наиболее сильно по сравнению с другими цветами отражает, например, зеленый, это равноценно отражению в дополнение к зеленому белого света. Такая поверхность производит впечатление ненасыщенной (или пастельной) зеленой.

Если мы теперь возьмем три цветных фильтра (см. приложение), которые будут поглощать из белого света главным образом синий, зеленый или красный свет, то нам эти фильтры покажутся соответственно желтым, пурпурным и голубым (сине-зеленым) (рис. 5.4). Наложив теперь их попарно друг на друга, мы получим три разных цвета: если накладываются желтый и пурпурный фильтры, они будут поглощать синий и зеленый свет, пропуская соответственно только красный (рис. 5.5). Аналогично этому желтый и голубой в совокупности дадут зеленый, а голубой и пурпурный — синий цвета. Три фильтра вместе поглощают все цвета и, таким образом, представляются черными. Эти основные принципы учитываются при смешении акварельных красок (считается, что с самими красками не происходит никаких химических изменений).

5.3. Аддитивный метод получения цветов

Аддитивный метод принципиально не отличается от субтрактивного и состоит в том, что на темный экран проецируют разные цвета, добавляя их один к другому. Таким образом, вместо того чтобы получать красный цвет, вычитая все цвета, кроме красного, из белого света, мы просто проецируем на экран красный свет. (Зачастую красный цвет получают, поместив перед линзой проектора, испускающего белый свет, красный фильтр, но можно использовать для этой цели источник, испускающий только красный свет, например неоновую лампу.)

Если, как это показано на фото 6, мы спроецируем перекрывающиеся пятна света от трех проекторов (по принципу Томаса Юнга, разд. 4.4), дающих соответственно красный, зеленый и синий свет, то в месте попарного перекры-

вания пятен получим голубой, пурпурный и желтый (цвета, использующиеся в качестве основных). Там, где перекрываются все три цвета, можно получить белый свет. На самом деле, соответствующим образом регулируя количество света от каждого проектора, удастся получить широкую гамму цветов. Для этого используют трансформаторы, позволяющие изменять напряжение на лампе каждого проектора. Три цвета — красный, зеленый и синий — представляют собой основные цвета, и обычно для получения наиболее широкого диапазона смешанных цветов берут именно их. Такое сочетание создает экспериментальную основу для измерения цвета (гл. 7).

5.4. Влияние спектрального состава освещающего света на восприятие цвета поверхности

Воспринимаемый наблюдателем цвет поверхности зависит не только от ее отражающих свойств, но и от спектрального состава света, освещающего эту поверхность. Например, лист бумаги, поглощающий зеленый свет, при освещении белым светом будет казаться пурпурным, поскольку сильно отражает красный и синий свет (рис. 5.6). Однако если падающий свет в основном синий с очень небольшой примесью красного, бумага будет казаться синей. Если же падающий свет преимущественно красный, бумага будет казаться красной.

Такое изменение цвета часто имеет место тогда, когда объекты наблюдаются сначала при дневном свете, а затем в свете, создаваемом обыкновенными лампочками накаливания. В таком свете по сравнению с дневным гораздо меньше синего и больше красного. Сильное искажение

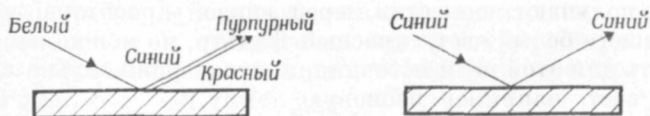


Рис. 5.6. Пурпурная бумага, рассматриваемая в белом и синем свете.

цвета наблюдается, например, в том случае, если мы смотрим на красный автобус в свете натриевых фонарей, которые дают в основном монохроматический желтый свет. Автобус кажется темно-коричневым, поскольку он не отражает красного цвета и лишь частично отражает желтый.

5.5. Метамеризм

Рассмотренные выше изменения цветов весьма значительны; зачастую, однако, происходят и другие, гораздо более тонкие изменения. Например, можно подобрать два куска материи, которые при дневном освещении имеют одинаковый цвет, а при освещении лампой накаливания выглядят совершенно по-разному, хотя лампа также испускает белый свет.

На рис. 5.7 показаны спектральные кривые отражения (т. е. процент света, отраженного при различных длинах волн) двух образцов крашеной материи *I* и *II*. При дневном свете оба они кажутся зелеными и в точности совпадают по цвету. Это происходит потому, что отраженный свет, хотя он и имеет разный спектральный состав, суммируется глазом, создавая в обоих случаях ощущение

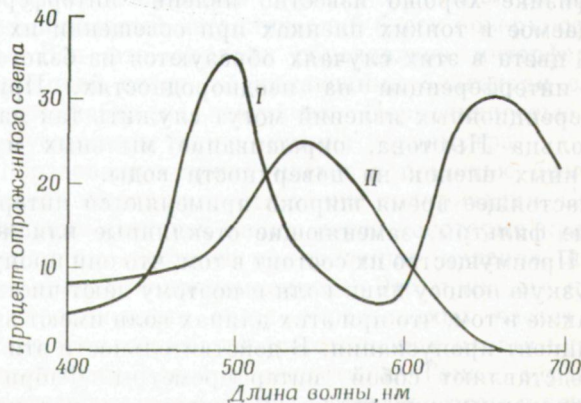


Рис. 5.7. Кривые спектрального отражения тканей *I* и *II*, имеющих одинаковый цвет днем, но различающихся при искусственном свете (по Райту).

одинакового цвета. Однако когда образцы освещаются лампой накаливания, ткань I из-за большего отражения красного цвета кажется коричневой, а второй образец продолжает казаться зеленым. Это явление называется метамеризмом и может привести к любопытным казусам. Например, если пришить на одежду заплату, в точности совпадающую по цвету с материалом при освещении обычной электрической лампочкой, может оказаться, что днем заплата очень заметна. Связано это с тем, что краситель, которым окрашена ткань, несколько отличается по своим спектральным свойствам от красителя заплата, и единственный способ избежать описанных выше нежелательных эффектов — подбирать ткани, окрашенные красителями в точности одинаковых спектральных свойств.

5.6. Цвета, образующиеся при интерференции, дифракции, поляризации и рассеянии

Выше мы рассмотрели только три основных способа получения цветов, однако на самом деле существует очень много физических явлений, связанных с образованием цвета.

В физике хорошо известно явление интерференции, наблюдаемое в тонких пленках при освещении их белым светом; цвета в этих случаях образуются из белого света путем интерференции на неоднородностях. Примером интерференционных явлений могут служить так называемые кольца Ньютона, окрашивание мыльных пузырей и масляных пленок на поверхности воды.

В настоящее время широко применяются интерференционные фильтры, заменяющие стеклянные или желатиновые. Преимущество их состоит в том, что они пропускают очень узкую полосу длин волн и поэтому дают чистые цвета, а также в том, что при этих длинах волн имеют высокий коэффициент пропускания. В действительности эти фильтры представляют собой интерферометры Фабри—Перо с фиксированным интервалом. Их изготавливают, нанося тонкий слой серебра на стекло, нанося затем слой прозрачного криолита, а потом еще одну серебряную пленку. Криолит является прокладкой, создающей очень малое

фиксированное расстояние между серебряными пленками. Если толщина слоя криолита равна 370 нм, то происходит максимальное пропускание зеленого света с $\lambda = 500$ нм. Пропускается также свет с длинами волн 1000 и 333 нм, но первый находится в инфракрасной, а второй — в ультрафиолетовой области. Интересно, что «обыкновенные люди», по выражению Ньютона, глядя на эти фильтры, могут подумать, что они окрашены, в то время как на самом деле они сделаны из бесцветных материалов. Яркие оксидные пленки, которые кажутся интенсивно окрашенными благодаря интерференции, могут также образовываться в результате электролиза на поверхности металлов, например тантала.

Еще одно явление, сопровождаемое образованием цвета, — это дифракция; когда через дифракционную решетку смотрят на белый свет, она кажется окрашенной. Интересно также, что наблюдаемые в природе яркие цвета часто являются результатом интерференции, а иногда одновременно и интерференции, и дифракции на правильных периодических структурах. Так, переливающиеся цвета перьев колибри обусловлены многослойной интерференцией света, отражаемого от роговых пластинок, расположенных стопкой до 15 пластинок в каждой. Аналогичным образом получается окраска «глазков» на крыльях павлина и зеленый металлический блеск поверхности тела жуков. Вся эта окраска обусловлена интерференцией и дифракцией света, возникающими благодаря сложной структуре ребер на чешуйках. Периодичностью структуры обусловлена также окраска перламутра.

К образованию ярких цветов с помощью бесцветных материалов может привести также поляризация. Скорость прохождения световой волны через некоторые кристаллы зависит от плоскости ее поляризации (явление, называемое двойным лучепреломлением.) Это приводит к замедлению прохождения света определенных частот и как следствие к «изъятию» соответствующих цветов благодаря взаимодействию света с веществом. Таким образом, из белого света «удаляются» дискретные частоты и возникают яркие цвета. Это явление легко можно наблюдать, взяв обычную прозрачную ацетатную клейкую ленту, которая обладает способностью к двойному лучепрелом-

лению благодаря тому, что при изготовлении ее растягивают в продольном направлении. Если наклеить кусочки ленты на стеклянную пластинку так, чтобы разные ее части содержали разное число слоев (все они, естественно, расположены горизонтально), поместить пластинку между скрещенными поляроидами (т. е. в простой «скрещенный» полярископ) и затем рассматривать ее в свете источника белого света, то пластинка будет ярко окрашена. В табл. 5.1 приведены цвета, наблюдаемые при разном числе слоев. Интересно затем посмотреть пластинку в «параллельном» полярископе, т. е. при параллельном расположении поляроидов. Возникающие в этом случае цвета являются дополнительными к исходно наблюдаемым (т. е. цветами, которые необходимо добавить к исходным для получения белого света).

Таблица 5.1

ЦВЕТА, ВИДИМЫЕ В ПОЛЯРИСКОПЕ

Число слоев	«Скрещенный» полярископ	«Параллельный» полярископ
1	Светло-желтый	Синий
2	Голубой	Оранжевый
3	Пурпурный	Зеленый
4	Светло-зеленый	Пурпурный
5	Темно-зеленый	Пурпурный
6	Розовый	Зеленый
7	Сине-зеленый	Розовый

Замечательные цветовые эффекты можно получить, вырезая силуэты различной формы и накладывая их друг на друга; особенно интересно после этого вынуть их из полярископа и увидеть, что при обычном освещении силуэты совершенно бесцветны.

Красивые цветные картинки могут давать естественные кристаллы и слюда, если рассматривать их в полярископе, а также стекло и пластмасса, к которым приложено механическое напряжение.

Способность мелких частиц рассеивать свет также может привести к появлению красивой окраски. Светорас-

сеивающая способность мириад частиц, из которых состоят облака и туман, значительно превосходящих по размеру

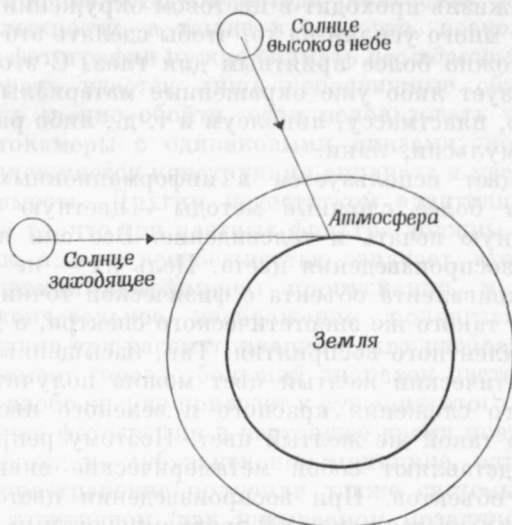


Рис. 5.8. Почему заходящее солнце кажется красным.

длины волн света, не зависит от длины волны. Однако, когда эти частицы меньше длины волны света λ , их светорассеивающая способность, согласно закону Рэля, становится пропорциональной $1/\lambda^4$. Отсюда следует, что количество света, рассеиваемого в синей области спектра (малые длины волн), в 10 раз превышает рассеяние в красной области (большие длины волн). Этим объясняется голубоватый оттенок табачного дыма, а также голубой цвет ясного неба — в обоих случаях рассеяние почти полностью происходит на самих молекулах воздуха. Если бы не было рассеяния, небо казалось бы черным, и были бы видны только Солнце, звезды, Луна и планеты. Сгущающийся красный цвет заходящего Солнца обусловлен тем, что свет проходит через более толстый слой атмосферы, чем раньше, сталкивается с большим числом молекул воздуха и рассеивается больше голубого света (рис. 5.8).

5.7. Воспроизведение цвета

Вся наша жизнь проходит в цветовом окружении, и человек тратит много усилий на то, чтобы сделать это окружение как можно более приятным для глаз. С этой целью он использует либо уже окрашенные материалы, например стекло, пластмассу, линолеум и т. д., либо различные краски, эмульсии, лаки.

Если цвет используется в информационных целях, применяют более сложные методы — цветную фотографию, цветную печать и телевидение. Все они являются методами воспроизведения цвета. Цель их — не создание точного эквивалента объекта с физической точки зрения, т. е. точно такого же энергетического спектра, а достижение эквивалентного восприятия. Так, насыщенный, почти монохроматический желтый цвет можно получить путем аддитивного сложения красного и зеленого цветов, что даст точно такой же желтый цвет. Поэтому репродукции часто представляют собой метамерические эквиваленты реальных объектов. При воспроизведении цветов почти всегда используется основной трехкомпонентный принцип цветового зрения.

5.8. Цветная фотография

Первая цветная фотография была сделана Максвеллом в 1861 г. Любопытно, что он не собирался получать цветное изображение, а просто хотел проиллюстрировать трехцветную природу зрения человека. Он взял три одинаковые черно-белые фотографии и поместил их соответственно под красный, зеленый и синий свет. Затем сделал три черно-белых позитивных изображения в виде диапозитивов. Эти диапозитивы одновременно проецировались на экран через три проектора, снабженные соответственно теми же тремя фильтрами. В физическом смысле на экране присутствовали только три цвета, но субъективно глаз видел целую гамму цветов и изображение было очень близким к реальному. В настоящее время при воспроизведении цвета как с помощью цветной фотографии и цветной печати, так и с помощью цветного телевидения используется почти всюду тот же принцип

Максвелла, хотя что касается деталей, это не всегда очевидно.

Один из недостатков метода Максвелла заключается в его сложности, а также в том, что, поскольку трехцветные фотографии нужно снимать *последовательно*, фотографировать удастся лишь неподвижные объекты. Эту трудность можно обойти, если использовать три отдельные фотокамеры с одинаковыми линзами, но при этом очень усложняется конструкция аппарата и увеличивается его стоимость. Другим недостатком аддитивного метода является то, что три цветных фильтра должны быть насыщенными, а это с неизбежностью означает, что они будут иметь низкий коэффициент пропускания, в результате чего окончательное изображение получится темным. Субъективно при рассматривании ярких изображений глаз воспринимает гораздо больший диапазон цветов; поэтому тусклое изображение приведет к сужению этого диапазона.

Цветная фотография в настоящее время почти целиком основывается на субтрактивном принципе, однако широкое распространение получили также системы, основанные на аддитивном (так называемом мозаичном) методе. Если рассматривать на достаточно большом расстоянии картину, образованную сочетанием очень мелких красных, зеленых и синих квадратиков, то глаз будет воспринимать не отдельные цветные кусочки, а в целом однородный цвет. Это является результатом сложения в различных пропорциях света от всех трех видов цветных квадратиков. Если через красные и зеленые квадратики проходит больше света, чем через синие, суммарный цвет будет желтым, подобным тому, который мы видим при одновременной проекции на экран красного и зеленого света.

В этом варианте цветной фотографии цветовая сетка, получаемая описанным выше способом, находится в контакте с фотопластинкой в камере фотоаппарата. Фотопластинка экспонируется, и после проявления на ней появляется изображение, обратное оригиналу — темные части выглядят светлыми, а светлые — темными; изображение рассматривают затем через ту же цветную сетку, что и при фотографировании. Воспринимаемые цвета будут соответствовать естественным цветам объектов. Этот метод имеет огромное преимущество хотя бы потому, что

нужно сделать всего один снимок, который можно рассматривать либо вообще без проектора, либо с помощью всего одного проектора. На этом принципе основано устройство аутохромной пластинки, в которой вместо цветной сетки используется смесь очень мелких гранул крахмала, окрашенных в красный, зеленый и синий цвета. Такие пластинки очень широко использовались в период с 1907 по 1930 г. Аналогичный процесс лежит в основе метода Агфакolor, где используется мозаика из окрашенных гранул смолы. Был разработан также ряд методов с применением разграфленных экранов; один из них — метод Дюфайкolor; здесь цветная мозаика состоит примерно из миллиона квадратиков на 1 см^2 . Основной недостаток всех этих методов — сравнительно низкое пропускание света и как следствие этого довольно тусклое и нечеткое изображение.

На смену им пришли теперь различные субтрактивные методы получения цветов, и фотографии стали гораздо более яркими. Их качество зависит от качества трех наложенных друг на друга цветных изображений, полученных с помощью трех основных цветов, которые подбирают с помощью красителей. Количество голубого красителя влияет на присутствие в изображении красного цвета, желтый краситель определяет содержание синего, а пурпурный — зеленого цвета. Необходимо лишь в каждой точке изображения независимым образом регулировать концентрацию этих трех красителей. Один из самых простых способов решить эту задачу состоит, вероятно, в получении трех отдельных фотографий через красный, зеленый и синий фильтры по методу Максвелла, а затем в изготовлении из таких негативов цветных прозрачных позитивов. Красный негатив используется для получения голубого изображения, зеленый — пурпурного, а синий — желтого. Затем три прозрачных позитива аккуратно накладываются друг на друга и рассматриваются в белом свете. На фото 7 показаны три отдельных позитива и черно-белое изображение; при совмещении получается окончательное цветное изображение.

На самом деле для получения цветной фотографии теперь, конечно, никто не делает три фотоснимка и не пользуется тремя одинаковыми фотоаппаратами; совре-

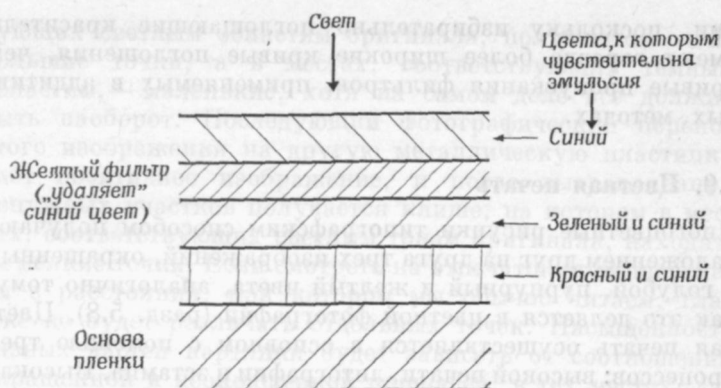


Рис. 5.9. Интегральная цветная трехслойная пленка.

менные методы основаны на применении трех эмульсий, наложенных одна на другую для получения трех изображений. Фотоэмульсии чувствительны в основном только к синему свету, но добавлением сенсibiliзирующих красителей их чувствительность может быть распространена на зеленый и красный свет. Верхний слой (рис. 5.9) представляет собой обычную эмульсию, чувствительную к синему свету; она фиксирует синее изображение. Затем идет желтый (поглощающий синий) фильтр, который «нейтрализует» чувствительность двух расположенных ниже эмульсий к синему свету. Вторая эмульсия обладает чувствительностью только к синему и зеленому свету и поэтому фиксирует только зеленое изображение. Самая нижняя эмульсия чувствительна лишь к синему и красному свету, и на ней фиксируется только красное изображение. Таким образом, при однократной экспозиции синее, зеленое и красное изображения фиксируются на различной глубине одной и той же пленки. Затем в результате сложного процесса проявления, описание которого мы здесь не даем, эти три изображения приобретают желтый, пурпурный и голубой цвета соответственно. В итоге получается одна цветная фотография, состоящая из отдельных слоев с полностью совпадающими изображениями. Таким путем можно получать яркие цветные диапозитивы и фотогра-

фии, поскольку избирательно поглощающие красители имеют гораздо более широкие кривые поглощения, чем кривые пропускания фильтров, применяемых в аддитивных методах.

5.9. Цветная печать

Многоцветные рисунки типографским способом получают наложением друг на друга трех изображений, окрашенных в голубой, пурпурный и желтый цвета, аналогично тому, как это делается в цветной фотографии (разд. 5.8). Цветная печать осуществляется в основном с помощью трех процессов: высокой печати, литографии и эстампа. Высокая печать широко используется при печатании газет, книг и журналов, и мы остановимся здесь именно на ней. Как следует уже из названия¹, высокая печать первоначально использовалась для печатания букв. Не подлежащие воспроизведению участки поверхности удаляют ручным, химическим, механическим или электрическим способом, при этом те части, которые должны быть напечатаны, рельефно выступают на поверхности металлической пластинки. Их затем покрывают краской, накатывая ее с помощью каландра. Когда пластинку плотно прижимают к листу бумаги, краска отпечатывается на ней. Методом высокой печати можно печатать только с одинаковой плотностью, поэтому изображения получаются либо черно-белыми, либо, например, красно-белыми; получить промежуточный между черным и белым оттенок (серый) не удастся. В связи с этим для воспроизведения обычных фотографий, когда необходимо получить множество промежуточных оттенков между черным и белым цветами, этот метод в чистом виде не годится.

Однако с его помощью удастся все-таки получить серые тона, если прибегнуть к весьма оригинальной уловке. Для этого фотографируют объект через экран с большим числом мелких дырочек, разбивающих изображение на множество мельчайших точек; их размеры зависят от тона оригинала. На негативе в местах, соответ-

¹ Английский термин letterpress означает печатание текста.—
Прим. перев.

вующих светлым областям оригинала, получают очень большие точки, а в местах, соответствующих темным областям,— маленькие, хотя на самом деле все должно быть наоборот. Последующий фотографический перенос этого изображения на другую металлическую пластинку дает позитивное изображение, и после вытравливания ненужных участков получается клише, на котором в местах, соответствующих светлым тонам оригинала, находятся мелкие точки. Если смотреть на отпечаток этой пластинки с расстояния, при котором мы обычно читаем, глаз уже не будет различать отдельных точек. Насыщенность разных частей картинки будет зависеть от соотношения окрашенной и неокрашенной площадей: в тех местах, где точки мелкие, бумага будет светлой, а там, где они крупные,— темной или интенсивно окрашенной; промежуточные по размеру точки будут создавать самую разную степень насыщенности. Этот метод называется аутотипией — методом воспроизведения полутонов. Точки на таких картинках можно рассмотреть с помощью обычной лупы. Особенно хорошо они видны на газетных фотоснимках, поскольку применяемый в этом случае экран имеет довольно крупные отверстия: на 1 см располагается 22, 26 или 33 точки и промежутков между ними, в то время как для книжных иллюстраций и справочников применяются экраны с более мелкими отверстиями — 47, 52, 59 или 79 точек и промежутков между ними на 1 см. Чем мельче отверстия в экране, тем больше отдельных деталей можно воспроизвести, и, поскольку глаз плохо различает точечную структуру, в результате получается более гладкое и приятное для глаза изображение. На фото 8 показана часть позитивной полутоновой фотографии при большом увеличении.

Отсюда недалеко и до получения трехточечного изображения. Для этого также берут специальные экраны и накладывают изображения одно поверх другого с помощью голубой, пурпурной и желтой типографских красок. Часто используют четвертое, черно-белое изображение. Таким способом, например, было напечатано фото 7, на нем показаны четыре отдельных изображения. Черная краска накладывается главным образом потому, что типографская краска других цветов не лишена определен-

ных недостатков и при наложении одного на другое трех цветных изображений не всегда получается хороший черный цвет. На фото 9 показан небольшой участок цветной фотографии, полученной методом высокой печати, при довольно большом увеличении. Как можно видеть, такое изображение получено не только в результате субтрактивного процесса; в нем присутствуют также и некоторые черты аддитивного метода. Это происходит потому, что в некоторых частях изображения беспорядочно разбросанные голубые, пурпурные и желтые точки совмещаются неточно и напечатаны отдельно.

5.10. Цветное телевидение

5.10.1. Система последовательных полей

Самый простой метод создания цветного телевизионного изображения основан на использовании системы последовательных полей. Красный, зеленый и синий фильтры поочередно быстро вращаются перед черно-белой телевизионной камерой, и такие же фильтры вращаются синхронно перед экраном черно-белого телевизионного приемника, соединенного с камерой. Этот метод был использован при передаче изображения с помощью релейной связи. Вполне очевидно, что смотреть на изображение через вращающиеся фильтры неудобно и, чтобы устранить мелькание изображения, частота чередования фильтров должна быть довольно высокой, порядка 150 красных, зеленых и синих полей в 1 с. В случае когда поля последовательно сменяются со скоростью, слишком высокой для различения изображения, глаз, естественно, работает аддитивно. Другим недостатком этой системы является ее несовместимость. Это означает, что изображения, передаваемые с помощью такой системы, не могут приниматься в виде черно-белого изображения на существующих телевизионных приемниках.

Обратившись теперь к современным системам цветного телевидения, мы увидим, что, хотя мозаичная система воспроизведения цвета в цветной фотографии уже устарела, в цветном телевидении она применяется очень широко: большинство телевизоров теперь снабжено катод-

ными трубками, воспринимающими точки мозаики. В таких системах (рис. 5.10) камера состоит из одной линзы и расщепляющих лучи зеркал. Три трубки камеры снабжены красным, зеленым и синим интерференционными фильтрами, которые при сканировании изображения строчка за строчкой посылают «красные», «зеленые» и «синие» сигналы. Однако в действительности отдельно «красные», «зеленые», «синие» сигналы телевизионными станциями не передаются, поскольку, если бы это было так, для передачи цветных изображений потребовался бы в три раза больший диапазон частот (называемый шириной полосы пропускания), чем при передаче обычного черно-белого изображения. На самом деле передается сигнал яркости, который кодирует яркость каждой части изображения, и два дифференциальных цветовых сигнала. Оказывается, что, если сигнал яркости переносит информацию в 100 единиц, два дифференциальных цветовых сигнала должны перенести лишь по 25 единиц информации каждый, что достаточно для получения хорошего цветного изображения. Значит, вся информация, которую необходимо пере-

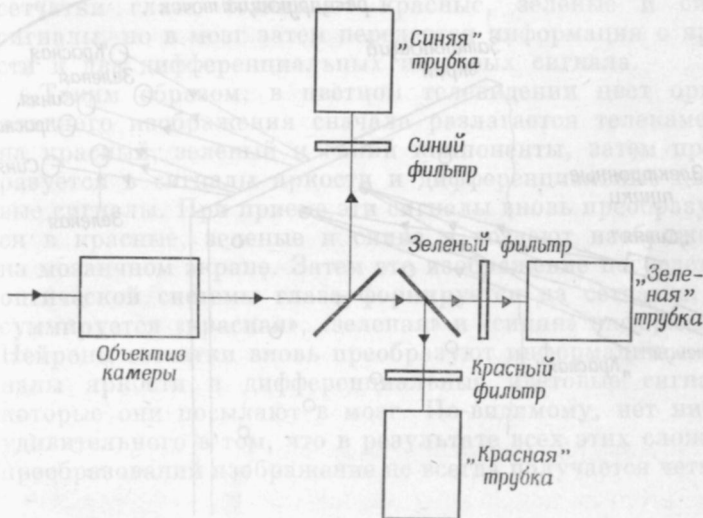


Рис. 5.10. Цветная телевизионная камера.

дать, будет составлять всего 150 единиц, в то время как для передачи «красных», «синих» и «зеленых» сигналов по отдельности понадобится 300 единиц. Это дает возможность значительно уменьшить ширину полосы пропускания. Еще одно преимущество метода — это его совместимость: черно-белый приемник может работать только на сигналах яркости, не принимая дифференциальных цветовых сигналов и, таким образом, давать нормальное черно-белое изображение.

Цветной телевизионный приемник работает по принципу аддитивности красного, зеленого и синего цветов, поэтому красный, зеленый и синий сигналы, посылаемые тремя трубками камеры, должны быть выделены из сигналов яркости и дифференциальных сигналов в электрической цепи телевизионного приемника.

Эти сигналы поступают затем в три электронные пушки в трубке приемника, испускающие три пучка электронов.

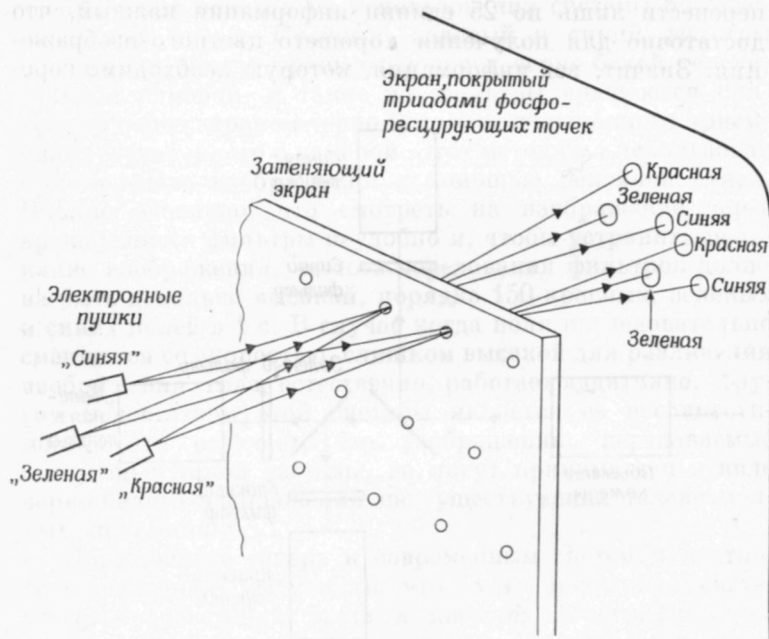


Рис. 5.11. Цветной телевизионный приемник,

Их интенсивность меняется в соответствии с интенсивностью сигналов (рис. 5.11). Экран покрыт триадами крошечных красных, зеленых и синих фосфоресцирующих точек. Прежде чем электронные лучи достигнут экрана, они проходят через затеняющий экран — металлическую пластинку, усеянную большим числом маленьких отверстий. Это позволяет электронам, вылетевшим из «красной» пушки, попадать только на фосфоресцирующие красные точки; лучам, вышедшим из «зеленой» пушки, — попадать на зеленые точки, и из «синей» — на синие. Число точек на экране достигает миллиона, но с обычного расстояния их увидеть нельзя; однако при более тщательном рассмотрении работающего экрана с помощью ручной лупы эти точки становятся легко заметными. Следовательно, глаз суммирует одновременно свет от этих трех точек аналогично тому, как это происходит при знакомом нам мозаичном методе цветной фотографии.

Интересно отметить, что, как мы уже видели в гл. 4, глаз обрабатывает зрительную информацию, поступающую на сетчатку, тем же способом, который лежит в основе цветного телевидения. В соответствующих рецепторах сетчатки глаза возникают красные, зеленые и синие сигналы, но в мозг затем передается информация о яркости и два дифференциальных цветовых сигнала.

Таким образом, в цветном телевидении цвет оригинального изображения сначала разлагается телекамерой на красный, зеленый и синий компоненты, затем преобразуется в сигналы яркости и дифференциальные цветовые сигналы. При приеме эти сигналы вновь преобразуются в красные, зеленые и синие и создают изображение на мозаичном экране. Затем это изображение посредством оптической системы глаза формируется на сетчатке, где суммируется «красная», «зеленая» и «синяя» информации. Нейроны сетчатки вновь преобразуют информацию в сигналы яркости и дифференциальные цветовые сигналы, которые они посылают в мозг. По-видимому, нет ничего удивительного в том, что в результате всех этих сложных преобразований изображение не всегда получается четким,

Системы классификации цветов

6.1. Характеристика цвета при его восприятии

Как мы уже говорили в гл. 4, излучение источника, испускающего свет в широком спектральном диапазоне, воспринимается не в виде отдельных длин волн, а как свет определенного цвета. При низком уровне светового стимула (т. е. при скотопическом зрении) все длины волн оказывают на зрительную систему одинаковое действие, и мы можем различать только степени света и тени. В этом случае функционирует один рецепторный механизм и цветовая окраска объекта сопоставляется только со шкалой яркости. При более высоких уровнях раздражителя (т. е. при фотопическом зрении) восприятие света представляет собой более сложный процесс и для характеристики цвета требуется по крайней мере три параметра. Это минимальное число, несомненно, связано с ответной реакцией трех различных типов рецепторов колбочек, которые имеются в сетчатке. Изменения в размере, характере поверхности предмета, цвете фона и состоянии адаптации наблюдателя — все это влияет на восприятие цвета, и мы не всегда можем гарантировать, что этих трех параметров достаточно. Однако во многих случаях для адекватного описания цвета можно привести лишь три характеристики. Это один из примеров явления, называемого константностью восприятия цвета.

6.2. Константность восприятия цвета

Рассматривая какой-либо объект при разном освещении, например сначала при искусственном свете, а затем при дневном, мы зачастую обнаруживаем, что цвет его остается

на удивление постоянным. Это явление, называемое константностью цветовосприятия, наблюдается столь часто (даже когда уровень освещенности и цвет источника и фона в значительной степени изменяются), что ему вскоре пересташь удивляться. Большинство рассматриваемых нами объектов весьма сложны: они состоят из множества поверхностей, которые по-разному окрашены и обладают разной отражательной способностью, каждая из них находится на каком-то фоне или одна находится на фоне другой. Усредненная фоновая окраска (т. е. совокупный эффект всех окрашенных элементов рассматриваемой картины) в общем будет приближаться к ахроматическому окружению с низкой или средней отражательной способностью. Если, рассматривая объект (предмет), мы ограничимся углом зрения всего в несколько градусов, то соотношение между размером поля, цветностью фона и яркостью объекта по отношению к фону останутся примерно теми же. Изменение уровня освещения не влияет на эти факторы, и небольшие изменения в освещенности в основном уравниваются за счет цветовой адаптации глаза. Совокупность подобных физиологических механизмов, по-видимому, обуславливает константность восприятия цвета. Несомненно, это явление наблюдается не всегда, и можно обнаружить множество исключений (см. контрастные эффекты на фото 12) но мы все-таки можем описывать цвета относительно простым способом. Например, если известны цветность (см. разд. 7.2) и относительная яркость объекта, можно предсказать его тон, насыщенность и светлоту. Характеристика цвета по его виду (т. е. психологическая, а не психофизическая) нашла широкое применение только благодаря такому постоянству.

Для характеристики цвета было разработано несколько систем. Их можно разделить на три типа: а) системы, основанные на эмпирическом и субъективном расположении ряда цветных поверхностей; б) системы, основанные на эмпирическом изучении различий в цветности, и в) системы, основанные на теориях зрения, целью которых является установить взаимосвязь между психофизическими раздражителями и тем, что мы видим.

6.3. Цветовые атласы и карты

Простейший способ расположить определенным образом ряд цветных поверхностей (обычно называемых образцами или выкрасками) — это собрать их в виде атласа. Каждый образец охарактеризован определенными его психофизиологическими свойствами: тоном, насыщенностью цвета и светлотой. На каждой странице атласа помещены образцы, расположенные по два, чтобы показать различия в их восприятии (см. фото 10). Недостатком цветового атласа является то, что образцы со временем загрязняются и обесцвечиваются. Кроме того, число образцов, включенных в атлас, естественно, ограничено, что неизбежно приводит к отсутствию некоторых цветов. В частности, ряд сильно насыщенных цветов невозможно воспроизвести в виде поверхностей, хотя наблюдатель в повседневной жизни может с ними встречаться.

6.3.1. Книга цветов Мензелла

В 1905 г. художник Мензелл задался целью составить атлас цветов, который помог бы студентам, изучающим живопись и смежные дисциплины, понять особенности цветов. Составленный им атлас «Книга цветов Мензелла» был с тех пор в значительной степени переработан и в настоящее время содержит свыше 1200 цветных образцов, исполненных как на матовой, так и на глянцевой бумаге; вероятно, это самая простая система классификации цветов, основанная на субъективном их восприятии, и применяется в настоящее время наиболее широко. В ней подробно документированы психофизиологические и психофизические свойства цветов, и книга может считаться превосходным средством описания цветов.

Пользуются атласом следующим образом. Каждый образец рассматривают при стандартных условиях, а именно на однородном сером фоне с коэффициентом отражения 20% и при освещении как образца, так и фона светом, близким по своим спектральным свойствам к дневному. Эти условия обеспечивают константность восприятия. Предполагается, что воспринимаемый цвет каждого образца однозначно описывается его тоном, насыщенностью

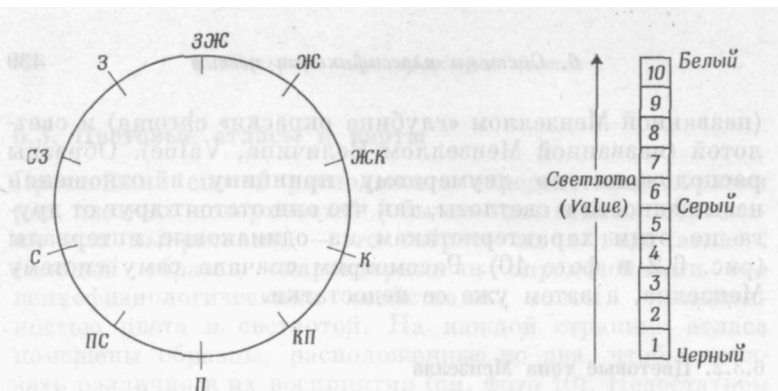
(названной Мензеллом «глубина окраски» *chroma*) и светлотой (названной Мензеллом Величина, *Value*). Образцы расположены по двумерному принципу в отношении насыщенности и светлоты, так что они отстоят друг от друга по этим характеристикам на одинаковые интервалы (рис. 6.2 и фото 10). Рассмотрим сначала саму систему Мензелла, а затем уже ее недостатки.

6.3.2. Цветовые тона Мензелла

Любая окрашенная поверхность по цвету похожа на один из спектральных цветов или на сильно насыщенный пурпур. Эта характеристика называется тоном по Мензеллу. Существует пять основных тонов: синий, зеленый, желтый, красный и пурпурный (обозначаемые как С, З, Ж, К и П), а также пять промежуточных тонов (СЗ, ЗЖ, ЖК, КП и ПС). Эти 10 тонов можно расположить по кругу (окружности тонов) таким образом, чтобы воспринимаемое различие в тонах между соседними поверхностями было постоянным. Все различающиеся тона можно получить подразделением каждого сегмента на 10 частей, что в сумме дает уже 100 тонов (рис. 6.1, А и Г). Степень различия по цвету между двумя тонами определяется величиной угла, соответствующего расположению их на окружности, или разделяющим их числом тонов. На самом деле число тонов мало что говорит неопытному наблюдателю, поэтому применяют другую характеристику. Каждый тон обозначают числом от 1 до 10 и буквой, соответствующей основному тону (например, 3К, 7СЗ и т. д.). Число 5 условно обозначает цвет, соответствующий основному тону; например, 8СЗ обозначает тон, который на 3 ступени отклоняется от чистого сине-зеленого (5СЗ) в сторону чистого синего.

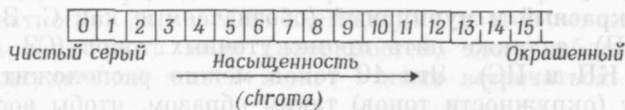
6.3.3. Светлота по Мензеллу

Каждую поверхность по светлоте можно сопоставить с какой-либо ахроматической поверхностью из серии цветов от черного до белого. Если обозначить черную и белую поверхности по шкале Мензелла соответственно через 1 и 10, то промежуточные серые оттенки получат

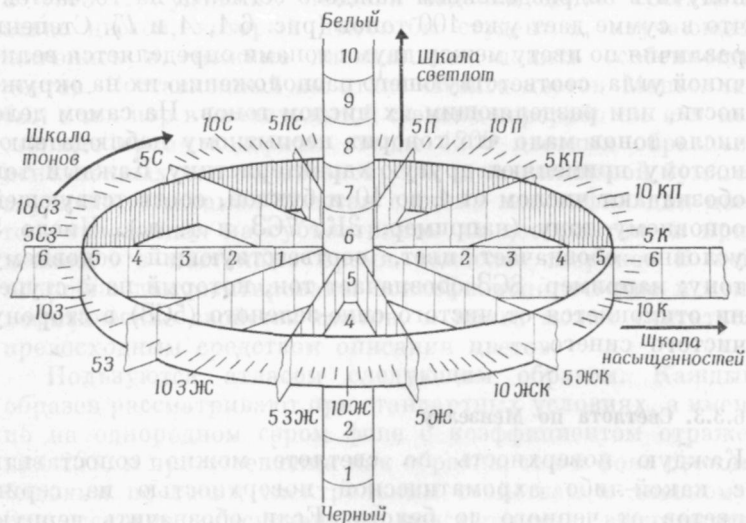


А. Окружность тонов

Б. Шкала светлот



В. Шкала насыщенностей



Г. Цветовое пространство Мензелла

Рис. 6.1. Цветовая система Мензелла,

обозначения от 2 до 9 и будут отличаться друг от друга на равные интервалы светлоты (рис. 6.1, Б). При одинаковой освещенности будут иметь одинаковые Величины по Мензеллу образцы, имеющие одинаковый коэффициент отражения.

6.3.4. Насыщенность по Мензеллу

Любую окрашенную поверхность можно представить себе как некую смесь серого цвета и какого-либо чистого тона. Цвета с большим воспринимаемым содержанием тона считаются более насыщенными, или обладают большей глубиной окраски по Мензеллу. Ряд поверхностей, имеющих одну и ту же светлоту и тон, можно расположить в порядке изменения глубины окраски (насыщенности). В цветовом атласе они разделены равными интервалами и обозначены соответствующими числами от 0 для серого цвета до 16—18 для насыщенного белого (рис. 6.1, В).

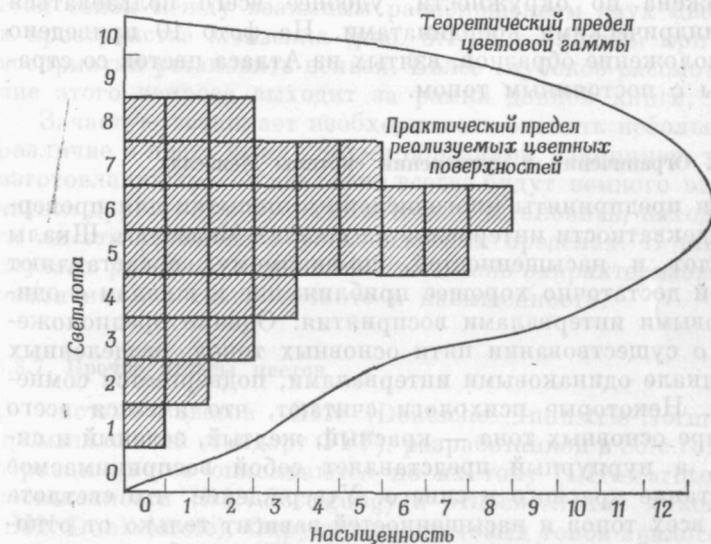


Рис. 6.2. Схематическое представление страницы постоянного тона из атласа Мензелла.

Верхний предел насыщенности зависит от светлоты тона данного цвета. Существуют определенные принципиальные ограничения насыщенности, которые можно получить на поверхности (ограничения Мак-Адама, рис. 6.2). Например, большая насыщенность и большая светлота взаимно исключают друг друга. Имеются также ограничения практического характера, обусловленные химическими свойствами смесей пигментов.

6.3.5. Система обозначений Мензелла и цветовое пространство

Каждая поверхность с точки зрения восприятия характеризуется тоном, светлотой и насыщенностью. Условно эти величины записываются как тон/светлота/насыщенность; так, запись 5СЗ/6/9 означает сине-зеленый цвет средней светлоты и высокой насыщенности. Эти три шкалы могут послужить основой для создания трехмерного цветового пространства (рис. 6.1, Г). Поскольку шкала тонов расположена по окружности, удобнее всего пользоваться цилиндрическими координатами. На фото 10 приведено расположение образцов, взятых из Атласа цветов со стра-
ницы с постоянным тоном.

6.3.6. Ограничения в применении системы Мензелла

Были предприняты многочисленные попытки для проверки адекватности интервалов на шкалах Мензелла. Шкалы светлот и насыщенностей, по-видимому, представляют собой достаточно хорошее приближение к шкалам с одинаковыми интервалами восприятия. Однако предположение о существовании пяти основных тонов, разделенных на шкале одинаковыми интервалами, подвергается сомнению. Некоторые психологи считают, что имеется всего четыре основных тона — красный, желтый, зеленый и синий, а пурпурный представляет собой воспринимаемое сочетание красного и синего. Утверждение, что светлота для всех тонов и насыщенностей зависит только от относительной яркости или отражательной способности, верно лишь отчасти. Интенсивно окрашенные поверхности определенных тонов воспринимаются большинством наблюда-

телей как более светлые по сравнению с менее интенсивно окрашенными поверхностями, имеющими ту же Величину по Мензеллу (эффект Гельмгольца—Кольрауша, см. также разд. 8.4).

Различия в цвете, соответствующие единичному увеличению тона, светлоты и насыщенности, не равноценны. В первом приближении повышение светлоты на единицу с точки зрения восприятия цвета эквивалентно изменению тона на 3 единицы или насыщенности на 2 единицы. Это следует учитывать при оценке субъективных различий по цвету двух поверхностей, предположительно имеющих различные тон, светлоту, насыщенность, особенно когда пытаются связать это различие с расположением объектов в трехмерном цветовом пространстве Мензелла. Еще одна трудность возникает тогда, когда пытаются связать эти величины с пространственным разделением. Существует ряд экспериментальных данных, которые показывают, что цвета с точки зрения их восприятия нельзя полностью описать, пользуясь евклидовым пространством, т. е. простой связи между взаимным расположением двух цветов в пространстве Мензелла (рис. 6.1) и различием при их восприятии установить нельзя. Более глубокое рассмотрение этого вопроса выходит за рамки данной книги.

Зачастую возникает необходимость оценить небольшое различие в цвете между двумя образцами. Например, при изготовлении красок две серии всегда будут немного отличаться друг от друга, и очень важно установить, находятся ли эти различия в установленных пределах. В таких случаях различия в цвете вполне можно охарактеризовать различиями в тоне, светлоте и насыщенности.

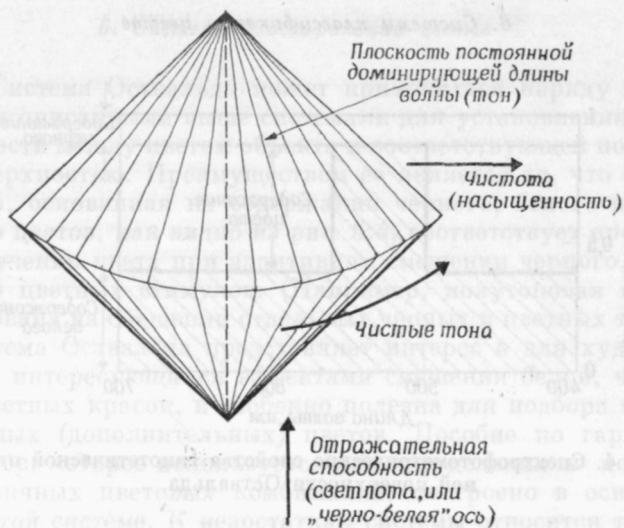
6.3.7. Прочие атласы цветов

В системе цветов DIN (Deutsche Industrie-Norm — промышленный стандарт ФРГ), разработанной в 50-е годы, образцы цветов описываются по их тону (DIN-Farbtton), насыщенности (DIN-Sättigung) и относительной яркости (DIN-Dunkelstufe). Окружность цветовых тонов аналогична окружности в системе Мензелла, однако она разделена на 24 равные части, соответствующие разным воспринимаемым тонам. Тон в этой системе зависит только от доми-

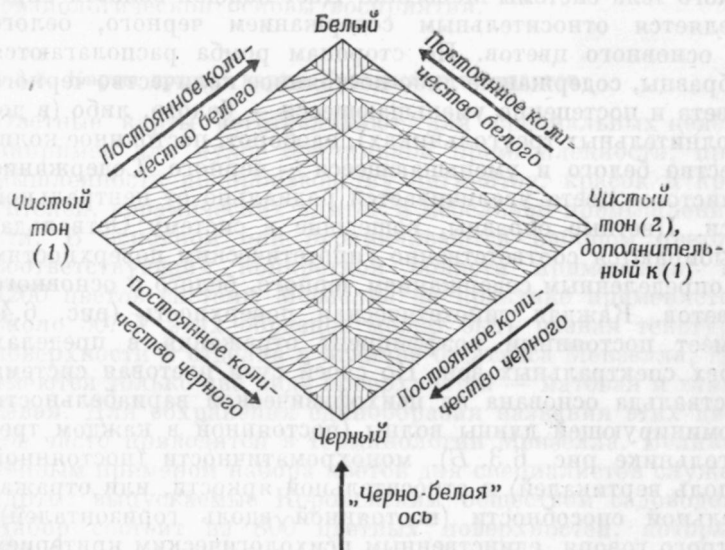
нирующей (основной) длины волны (т. е. основного цвета образца) — предположение, по утверждению сторонников системы Мензелла, верное лишь отчасти. Основная трудность в установлении связи между системами Мензелла и DIN состоит в невозможности более или менее просто связать шкалу Величин по Мензеллу со шкалой относительных яркостей в системе DIN. Относительная яркость определяется как логарифм отношения коэффициента отражения образца к коэффициенту отражения при освещении его неким «оптимальным» цветом той же цветности. Эта величина введена для того, чтобы добиться наилучшего психофизического соответствия в окончательном упорядочении цветов, но ее не удается каким-либо простым способом сопоставить с Величиной по Мензеллу. Шкала насыщенности в системе DIN зависит только от цветности и не изменяется с изменением относительной светлоты. Это также представляет собой значительный отход от эмпирических соотношений системы Мензелла.

Цветной атлас Хессельгрена, подобно системе Мензелла, основан на распределении поверхностей по тонам, насыщенностям и светлотам. Он послужил основой для недавно созданной Системы естественных цветов. Цвета в этой системе располагаются согласно результатам прямого определения относительного содержания в образцах шести природных цветов — синего, зеленого, желтого, красного, черного и белого. Исходя из этих оценок можно попытаться понять некоторые закономерности психологических характеристик цвета.

Физик Оствальд при создании в 1917 г. своей Системы цветов, как и Мензелл, попытался расположить цвета в трехмерном пространстве. На рис. 6.3, А изображено цветовое тело, напоминающее цветовое пространство Мензелла; обе системы нашли одинаковое применение. Однако система Оствальда основывается не на эмпирической организации цветовосприятия, а на представлениях ее создателя. Вертикальная ось — это ахроматические, или серые, поверхности от черной до белой. В вертикальном сечении геометрическое тело представляет собой ромб (рис. 6.3, Б), причем два треугольника по обе стороны «черно-белой» оси содержат дополнительные друг к другу цвета доминирующих постоянных длин волн, называемых



А. Цветовое тело Оствальда



Б. Вертикальное сечение цветового тела

Рис. 6.3. Цветовая система Оствальда.

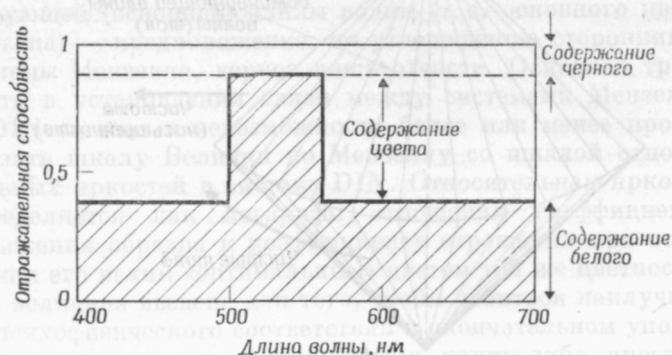


Рис. 6.4. Спектрфотометрические свойства гипотетической идеальной поверхности Оствальда.

«чистыми тонами». Это аналогично сечению геометрического тела системы Мензелла. Цвет каждой области определяется относительным содержанием черного, белого и основного цветов. По сторонам ромба располагаются образцы, содержащие либо постоянное количество черного цвета и постепенно уменьшающееся — белого, либо (в дополнительных треугольниках), наоборот, постоянное количество белого и уменьшающееся — черного. Содержание «чистого» цвета увеличивается радиально от центральной оси. Цветные образцы, вошедшие в систему Оствальда, выбираются соответственно гипотетическим поверхностям с определенным содержанием черного, белого и основного цветов. Каждая гипотетическая поверхность (рис. 6.4) имеет постоянный коэффициент отражения в пределах трех спектральных зон. По своей сути цветовая система Оствальда основана на психофизической вариабельности доминирующей длины волны (постоянной в каждом треугольнике рис. 6.3, *В*), монохроматичности (постоянной вдоль вертикалей) и относительной яркости, или отражательной способности (постоянной вдоль горизонталей). Строго говоря, единственным психологическим критерием выбора является равномерное расположение поверхностей с чистыми тонами с разными доминирующими длинами волн.

Система Оствальда может применяться наряду с другими описанными выше системами для установления зависимости между цветом объекта и соответствующей по цвету поверхностью. Преимуществом ее является то, что структура, основанная на содержании черного, белого и цветного цветов, как видно из рис. 6.4, соответствует процессу получения цвета при аддитивном смешении черного, белого и цветных стимулов. (Например, полутоновая печать основана на смешении отдельных черных и цветных точек.) Система Оствальда представляет интерес и для художников, интересующихся эффектами смешения белой, черной и цветных красок, и особенно полезна для подбора гармоничных (дополнительных) цветов. Пособие по гармонии цветов, которое используется для определения и подбора различных цветовых комбинаций, построено в основном на этой системе. К недостаткам системы относится то, что гипотетические стандарты не могут воспроизводиться с достаточной точностью и что система совершенно лишена физиологической основы восприятия.

6.3.8. Карты красок: карты Британских стандартов

Цветные карты изготавливают для специальных целей, например для нужд текстильной промышленности, промышленности по производству пигментов, красок и красителей, керамических плиток и мебельной промышленности. В основном они ограничиваются набором цветов, соответствующих конкретной области применения; из 1200 цветов системы Мензелла на практике применяется около 30. У этих образцов может быть разная текстура поверхности и отделка в отличие от атласа Мензелла, где имеются только два вида поверхностей — матовая и глянцевая. Для сохранения единообразия названия этих цветов часто приводятся в терминологии Мензелла. Великолепным примером набора цветов для специалистов служат карты, выпускаемые Королевским обществом садоводов. Набор состоит из 800 цветных поверхностей, которые подобраны специально для распознавания цветов и растений и различения цветов и их окраски.

Национальные стандарты цветов, такие, как Британский стандарт (BS 266 : 1955), предназначены для более

широкого применения, чем однотипные промышленные стандарты. Они представляют собой нечто среднее между атласами, охватывающими большой диапазон цветов, и картами, предназначенными для специальных целей. Новейший Британский стандарт (BS 4800 : 1972) состоит из 86 образцов, сгруппированных таким образом, чтобы дизайнер смог легко подобрать нужную ему цветовую комбинацию. Основное отличие этой системы от стандарта BS 266 : 1955 состоит в том, что образцы в ней расположены по принципу восприятия содержания в них серого цвета — свойство восприятия, не всегда включаемое в большинство цветовых стандартов.

6.4. Терминология систем классификации цветов

В этой главе мы попытались там, где это возможно, охарактеризовать воспринимаемый цвет с помощью тона, насыщенности и светлоты. Однако на практике в разных областях для описания цвета употребляются различные термины. Этих терминов так много, что дать их логически последовательный и полный перечень невозможно. Термин «яркость» обычно для характеристики поверхностей не используется; вместо него предпочитают применять термин «светлота». Часто употребляют термины «яркость», «блескость» или «интенсивность цвета». Для описания интенсивно насыщенных цветов, особенно для объектов с высокой отражательной способностью, пользуются терминами «яркий», «блестящий», «сочный». При промышленном производстве красителей применяют термин «интенсивность» как в субъективном, так и в объективном смысле. «Оттенок» — это очень широко распространенный термин, принимающий почти любой смысл; наряду с ним применяется термин «тон». Тон также имеет несколько значений, но наиболее часто употребляется для обозначения цветов, получающихся от смешения в разных пропорциях белого и какого-либо другого цветов. Такие термины, как «бледный», «блеклый», «густой», «пастельный», имеют довольно ясный смысл, особенно в тех случаях, когда имеются в виду какие-то конкретные области применения цвета, но такие слова, как «слабый», «скудный» и «ядовитый», мало что говорят о характере цвета. Изучая цвета,

гораздо удобнее пользоваться минимальным числом терминов. Наиболее предпочтительными из них являются такие понятия, как тон, насыщенность и светлота — психофизиологические термины для обозначения цвета. Дополнительным их преимуществом является то, что они совершенно очевидным образом связаны с соответствующими физическими понятиями — доминирующей длиной волны, монохроматичностью и яркостью.

6.5. Системы расположения цветов, основанные на цветоразличении

Второй метод описания цвета основан на способности наблюдателя замечать разницу между цветами. Будем изменять тон, насыщенность или светлоту цветового поля до тех пор, пока не будет достигнут едва заметный порог восприятия; тогда произойдет соответствующее пороговое изменение физических параметров — доминирующей длины волны, монохроматичности и яркости. На

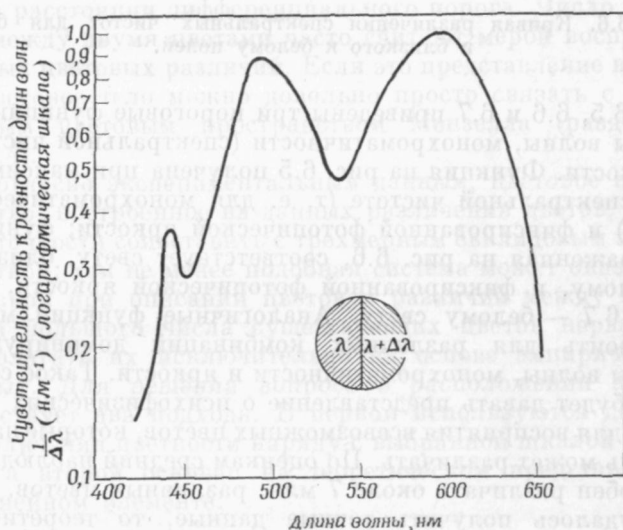


Рис. 6.5. Кривая различения спектральных цветов, измеренная для монохроматических полей.

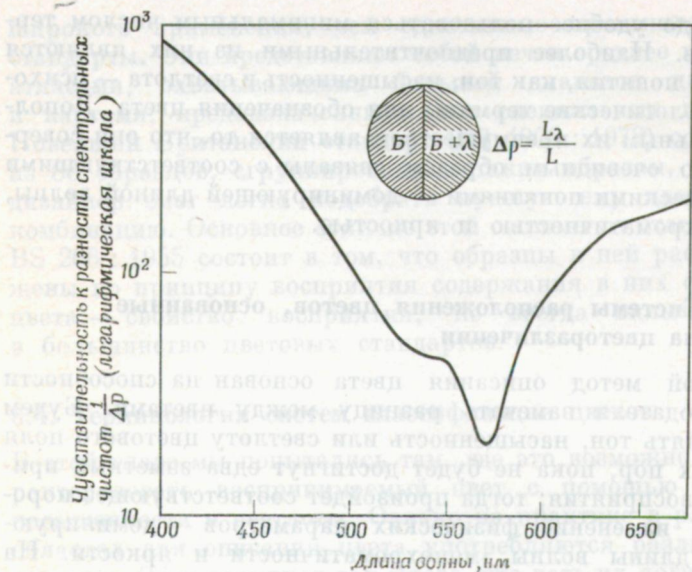


Рис. 6.6. Кривая различения спектральных чистот для белого и близкого к белому полей.

рис. 6.5, 6.6 и 6.7 приведены три пороговые функции для длины волны, монохроматичности (спектральной чистоты) и яркости. Функция на рис. 6.5 получена при максимальной спектральной чистоте (т. е. для монохроматического света) и фиксированной фотопической яркости; функция, изображенная на рис. 6.6, соответствует свету, близкому к белому, и фиксированной фотопической яркости, а на рис. 6.7 — белому свету. Аналогичные функции можно построить для различных комбинаций доминирующей длины волны, монохроматичности и яркости. Такое семейство будет давать представление о психофизических условиях для восприятия всевозможных цветов, которые наблюдатель может различать. По оценкам средний наблюдатель способен различать около 7 млн. различных цветов. Если бы удалось получить точные данные, то теоретически можно было бы расположить все эти цвета в цветовом пространстве так, чтобы соседние находились друг от дру-

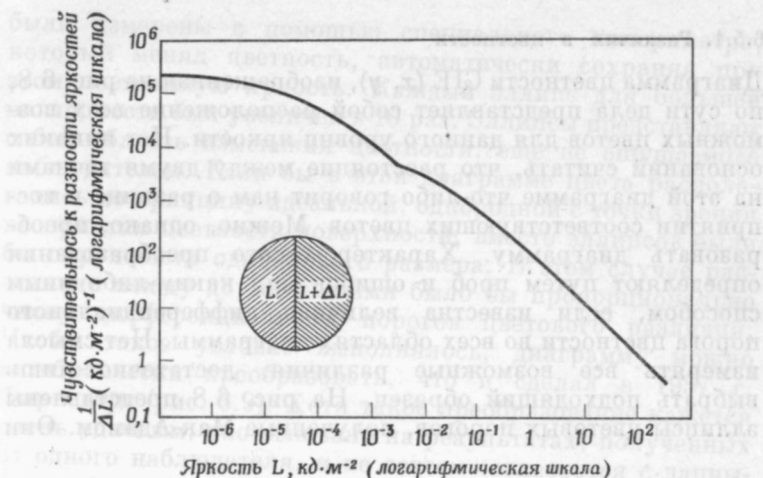


Рис. 6.7. Кривая различения яркости белых полей. Это другой способ представления нижней кривой рис. 3.6.

га на расстоянии дифференциального порога. Число порогов между двумя цветами часто считают мерой воспринимаемых цветовых различий. Если это представление верно, то цветовое тело можно довольно просто связать с трехмерным цветовым пространством Мензелла (разд. 3.7 и 10.4).

Согласно экспериментальным данным, цветовое пространство, построенное на данных различения цветов, нельзя в точности сопоставить с трехмерным евклидовым пространством; тем не менее подобная система может оказаться полезной при описании цветов и различий между ними. Из-за большого числа существующих цветов неразумно располагать их исключительно на основе эмпирических данных. Для решения вопроса о расположении цветов существует два подхода. В первом используются данные о различении цветности наряду с выбранной шкалой яркости, а второй основан на теоретическом представлении о линейном элементе.

6.5.1. Различия в цветности

Диаграмма цветности CIE (x , y), изображенная на рис. 6.8, по сути дела представляет собой расположение всех возможных цветов для данного уровня яркости. Нет никаких оснований считать, что расстояние между двумя точками на этой диаграмме что-либо говорит нам о разнице в восприятии соответствующих цветов. Можно, однако, преобразовать диаграмму. Характер такого преобразования определяют путем проб и ошибок или каким-либо иным способом, если известна величина дифференциального порога цветности во всех областях диаграммы. Нет смысла измерять все возможные различия, достаточно лишь выбрать подходящий образец. На рис. 6.8 представлены эллипсы цветовых порогов, полученные Мак-Адамом. Они

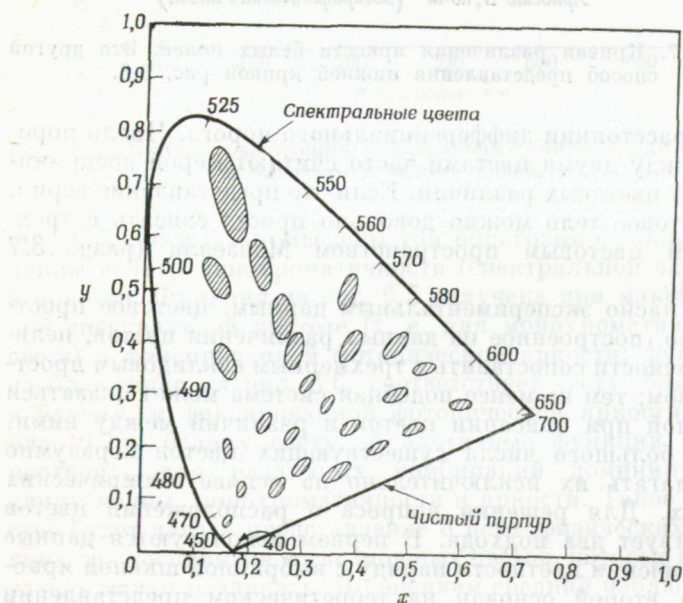


Рис. 6.8. Эллипсы цветовых порогов Мак-Адама, представленные на диаграмме цветности CIE (x , y). Каждый эллипс получен при пороговых изменениях цветности. Размеры эллипсов увеличены в 10 раз, положение центров соответствует действительности.

были измерены с помощью специального колориметра, который менял цветность, автоматически сохраняя при этом постоянную яркость. Каждый эллипс для большей наглядности был увеличен в 10 раз. Эллипсы представляют собой область изменения цветности, еще не ощущаемого наблюдателем. Если бы в этой диаграмме цвета располагались по принципу идеальной, однородной с точки зрения восприятия цветности поверхности, вместо эллипсов были бы окружности одинакового размера. В этом случае расстояние между двумя цветами было бы пропорционально числу дифференциальных порогов цветового различия. Чтобы такое условие выполнялось, диаграмму можно алгебраически преобразовать, что и сделал в 1957 г. Фарнсворт (рис. 6.9). Хотя такое преобразование кажется очень удачным, оно основано на результатах, полученных от одного наблюдателя, и не совсем согласуется с данными, полученными от других испытуемых, а кроме того, оно слишком сложно. Более простое и во многих отношениях более эффективное линейное преобразование показано на диаграмме одинаковой цветности системы CIE (u, v) (рис. 6.10, см. также разд. 7.8). Это преобразование ни в коей мере не является идеальным; эллипсы Мак-Адама по-прежнему остаются эллипсами, а не окружностями и различаются по размеру, однако она все-таки представляет собой улучшенную модификацию диаграммы цветности CIE (x, y), изображенную на рис. 6.8.

Чтобы завершить образование пространства примерно одинаковой цветности, была введена шкала Величин Мензелла, с помощью которой объясняются вариации в различении при изменении уровня яркости (фотопической). Это особенно ценно, так как шкала Мензелла, основанная на равных интервалах светлоты, должна соответствовать шкале, основанной на данных о различении яркости. Полученное в результате этого трехмерное цветовое пространство известно как система CIE (U^*, V^*, W^*); она была разработана в 1964 г. Любое цветовое различие между двумя образцами, характеризуемыми соответственно параметрами U^*, V^*, W^* и $U^* + \Delta U^*, V^* + \Delta V^*, W^* + \Delta W^*$, выражается следующим уравнением:

$$\Delta E = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2}.$$

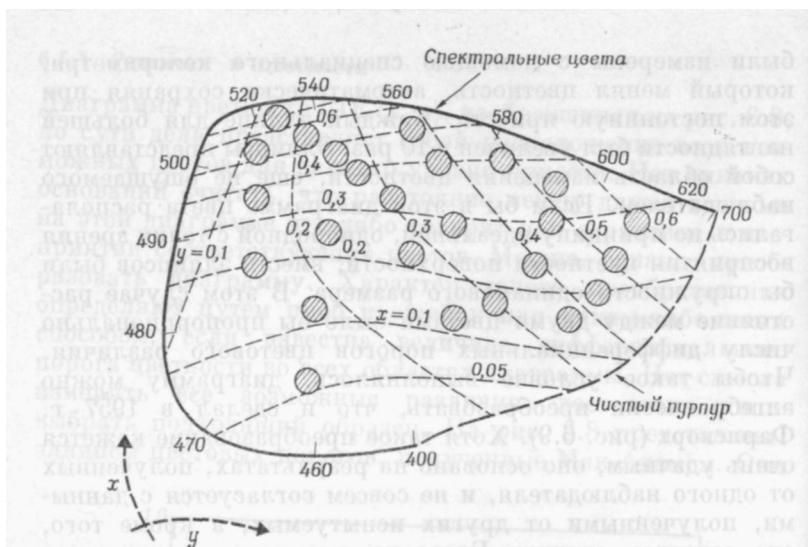


Рис. 6.9. Преобразованная Фарисвортом диаграмма цветности CIE (x, y).

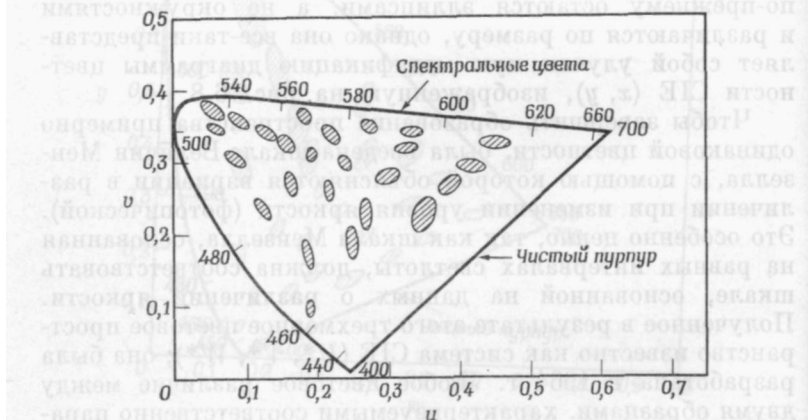


Рис. 6.10. Эллипсы цветовых порогов Мак-Адама, представленные на диаграмме постоянной цветности CIE (u, v). Размеры эллипсов увеличены в 10 раз; положение центров соответствует действительности.

6.5.2. Линейный элемент

Другой подход к созданию пространства одинаковой цветности базируется на наших представлениях о механизме зрительного процесса. Эти представления впервые были сформулированы Гельмгольцем на основе ряда предположений об ответной реакции трех типов колбочек, а также исходя из допущения о том, что закон Вебера о различении выполняется (разд. 3.8). В основе такого подхода лежит понятие о линейном элементе — отрезке прямой, соединяющей две точки в трехмерном цветовом пространстве. Сначала такое рассмотрение не дало каких-либо ощутимых практических результатов, однако проведенное недавно Стайлсом более глубокое исследование этого вопроса вновь пробудило интерес к подобному подходу. Детальное рассмотрение этой проблемы выходит за рамки книги, но значение ее можно понять хотя бы из того, что Стайлс смог предсказать многие данные по различению цветов, такие, например, как эллипсы Мак-Адама, хорошо сопоставимые с существующими эмпирическими данными. Однако в настоящее время понятие о линейном элементе является, по-видимому, наиболее полезным для проверки правильности наших представлений о механизме зрительного процесса. Вследствие своей чрезвычайной простоты эмпирически построенное однородное цветовое пространство, очевидно, еще некоторое время будет вполне удовлетворять исследователей.

Измерение цвета

7.1. Необходимость измерения цвета

Как будет ясно из дальнейшего, очень часто возникает необходимость в измерении цветов для промышленных и других целей. Конечно, создать систему, с помощью которой можно измерять такую субъективную величину, как цвет, весьма непросто. Измерения такого рода должны быть несложными, по мере возможности объективными, с достаточной степенью точности и воспроизводимостью, чтобы мы были в состоянии определять, будут ли два цвета казаться одинаковыми.

Следует подчеркнуть, что измерение цвета проводится в основном не с точки зрения восприятия. Эти измерения дают лишь отдаленное представление о виде цвета и, как пойдет речь далее в гл. 8, в ряде случаев могут привести к ошибкам.

Рассмотрим пример, из которого ясно, сколь необходимо бывает измерение цвета в промышленности. Различные части кузова автомобиля обычно производятся в разных цехах большого завода и впервые встречаются на сборочном конвейере. Ясно, что все эти части должны выглядеть по цвету совершенно одинаковыми, только тогда они будут восприниматься как единое целое. Поэтому необходимо измерять цвета всех частей кузова по отдельности, а затем сопоставлять эти измерения. Если они хорошо согласуются, то все части будут совпадать по цвету. Совсем не обязательно при этом точно знать, какой именно цвет мы будем воспринимать, глядя на автомобиль. Это зависит не только от измерений цвета, но и от цвета света, фона и ряда других факторов.

Другой пример необходимости измерения цвета в промышленности можно взять из области производства бумаги.

Для удобства чередующиеся листы блокнота поступают из разных рулонов. Глаз очень чувствителен к малейшим изменениям цвета, особенно близкого к белому. Поэтому, если не проводить тщательных измерений и не осуществлять контроля за цветом рулонов бумаги, может получиться, что следующие один за другим листы будут иметь разную окраску.

Часто при пошиве брюк разные их части выкраивают из разных кусков материи. Если вовремя не провести измерений цвета и контроль, малейшее различие в цвете между ними при сшивании немедленно выявится.

Весьма тщательный контроль за цветом необходим в пищевой промышленности. Мы привыкли, что масло имеет желтый оттенок, пиво и безалкогольные напитки — один и тот же цвет. Некоторые пищевые продукты, например рыба, могут показаться нам несвежими, если цвет их будет слегка зеленоватым, однако это может быть обусловлено просто неправильным освещением. Ясно поэтому, какое значение имеет измерение цвета осветительных ламп.

С переходом к системе магазинов самообслуживания все большее значение стал приобретать контроль за цветом упаковочных материалов. В таком магазине мы видим на полках ряд одинаково окрашенных цветных пакетов. Если они даже слегка различаются по цвету, это сразу бросится в глаза, и мы подумаем, что это связано с какими-то их свойствами или датой изготовления.

Еще один пример — контроль за цветом банок с красками; необходимо, чтобы краска из одной банки по цвету была точно такой же, что и краска из другой банки с аналогичной этикеткой.

Необходимо стандартизовать и тщательно контролировать также и цвета сигнальных огней. Даже беглый взгляд на огромное разнообразие красных цветов задних фар автомобилей и других видов транспорта сразу же убеждает нас в этом.

7.2. Принципы, лежащие в основе измерения цвета

Принцип, на котором основаны все измерения цвета, базируется на том факте, что большинство цветов можно получить путем смешения соответствующих количеств трех

основных цветов; это показал еще Томас Юнг (разд. 4.4). Измеряя количество каждого основного цвета, который используется для получения данного образца, мы получим меру цвета.

Конечно, существует безграничный выбор основных цветов. Это может быть монохроматический свет, отфильтрованный белый свет или даже цветные бумажки, подобные тем, которыми пользовался Максвелл. Правда, применение различных основных цветов требует применения разных систем классификации. На практике же используют принятую международную систему стандартизованных основных цветов, а измерения с использованием других основных цветов переводят в стандартные измерения.

Предположим, что мы хотим охарактеризовать цвет C , исходя из трех основных цветов, красного, зеленого и синего, образуемых при помощи трех проекторов с красным, зеленым и синим фильтрами (рис. 7.1). Цвет C проецируется на экран, а рядом с ним проецируется такое же пятно света, образованного смесью трех основных цветов. Будем теперь изменять интенсивность красного, зеленого и синего света до тех пор, пока световые пятна не совпадут как по цвету, так и по яркости. Предположим, что

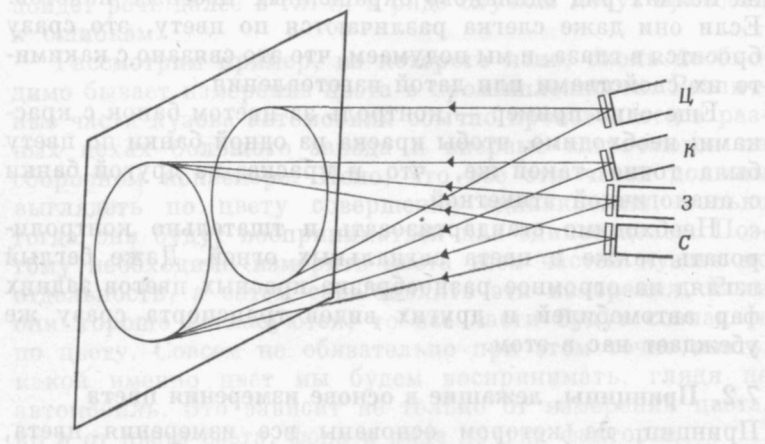


Рис. 7.1. Получение цвета, совпадающего с тестовым, путем аддитивного смешения красного, зеленого и синего света.

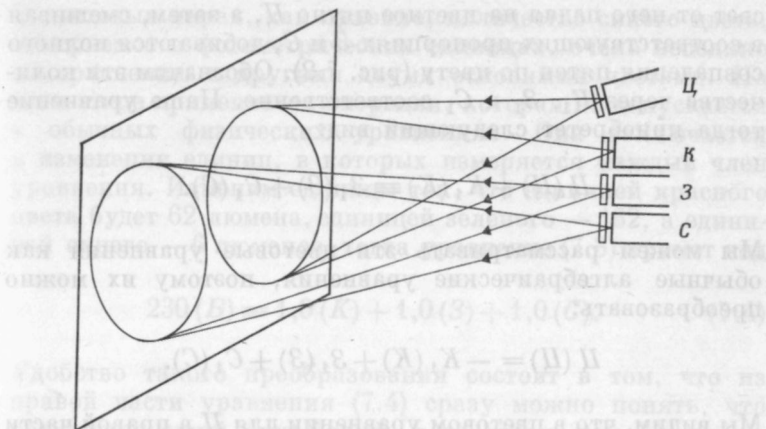


Рис. 7.2. Получение цвета, совпадающего с тестовым, путем смешения синего и зеленого с добавлением к тестовому пятну красного цвета.

у нас имеется Π люменов ¹ цвета Π и что мы получаем совпадающие цвета, когда второе пятно света образовано K люменами красного, Z люменами зеленого и C люменами синего цвета; тогда можно записать

$$\Pi(\Pi) = K(K) + Z(Z) + C(C), \quad (7.1)$$

где $\Pi(\Pi)$ означает Π люменов цвета Π , $K(K)$ — K люменов красного цвета и т. д., а знак равенства — совпадение по цвету и светлоте.

Вполне возможно (как это, например, имело место в опытах Гельмгольца), что, если Π представляет собой достаточно насыщенный сине-зеленый цвет, его не удастся воспроизвести путем аддитивного сложения красного, зеленого и синего. Любая смесь будет казаться белесой, ненасыщенной. В таком случае поступают следующим образом: расфокусируют красный проектор так, чтобы

¹ В вопросах такого рода обычно пользуются понятием светового потока (в люменах), падающего на глаз. Однако в этой книге мы часто пользуемся термином «яркость поверхности» и можем с одинаковым основанием пользоваться единицами яркости, например $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$ или любыми другими пропорциональными им единицами (см. словарь терминов).

свет от него падал на цветное пятно $Ц$, а затем, смешивая в соответствующих пропорциях $З$ и $С$, добиваются полного совпадения пятен по цвету (рис. 7.2). Обозначим эти количества через K_1 , $З_1$ и $С_1$ соответственно. Наше уравнение тогда приобретет следующий вид:

$$Ц(Ц) + K_1(K) \equiv З_1(З) + C_1(С).$$

Мы можем рассматривать эти цветовые уравнения как обычные алгебраические уравнения, поэтому их можно преобразовать:

$$Ц(Ц) = -K_1(K) + З_1(З) + C_1(С).$$

Мы видим, что в цветовом уравнении для $Ц$ в правой части содержится отрицательная величина. Именно присутствие этих отрицательных величин и озадачило Гельмгольца, поскольку три «нерва» Томаса Юнга могли давать лишь положительные сигналы. Однако, как мы видели в разд. 4.8 на примере из области металлургии, наличие отрицательных величин можно объяснить. По аналогии с этим примером путем добавления красного цвета к нашему образцу мы поступаем так же, как и при добавлении олова к латуни для того, чтобы получить одинаковые сплавы.

Цветоизмеряющие приборы удобно калибровать, подбирая с их помощью белый свет, совпадающий с тестовым белым полем. Предположим, что мы хотим получить световое пятно, совпадающее с $Б$ люменами белого цвета ($Б$); для этого мы смешиваем вместе K_B люменов красного цвета, $З_B$ люменов зеленого и $С_B$ люменов синего цвета. Наше уравнение для такого образца цвета примет следующий вид:

$$Б(Б) \equiv K_B(K) + З_B(З) + C_B(С). \quad (7.2)$$

Экспериментально измеренные в этом конкретном опыте величины будут следующими: 230 люменов белого цвета получаются при смешении 62 люменов красного, 162 люменов зеленого и 6 люменов синего цветов, т. е.

$$230(Б) \equiv 62(K) + 162(З) + 6(С). \quad (7.3)$$

В цветовых парах, как правило, количество синего цвета, измеряемое в фотометрических единицах, очень невелико по сравнению с другими двумя основными цветами. На этом этапе применяется операция, которая не допускается в обычных физических уравнениях. Она заключается в изменении единиц, в которых измеряется каждый член уравнения. Изменим единицы так, что единицей красного цвета будет 62 люмена, единицей зеленого — 162, а единицей синего — 6 люменов, тогда уравнение (7.3) примет вид

$$230 (B) \equiv 1,0 (K) + 1,0 (З) + 1,0 (C). \quad (7.4)$$

Удобство такого преобразования состоит в том, что из правой части уравнения (7.4) сразу можно понять, что результирующий свет белый, в то время как, глядя на уравнение (7.3), можно подумать, что он довольно насыщенный желто-зеленый.

Уравнение (7.4) по-прежнему отражает содержание определенного количества люменов белого света; однако на данном этапе удобно отделить цвет от его яркости, так как более высокая или низкая яркость одного и того же цвета будет просто означать разные коэффициенты при (K) , $(З)$ и (C) с сохранением соотношения между ними. Цвет определяется именно соотношением между этими коэффициентами. Цвет и яркость разделяют путем деления левой части уравнения (7.4) на 230, а правой части — на сумму коэффициентов, т. е. на 3,0. Таким образом, мы получаем

$$1,0 (B) \equiv 0,333 (K) + 0,333 (З) + 0,333 (C). \quad (7.5)$$

Это уравнение известно как единичное трихроматическое уравнение, а единица (B) известна как 1 трихроматическая единица, или 1 Т-единица.

Возвращаясь теперь к алгебраической стороне уравнений (7.1) и (7.2), мы можем выразить уравнение (7.1) в единицах уравнения (7.2) следующим образом:

$$Ц (Ц) \equiv \frac{K}{K_B} (K) + \frac{З}{З_B} (З) + \frac{C}{C_B} (C),$$

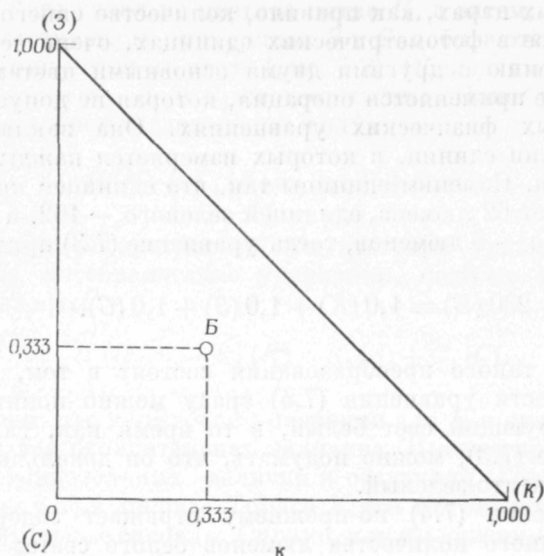


Рис. 7.3. «Красно-зеленая» диаграмма цветности.

а если обе части уравнения разделить на сумму коэффициентов, получим

$$\begin{aligned}
 1,0(I) \equiv & \frac{K/K_B}{(K/K_B) + (3/3_B) + (C/C_B)} (K) + \\
 & + \frac{3/3_B}{(K/K_B) + (3/3_B) + (C/C_B)} (3) + \\
 & + \frac{C/C_B}{(K/K_B) + (3/3_B) + (C/C_B)} (C). \quad (7.6)
 \end{aligned}$$

Это уравнение выражает в общем виде все операции, которые мы проделали, чтобы получить уравнение (7.5). Теперь можно переписать уравнение (7.6) в виде

$$1,0(I) \equiv \kappa(K) + 3(3) + c(C), \quad (7.7)$$

где $\kappa + 3 + c = 1$.

Коэффициенты κ , 3 и c известны как координаты цветности. Поскольку сумма их равна единице, доста-

точно определить лишь две из них. Так, если κ и z известны, то $c = 1 - (\kappa + z)$. Это позволяет использовать более удобное графическое изображение цвета, чем равнобедренный треугольник Максвелла (рис. 4.8). На практике пользуются обычной декартовой ортогональной системой координат и откладывают по осям только две величины, например κ и z (рис. 7.3). Чистый красный цвет соответствует $\kappa = 1,0; z = 0,0$; зеленый — $\kappa = 0; z = 1,0$ а синий — $\kappa = z = 0$. Белому цвету соответствуют координаты $\kappa = z = 0,333$. Такая цветовая карта называется диаграммой цветности. В ее рамки вписывается закон центра сил тяжести, предложенный Максвеллом (разд. 4.10), и аддитивные смеси двух цветов лежат на прямой линии, соединяющей их. Линия $(K)(Z)$ является геометрическим местом точек, для которых $\kappa + z = 1$, или $c = 0$. На ней лежат насыщенный зеленовато-желтый, желтый и оранжевый цвета. Аналогично этому прямая $(C)(Z)$, где $\kappa = 0$, является геометрическим местом точек сине-зеленых цветов, а прямая $(C)(K)$, где $z = 0$, — геометрическим местом точек пурпурных цветов.

7.3. Применение монохроматических основных и тестовых цветов

Хотя в практическом отношении это и не самый легкий путь, но теоретически проще всего создать систему измерения цветов на основе применения монохроматических основных и тестовых цветов. Они представляют собой наиболее насыщенные из существующих цветов и поэтому расположены на границах цветовой карты.

Если в качестве основных цветов — красного, зеленого и синего — использовать монохроматический свет с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм, то путем аддитивного их смешения можно получить свет любой длины волны из всей видимой области спектра. На рис. 7.4 представлены кривые, точки пересечения с которыми перпендикуляра, опущенного на ось абсцисс в заданную точку λ , дают число люменов каждого основного цвета, необходимое для получения света мощностью 1 Вт с длиной волны λ . Если мы изменим единицы измерения, разделив все ординаты каждой кривой на площадь под ней,

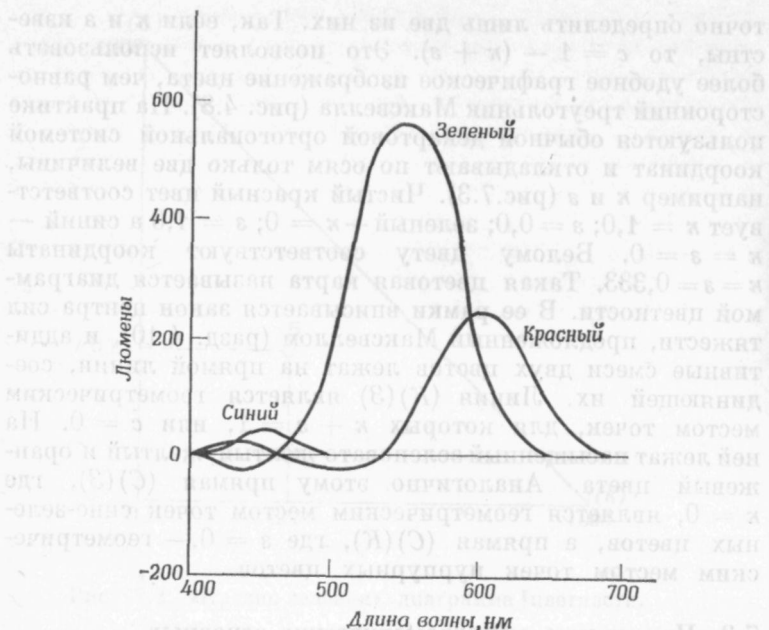


Рис. 7.4. Число люменов трех монохроматических основных цветов, дающих при смешении свет соответствующих длин волн.

то получим кривые, интегралы для которых являются энергетическими коэффициентами при основных цветах, соответствующими цвету, неотличимому от равноэнергетического белого. Такое изменение единиц равнозначно получению уравнения (7.4); в результате мы имеем кривые, изображенные на рис. 7.5. Ординаты их известны как спектральные трехстимульные величины. Точки пересечения перпендикуляров, опущенных на ось абсцисс в каждую точку λ , дают относительные величины цветности λ . При делении этих величин на их сумму получаются истинные координаты цветности. Эти координаты можно нанести на нашу диаграмму, в результате чего получится подковообразная кривая, которая называется цветовым треугольником (рис. 7.6). На линии, соединяющей красный и синий концы, находятся насыщенные пурпурные цвета,

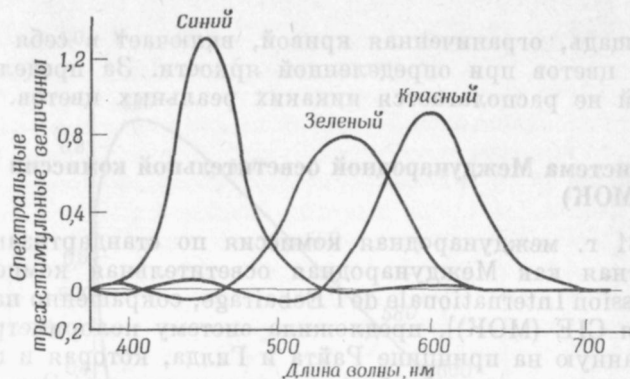


Рис. 7.5. Спектральные трехстимульные величины.

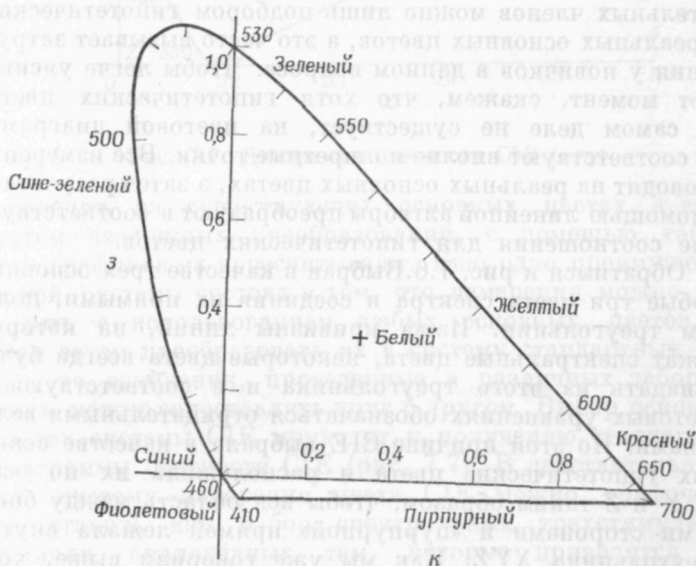


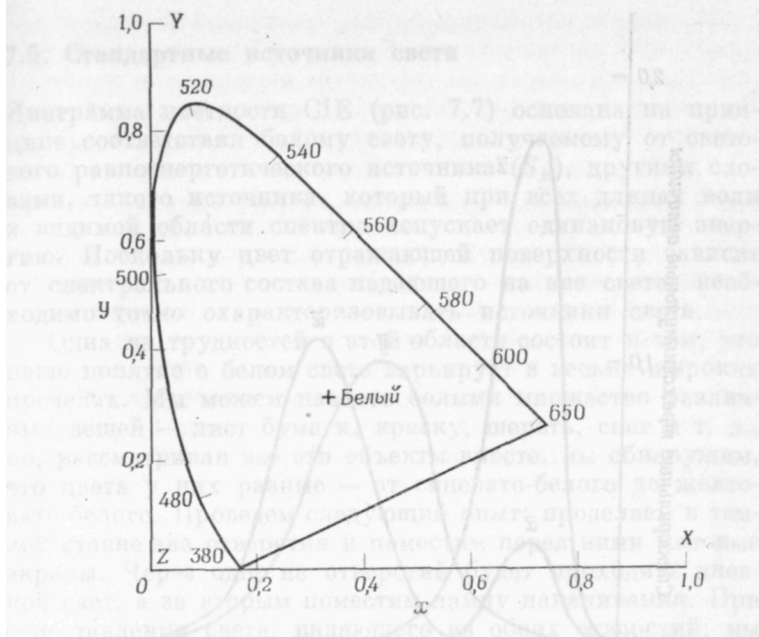
Рис. 7.6. Цветовой треугольник на «красно-зеленой» диаграмме цветности. Числа по сторонам треугольника — длины волн в нм соответствующего монохроматического света.

а площадь, ограниченная кривой, включает в себя всю гамму цветов при определенной яркости. За пределами кривой не располагается никаких реальных цветов.

7.4. Система Международной осветительной комиссии CIE (МОК)

В 1931 г. международная комиссия по стандартизации, известная как Международная осветительная комиссия [Commission Internationale de l'Eclairage, сокращенно называемая CIE (МОК)], предложила систему колориметрии, основанную на принципе Райта и Гилда, которая и применяется с тех пор с небольшими изменениями. Эта система имеет ряд преимуществ; одно из них, наиболее важное, состоит в том, что в цветовых уравнениях отсутствуют отрицательные члены, что значительно уменьшает число ошибок при записи таких уравнений. Избавиться от отрицательных членов можно лишь подбором гипотетических, нереальных основных цветов, а это часто вызывает затруднения у новичков в данном вопросе. Чтобы легче уяснить этот момент, скажем, что хотя гипотетических цветов на самом деле не существует, на цветовой диаграмме им соответствуют вполне конкретные точки. Все измерения проводят на реальных основных цветах, а затем результаты с помощью линейной алгебры преобразуют в соответствующие соотношения для гипотетических цветов.

Обратимся к рис. 7.6. Выбрав в качестве трех основных любые три цвета спектра и соединив их прямыми, получим треугольник. Из-за кривизны линий, на которых лежат спектральные цвета, некоторые цвета всегда будут выпадать из этого треугольника и в соответствующих цветовых уравнениях обозначаться отрицательными величинами. По этой причине CIE выбрала в качестве основных гипотетические цвета и расположила их по осям X , Y и Z таким образом, чтобы вся область между боковыми сторонами и «пурпурной» прямой лежала внутри треугольника XYZ . Как мы уже говорили выше, хотя эти основные цвета в природе не существуют и их нельзя получить никаким способом, преобразование к ним измерений, выполненных на основе реальных цветов, — делом линейной алгебры. Поэтому измерения цвета

Рис. 7.7. Диаграмма цветности CIE (x , y).

проводят на существующих основных цветах, а затем путем несложных преобразований, с помощью таблиц или графиков их пересчитывают. Еще одно преимущество такой системы состоит в том, что измерения можно проводить с использованием любых основных цветов, но если затем преобразовать их в систему стандартных цветов, то измерения, проведенные в различных лабораториях, можно сопоставлять друг с другом. Выбор основных цветов системы CIE приводит к получению стандартной диаграммы цветности CIE (рис. 7.7). В действительности всю систему измерения цвета CIE можно графически представить как набор спектральных трехстимульных величин, аналогичных тем, которые приводятся для реальных основных цветов на рис. 7.5. Это сделано на рис. 7.8. Точки пересечения перпендикуляров, опущенных на ось абсцисс в точку λ , с тремя кривыми дают относительные величины X , Y и Z основных цветов,

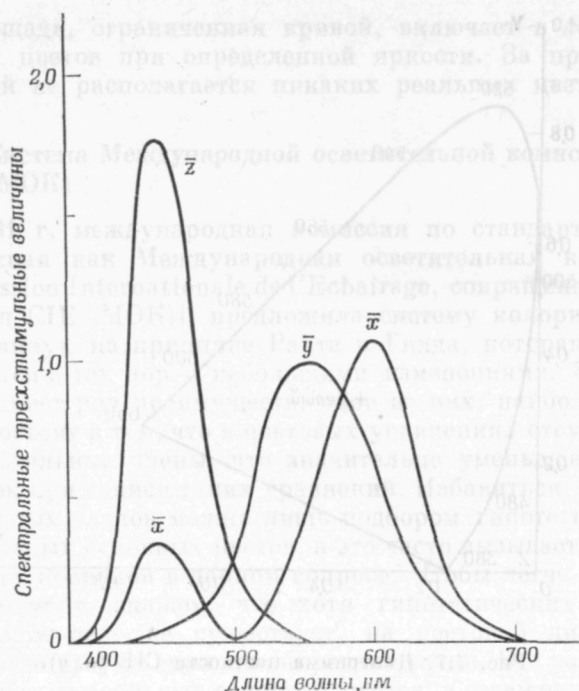


Рис. 7.8. Спектральные трехстимульные величины СIE.

которые необходимы для получения подходящего света с этой длиной волны. Они называются спектральными трехстимульными величинами СIE $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$, а частное от деления этих величин на их сумму будет давать координаты цветности СIE для спектральных цветов, обозначаемые буквами x , y и z . Первым, кто использовал эти символы для цветовых уравнений, был Максвелл, хотя у него ими обозначались реальные основные цвета. В работе, опубликованной в 1860 г., где он описал свой цветовой ящик, он обозначал символами X , Y и Z щели, которые находились в красной, зеленой и синей областях спектра. Обозначения x , y и z он применял для соответствующих величин в своих цветовых уравнениях.

7.5. Стандартные источники света

Диаграмма цветности CIE (рис. 7.7) основана на принципе соответствия белому свету, получаемому от светового равноэнергетического источника (S_E), другими словами, такого источника, который при всех длинах волн в видимой области спектра испускает одинаковую энергию. Поскольку цвет отражающей поверхности зависит от спектрального состава падающего на нее света, необходимо точно охарактеризовывать источники света.

Одна из трудностей в этой области состоит в том, что наше понятие о белом свете варьирует в весьма широких пределах. Мы можем назвать белыми множество различных вещей — лист бумаги, краску, шерсть, снег и т. д., но, рассматривая все эти объекты вместе, мы обнаружим, что цвета у них разные — от синевато-белого до желтовато-белого. Проведем следующий опыт: проделаем в темной ставне два отверстия и поместим перед ними матовые экраны. Через одно из отверстий будет проходить дневной свет, а за вторым поместим лампу накаливания. При сопоставлении света, падающего из обоих отверстий, мы не сможем назвать белым ни один из них: дневной свет будет казаться голубым, а свет от лампы — желтым. Качество «белого» цвета значительно колеблется в зависимости от времени дня: рано утром и поздно вечером он кажется красноватым, а днем — голубоватым. Цвет зависит также и от того, присутствует ли при этом прямой солнечный свет, поскольку он по сравнению с голубым цветом неба воспринимается как желтый. В силу всех этих причин в системе CIE принято несколько стандартных источников белого цвета.

Стандартный источник света A (S_A) — это обычная лампа накаливания. Он представляет собой наполненную газом лампу с вольфрамовой нитью, накаливаемой до цветовой температуры (см. словарь терминов) 2856 К. Два других стандартных источника света, B и C (S_B и S_C), представляют собой солнечный свет и дневной свет затянутого облаками неба. На практике таким стандартным источником является источник света с жидкими цветными фильтрами определенного состава и толщины,

Излучение источников S_B и S_C «обеднено» синим цветом, и поэтому в последнее время были подобраны другие источники дневного света. В частности, им является источник D_{65} , который дает дневной свет, по цветности аналогичный источнику с цветовой температурой 6500 К.

7.6. Доминирующая длина волны и спектральная чистота

Если не очень хорошо ориентироваться в диаграммах цветности, то довольно трудно зрительно представить себе цвет, имея его характеристики x , y . В то же время большинство людей представляют себе цвет монохроматического света, если дана его длина волны λ . Поэтому, как правило, характеризуют положение цвета на диаграмме цветности доминирующей длиной волны λ и спектральной чистотой p . Так, если мы хотим определить на рис. 7.9 положение цвета C , нужно провести линию BC

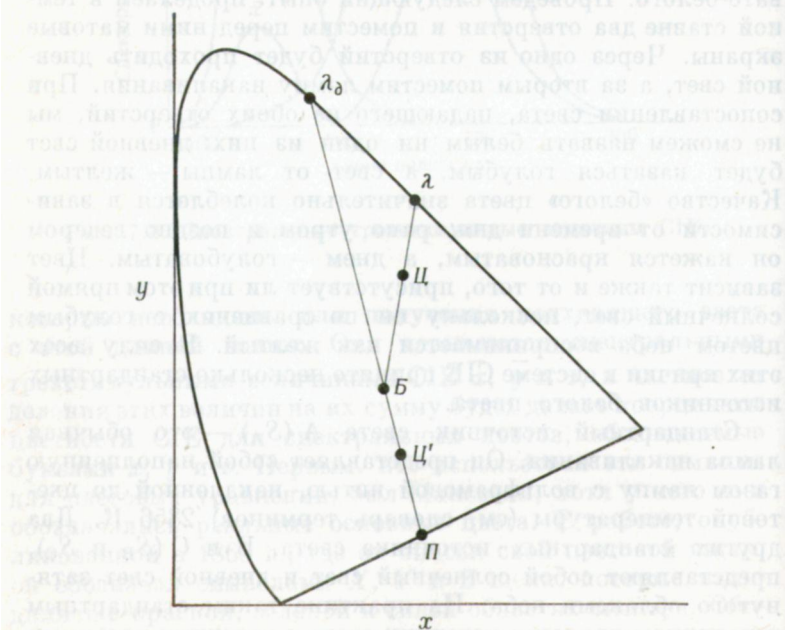


Рис. 7.9. Доминирующая длина волны и монохроматичность.

от «белой» точки (B) и продолжить ее до пересечения со стороной треугольника (точка λ). Так как λ , C и B лежат на одной прямой, можно получить совпадающий с C цвет путем смешения соответствующих количеств монохроматического излучения λ и белого цвета B . Количество каждого из них зависит от положения C на этой прямой. λ называется доминирующей длиной волны, а отношение $BC/B\lambda$ называется спектральной чистотой p . Таким образом, нулевая чистота означает, что цвет белый, а чистота, равная единице, соответствует какому-либо полностью насыщенному цвету. Спектральная чистота (объективное понятие) связана, таким образом, с насыщенностью (субъективное понятие).

Пурпурный цвет, например C' (рис. 7.9), не имеет доминирующей длины волны, поскольку линия BC' при продолжении пересекается не с боковой стороной треугольника, а с прямой, ограничивающей пурпурные цвета (в точке P). В этом случае продолжают линию $C'B$ в другую сторону, до пересечения ее с цветовым треугольником в точке λ_θ . Длина волны λ_θ называется дополнительной¹ к длине волны точки C' ; другими словами, при сложении в соответствующих пропорциях света с λ_θ и C' мы получим белый цвет B . Чистота в этом случае определяется отношением BC'/BP .

7.7. Простые цвета на диаграмме цветности

Интересно посмотреть, куда на диаграмме цветности попадают обычные, существующие в природе цвета; положение некоторых из них показано на рис. 7.10. Обратите внимание на сдвиг цвета помидора по мере его созревания.

7.8. Однородная диаграмма цветности

Показано, что чувствительность глаза к изменениям цвета в различных участках цветовой диаграммы неодинакова, в частности в зеленой области довольно значи-

¹ Два цвета называются дополнительными, если при смешении дают белый свет.

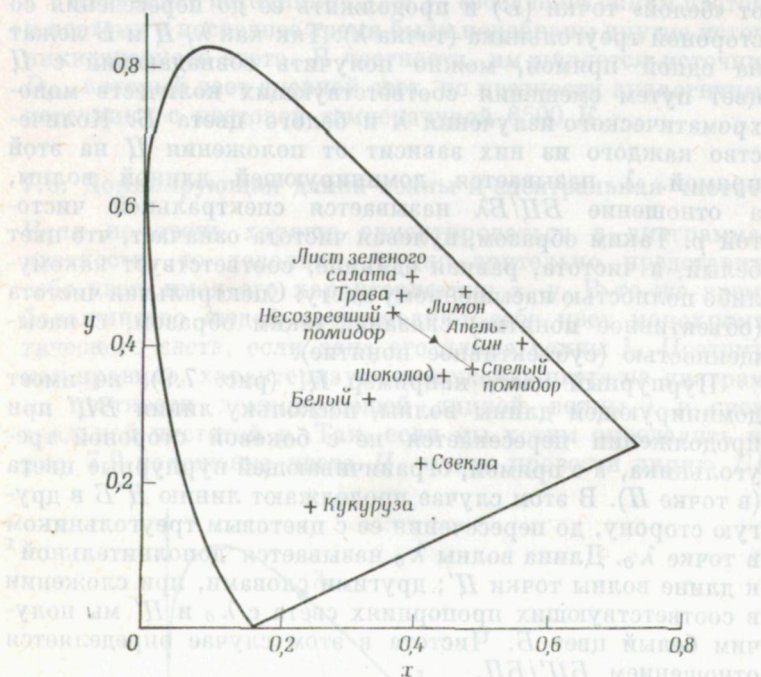


Рис. 7.10. Положение некоторых существующих в природе цветов на диаграмме цветности CIE (x , y).

тельные перемещения соответствуют небольшим изменениям в восприятии. Чтобы исправить это положение, можно изменить форму диаграммы так, чтобы равные расстояния на ней более точно соответствовали равным изменениям в восприятии. Для этого переходят в другую систему координат — u , v и w , которые связаны с x , y и z следующими соотношениями:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3},$$

$$v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3},$$

$$w = \frac{3y - 3x + 1,5}{6y - x + 1,5}.$$



Рис. 7.11. Цвета, представленные на рис. 7.10, на диаграмме CIE (u , v).

Эти координаты были предложены Мак-Адамом в 1937 г. и в 1960 г. приняты CIE. Диаграмма на рис. 7.10 в новых координатах u и w принимает вид, представленный на рис. 7.11. Она называется однородной диаграммой цветности CIE. Обе диаграммы в настоящее время нашли широкое применение (разд. 6.8.1).

7.9. Визуальные колориметры

Несмотря на то что сейчас имеются автоматические фотоэлектрические приборы, визуальные колориметры по-прежнему применяются очень широко. Связано это с тем, что автоматические колориметры гораздо более сложные и дорогие приборы, для работы на них требуются определенные навыки. Визуальные колориметры весьма надежны в работе, но измерения занимают больше времени. Кроме того, на них не могут работать люди с дефектами цветового зрения.

7.9.1. Простой колориметр с фильтрами

Для измерений, не требующих большой точности, можно сконструировать очень простой колориметр, работающий на фильтрах с основными цветами (рис. 7.12).

Прибор состоит из зеркальных ящиков, в одном из которых смешивается свет разных цветов. Длина ящиков должна быть по крайней мере вдвое больше диагонали торцевой стенки, которая изготавливается из молочного или матового стекла или из молочной пластмассы. Поступающий внутрь свет из-за многократного отражения от зеркальных стенок хорошо перемешивается и практически не теряется. Свет лампы поступает в большой зеркальный ящик, равномерно освещая заднюю удаленную стенку. Часть света затем проходит через фильтр, цвет которого хотят определить, и далее — в одну из половин двойного зеркального ящика. Другая часть света проходит через красный, зеленый и синий фильтры, имеющие одинаковые размеры и снабженные подвижными заслонками. Цвет, видимый с противоположного конца ящика, представляет собой аддитивную смесь трех основных цветов; заслонки юстируют до тех пор, пока обе половины торцевой стенки двойного зеркального ящика не совпадут по яркости и цвету. Скользящие заслонки снабжены линейной шкалой, которая регистрирует длину, а следовательно, и площадь экспонированной части каждого фильтра. Таким способом легко определить содержание красного, зеленого и синего цветов в любой смеси. Для уравнивания яркостей иногда приходится помещать скользящую заслонку поверх тестового фильтра. Такой простой по конструкции колориметр можно приспособить для измерения цвета отражающих поверхностей и последовательных образов (разд. 9.4).

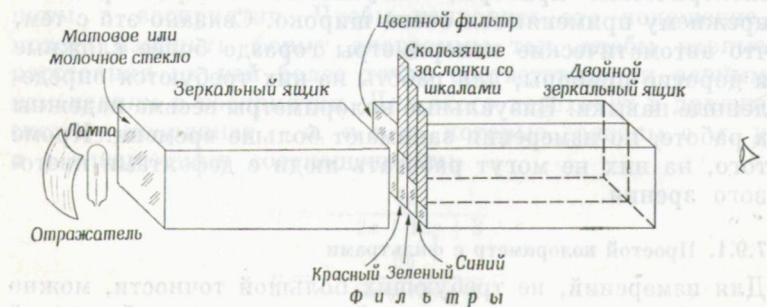


Рис. 7.12. Простой колориметр с фильтрами.

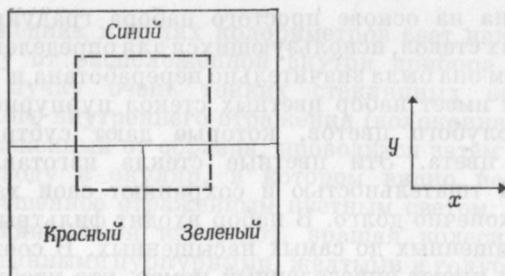


Рис. 7.13. Колориметрическая установка Бэрнема.

Если мы хотим, чтобы было только две переменные, определяющие соотношение цветов, а не три, можно использовать колориметр конструкции Бэрнема. В нем применяется такой же ящик с зеркальными стенками, но система фильтров здесь другая (она показана на рис. 7.13). Фиксированная прямоугольная рамка, обозначенная пунктирной линией, устанавливается таким образом, чтобы ее отверстие совпадало с одним из торцов зеркального ящика, а вся система фильтров передвигается в двух направлениях. Смещение вправо изменяет соотношение между красным и зеленым цветами, в то время как «синий» компонент остается без изменений. Поскольку зеленый и красный цвета при сложении дают желтый, смещение вверх (в направлении y) изменяет соотношение между синим и желтым, оставляя неизменным соотношение между красным и зеленым цветами. Можно считать, что этот колориметр действует по оппонентному принципу, поскольку перемещения в направлениях x и y дают отдельные ответные реакции красно-зеленых и желто-синих оппонентных зрительных механизмов. Для определения соотношений цветов в смеси по осям x и y имеются специальные шкалы.

7.9.2. Колориметр Ловибонда

В настоящее время широко используется превосходный фирменный визуальный колориметр Ловибонда, который действует по субтрактивному принципу. Система была

разработана на основе простого набора градуированных коричневых стекол, использующихся для определения цвета пива. Затем она была значительно переработана и в настоящее время имеет набор цветных стекол пурпурного, желтого и голубого цветов, которые дают субтрактивные основные цвета. Эти цветные стекла изготавливаются с большой тщательностью и сохраняют свои характеристики бесконечно долго. В набор входят фильтры от очень слабо окрашенных до самых насыщенных. В соответствии с этим они имеют определенный номер, что удобно в двух отношениях: во-первых, номера аддитивны, т. е. если используется одновременно несколько фильтров, сумма их номеров будет соответствовать тому же цвету, что и один фильтр с тем же номером; во-вторых, они расположены так, чтобы равные количества пурпурного, желтого и голубого цветов при освещении давали цвет, неотличимый от белого. Эта система позволяет получать цвета, совпадающие с тестовым как по цвету, так и по яркости.

Часто, однако, оказывается более удобным использовать одновременно только два различных типа цветных фильтров и изменять отдельно яркость. Этот метод лежит в основе современных приборов и облегчает переход единиц цвета Ловибонда в координаты цветности CIE.

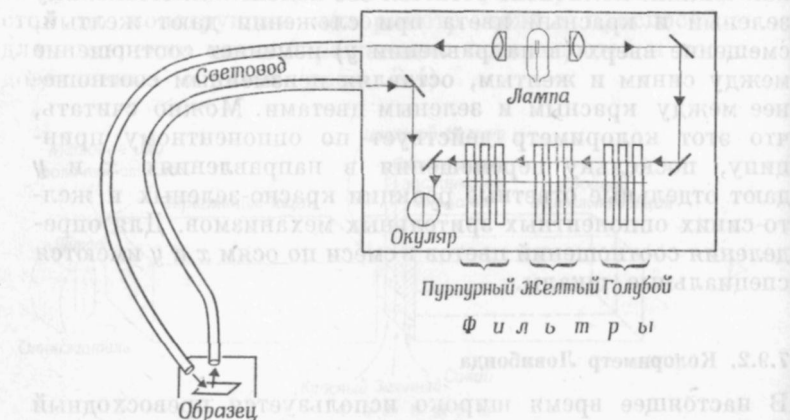


Рис. 7.14. Оптическая схема колориметра Ловибонда.

В последних моделях колориметров свет направляется к образцу от расположенной внутри прибора лампы по гибкому пучку очень тонких стеклянных волокон за счет полного внутреннего отражения (волоконная оптика). Свет, отраженный от образца, проводится затем по такому же световоду в окуляр, в котором видно полукруглое поле, освещенное отраженным цветным светом. Цвет другой половины поля изменяют, вращая колесики с проградуированными пурпурными, желтыми и голубыми фильтрами до тех пор, пока цвета обеих половин не совпадут (рис. 7.14).

Измерения на визуальном колориметре занимают не очень много времени, однако для работы на нем нужны определенные навыки и, кроме того, на нем не могут работать люди с дефектом цветового зрения. К достоинствам прибора следует отнести то, что он сравнительно дешев, чрезвычайно удобен и стабилен.

7.10. Фотоэлектрические колориметры

Современные приборы стараются конструировать так, чтобы вместо глаза использовались фотоэлектрические элементы; такие элементы должны реагировать на различные области спектра точно так же, как и обычный человеческий глаз. Эти устройства облегчают работу исследователя и незаменимы в тех случаях, когда требуется автоматический контроль цвета, например при изготовлении красок. К сожалению, не всегда принимается во внимание то, что поскольку мы используем фотоэлектрические элементы вместо глаза, они должны быть прокалиброваны с помощью визуальных наблюдений. Поэтому получаемые данные не могут быть точнее, чем показания визуальных приборов. Тем не менее на самом деле измерения с помощью фотоэлектрических приборов обладают большей точностью в том смысле, что разброс данных в среднем меньше, чем при зрительных измерениях. Средние показания у них, однако, по-видимому, совпадают, т. е. с этой точки зрения точность у них одинаковая. В любом случае для получения достоверного среднего значения необходимо провести ряд повторных наблюдений с помощью зрительного прибора, а это сопряжено с затратами времени.

7.10.1. Фотоэлектрический отражательный колориметр

Этот колориметр представляет собой недорогой прибор, обладающий достаточной степенью точности и позволяющий быстро определять цвета отражающих свет образцов. Он состоит из небольшой измерительной насадки с вмонтированным в нее источником света и отдельного измерительного блока с гальванометром, а также снабжен источником питания для источника света.

Насадка (рис. 7.15) состоит из лампочки L , свет которой проходит через коллимационную линзу K и фильтр в колесике Φ , а затем под углом 45° падает на образец O . Свет, отраженный от образца, попадает на фотоэлектрический элемент $\PhiЭ$, сигнал на выходе которого измеряется гальванометром. Колесико с фильтрами Φ содержит красные, зеленые и синие фильтры, соответствующие цветовым функциям X , Y и Z в системе CIE. Координаты цветности CIE образца можно быстро определить с помощью трех простых измерений отражения. Сначала, вращая колесико, устанавливают в определенном положении X -фильтр, а свет от лампы направляют на стандартную белую поверхность, которая представляет собой только что очищенную поверхность блока из углекислого магния. Контроль чувствительности на гальванометре устанавливают на отметку 100. Затем свет направляют на подлежащую измерению окрашенную поверхность и фикси-

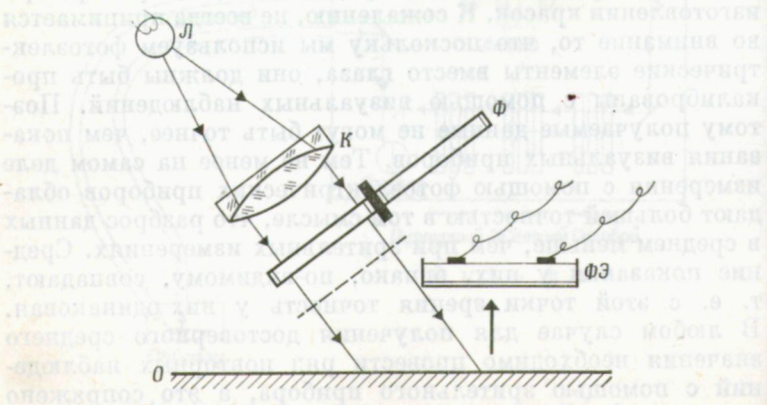


Рис. 7.15. Отражательный колориметр.

руют показание гальванометра R_x . Ту же операцию проводят с фильтрами Y и Z , устанавливая показания гальванометра при освещении стандартной белой поверхности на отметки 90,8 и 32,3 соответственно и отмечая значения R_y и R_z . Используя следующие равенства, находят координаты цветности в системе CIE:

$$x = \frac{R_x}{\sum R}, \quad y = \frac{R_y}{\sum R} \quad \text{и} \quad z = \frac{R_z}{\sum R},$$

где $\sum R = R_x + R_y + R_z$.

Поясним ход измерений. Лампа накаливания, применяемая в этом приборе, работает при цветовой температуре, равной 2856 К, и является стандартным источником света А по системе CIE. Координаты цветности источника следующие: $x = 0,448$, $y = 0,407$ и $z = 0,145$. Три фильтра X , Y и Z в совокупности с фотоэлементом дают цветные функции x , y и z по системе CIE. Поскольку стандартный образец из углекислого магния приблизительно нейтрален по цвету (коэффициент отражения его одинаков для всех длин волн), его цветные координаты должны быть равными координатам источника света, т. е. стандартного источника света А. Для этого устанавливают показания гальванометра для белого цвета на отметки, относящиеся между собой как 100 : 90,8 : 32,3, что равно отношению координат цветности источника света А — 0,448 : 0,407 : 0,145.

Так как показания, полученные при помощи фильтров, всегда пропорциональны трехстимульным величинам, такой ход измерения гарантирует, что правильные цветности получаются для всех других цветов. Отражательную способность образца измеряют с помощью одного Y -фильтра, причем сначала устанавливают показание гальванометра при освещении белой поверхности на 97,3 (97,3 — процент отражения белого стандартного образца в свете, создаваемом источником А). Затем свет от лампы направляют на опытный образец, и гальванометр регистрирует непосредственно его коэффициент отражения. Такой ход измерений обоснован, поскольку светлота образца в системе CIE целиком представлена функцией цвета $\bar{y}$. Функции $\bar{x}$ и $\bar{y}$ указывают лишь на содержание цвета в образце, а не на его светлоту.

Существует ряд более сложных и более точных приборов, использующих в своей основе такие же цветные фильтры и фотоэлектрические элементы. Хотя конструкция этих приборов на первый взгляд проста, сделать их довольно сложно; связано это с трудностями изготовления цветных фильтров с точным значением поглощения.

Некоторые фирменные приборы измеряют только небольшие различия в цвете стандартных цветных образцов применительно к конкретным требованиям промышленности. Такие приборы называются счетчиками цветовых различий. Они точнее, чем абсолютные колориметры. Это связано с тем, что стандартный и исследуемый образцы должны минимально отличаться друг от друга по цвету, т. е. прибор должен «чувствовать» очень небольшие различия. Даже такая погрешность прибора, как $\pm 10\%$, означает очень маленькую разницу в цвете, в то время как при абсолютных измерениях цвета это существенная погрешность.

7.10.2. Спектральный колориметр с рамкой

Для преодоления трудностей, связанных с изготовлением точных цветных фильтров, был разработан весьма оригинальный метод. Он основывается на том, что спектр, полученный после прохождения света от образца через

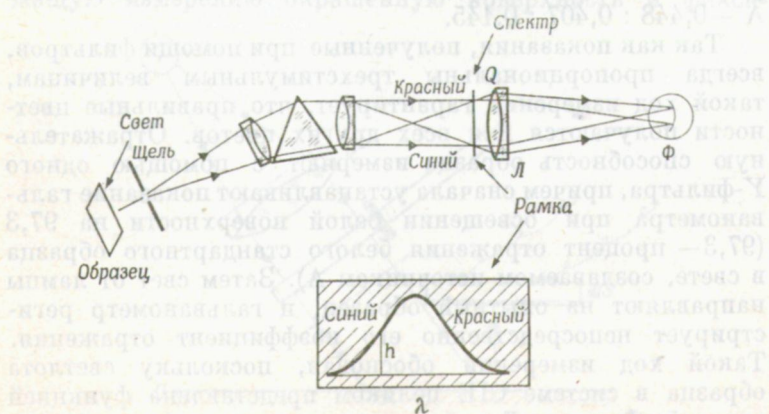


Рис. 7.16. Спектральный колориметр с рамкой.

призму, можно в нужных местах ослабить с помощью рамки. Такая система изображена на рис. 7.16. Свет от образца пропускается через щель и разлагается в спектр в плоскости Q с помощью призмы. Затем свет вновь собирается линзой L и падает на фотоэлемент Φ . В плоскости спектра помещается металлическая рамка, в которой вырезан клин. Пропускание системы при любой длине волны λ определяется высотой h , соответствующей вырезанной секции рамки. Эта величина может быть рассчитана для каждой длины волны по сигналу на выходе фотоэлемента по мере продвижения щели вдоль спектра или установлением щели на определенной высоте; эту высоту можно изменять до получения необходимого сигнала на выходе при выбранной длине волны.

Можно вырезать три отдельные рамки, чтобы сигнал, поступающий от фотоэлемента, соответствовал трем функциям $\bar{x}$, $\bar{y}$ и $\bar{z}$ в системе СИЕ. Практически же это сделать не так легко, поскольку спектр обычно бывает очень мал, и поэтому при вырезании и наложении рамки нужна высокая точность. Однако, если опыты не требуют точных измерений, сделать такой прибор совсем несложно. Для наиболее подготовленных студентов это оказалось бы весьма полезным занятием.

Восприятие цвета

8.1. Неадекватность результатов измерения цвета

Как мы уже говорили в гл. 7, в промышленности часто возникает потребность в измерении цвета. Цель обычно состоит в том, чтобы заранее определить, будут ли два цвета казаться совершенно одинаковыми при помещении их рядом друг с другом при стандартных условиях освещения и восприятия. Хотя мы, исходя из координат цветности CIE, и можем судить о том, каковы будут оттенок и насыщенность цвета, наше предсказание будет лишь приблизительным; в определенных условиях оно может оказаться далеким от истины. Другими словами, результат измерения цвета — не очень надежный показатель того, каким будет представляться тот или иной цвет, т. е. каким будет его действительное восприятие.

8.2. Субъективное восприятие цвета

Восприятие цвета зависит от ряда факторов, которые мы рассмотрим по отдельности. Прежде всего оно зависит от уровня освещенности. При очень низкой освещенности у нас нет цветового зрения, так как палочки в сетчатке нашего глаза нечувствительны к цвету. С повышением освещенности в процесс вовлекаются колбочки. Естественно, при большем количестве света рецепторы подают более интенсивные сигналы, и в частности сигналы цветоразличения в нашем мозгу становятся сильнее. Видимое разнообразие и яркость окраски предметов в летний солнечный день и тусклость тех же самых предметов, наблюдаемых в серый зимний день, хорошо известны. Мы также

хорошо знаем, что насыщенность, т. е. видимая степень хроматичности, цвета красных сигнальных огней и неоновых реклам намного больше, чем насыщенность окраски кусочков бумаги того же цветового тона: они, конечно, всегда создают на сетчатке гораздо меньшую освещенность.

Еще один фактор — величина цветного поля. В очень небольшом поле восприятие синего цвета исчезает. Это можно продемонстрировать с помощью сине-желтой фигуры на фото 11, если сначала смотреть на него вблизи, а затем постепенно отдаляться от него. Уже на расстоянии около 1 м восприятие синего начнет исчезать. Это происходит при видимой угловой величине объекта около 20'. Такой эффект известен как тританопия малого поля (см. разд. 10.3.1).

Следующий фактор — яркость фона. Если рассматривать фото 12 с нормального расстояния, легко заметить, что одинаковые цветные квадраты выглядят по-разному в зависимости от того, светлым или темным фоном они окружены. Черный фон усиливает яркость цветных полей, так что они выглядят более светлыми (см. разд. 3.9.2.), но в то же время несколько ослабляет цвет: квадратики кажутся менее насыщенными. Это, несомненно, вызвано раздражением рецепторов в той части сетчатки, которая окружает точку фиксации и которая передает информацию в область центральной ямки. С помощью электронного микроскопа выявлено огромное количество горизонтальных связей в нейронных слоях сетчатки; они, вероятно, и служат физиологической основой взаимодействий, происходящих при восприятии цвета.

Влияние светлого и темного фона может быть хорошо продемонстрировано при помощи цветных фильтров, укрепляемых на ярко освещенном матовом стекле. Здесь эти эффекты будут выражены еще сильнее, чем при более низкой освещенности, которую можно получить, используя отражающую поверхность бумаги. Это имеет и практическое применение. Можно существенно расширить гамму цветовосприятия, если смотреть цветную телевизионную передачу не в затемненном помещении, а при свете (слегка усилив яркость изображения). Результат оказывается противоположным тому, чего на первый взгляд можно было бы ожидать.

Следующий эффект связан с цветом окружающего фона. На фото 13 представлены квадраты одного и того же цвета на желтом и синем фоне. Изменение в цвете поразительно, и обусловлено оно тоже горизонтальными связями в сетчатке, передающими информацию о цвете в соседние цветовые каналы. Этот эффект известен как одновременный цветовой контраст. Однако самые удивительные эффекты дают сложные цветные узоры. На фото 14 изображен узор С. Хэрри; он образован только тремя цветами, но сложные взаимодействия способствуют разнообразию цветового восприятия. При изменении расстояния от глаз эффект меняется. По мере удаления рисунка цветные участки изображения на сетчатке сближаются. Это приводит к более сильному взаимодействию и, таким образом, к большей модификации воспринимаемых цветов. Если рассматривать рисунок с очень близкого расстояния, эти эффекты в значительной мере исчезают; становится очевидно, что здесь всего лишь три основных цвета.

Еще один интересный оптический феномен наблюдается при рассматривании на некотором расстоянии фото 15. Рисунок состоит из чередующихся красных и синих полос. Если отойти так далеко, что полосы будут неразличимы (на расстоянии 5 или более метров), вся цветная область, как и следовало ожидать, будет казаться фиолетовой. Однако фиолетовый цвет будет в некоторой степени виден и с более близкого расстояния, когда можно уже различить синие и красные полосы. Это происходит потому, что у нормальных людей обычно имеет место значительная миопия в отношении синего цвета из-за нескорректированной хроматической аберрации глаза. Поэтому, в то время как красный свет фокусируется на сетчатке или совсем близко к ней, синий свет фокусируется на значительном расстоянии впереди нее. В результате на сетчатке образуется большое расплывчатое синее изображение, которое накладывается на красное изображение, и это приводит к восприятию фиолетового цвета.

На фото 16 представлен еще один такой пример. На каждой горизонтальной полосе цветовой фон по всей ее длине одинаков, но при наложении на него ажурного черного узора он кажется темнее, а при наложении белого узора — светлее. Этот эффект противоположен тому, кото-

рый возникает под влиянием светлого или темного фона. Он известен как эффект распространения Бецольда, так как бо́льшая яркость ажурного узора как бы распространяется на фон.

Эти эффекты могут иметь практическое значение, как показал, например, С. Хэрри на составленных им узорах для ковров. При некоторых обстоятельствах может, скажем, понадобиться использовать шерсть *разных* оттенков там, где цвета должны казаться *одинаковыми*. При надлежащей изобретательности можно также получить большое разнообразие кажущихся оттенков с помощью ограниченного числа действительных цветов.

В эксперименте с цветными тенями, который нетрудно осуществить, выявляется еще один поразительный эффект восприятия цвета. Схема такого эксперимента показана на рис. 8.1. Два проектора располагаются таким образом, что на белый экран проецируются два перекрывающихся световых пятна. Одно из них окрашивают в красный цвет, помещая перед линзой проектора красный фильтр. На пути лучей света от обоих проекторов ставят непрозрачную

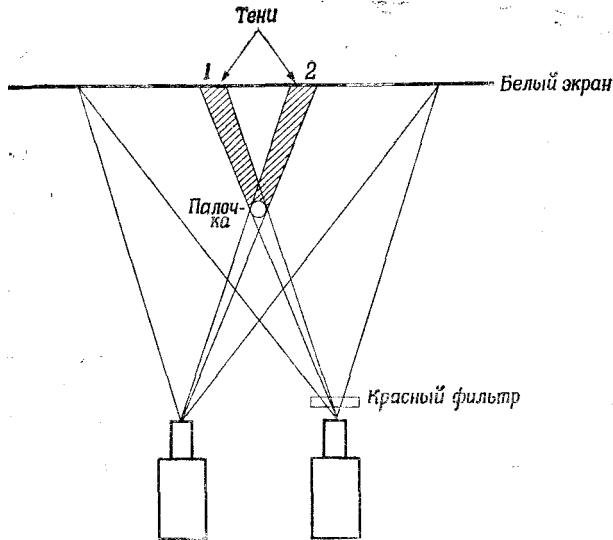


Рис. 8.1. Цветные тени.

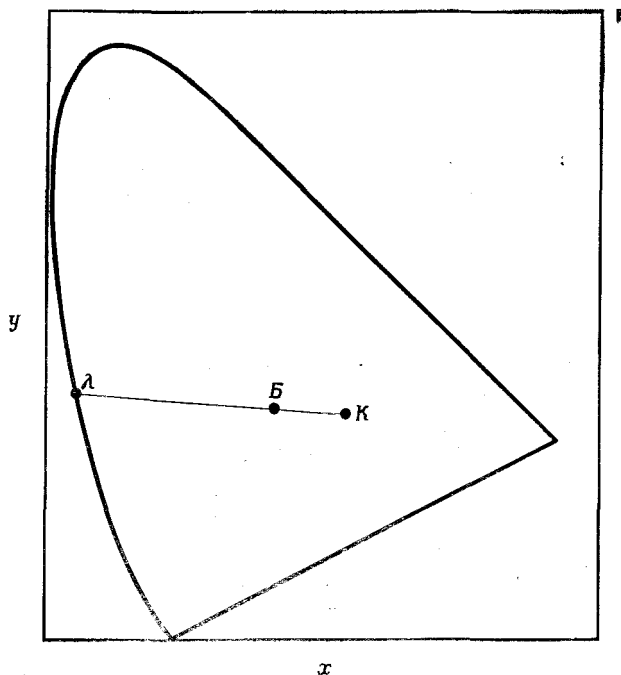


Рис. 8.2. Объяснение цветных теней.

вертикальную палочку таким образом, чтобы на экран отбрасывались две тени. Тень 1, образованная красным проектором, освещается исключительно белым светом, в то время как тень 2, образованная белым проектором, освещается только красным светом. Таким образом, тень 1 должна была бы казаться белой, а тень 2 — красной. На самом же деле тень 1 выглядит явно сине-зеленой, а тень 2 — красной. Этот удивительный результат обусловлен тем, что большая часть экрана освещена розовым светом, получившимся при смешении красного с белым, и цвет его находится приблизительно в точке K на диаграмме цветности (рис. 8.2). Глаз быстро адаптируется к нему и воспринимает его как белый. Исходный белый свет с цветностью B оказывается теперь на сине-зеленой стороне от K , что соответствует преобладающей длине

волны λ , т. е. сине-зеленому цвету. Тень 2 также изменяется, но на аналогичный красный. Конечно, цвет тени 1 не изменился — изменилось только его восприятие. Интересно попробовать заменить красный фильтр зеленым. Тень 1 покажется теперь красной. При использовании синего фильтра тень 1 будет казаться желтой.

Этот опыт представляет собой упрощенный вариант знаменитого опыта Эдвина Лэнда — изобретателя «поляроида». Лэнд показал, что при проведении эксперимента Максвелла по цветной фотографии (см. разд. 5.8) можно воспринимать поразительное разнообразие цветов даже в том случае, если пользоваться не тремя проекторами, а двумя и к тому же применять только один цветной фильтр. Если, например, проецировать красное изображение какой-либо сцены, снятой через красный фильтр, поверх *белого* изображения, снятого через зеленый фильтр, то будут восприниматься желтые, зеленые, а также красные тона. Эффекты, наблюдаемые в сложном цветном изображении, еще более поразительны, чем в простых цветных тенях, и их стоит воспроизвести. Для таких опытов хорошо фотографировать, например, вазы с фруктами, среди которых находятся апельсины и спелые бананы.

8.3. Цвета поверхностей

Существует множество удивительных эффектов восприятия, которые возникают благодаря текстуре и блескости поверхностей. Текстура поверхности дает нам информацию о том, смотрим ли мы на камень, кирпич, цемент, штукатурку, краску, материю, бархат, дерево и т. д., и эта информация дополняет ту, которая связана с восприятием цвета и яркости. Под текстурой мы понимаем характерные небольшие различия в цвете и яркости, и содержащаяся в ней информация позволяет нам распознать, какого рода поверхность мы видим, — даже тогда, когда мы смотрим на цветную фотографию или экран цветного телевизора.

Другим интересным фактором восприятия поверхностей является восприятие металлического блеска. Металлы могут иметь матовую, полуматилованную или полностью полированную поверхность, а цвет металлического блеска

и световых бликов помогает нам распознать характер видимой поверхности. Более того, мы можем определить по цвету отражения, является ли данная поверхность медной, латунной, золотой, серебряной, хромированной или же она из нержавеющей стали.

Очень тонкие цветовые эффекты можно также наблюдать на просвечивающих материалах, таких, как алебастр. Такие материалы как бы светятся изнутри, и к восприятию цвета примешивается элемент *объема*. Другими словами, цвет как бы излучается изнутри самого материала, и нам уже не кажется, что мы смотрим на цветную поверхность. Однако Ральф Эванс показал, что если цветному участку придать расплывчатые границы, то он будет казаться почти полупрозрачным. Это такая область восприятия, о которой мы пока еще мало что знаем.

8.4. Эффект Гельмгольца — Кольрауша

Гельмгольц был первым, кто заметил, что насыщенность цвета влияет на его яркость и что некоторые цвета кажутся ярче при большей насыщенности, даже если освещенность сетчатки при этом остается постоянной. Впоследствии эти эффекты изучал Кольрауш. Он показал, что если поместить рядом два цвета одинаковой яркости, один из которых будет иметь высокую, а другой — низкую насыщенность, то первый из них будет казаться ярче. Однако если освещать их вспышками, так что они будут видимы попеременно, эффект различной яркости исчезает.

Этот эффект может привести к неожиданным ситуациям, которые нетрудно продемонстрировать. Например, можно отдельно проецировать на экран световые пятна насыщенного красного и зеленого цвета и уравнивать их по яркости с другими двумя пятнами белого света. Если теперь наложить друг на друга красное и зеленое пятна, то получившееся в результате желтое пятно (смесь красного и зеленого) будет казаться значительно бледнее, чем пятно, полученное при наложении двух белых пятен. Как показал Мак-Адам, удаление некоторой части красного компонента из смеси красного, зеленого и синего цветов повышает яркость оставшейся смеси.

Эти поразительные опыты демонстрируют несостоятельность закона аддитивности, согласно которому более высокая освещенность всегда должна приводить к более высокой субъективной яркости; при определенных условиях из этого вытекают весьма серьезные последствия для науки фотометрии. Обычно, однако, мы имеем дело с цветными поверхностями достаточно низкой насыщенности, а в этих случаях освещенности аддитивны.

Тем не менее эффект этот важен, когда мы встречаемся с ярким цветным светом высокой степени насыщенности, например с уличными и железнодорожными светофорами, указателями поворота и стоп-сигналами автомобилей, а также с рекламными установками из газоразрядных трубок. Хорошо известно, что в красном стоп-сигнале можно использовать более слабую лампочку, чем в желтом указателе поворота, поскольку эффект Гельмгольца — Кольрауша более четко выражен в красном цвете, чем в желтом.

Этот эффект можно исследовать методом прямых оценок. На рис. 8.3 представлены результаты одного из таких опытов для источника белого света S_1 и для цветных стимулов средней насыщенности (S_2) и высокой насыщенности (S_3). По оси ординат отложены логарифмы соотношения действительной яркости белого и цветного света, имеющих одинаковую субъективную яркость. Эти соотношения больше единицы (логарифм отношения >0), т. е. белый свет должен быть более интенсивным, чем цветной, чтобы казаться таким же ярким. Для некоторых людей эти эффекты могут быть весьма значительными. Например, для синего цвета высокой насыщенности отношение логарифмов равно 1,70; значит, интенсивность белого света должна быть в 50 раз выше, чем синего, чтобы он казался таким же ярким. Соответствующая цифра для красного света равна 31. Для желтого цвета этот эффект гораздо слабее, но он все-таки может быть заметным, и белый свет должен быть в четыре раза ярче желтого, чтобы иметь такую же субъективную яркость для данного наблюдателя.

Объяснение этого эффекта следует, по-видимому, искать в организации нервных механизмов сетчатки. Как мы уже видели в разд. 4.13, информация о яркости стимула передается в мозг по неоппонентным каналам, в то время

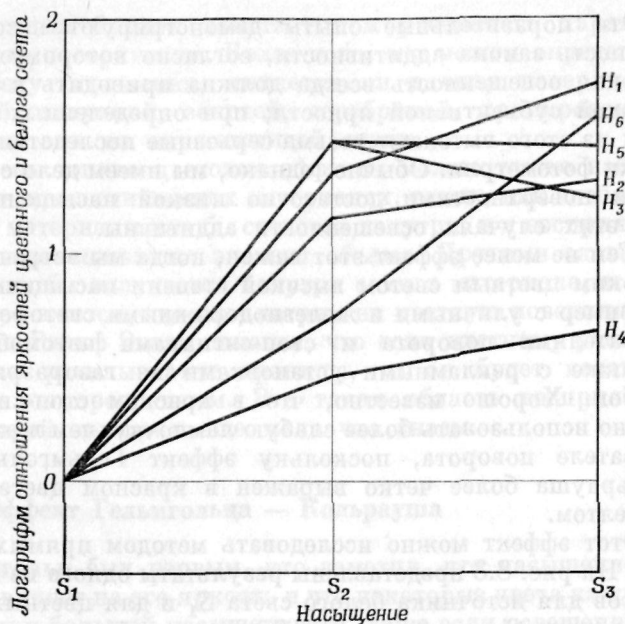


Рис. 8.3. Эффект Гельмгольца — Кольрауша. H_1 — синий, H_2 — сине-зеленый, H_3 — зеленый, H_4 — желтый, H_5 — красный, H_6 — пурпурный.

как информация о цвете поступает в виде дифференциальных оппонентных сигналов (сигналов цветоразличения). Кажется вероятным, что при наблюдении насыщенных цветов цветоразличительные сигналы очень сильны и что восприятие яркости возникает в мозгу на основе информации, получаемой не только из неоппонентных каналов, но также от цветоразличительных механизмов.

8.5. Эффект Бецольда — Брюкке

Это явление было впервые обнаружено фон Бецольдом в 1873 г., но позднее установлено независимо от него Брюкке в 1878 г. Оно состоит в том, что изменение яркости влияет на восприятие цветового тона. При большей яркости красный цвет кажется желтее, а фиолетовый и сине-зеленый — синее.

Еще Гельмгольц обратил внимание на то, что солнце, если смотреть на него через темно-красное стекло, кажется желтым. (Обратите внимание: опасно использовать солнце в качестве источника света, так как невидимая тепловая радиация может вызвать серьезное повреждение глаза. Однако тот же опыт можно провести с вольфрамовой лампочкой накаливания, используя красный фильтр и кусок стекла, поглощающего тепло.)

Этот эффект можно представить графически (рис. 8.4). На графике показано кажущееся изменение цветового тона ($\Delta\lambda$) при уменьшении освещенности сетчатки в 10 раз; излучение (λ) при большей яркости кажется таким же, как $(\lambda + \Delta\lambda)$ при меньшей яркости. Например, для красного света с длиной волны 620 нм величина $\Delta\lambda$ равна -15 нм. Таким образом, при высокой освещенности излучение в 620 нм будет казаться такого же цвета, как и излучение $(620 - 15)$ нм, т. е. 605 нм при низкой освещенности сетчатки. Другими словами, при высокой освещенности красный цвет будет казаться более желтым.

Интересно, что цвета, которые субъективно не изменяются при изменении яркости, соответствуют длинам

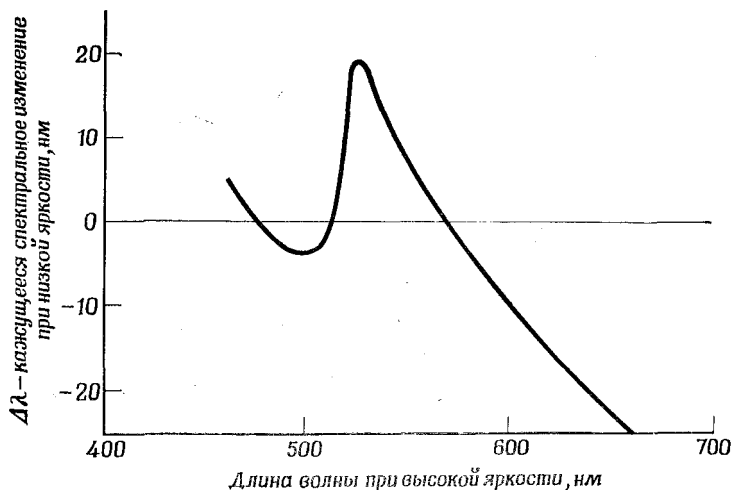


Рис. 8.4. Эффект Веинштейна — Брюкке.

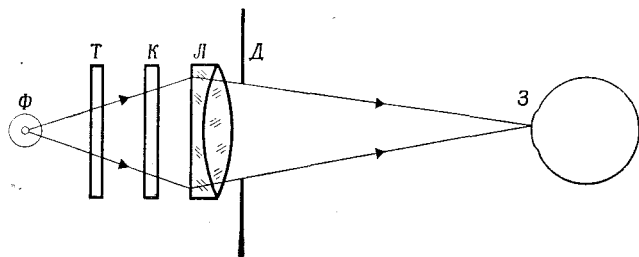


Рис. 8.5. Установка для наблюдения последовательных изменений воспринимаемого цвета яркого источника света.

волн примерно 571, 506 и 414 нм. Если мы обратимся к кривым спектральной чувствительности рецепторов (см. рис. 4.10), то мы увидим, что красные и зеленые рецепторы дают одинаковые ответные реакции при 575 нм, а при 506 нм одинаковы реакции красных и синих рецепторов.

Первая из этих двух точек, по-видимому, означает, что цветовой тон устойчив, когда различительный механизм для красного и зеленого цветов находится в нейтральном состоянии. Вторая точка может означать, что цвет стабилен также и тогда, когда один из компонентов одного цветов-различительного механизма равен одному из компонентов другого. Точку 474 нм интерпретировать труднее, но хотя мы здесь и не будем пытаться сделать это, отметим, что можно объяснить все три точки инвариантности на основе предположения о двух оппонентных цветовых механизмах в сетчатке.

Еще одно родственное явление было описано Корнсуитом. Речь идет об изменении видимого цвета во времени при восприятии очень яркого источника красного света. Этот феномен легко продемонстрировать, просто наблюдая яркую лампочку через красный фильтр, дополненный теплопоглощающим фильтром, или используя более сложное устройство, изображенное на рис. 8.5. Изображение нити низковольтной лампочки от автомобильной фары (Ф) фокусируют на уровне зрачка (З) с помощью линзы Л. Для уменьшения поля зрения примерно до 5° используется диафрагма Д. На пути лучей помещают теплопоглощаю-

щий фильтр *T* (Chance HA3) и красный фильтр *K* (например, Cinemoid № 6). (Обратите внимание — очень важно в обоих опытах применять теплопоглощающее стекло. Дело в том, что лампочки накаливания испускают большую часть своей лучистой энергии в виде тепла, и если его не устранить, оно может вызвать повреждение роговицы или даже ожог сетчатки, что связано с опасностью серьезного ущерба для зрения.)

Характер видимого изменения цвета показан на рис. 8.6: спустя 10 с лампочка кажется желтой, через 60 с — зеленой и, наконец, снова приобретает желтый цвет. Для объяснения этого можно предположить, что красный стимул имеет длину волны около 630 нм и поэтому красные рецепторы подвергаются очень сильному воздействию, а зеленые — не столь сильному. При такой высокой интенсивности света фотопигмент красных рецепторов будет быстро обесцвечиваться, произойдет ослабление красного сигнала в красно-зеленом цветоразличительном механизме и последний будет давать «зеленый» сигнал. Однако вскоре обесцветится и значительное количество фотопигмента зеленых рецепторов; тогда сигналы от красных и зеленых рецепторов приблизительно уравни-

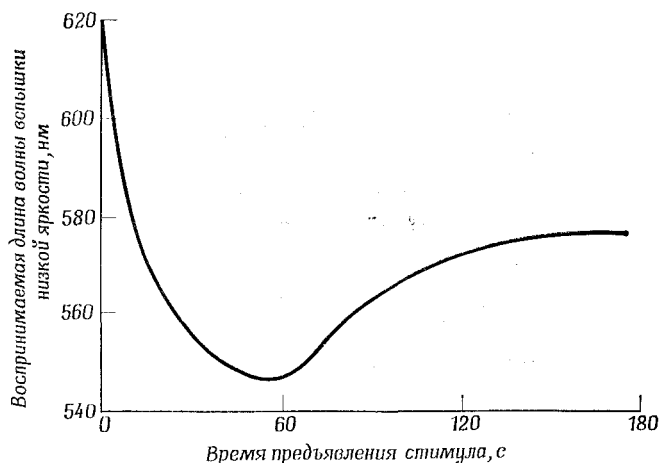


Рис. 8.6. Изменение воспринимаемого цвета с течением времени.

няются и красно-зеленый цветоразличительный механизм перейдет в нейтральное состояние. При этом будет продолжаться значительное поступление красно-зеленого сигнала в желто-синий механизм, что в конечном итоге приведет к восприятию желтого цвета.

8.6. Прямое определение цветового тона и насыщенности

Очевидно, что путем измерения цвета, хотя оно имеет большое значение в ряде производств, совершенно невозможно учесть многие эффекты восприятия, кратко описанные в этой главе. Необходимость оценивать верность воспроизведения цветов в цветном телевидении и цветной фотографии привела к разработке нового метода, предложенного Роу. Предъявляя испытуемым цветные поля на стандартном белом фоне, Роу установил, что после определенной подготовки они могли непосредственно определить как цветовой тон, так и насыщенность предъявляемых образцов с достаточной воспроизводимостью. Это наблюдение аналогично прямому определению яркости, описанному в разд. 3.11.

Цветовой тон оценивали в терминах четырех «психологически основных» цветов, а именно красного, желтого, зеленого и синего. В зависимости от ситуации испытуемый мог назвать, например, чисто красный или чисто синий цвет. Если же он видел пурпурный цвет, он мог сказать «50% красного и 20% синего», чтобы указать положение данного цвета между чисто красным и чисто синим. Независимо от этого определялась в процентах насыщенность: 0% — белый, а 100% — полностью насыщенный спектральный цвет.

Было найдено, что результаты определения цветового тона более точны, чем оценки насыщенности. Тем не менее оказалась возможной «калибровка» испытуемых на основе оценок, которые они дают. На рис. 8.7 показаны линии одинаковых оценок цветового тона и насыщенности, построенные на диаграмме цветности CIE UCS. После этого испытуемый может определять цвет в реальной действительности, а позднее — в цветном телевизионном изображении или на цветной фотографии. Совпадение или

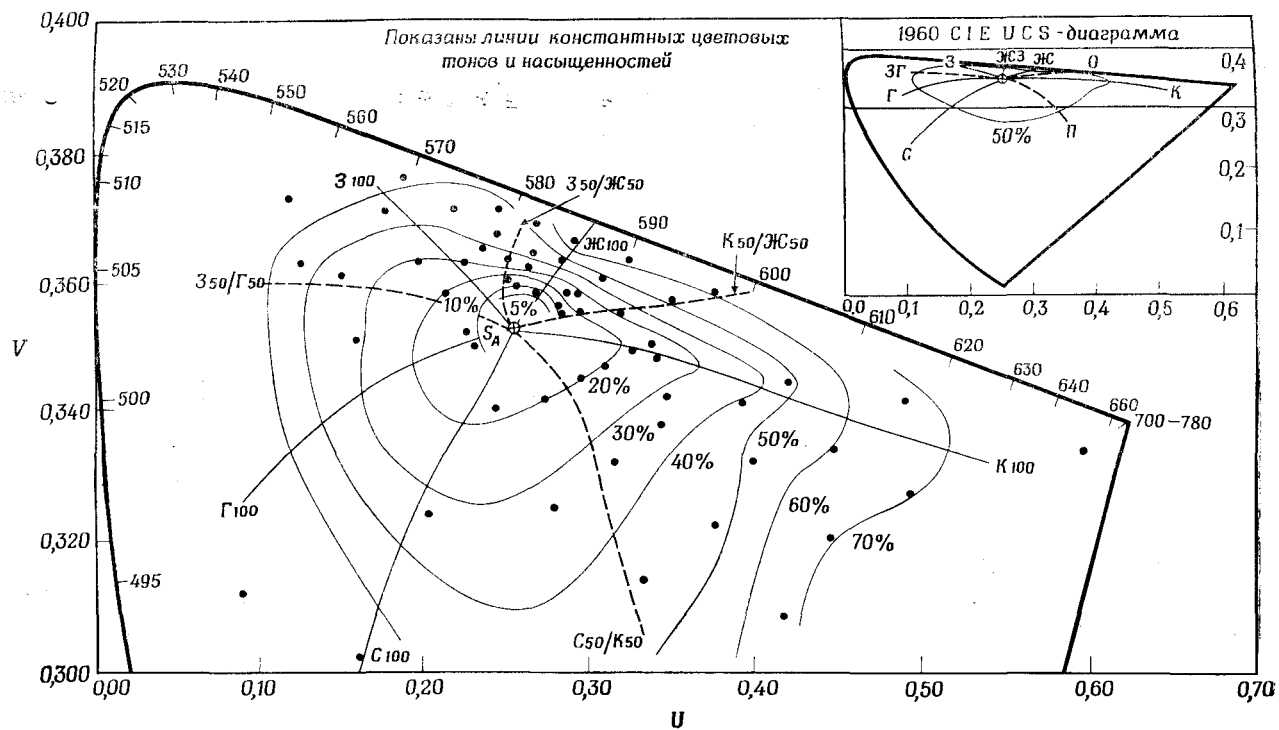


Рис. 8.7. Определение цветового тона и насыщенности на диаграмме CIE UCS.

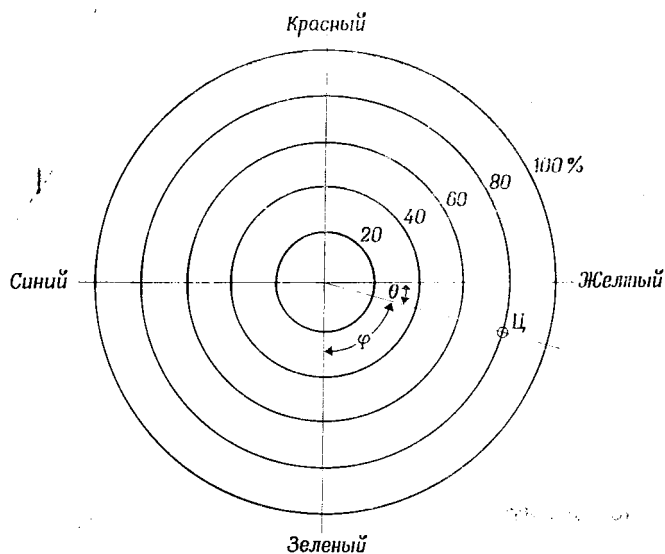


Рис. 8.8. Диаграмма для фиксации оценок цветового тона и насыщенности.

расхождение таких оценок позволяет судить о верности воспроизведения цвета, хотя иногда дело несколько осложняется нашим странным желанием видеть на фотографиях небо более синим, а траву — более зеленой, чем они есть на самом деле. Это, по-видимому, еще один пример того, что мы живем в мире фантазии, в котором мы предпочитаем видеть вещи такими, какими их себе представляем, а не такими, каковы они в действительности.

Эксперимент с прямым определением цветов легко осуществить без сложной аппаратуры. Для этого достаточно иметь листы Мензелла, цветовой тон и насыщенность которых известны. Испытуемые могут указывать обе эти характеристики на одной диаграмме (рис. 8.8). Пусть, например, цвет Ц представляет собой зеленовато-желтый цвет с насыщенностью 80%. Наблюдатель опишет этот оттенок как «50 частей желтого, 10 частей зеленого, 80%-ной насыщенности», где соотношение $\phi/\theta = 50/10$.

(т. е. $\varphi = 75^\circ$, $\theta = 15^\circ$). Можно также определять светлоту этих образцов Мензелла по шкале от 0 до 10 или от 0 до 100, где 0 — черный цвет, а верхняя величина соответствует идеальному белому цвету (100%-ному отражению света).

Интересно, что почти все цвета можно описать в понятиях четырех психологически основных цветов. Исключение составляет лишь коричневый цвет. Коричневые тона располагаются на шкале цветности рядом с оранжево-желтыми, и они всегда отличаются низкой светлотой по сравнению с другими цветами. Поэтому мы можем описывать их как оранжево-желтые цвета низкой светлоты, но они на самом деле выглядят не так. Восприятие коричневого цвета имеет сложную природу и возникает тогда, когда мы видим оранжево-желтую поверхность, слабо отражающую свет, на освещенном фоне. Это, несомненно, очень интересное явление, которое обусловлено особой интерпретацией в мозгу сигналов, получаемых от цвето-различительных механизмов сетчатки, если эти сигналы слабые. Понятно, что коричневые цвета могут граничить с красными или желтыми, и тогда это будет соответственно красновато- или желтовато-коричневые тона. Однако не существует такого цвета, как синевато-коричневый, поэтому очевидно, что этот феномен проявляется при достаточно большой длине волны (более 570 нм), при которой синий рецептор не работает.

СВЕТЛОТНО-ЦВЕТОВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ

8.7. Перспективы

Как отмечает Эванс, цветовой тон, насыщенность и светлота — это всего лишь три из многочисленных аспектов восприятия человеком цвета. В зависимости от обстоятельств цвет может иметь примесь серого, может проявлять большую «блескость» или иметь металлический оттенок; цветная поверхность может казаться сильно отполированной или матовой (с множеством промежуточных вариантов), а также просвечивающей; кроме того, на восприятие может влиять текстура поверхности. Психофизические корреляты преобладающей длины волны, спектральной чистоты и отражательной способности — это соответственно цветовой тон, насыщенность и светлота,

но мы еще не знаем психофизических коррелятов других воспринимаемых свойств. Несомненно, со временем проблема нахождения таких коррелятов может быть решена.

Явления и проблемы, рассмотренные в этой главе, касаются достаточно элементарных восприятий, связанных с функцией ряда различных уровней зрительной системы. Понимание того, как работают глаз и мозг, все еще находится в зачаточном состоянии. До тех пор пока у нас не будет более полного представления о механизмах работы мозга, мы не сможем подойти к разгадке проблемы восприятия. Конечно, может быть и так, что, используя мозг как инструмент, мы никогда не сможем по-настоящему проникнуть в тайны его собственной функции. Например, мы никогда не можем непосредственно увидеть свои собственные глаза, но в этом случае зеркало дает нам хорошее, хотя и перевернутое слева направо изображение. Существует ли аналогичное «зеркало», которое позволит нам заглянуть в наш собственный мозг? Не исключено, что ответ в этом случае будет отрицательным. И все же человек — такое любознательное существо, что поиски в области изучения мозга и восприятия будут и должны продолжаться.

Последовательные образы и субъективный цвет

9.1. Инерция зрительного ощущения

Когда мы имеем дело с повседневными событиями, а не с астрономическими проблемами, можно принять, что свет распространяется мгновенно. Зрительные процессы, однако, не мгновенны, и прежде чем наблюдатель осознает, что в глаз его попала вспышка света, пройдет около 0,1 с. И наоборот, после того как действие светового раздражителя прекратится, восприятие света в течение короткого времени сохраняется неизменным. Это называют инерцией зрительного ощущения.

Эту инерцию легко продемонстрировать, если смотреть на лампу через вращающийся диск с чередующимися прозрачными и непрозрачными секторами (рис. 9.1). Диск может приводиться в движение электромотором с регулируемой скоростью. Если видимые через диск вспышки света имеют достаточно низкую частоту, скажем

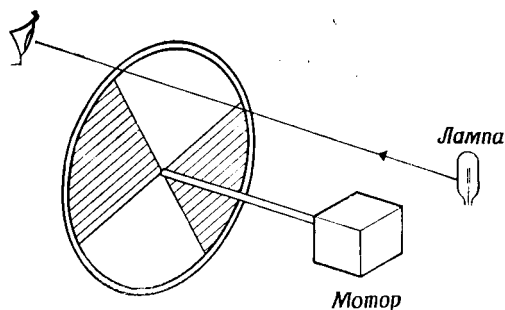


Рис. 9.1. Определение частоты слияния мельканий.

около 10 Гц, то будет восприниматься мелькающий свет. Если теперь понемногу увеличивать скорость вращения, то при определенной частоте f_c ощущение мелькания исчезнет. Это произойдет тогда, когда вспышки будут следовать друг за другом достаточно часто для того, чтобы благодаря инерции зрительного аппарата ощущение света сохранялось в течение всего темного промежутка. Такую частоту f_c называют критической частотой слияния мельканий (ЧСМ). Величина ее линейно изменяется с логарифмом освещенности (L), к которой адаптирован глаз, и варьирует в пределах от 10 Гц при низкой освещенности до 55 Гц при высокой. Математически эту зависимость можно выразить так:

$$f_c = a \log_{10} L + b,$$

где L выражена в свечах на 1 м². Это так называемый закон Ферри — Портера, который обусловлен электрофизиологическими механизмами сетчатки. Как мы уже объясняли в разд. 3.6, яркость кодируется частотой импульсов, генерируемых ганглиозными клетками сетчатки, а эта частота приблизительно пропорциональна логарифму освещенности сетчатки. Очевидно, что если вспышки света поступают в глаз чаще, чем возникают импульсы, то тогда, естественно, эти импульсы не могут нести в мозг информацию о частоте световых вспышек; в результате происходит слияние мельканий. Однако при повышении уровня освещенности частота потенциалов действия (импульсов), передающихся по зрительному нерву, увеличивается, а поэтому возрастает и частота слияния мельканий.

Такая инерция ощущения используется в ряде технических устройств. Например, свет газоразрядных ламп и трубчатых флуоресцентных ламп, питающихся переменным током в 50 Гц, мелькает с частотой 100 Гц (изменение направления тока не изменяет знака испускаемого света, который может быть только положительным или равным нулю; поэтому на 50 полных колебаний тока приходится 100 световых импульсов). Это намного превышает частоту слияния мельканий, и в результате яркость этих ламп при обычных условиях кажется постоянной. Кинопроектор тоже каждую секунду проецирует 24 различных изображения (кадра). Каждый кадр экспонируется дважды, так

что на экране каждую секунду появляются 48 изображений с темными интервалами между ними. Освещенность достаточно низка, и поэтому создается впечатление непрерывной картины. Большинство людей удивляются, узнав, что на самом деле экран *половину* времени остается темным.

Еще один пример использования этого феномена — телевидение. В каждый момент времени экран телевизора освещается только одним маленьким световым пятном. Это так называемое «летающее пятно», так как оно обрисовывает изображение очень быстро, вычерчивая на экране 313 параллельных линий (строк) за 0,02 с (что согласовано с частотой переменного тока в сети — 50 Гц). Сначала оно рисует нечетные строки 1, 3, 5 и т. д., затем очень быстро возвращается к началу и за 0,02 с создает еще одно изображение из 312 строк, которые чередуются с первыми, т. е. это четные строки — 2, 4, 6 и т. д. В результате воспринимается достаточно непрерывное изображение, хотя иногда заметно некоторое мелькание, особенно если яркость экрана высока и он проецируется на периферическую область сетчатки, где частота слияния мельканий может быть выше. В ряде стран используется переменный ток с частотой 60 Гц, позволяющей устранить и это остаточное мелькание.

На этих интересных примерах мы видим, как знание особенностей зрительного процесса нашло широкое и полезное применение. Очевидно, что если бы инерции зрительного ощущения не было, то кино и телевидение в их настоящем виде не могли бы существовать.

9.2. Типы последовательных образов

Инерция зрительного ощущения обусловлена кратковременными эффектами последствия — последовательными образами, которые продолжают существовать лишь долю секунды. Но если глаз адаптирован к темноте, а затем подвергается раздражению одиночной кратковременной вспышкой яркого света (например, от фары автомобиля), то слабое восприятие света в полной темноте сохраняется гораздо дольше и лишь постепенно затухает в течение 1—2 мин. Это называют длительным положительным последовательным образом. В отличие от образа, сохра-

нящегося за счет инерции ощущения, этот последовательный образ, хотя он и кажется достаточно ярким, соответствует всего лишь одной миллионной доле яркости первоначального стимула. Положительный последовательный образ имеет вначале тот же цвет, что и вызвавший его раздражитель, но потом он претерпевает ряд изменений, о которых будет сказано позже.

Однако если первичный яркий раздражитель будет иметь небольшие угловые размеры (например, несколько градусов), а после его выключения сразу появится большое белое адаптационное поле низкой освещенности, то сначала будет виден, как и раньше, яркий положительный последовательный образ. Если теперь освещенность белого поля быстро увеличить, то сначала положительный последовательный образ сольется с окружающим фоном, а затем, когда освещенность фона достигнет большой величины, появится снова в виде темного пятна. Это темное пятно называют отрицательным последовательным образом. Отрицательный последовательный образ цветного первичного стимула имеет приблизительно дополнительный цвет. Например, последовательный образ красного стимула будет сине-зеленым, а зеленого — фиолетовым.

Последовательными образами интересовалось много знаменитых людей, начиная с Аристотеля; об этом явлении писали Ньютон, Бойль, Юнг, Пуркинье, Гете, Фехнер, Гельмгольц и Геринг.

В 1664 г. Бойль описал опыты, при которых он смотрел на Солнце в телескоп. Он говорит, что продолжал видеть образ Солнца в виде белого объекта даже спустя 9 или 10 лет. (Это был чрезвычайно опасный эксперимент, он мог закончиться потерей зрения. По-видимому, в данном случае произошел сильный ожог сетчатки, приведший к необратимому повреждению рецепторов). Прочитав описание Бойля, Локк спросил Ньютона, что он думает по этому поводу. Ответ Ньютона в его письме из Кембриджа (июнь 1691 г.) очень интересен:

«Наблюдение, о котором Вы упоминаете, из книги о цветах м-ра Бойля я произвел однажды сам, с риском для зрения. Это было так: я в течение очень короткого времени смотрел на Солнце в подзорную трубу правым глазом, а затем переводил глаза в темный угол своей ком-

наты и моргал, чтобы наблюдать за возникавшим впечатлением и цветными кругами, которые появлялись при этом, — следить, как они постепенно затухали и наконец исчезали. Это я повторил еще раз, а затем и в третий раз. На третий раз, когда иллюзия света и цветов, окружающих его, почти исчезла и я старался зафиксировать их последний образ, я, к своему удивлению, обнаружил, что они начали возвращаться и мало-помалу снова стали такими же яркими и живыми, как вначале, сразу после того как я взглянул на Солнце».

Он продолжает описывать то, как он, по-видимому, смог перенести последовательный образ в другой глаз путем умственного усилия, хотя из его слов неясно, действительно ли произошло именно это. Возможно, однако, что он получил также легкий ожог сетчатки, поскольку далее он пишет:

«Я довел свои глаза до такого состояния, что уже не мог смотреть ни на какой яркий объект ни тем, ни другим глазом, но я видел перед собой Солнце, поэтому не мог уже ни читать, ни писать; чтобы восстановить работу своих глаз, я заперся на три дня в затемненной комнате и всеми силами старался отвлечь свое воображение от Солнца».

Ньютон признается, что проблема представляет собой «слишком запутанный узел, с которым мне не справиться». Мы также должны сознаться, что спустя почти 300 лет по-прежнему ломаем себе голову над разгадкой тайны последовательных образов.

Отрицательные последовательные образы можно легко получить, смотря в течение 2 с на нить лампочки с прозрачной колбой после 1—2 мин темновой адаптации. Положительный последовательный образ можно будет увидеть на неосвещенном проекционном экране. Если теперь осветить экран белым светом с помощью диапозитивного проектора, то появится отрицательный последовательный образ. Выключив проектор, можно убедиться в том, что и положительный последовательный образ не исчез. Перед лампой можно помещать цветные фильтры, например зеленый. Нетрудно наблюдать эффектное чередование зеленых положительных и фиолетовых отрицательных последовательных образов; интересно, что положительный

последовательный образ, без сомнения, должен по-прежнему сохраняться и в то время, когда мы видим отрицательный последовательный образ.

9.3. Отрицательные последовательные образы

Способность отрицательных последовательных образов маскировать положительные связана с тем, что первые значительно ярче.

Эти отрицательные последовательные образы дополнительного цвета довольно легко объяснить утомлением небольших участков сетчатки. Например, если первичный раздражитель зеленый, то в зеленых колбочках пигмент будет обесцвечиваться в большей степени, чем в красных или синих; поэтому они станут менее чувствительными к зеленому свету. Таким образом, если зеленый раздражитель предшествует большему по размеру белому стимулу меньшей яркости, то та часть сетчатки, которая ранее была освещена зеленым светом, будет воспринимать белый цвет с меньшим содержанием зеленого, чем обычно. Белый без зеленого воспринимается как пурпурный; именно таким и будет цвет последовательного образа. То, что он виден на фоне более обширной белой области, где колбочки не подверглись дифференциальному обесцвечиванию, усиливает восприятие его цвета.

Отрицательный последовательный образ можно очень эффектно продемонстрировать с помощью диска Бидвелла (рис. 9.2), который нетрудно сделать из белого картона и приводить во вращение электродвигателем с регулируемой скоростью. При быстром вращении в направлении, указанном стрелками, красная лампочка будет казаться ярко-зеленой, если удачно подобрать освещенность диска. То, что будет видеть наблюдатель, — это дополнительный отрицательный последовательный образ красной лампочки, проецируемый на белую половину диска. Черная часть диска обеспечивает короткий период восстановления, после которого опять на мгновение появляется красный стимул. Поскольку вырезанный участок диска составляет лишь небольшую долю белой области, время экспозиции первичного стимула невелико по сравнению с периодом восприятия последовательного образа. Чрезвычайно инте-

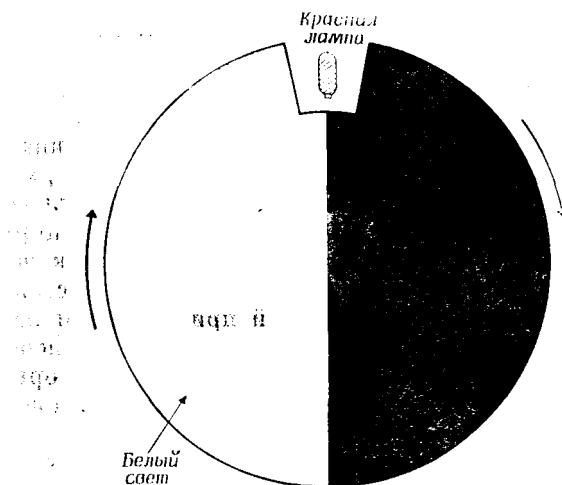


Рис. 9.2. Диск Бидвелла.

ресно то, что в этих условиях яркий первичный раздражитель не замечается вовсе, а воспринимается только отрицательный последовательный образ.

Интересно также, что последовательный образ неподвижен относительно сетчатки. Обычно, когда мы поворачиваем глаза, но не голову, окружающее кажется нам неподвижным: смещение изображения на сетчатке компенсируется мозгом благодаря информации о движениях глаза, поступающей от глазодвигательных мышц. Это приводит к парадоксальной ситуации. Когда глаз поворачивается при наличии последовательного образа, этот образ не изменяет своего положения на сетчатке, и, таким образом, когда смещение обычного изображения как бы аннулируется, последовательный образ, наоборот, движется относительно внешнего поля.

Еще один интересный опыт — демонстрация закона Эммерта. Согласно этому закону, кажущаяся величина отрицательного последовательного образа прямо пропорциональна расстоянию до той поверхности, на которой он виден. В этом можно убедиться, создав последовательный образ нити прозрачной лампочки и глядя сначала

на лист белой бумаги примерно в 25 см от глаз, а потом на белую стену на расстоянии 3 м. Во втором случае последовательный образ будет казаться гораздо более крупным. Это связано с тем, что угловая величина такого образа постоянна, поэтому его кажущаяся величина соответствует проекции этого угла на видимую поверхность.

На расстоянии около 200 м закон Эммерта перестает действовать, и если последовательный образ проецируется на ясное небо, он уже не кажется фигурой бесконечных размеров. На самом деле он имеет почти постоянную величину для большинства людей при проекции на расстояние свыше 200 м. Почему это так, не совсем ясно, но, видимо, по той же причине Солнце или Луна (которые оба видны под углом около $0,5^\circ$) не кажутся нам бесконечно большими.

9.4. Положительные последовательные образы

Положительные последовательные образы можно легко наблюдать, если сначала адаптироваться к темноте (5—15 мин), чтобы исчезли все предыдущие образы, а затем смотреть на очень яркий источник света в течение 1 или 2 с. После этого в полной темноте можно увидеть положительный последовательный образ.

Эта простейшая постановка опыта имеет тот недостаток, что в темноте очень трудно заранее определить направление на лампочку, чтобы последовательный образ создавался на центральной ямке. Поэтому целесообразно

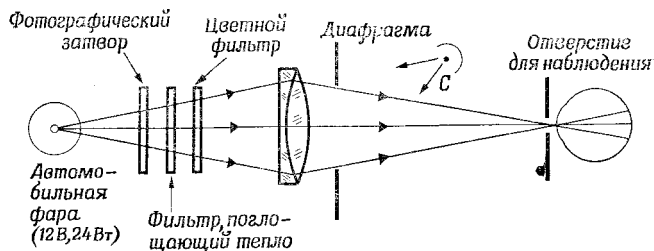


Рис. 9.3. Установка для получения положительного последовательного образа.

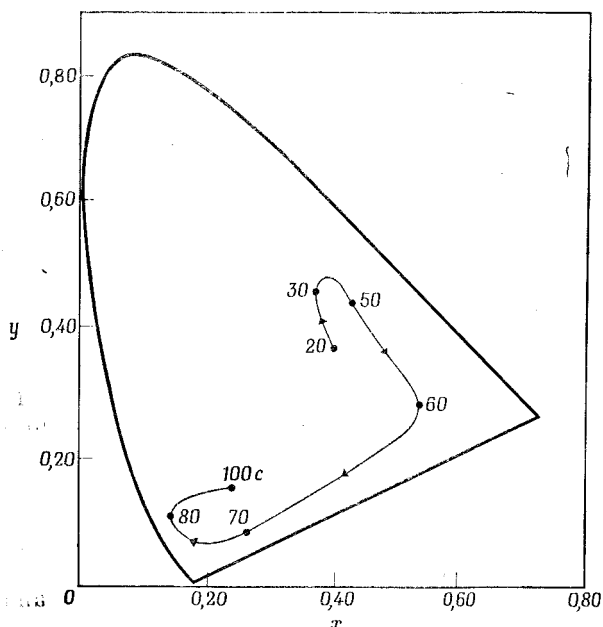


Рис. 9.4. Изменения цвета последовательного образа от белого света, нанесенные на диаграмму цветности CIE.

использовать несколько более сложную систему, показанную на рис. 9.3. Источник слабого красного света *C* в достаточной степени освещает белое кольцо, нарисованное вокруг отверстия диафрагмы, чтобы можно было фиксировать взор, прежде чем будет предъявлен раздражитель. Цветные фильтры «Cinemoid» могут вставляться как показано на рисунке; для защиты глаза от перегрева на пути светового пучка устанавливают теплопоглощающий фильтр Chance HАЗ (подробности см. в приложении, стр. 249).

Интересно отметить, что положительный последовательный образ вначале имеет тот же цвет, что и первичный раздражитель. Однако в дальнейшем цвет претерпевает ряд изменений, которые иногда называют «переливанием цветов». Для последовательного образа, создаваемого ярким белым раздражителем, типична следующая смена цветов: белый, зеленый, белый, красный, красно-фиоле-

товый, сине-фиолетовый, синий. Она показана на диаграмме цветности CIE (рис. 9.4), на которой цифрами по оси абсцисс обозначено время (в секундах), прошедшее с начального момента предъявления раздражителя.

Любопытно то, что, каким бы ни был цвет исходного раздражителя, последовательный образ покажется синим, перед тем как он окончательно угаснет.

Яркость затухающего последовательного образа можно измерять с помощью метода бинокулярного уравнивания, сходного с тем, который был первоначально предложен Райтом из Имперского колледжа. Последовательный образ создают в одном глазу, а другим глазом наблюдают регулируемое световое пятно, которое стремятся уравнять по яркости с последовательным образом. Пятно и образ несколько сдвинуты относительно друг друга по вертикали, поэтому они не сливаются. Благодаря такому приему стимул-измеритель не влияет на последовательный образ.

На рис. 9.5 представлена освещенность сетчатки (в троландах) в области пятна, равного по субъективной яркости с последовательным образом на различных этапах его исчезновения. Из приведенных кривых видно, как сказывается увеличение углового диаметра светового стимула с $20'$ до 5° . Раздражитель больших размеров дает более яркие и более стойкие последовательные образы. Вовлечение палочек при большем поле приводит к образованию на кривой двойного пика. Нисходящая часть кривой для раздражителей белого цвета подчиняется закону

$$R = Ct^{-3},$$

где R — освещенность сетчатки, необходимая для бинокулярного уравнивания видимого пятна с последовательным образом, t — время от момента включения стимула, вызвавшего этот образ, и C — постоянная величина. Следует отметить, что максимальная яркость положительного последовательного образа соответствует всего лишь около $0,5 \cdot 10^{-6}$ яркости исходного светового раздражителя. Столь низкая яркость — одна из причин того, что в обычных условиях положительные последовательные образы обычно не видны. Даже тогда, когда человек ночью ведет автомобиль и смотрит на фары встречных машин, после-

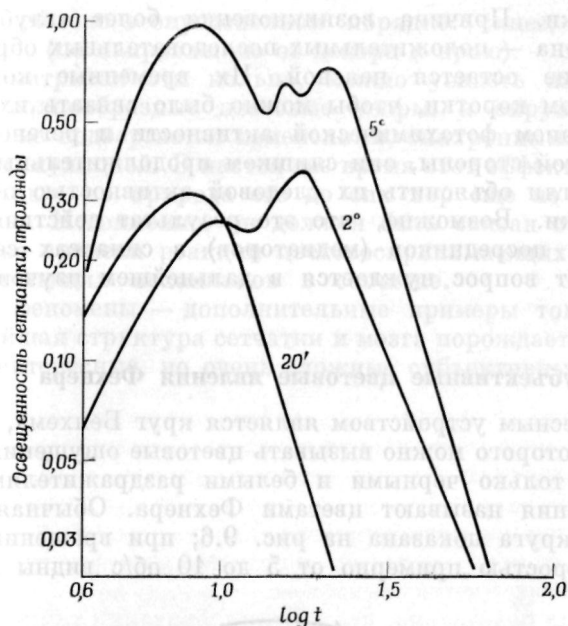


Рис. 9.5. Изменение субъективной яркости последовательных образов после воздействия трех стимулов белого цвета различного углового диаметра (оценки, полученные путем подбора эквивалентных реальных раздражителей). Время t измерялось в секундах.

довательные образы не доставляют особого неудобства, так как в механизме восприятия существует, по-видимому, какое-то звено, позволяющее не замечать их.

Хотя затухание положительного последовательного образа, созданного белым световым стимулом, подчиняется степенной зависимости, при монохроматическом стимуле такой образ затухает во времени экспоненциально.

9.5. Происхождение последовательных образов

По-видимому, последовательные образы формируются в сетчатке, а отрицательные последовательные образы, несомненно, возникают в результате простого утомления

сетчатки. Причина возникновения более «глубинного» феномена — положительных последовательных образов — все еще остается неясной. Их временные константы слишком коротки, чтобы можно было связать их с продолжением фотохимической активности и регенерацией. С другой стороны, они слишком продолжительны, чтобы мы могли объяснить их следовой активностью нейронов сетчатки. Возможно, что это результат действия химических посредников (медиаторов) в синапсах сетчатки, но этот вопрос нуждается в дальнейшем изучении.

9.6. Субъективные цветовые явления Фехнера

Интересным устройством является круг Бенхема, с помощью которого можно вызывать цветовые ощущения, пользуясь только черными и белыми раздражителями. Эти ощущения называют цветами Фехнера. Обычная форма этого круга показана на рис. 9.6; при вращении круга со скоростью примерно от 5 до 10 об/с видны цветные

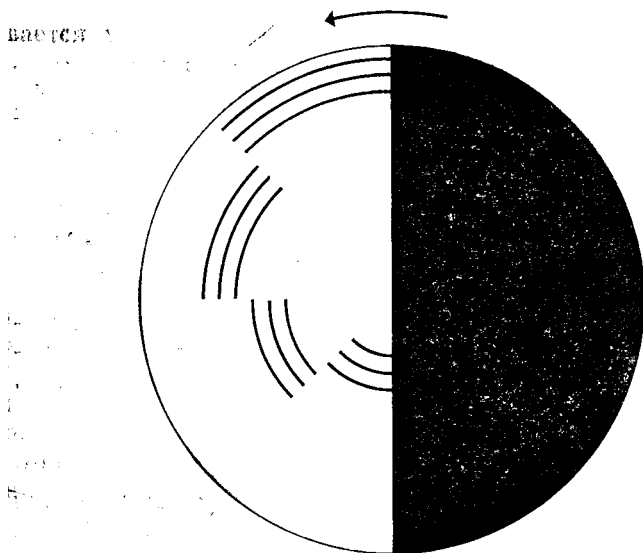


Рис. 9.6. Круг Бенхема.

кольца, обычно в определенном порядке: синес, зеленое и красное (по направлению от центра к краю).

Рассматривая эти кольца, можно увидеть изменяющиеся волнообразные цветовые узоры, а окружающий фон также подвергается изменениям, синхронным со световой стимуляцией. В настоящее время этот эффект активно изучают, но природа его до сих пор еще не понята до конца. Несомненно, он должен быть связан с различиями во времени реакции цветовоспринимающих и цветоторазличающих механизмов в сетчатке.

Эти феномены — дополнительные примеры того, как сложнейшая структура сетчатки и мозга порождает необычайно интересные, но очень сложные субъективные явления.

Аномалии цветового зрения

Л. С. ГИЛЯНЦОВА

10.1 Введение

У каждого человека есть небольшие отклонения от так называемого нормального цветового зрения. Однако у некоторых людей эти отклонения настолько велики, что их уже нельзя рассматривать как крайние случаи обычной популяционной изменчивости. Такие аномалии часто называют цветовой слепотой, но правильнее будет говорить о дефектах цветового зрения.

Было подсчитано, что в Великобритании такие дефекты имеются у 8% мужчин и 0,4% женщин (т. е. примерно у 2 млн. мужчин и 100 000 женщин). Некоторые из этих дефектов незначительны, но другие достаточно серьезны, чтобы привести к затруднениям в мире, где такие вещи, как дорожные сигналы, цветное телевидение, цветные фотографии, а также красители, краски и расцветка тканей рассчитаны на восприятие людей с нормальным цветовым зрением. Только благодаря удивительной адаптационной способности нашего мозга эти дефекты создают не так уж много проблем в повседневной жизни. Взрослые люди часто даже не подозревают о существовании у них врожденных аномалий цветового зрения, пока эти аномалии не будут выявлены с помощью несложных лабораторных тестов. Поскольку человек не может знать о том, какие именно цвета воспринимаются другими людьми, явное смещение цветов не так легко обнаружить при устном опросе. Человек с дефектом зрения, который путает красный и зеленый цвета, может опознавать цвета светофора по их яркости и положению. Опыт приучил его

называть более темный цвет красным, а более светлый — зеленым, даже если он не видит подлинного различия в цветовом тоне.

10.2. Модель процесса цветового зрения и возможные типы дефектов

На рис. 4.11 представлена возможная нормальная организация начального этапа передачи информации о цвете. Предложено много подобных моделей; они, так же как и приведенная здесь модель, помогают описывать и понимать различные типы цветовых дефектов. Весьма вероятно, что по крайней мере первые этапы цветового анализа происходят в сетчатке, но важную роль могут играть и центральные отделы зрительной системы. Рецепторы и нейроны, обозначенные кружками, реагируют на коротко-, средне- или длинноволновый участки видимого спектра (C , $З$ и K соответственно) или на их определенные сочетания. Около соответствующих клеток приведены кривые их спектрального ответа (сплошные линии) и для сравнения — три кривые ответов колбочек (пунктирные линии).

Трехкомпонентность нормального цветового зрения, очевидно, связана с наличием трех типов колбочковых пигментов и соответствующих спектральных ответов, обозначенных на рис. 4.11 буквами K , $З$ и C . Показан и ответ палочек, но мы будем считать, что он не участвует в восприятии цвета. Пострецепторные этапы представлены: нейроном, кодирующим яркость (L) (суммация ответов $K + З + C$), «желтым» нейроном (суммация ответов $K + З$) и двумя цветоразличительными нейронами, дающими противоположные ответы на K и $З$ и на $Ж$ и C соответственно. На этапе рецепции информация о цвете передается нейронами C , $З$ и K по простой трехканальной системе. На последнем этапе этой модели та же самая информация закодирована выходными сигналами нейронов, различающих два цвета, и нейрона яркости, т. е. система остается трехканальной. Предполагается, что палочки сетчатки кодируют только информацию о яркости и работают при более низких уровнях освещенности, чем это необходимо для трехцветных каналов, хотя есть

данные о том, что они продолжают функционировать и при довольно высоких освещенностях.

Эта модель позволяет предсказать несколько возможных типов аномалий цветового зрения.

1. Отсутствуют пигменты всех трех типов колбочек или же колбочки не передают информацию на последующие уровни; в результате сохраняется только палочковое зрение (палочковый монохромат).

2. Нарушена функция двух типов колбочек, так что в зрении участвуют колбочки только одного типа (колбочковый монохромат). Возможно или даже вероятно, что вклад в реакцию L -нейрона, дающего нормальный яркостный ответ, вносят ответы колбочек всех трех типов (C , $З$ и K), но они не вносят никакого вклада в цветоразличительные каналы.

3. Нарушена функция колбочек только одного типа (колбочковый дихромат). Функция яркости может быть нормальной или же она складывается из суммы только двух ответных реакций колбочек.

4. Неправильно функционирует система $K - З$, что не нарушает работы цветоразличительного канала $C - Ж$ и канала яркости. Этот тип дихроматического зрения может быть обусловлен слиянием ответов K и $З$, а не утратой какого-то одного из колбочковых ответов.

5. Другие дефекты могут вызываться нарушениями в нейроне $C - Ж$, $Ж$ -нейроне или L -нейроне; можно также представить себе сочетания этих дефектов и иные аномалии. Однако большинство известных дефектов цветового зрения объяснимо на основе первых четырех нарушений.

10.3.1. Нормальное цветовое зрение

Человек с нормальным цветовым зрением может воспродуизвести видимый оттенок светового пятна любого цвета и любого спектрального состава (если это пятно воспринимается центральной ямкой) с помощью подходящей смеси трех основных цветов. Как было показано в гл. 7 [уравнение (7.1)], это можно выразить с помощью трихроматического уравнения

$$D(D) = A(A) + B(B) + C(C),$$

где (D) — цвет, который следует воспроизвести с помощью A, B и C единиц основных цветов (A), (B) и (C). Здесь действуют обычные алгебраические законы. Символы A, B, C и D эквивалентны $\bar{C}$, P, Z и C в уравнении (7.1).

В практически достаточном приближении все люди с нормальным цветовым зрением нуждаются в одних и тех же количествах основных цветов для подбора заданного цвета. Однако у ряда людей, зрение которых считают нормальным, все же выявляются небольшие, но постоянные отклонения. Их объясняют различиями в спектре поглощения хрусталика, а также в количестве желтого макулярного пигмента, покрывающего центральную часть сетчатки величиной от 5 до 10°. С возрастом хрусталик желтеет. Есть данные о том, что макулярный пигмент поглощает в основном в коротковолновой области спектра, причем степень поглощения у разных людей неодинакова. Поскольку оба фактора изменяют спектральный состав света еще раньше, чем он достигнет сетчатки, эти изменения обычно не рассматривают как дефекты цветового зрения.

Маловероятно, чтобы свойства нормального цветового зрения варьировали в зависимости от расы или каких-либо других популяционных особенностей, хотя большинство данных о цветовом зрении было получено в Северной Америке и Европе. Имеются сведения о различиях в пигментации хрусталика у различных рас, что может приводить к различиям в цветовом зрении на досетчатковом уровне. Интересно также, что частота наиболее обычных дефектов у некавказских рас существенно ниже. В табл. 10.1 суммированы американские и европейские данные о распространенности и типах дефектов цветового зрения. Людей с нормальным зрением обычно нельзя заставить ощущать дефекты цветового зрения путем, например, помещения фильтров между глазом и окрашенным полем. Однако относительно периферического зрения есть указания на то, что способность различать цвета здесь понижена. Особый интерес представляет наблюдение очень малых полей (менее 20'). При этом обычные люди имеют тенденцию частично превращаться в дихроматов и приближаться к состоянию тританопии, т. е. у них уменьшается реакция на синий цвет.

Таблица 10.1

ЧАСТОТА ДЕФЕКТОВ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ (в процентах)

Тип дефекта	Среди мужчин	Среди женщин	Во всей популяции
Монохроматы			
палочковые	0,003	0,002	0,0025
колбочковые	Очень редки	Очень редки	Очень редки
Дихроматы			
протаномы	1,2	0,02	0,61
дейтераномы	1,5	0,01	0,76
тританомы	0,002	0,001	0,0015
Трихроматы			
протаномалы	0,9	0,02	0,46
дейтераномалы	4,5	0,038	2,5
тританомалы	Очень редки	Очень редки	Очень редки
Всего	8,1	0,43	4,3

Людей с обычным цветовым зрением называют нормальными трихроматами, поскольку для колориметрического подбора цветов им обычно нужны три основных цвета. Монохроматы и дихроматы нуждаются соответственно лишь в одном или двух подходящих основных цветах. Тех людей, которые нуждаются в трех основных цветах, но подбирают колориметрические равенства, не удовлетворяющие обычных трихроматов, называют аномальными трихроматами.

10.3.2. Монохроматы

Палочковые монохроматы, по-видимому, лишены функционирующих колбочек, и поэтому они видят не цвет а просто ахроматические различия света и тени. Их зрение сходно со зрением нормальных людей в условиях низкой освещенности сетчатки, т. е. острота зрения у них небольшая, а относительная эффективность скотопической реакции на различные освещенности нормальная. Им также свойственна фотофобия: у них появляются признаки дискомфорта при средних и высоких уровнях освещенности.

Можно было бы ожидать, что существуют три типа колбочковых монохроматов — с потерей любых двух из трех типов колбочек. В изученных случаях оказалось, что при такого рода аномалиях в сетчатке имеются или только зеленые, или только синие колбочки. Однако подобные случаи встречаются редко (см. табл. 10.1), и пока неясно, нарушена ли здесь функция рецепторов или же каких-то последующих звеньев зрительной системы. Функция палочек при этом обычно вполне нормальна.

10.3.3. Дихроматы

Установлено существование трех типов дихроматов, как и следовало ожидать, если может отсутствовать любой из колбочковых каналов или же его функция будет нарушена. Судя по имеющимся данным, у протанопы (*прото...* — первый) отсутствует пигмент колбочек, чувствительный к красному (K), у дейтеранопы (*дейтеро...* — второй) — чувствительный к зеленому ($З$), а у тританопы (*трито...* — третий) — к синему (C). Возможно также (см. рис. 4.11), что реакции красных и зеленых колбочек сливаются, образуя желтый ($Ж$) канал, и при этом цветоразличительный канал $K - З$ не дает на выходе никакой информации. Это может быть вызвано смещением красных и зеленых пигментов в отдельной колбочке или же слиянием более центральных участков в зрительной системе. С помощью такой модели было объяснено дейтеранопическое зрение.

10.3.4. Аномальные трихроматы

Одна из интересных особенностей дихроматов — то, что они воспринимают как одинаковые те цвета, которые кажутся одинаковыми нормальным людям, но, как мы увидим позже, они путают многие цвета, легко различимые при нормальном зрении. Это указывает на простую потерю или слияние функций на определенном этапе цветоразличительных каналов. Аномальному *трихромату* нужны три основных цвета для подбора соответствующего цветового тона, но количества, в которых он будет

их смешивать, значительно отличаются от используемых нормальными людьми. Этот дефект нельзя объяснить простым понижением чувствительности одного из трех каналов цветового зрения. В то время как у дихромата определенная функция в зрительной системе утрачена, у аномального трихромата она изменена. Однако в некоторых отношениях аномальные трихроматы занимают промежуточное положение между дихроматами и нормальными трихроматами.

Поэтому введены такие термины, как «протаномальный», «дейтераномальный» и «тританомальный», указывающие на пониженную чувствительность главным образом в красной, зеленой или синей областях спектра соответственно. Сильно аномальные субъекты приближаются к дихроматам; часто употребляются также более общие термины «протан», «дейтан» и «тритан», каждый из которых может означать и соответствующего дихромата, и аномала.

10.4. Особенности зрения дихроматов и аномальных трихроматов

Легче всего описать особенности дефектов цветового зрения на основе тех психофизических функций, которые зависят от способности человека различать цвета или реагировать на свет того или иного цвета.

10.4.1. Различение длин волны

Функцию различения длин волны можно измерить, помещая рядом два поля, которые сначала освещаются монохроматическим светом одной и той же длины волны. Если яркость этих полей одинакова, они будут казаться одинаковыми для всех наблюдателей. Затем длину волны одного из полей медленно изменяют до тех пор, пока наблюдатель не скажет, что появилось едва заметное различие между полями. (Во время этого изменения важно поддерживать одинаковую яркость, чтобы пороговое различие вызывалось только различием в длине волны.) Различительную чувствительность можно тогда охарактеризовать величиной, обратной разнице в длине волны ($\Delta\lambda$), которую уже

замечает испытуемый, при данной длине волны (λ), и построить соответствующую кривую для всего видимого спектра. При нормальном цветовом зрении эта чувствительность низка в крайних участках видимого спектра, где реагирует лишь один из трех типов колбочек, и максимальна при длинах волны около 490 нм и 590 нм, где сильному раздражению подвергаются по крайней мере два типа колбочек (см. рис. 6.5).

На рис. 10.1 показаны функции спектральной чувствительности для дихроматов трех типов — протана, дейтана и тритана. У дихроматов нет различения цвета в той области спектра, где преобладает функция колбочек какого-то одного типа. Поэтому протанопы и дейтеранопы не способны различать монохроматические цвета с длиной волны больше примерно 550 нм, а тританопы, наоборот, не могут различать более короткие волны. Сходство функций различения у протанопов и дейтеранопов можно объяснить тем, что ответы красных и зеленых колбочек охватывают приблизительно один и тот же диапазон длин

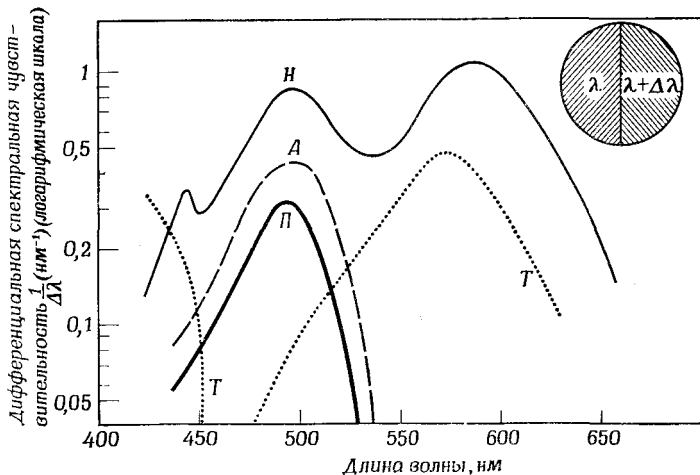


Рис. 10.1. Кривые дифференциальной (разностной) спектральной чувствительности для испытуемых с нормальным трихроматическим и с дихроматическим зрением. *Н* — нормальный испытуемый, *П* — протаноп, *Д* — дейтераноп, *Т* — тританоп.

волны, но здесь могут играть роль и другие факторы. Было бы интересно знать, какой цвет видит каждый дихромат в той области, где у него отсутствует цветоразличение; однако, как уже говорилось, их собственные объяснения могут быть ошибочными. Было обнаружено несколько человек, у которых один глаз обладает дихроматическим зрением, а другой — нормальным. Вопрос о достоверности этих сообщений пока остается открытым, однако можно думать, что протаноп воспринимает все длинные волны как зеленый цвет, а дейтераноп — как желтый цвет. Именно этого следовало ожидать, если у протанопа выпадает красная система, а у дейтеранопа произошло слияние красной и зеленой систем.

У аномальных трихроматов мы находим функции различения, промежуточные между нормальным зрением и зрением дихроматов. Уменьшение различительной способности может значительно варьировать у отдельных людей, и с помощью функций спектральной чувствительности можно устанавливать степень нарушения цветовосприятия. Найденные функции говорят в пользу того, что один из трех цветовых каналов не только отличается от нормального, но и претерпевает понижение чувствительности.

10.4.2. Кривые относительной спектральной чувствительности (функция V_λ)

Гипотезу о том, что у протанопа нарушена функция красного канала, подкрепляет тот факт, что в случае протанопии для восприятия длинноволнового стимула нужно больше энергии. Это можно видеть (рис. 10.2) по уменьшению V_λ , или фотопической относительной спектральной чувствительности (разд. 3.5), в длинноволновой области спектра и по сдвигу максимума в сторону более коротких длин волны. Функция дейтеранопа оказывается сходной с функцией нормального субъекта, что можно объяснить одной из двух причин. Может быть, зеленый канал утрачен, но его спектральная характеристика аналогична характеристике V_λ , так что при всех длинах волны происходит одинаковое снижение относительной чувствительности. Или, возможно, произошло слияние

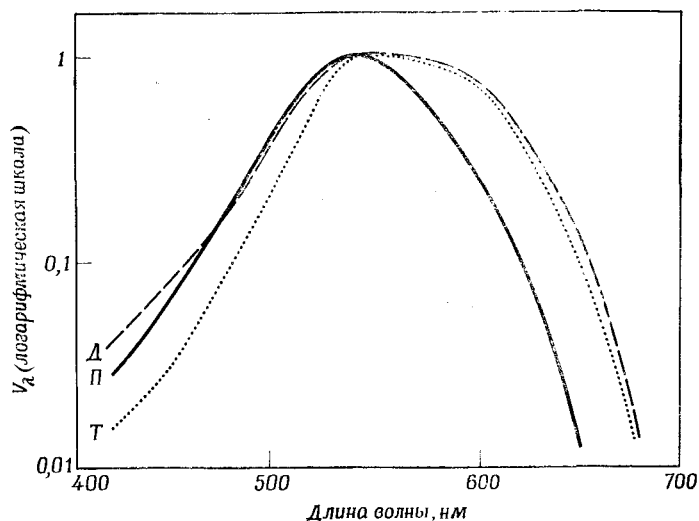


Рис. 10.2. Кривая относительной спектральной чувствительности V_λ для дихроматов. П — протаноп, Д — дейтераноп, Т — тританоп.

красного и зеленого каналов, что дает в результате функцию V_λ , аналогичную функции нормального цветового зрения. Достоверных данных об этом пока нет; не исключено, что существуют два типа дейтеранопов, один с утратой канала, а другой со слиянием. В функции тританопы отмечается небольшое снижение чувствительности при более коротких длинах волны, но оно может быть незначительным; вероятно, это просто результат того, что синий канал сравнительно мало участвует в восприятии яркости.

У аномальных трихроматов функции V_λ сходны с функциями соответствующих дихроматов, однако иногда снижение чувствительности бывает меньшим. Это еще раз указывает на то, что у аномалов цветовое зрение является во многих отношениях промежуточным между нормой и дихроматическим зрением, хотя дефекты этих двух типов, вероятно, обусловлены не одной и той же причиной.

10.4.3. Различение монохроматичности

Функция различения длин волны и функция V_λ в известной степени отражают вариации в различении цветовых тонов и в реакции на яркость при различных длинах волны. Аналогичным образом способность различать степень насыщенности поля по сравнению с белым полем характеризуется функцией различения монохроматичности (рис. 10.3). Эту функцию измеряют примерно так же, как функцию длин волны: сначала предъявляют два белых поля, а затем медленно добавляют к одному из них монохроматический свет до тех пор, пока изменение монохроматичности не станет едва заметным. Здесь тоже очень важно, чтобы яркость была все время одинаковой. Различия в монохроматичности Δp определяют как отношение добавленной цветной яркости к общей яркости (см. также рис. 6.6).

Минимум при длине волны 570 нм в нормальной функции, по-видимому, указывает на низкую насыщенность

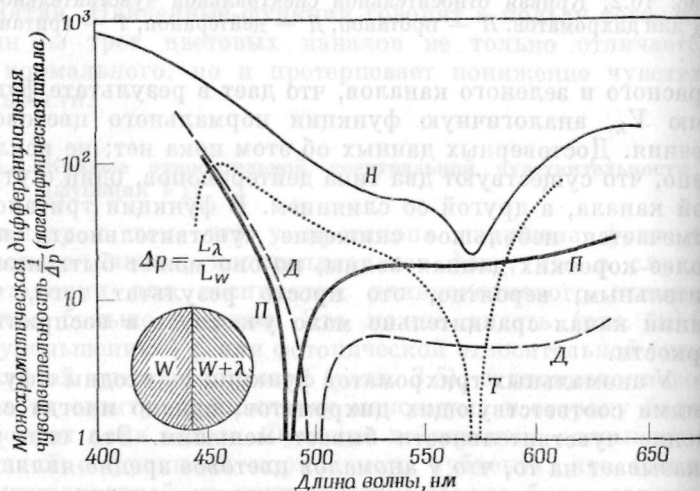


Рис. 10.3. Кривые монохроматической дифференциальной спектральной чувствительности для наблюдателя с нормальным трихроматическим и с дихроматическим зрением. *H* — нормальный испытуемый, *П* — протаноп, *Д* — дейтераноп, *Т* — тританоп.

желтого цвета по сравнению с другими участками видимого спектра. У людей, страдающих протанопией и дейтеранопией, отмечаются аналогичные минимумы примерно при 490 нм и 500 нм соответственно. В этой области изменение по сравнению с белым полем при добавлении одной из этих длин волн не изменяет вида цветного поля; значит, эти монохроматические цвета кажутся дихроматам ахроматическими. Аналогичный феномен наблюдается у аномалов, и выраженность его зависит от степени аномалии.

10.4.4. Смесь цветов и диаграмма цветности

Дихромат находит одинаковыми цвета, неразличимые при нормальном зрении, но, кроме того, путает цвета, которые в норме легко различаются. Путаются только те цвета, которые в норме различаются лишь благодаря действию на тот цветовой канал, функция которого у данного дихромата нарушена. Это легко продемонстрировать

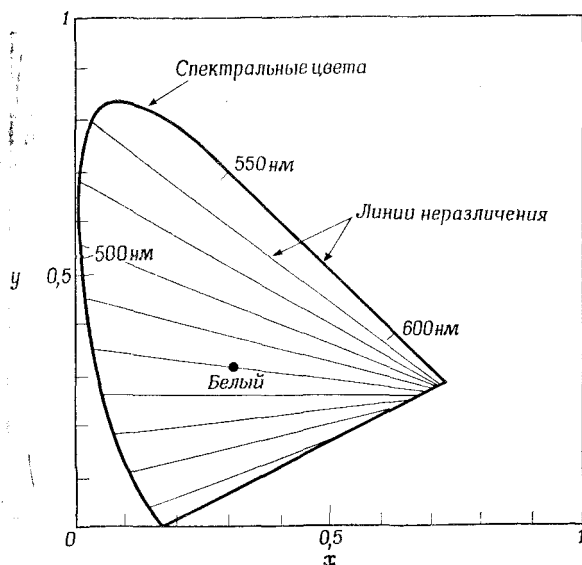


Рис. 10.4. Линии неразличения цветов для протанопов, нанесенные на диаграмму цветности СIE.

на диаграмме цветности нормального испытуемого. На рис. 10.4, 10.5 и 10.6 показаны геометрические места точек, где соответственно протанопы, дейтеранопы и тританопы не различают цвета, на диаграммах цветности CIE. Как и следовало ожидать, это прямые линии. Линия, проходящая через белый цвет, разбивает также цветовой треугольник, указывая тем самым в спектре ахроматическую точку, в которой цвет неотличим от белого цвета той же яркости. Эти так называемые нейтральные точки у протанопов, дейтеранопов и тританопов оказываются при длинах волны около 490, 500 и 570 нм соответственно. Более точные значения будут варьировать в зависимости от выбранного белого цвета.

Аномальные трихроматы в общем случае не воспринимают как идентичные те цвета, которые неразличимы для обычных людей. Способность различения цветов у них понижена, что видно из функций различения длин волны и чистоты цветовых тонов. Как правило, эти эффекты

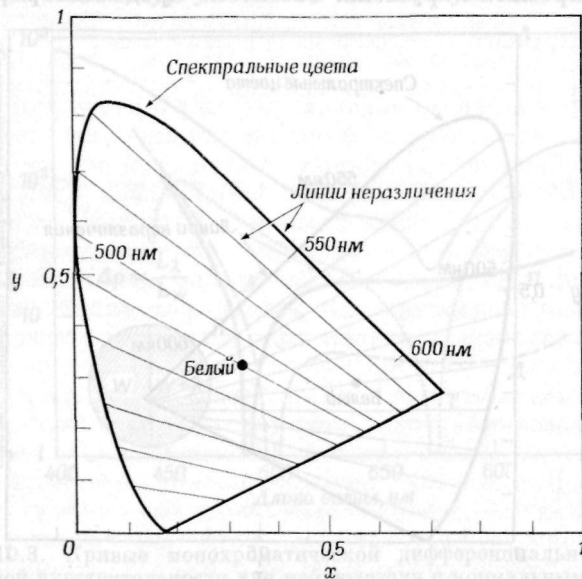


Рис. 10.5. Линии неразличения цветов для дейтеранопов, нанесенные на диаграмму цветности CIE (xy).

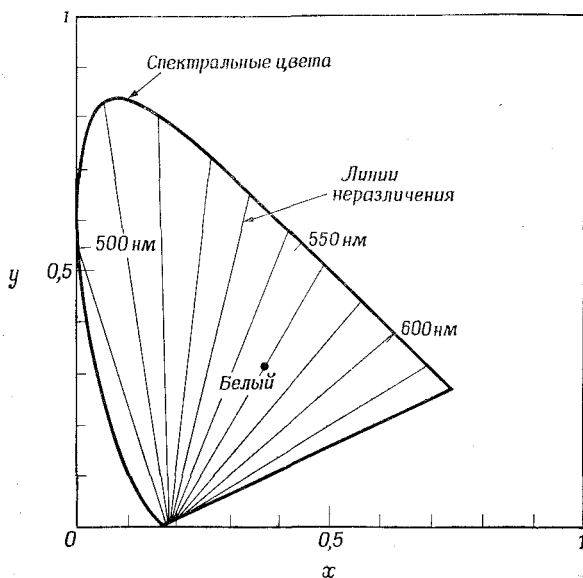


Рис. 10.6. Линии неразличения цветов для тританопов, нанесенные на диаграмму цветности CIE (xy) .

не так сильно выражены, как у дихроматов, и линий полного цветонеразличения нет. Тем не менее эллипсы Мак-Адама (разд. 6.5.1) у аномальных субъектов искажаются приблизительно в направлении цветонеразличительных линий соответствующих дихроматов.

10.5. Выявление дефектов цветового зрения

Выявлять дефекты цветового зрения важно в тех случаях, когда человек выполняет работу, требующую нормального различения цветов. Было разработано множество тестов, из которых одни позволяют отделять всех людей с аномалиями цветового зрения от людей нормальных, а другие предназначены для диагностики типа и степени дефекта.

10.5.1. Аномалоскоп Нагеля

Наиболее известный прибор для выявления протанов и дейтанов — это аномалоскоп, впервые созданный Нагелем в 1907 г. К монохроматическому желтому полю подбирается эквивалент путем аддитивного смешения монохроматических красного и зеленого полей. Из рис. 10.4 и 10.5 видно, что длины волны между 550 нм (зеленый) и 700 нм (красный) лежат на линиях слияния для протанопов и дейтеранопов и что у нормального субъекта этот участок цветового треугольника прямой. Поэтому нормальный человек может подобрать только одну цветовую пару между желтым и соответствующей смесью красного и зеленого. Однако дихромат может подобрать по цвету любую смесь красного и зеленого в пару с желтым путем одного лишь изменения яркости желтого (или смеси). Субъект с аномалией зрения может уравнивать по цвету целый ряд смесей красного и зеленого путем изменения яркости; насколько широки будут границы этого ряда, зависит от степени аномальности зрения. По тому, каков диапазон возможного подбора таких пар, можно судить о том, имеем ли мы дело с нормальным субъектом, дихроматом или аномалом. Можно также отличать протанов от дейтанов, просто заставляя их подобрать одинаковые по яркости пары между красным и желтым. Так как протаны нечувствительны к красному цвету, им понадобится более низкая яркость желтого цвета, чем дейтанам.

Этот тест вполне достаточен для выявления протанов и дейтанов, но с его помощью нельзя обнаружить тритана, который при подборе смесей красного с зеленым будет вести себя как нормальный субъект. Так как ни одна из областей цветового треугольника не совпадает с линией цветонеразличения тритана, невозможно провести подобный тест с помощью монохроматических полей. Однако эту трудность можно преодолеть, используя тщательно подобранные неспектральные раздражители, как, например, в аномалоскопе Пикфорда.

10.5.2. Псевдоизохроматические таблицы

Как мы уже видели, даже люди с нормальным цветовым зрением не могут различать все смеси монохроматических цветов. Наиболее простым примером может служить аддитивная смесь красного и зеленого света, которая воспринимается как желтый свет. Цветнослепые различают меньшее число цветов, чем нормальные люди. Поэтому можно создать цветные поверхности, отражающие смесь многих длин волны, которые кажутся различными по цвету нормальному человеку, но одинаковыми — человеку с дефектом цветового зрения. Рисунки, содержащие такие цвета, часто называют псевдоизохроматическими таблицами.

Эти таблицы представляют собой совокупность различных цветных точек, образующих какой-нибудь узор или знак. Цвета подбираются таким образом, чтобы они находились на геометрических местах точек цветонеразличения дихроматов и аномальных трихроматов. Поэтому определенные знаки (группы точек) видимы как один определенный цвет человеку с дефектом зрения, но не видимы нормальному человеку, и наоборот (фото 17). Существует целый ряд таких тестов, но почти все они пригодны только для выявления протанов и дейтанов. Их преимущество, однако, заключается в дешевизне и скорости проведения тестов, который, во всяком случае, не неприятен для испытуемого.

10.5.3. 100-оттеночный тест и круг оттенков

100-оттеночный тест Фарнsworthа — Мензелла основан на плохом различении цвета протанами, дейтанами и тританами в определенных участках круга оттенков Мензелла (разд. 6.3.2). Испытуемому предлагается расположить в порядке оттенков ряд цветных кусочков картона¹ в виде цветового круга. На рис. 10.7 показаны те области цветового круга, где испытуемые с дефектом зрения часто располагают кусочки не в том порядке, в котором их располагают люди с нормальным цветовым зрением. Число

¹ Первоначально в тесте было 100 кусочков, но впоследствии число их сократили до 85, чтобы сделать интервалы более равномерными.

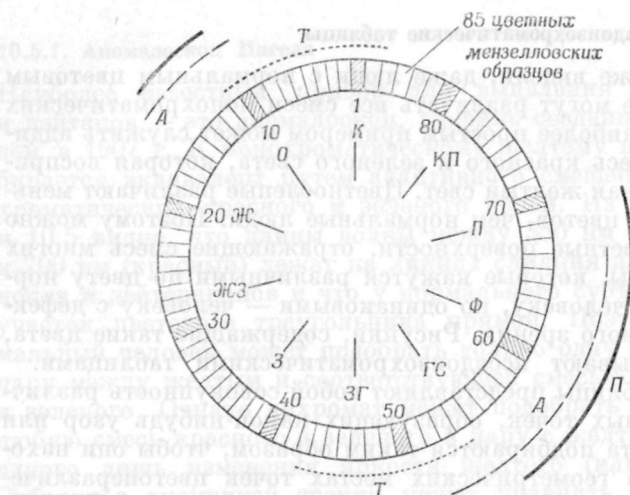


Рис. 10.7. 85 цветов «100-оттеночного» теста. Указаны области обычных ошибок для протанов (П), дейтанов (Д) и тританов (Т). К — красный; О — оранжевый; Ж — желтый; ЖЗ — желто-зеленый; З — зеленый; ЗГ — зелено-голубой; ГС — голубой, синий; Ф — фиолетовый; П — пурпурный.

отклонений от нормального расположения дает дополнительную информацию о степени серьезности дефекта. Этот тест обладает высокой чувствительностью, для его проведения требуется всего несколько минут и приблизительно такое же время для последующего анализа. Поэтому, когда нужно быстро обследовать большое число людей, применяют сходные тесты с таким же цветовым кругом, но с меньшим числом оттенков.

Аналогичный тест, но уже с различием насыщенности цвета, а не длин волны связан с нахождением нейтральной точки (разд. 10.4.4) на круге оттенков. Если круг оттенков предъявляет при различных уровнях насыщенности, медленно добавляя белый цвет к каждому оттенку, то это позволяет не только различить аномальных дихроматов и трихроматов, но и определить тип дефекта. Основанный на этом принципе тест, недавно разработанный Дэйном, известен как анализатор цветового зрения Ловибонда.

10.5.4. Тесты на цветовое зрение для особых целей

Существуют другие тесты на цветовое зрение, которые используются для особых целей. Например, тест Лантерна успешно применяется для обследования людей, профессии которых требует распознавания цветных сигналов, например железнодорожных машинистов, пилотов и т. п. Перед вольфрамовой лампочкой помещают ряд стеклянных фильтров и просят испытуемого описать цвет. Размеры поля могут изменяться для моделирования различных условий восприятия. Фильтры и величину поля выбирают на основе реальных условий труда.

10.5.5. Объективные тесты

Каждый из описанных выше тестов в значительной степени субъективен и зависит от испытуемого. Идеальным вариантом было бы создание объективного теста, при котором бы непосредственно регистрировалось состояние зрительной системы. Это было бы особенно полезно при обследовании маленьких детей, которые не всегда могут содействовать в проведении тестов, если требуется концентрация внимания более чем в течение нескольких минут. В настоящее время такие тесты могут проводиться только в исследовательских лабораториях, где возможны разнообразные измерения, и они не рассчитаны на определение дефектов цветового зрения у больших групп испытуемых.

Дефекты цветоощущения, возникающие вследствие утраты одного из пигментов колбочек, теоретически можно обнаружить с помощью денситометрии сетчатки. На центральную ямку проецируют луч света и измеряют количество отраженного света с помощью чувствительного фотоэлемента. Поглощение света пигментом сетчатки можно измерить путем сравнения количества монохроматического света, отражаемого необесцвеченной (темноадаптированной) сетчаткой, с количеством света, отраженного обесцвеченной (светлоадаптированной) сетчаткой. Проведя эту процедуру при определенной длине волны свыше 500 нм, можно получить спектр поглощения красных и зеленых рецепторов. Если присутствуют два пигмента, получается сложный спектр, а если имеется только один пигмент, то

спектр относительно прост и форма его не зависит от спектрального состава обесцвечивающего света. На основе результатов подобных измерений Раштон высказал предположение, что как у протанопы, так и у дейтеранопы отсутствует какой-то фовеальный пигмент, имеющийся в нормальном глазу. Однако пока исследовано лишь небольшое число испытуемых, и возможно, что существуют два типа дейтеранопов — с утратой и со слиянием каналов цветового зрения.

Другие методы, от которых в будущем можно ожидать пользы при выявлении дефектов цветового зрения, основаны на электрофизиологических измерениях с помощью наружных электродов, прикладываемых к глазу и к голове. Функцию сетчатки отражает электроретинограмма (ЭРГ) (разд. 2.8), для получения которой электрод помещают на роговицу или вблизи нее. Процессы в центральных отделах зрительной системы можно регистрировать в виде электроэнцефалограммы (ЭЭГ) (разд. 2.8), при которой электроды прикладывают к коже головы вблизи так называемой зрительной области. Оба метода уже используются для измерения функциональных параметров, содержащих информацию о различении цветов и относительной спектральной чувствительности; значит, с их помощью можно было бы оценивать и состояние цветового зрения, как и в аналогичных психофизических опытах. В настоящее время регистрация ЭРГ и ЭЭГ широко применяется при клинической оценке других особенностей зрения, и в будущем она, возможно, окажется полезной и при проверке цветового зрения.

10.6. Врожденные дефекты цветового зрения

Один из интересных моментов, отраженных в табл. 10.1, — это большая разница в распространенности дефектов цветового зрения у мужчин и женщин, по крайней мере в частоте протанов и дейтанов. Этот факт, так же как и повышенная частота таких дефектов в ряде поколений в отдельных семьях, указывает на то, что некоторые дефекты цветового зрения имеют генетическую основу. У человека 23 пары хромосом, одна из которых несет информацию о половых признаках. У женщин имеются

две идентичные половые хромосомы (XX) а у мужчин — две неодинаковые половые хромосомы (XY). Передача дефекта цветового зрения определяется геном, находящимся в X-хромосоме. Дефект не проявляется, если другая X-хромосома содержит соответствующий нормальный ген. Поэтому у женщины с одной дефектной и одной нормальной X-хромосомой цветовое зрение будет нормальным, но она может быть передатчиком дефектной хромосомы. Мужчина наследует X-хромосому от матери, а женщина — по одной от матери и от отца. Если предположить, что данный дефект не влияет на выживание вида, то доля женщин с нарушением цветового зрения во всей популяции должна приблизительно равняться квадрату доли мужчин с тем же дефектом. Рассмотрев отдельно данные о протанах и дейтанах, можно убедиться, что примерно так и обстоит дело в действительности (табл. 10.2).

Таблица 10.2

ДЕЙСТВИТЕЛЬНАЯ ЧАСТОТА ПРОТАНОВ И ДЕЙТАНОВ
И ТЕОРЕТИЧЕСКИ ОЖИДАЕМАЯ ЧАСТОТА ИХ СРЕДИ ЖЕНЩИН
(в процентах)

Тип дефекта	Среди мужчин	Среди женщин, ожидаемая частота ¹	Среди женщин, действительная частота
Протаны	2,1	0,044	0,04
Дейтаны	6,0	0,36	0,39

¹ Квадрат соответствующей величины для мужчин.

10.7. Приобретенные дефекты цветового зрения

Цветовое зрение может патологически изменяться и под действием различных внешних причин. При этом могут возникать явления, аналогичные врожденным дефектам, причем обычно процесс прогрессирует от нормального трихроматизма через какую-то форму аномального трихроматизма, а затем дихроматизма и, наконец, доходит иногда до монохроматизма. Часто эти нарушения маскируются другими дефектами зрения, и аналогия здесь не заходит слишком далеко. Дефекты цветового зрения, иногда необ-

ратимые, могут вызваться рядом препаратов, применяемых в медицинской практике. Чрезмерное употребление табака, алкоголя и возбуждающих средств тоже ведет иногда к ухудшению цветового зрения. Такие глазные болезни, как глаукома, повышенное внутриглазное давление и особенно заболевания, связанные с поражением макулярного или центрального зрения, сопровождаются и дефектами цветового зрения; обычно при этом ухудшается различение красного и зеленого или синего и желтого цветов. Об ухудшении этих функций в результате старения хрусталика мы уже упоминали ранее (разд. 10.3.1).

10.8. Значение дефектов цветового зрения в повседневной жизни и в связи с выбором профессии

Люди, страдающие аномалиями цветового зрения, лишены некоторых аспектов восприятия, значение которых может быть различным. Очевидно, что колбочковый монохромат оказывается в очень трудном положении, когда для облегчения передачи зрительной информации используется цвет. Дихроматы и аномальные трихроматы обычно будут испытывать меньше неудобств. Все мы знакомы с черно-белыми фотографиями, фильмами и телевидением, и их приемлемость для нас говорит о том, что наше зрительное восприятие во многих отношениях не зависит от цвета. Количество зрительной информации, содержащееся в штриховых рисунках и карикатурах, еще раз подтверждает, что в большинстве случаев важнее всего форма, на втором месте стоит распределение яркости и только на третьем — цвет. Цвет часто представляет собой скорее роскошь, чем необходимость.

В мире искусства и моды, где цвет зачастую намеренно используется как стимул, люди с дефектами цветового зрения, как правило, оказываются в невыгодном положении. Однако даже в этой сфере можно найти примеры того, как страдающие такими дефектами воспринимают мир в более привлекательном виде. Некоторые всемирно известные художники, как теперь стало известно, страдали дефектами цветового зрения, и было даже высказано мнение, что их аномальное видение мира было им на пользу.

Примитивный пример преимущества, которое может дать аномальное цветовосприятие,— это возможность увидеть на псевдоизохроматической таблице узор, который не воспринимается людьми с нормальным зрением (фото 17).

Профессионального риска, связанного с дефектами цветового зрения, следует, конечно, избегать. Представьте себе на минуту электротехника, который не может различить красный, зеленый и синий цвета кабелей электропроводки, повсеместно используемые в Великобритании в течение многих лет. Водителям транспорта часто приходится распознавать цветные сигналы с расстояния, слишком далекого для того, чтобы можно было руководствоваться какими-то дополнительными признаками. В таких профессиях соответствующие тесты совершенно необходимы, так как от качества выполнения работы здесь зависит безопасность как самого работающего, так и окружающих. Еще одна сфера деятельности, доступная только для лиц с нормальным цветоощущением,— это работа, связанная со зрительной оценкой внешнего вида различных товаров, имеющих номинально одинаковый цвет. Человек с нормальным цветовым зрением обладает острой чувствительностью к малейшим различиям в цвете, и небольшая разница в окраске отдельных частей одного предмета, который должен быть однотонным, во многих случаях вызывает раздражение. Например, дверца автомобиля может оказаться несколько иного оттенка, чем вся машина, из-за использования разных партий краски, которая номинально должна быть одного цвета, и недостаточного контроля за цветом. Аналогичные примеры можно привести из области текстильного производства и т. п.

Для облегчения идентификации предметов, сходных по виду, часто применяется цветовой код. Сюда относятся маркировка труб, содержащих различные жидкости и газы, на заводах, специальная окраска таких радиодеталей, как сопротивления и конденсаторы. Люди с дефектом цветового зрения, даже сравнительно небольшим, могут легко допускать серьезные ошибки. В тех случаях, когда они не подозревают о существовании у них дефекта зрения, они могут объяснять такие ошибки неудачным подбором используемых цветов. Поэтому в современных цветовых кодах стараются избегать применения наиболее часто спу-

тываемых цветов или же обеспечить дополнительные нецветовые маркеры в тех случаях, когда могут возникнуть серьезные ошибки.

При воспроизведении цветов, например в фотографии, кинематографии и телевидении, важно, чтобы воспроизводимые цвета, которые в лучшем случае должны восприниматься нормальными людьми как метамерически равноценные с исходными цветами (см. разд. 5.5), не казались неприемлемыми для людей с нарушенным цветовым зрением. В фотографии это сравнительно несущественно, так как здесь используются широкополосные основные цвета, обычно плохо различаемые цветоаномалиями. Однако все возрастающая популярность цветного телевидения, где часто применяются узкополосные фосфоры, возможно, приведет к тому, что важно будет учитывать и влияние дефектов цветового зрения.

Цвет в нашей жизни

11.1. Почему у нас есть цветовое зрение?

Как мы уже говорили в гл. 4, наряду с человеком способностью воспринимать в цвете образы окружающего мира обладают рыбы, птицы и высшие приматы. Обладать цветовым зрением — это по существу значит иметь возможность получать и перерабатывать большее количество информации о внешней среде; это позволяет, скажем, отличать спелые плоды, например клубнику и помидоры, от неспелых. Ясно, что такая способность имеет определенное приспособительное значение.

Интересно, что таких насекомых, как пчелы, привлекает окраска определенных цветов, и это служит примером поведенческой связи, опосредуемой цветом, между представителями животного и растительного мира; пчелы получают нектар, а цветы при этом опыляются. Поскольку, однако, у огромного множества видов цветового зрения нет и тем не менее они выживают, возникает вопрос о том, почему развился этот невероятно сложный механизм.

Разумеется, способность видеть цвет имеет для нас очень большое значение в эстетическом плане, и можно было бы даже сказать, что это одна из важных предпосылок нашей повседневной культурной жизни в том виде, в котором мы ее знаем. Но трудно не согласиться с тем, что эстетический аспект цветового зрения — это всего лишь добавочное преимущество, а не основная причина обладания цветоощущением. Нельзя представить себе рыбу или птицу, которая любовалась бы полотнами Тёрнера или Констебля или хотя бы воспринимала красоту ландшафта — соответственно подводного или наземного.

Цвет как источник эстетического наслаждения стоит в одном ряду с музыкой, литературой и искусством вообще, а они являются побочным продуктом деятельности необычайно развитого мозга, который обладает колоссальными резервными возможностями. Реализация этих возможностей ведет к появлению сложной культуры, которая заслуженно считается высочайшим достижением человека и вполне себя оправдывает, но в которой тем не менее нет ничего, что было бы необходимо для элементарного выживания вида.

11.2. Цвета вокруг нас

Как бы то ни было, нас окружает природа с ее поразительным великолепием красок. Мы видим зеленую траву и голубое небо, мир полон ярко окрашенных цветов и животных. Но мы не можем жить под открытым небом — нам нужна крыша над головой, и мы нередко щедро украшаем интерьер своего жилища. Даже в самом скромном коттедже стены окрашены краской или оклеены цветными обоями. Соответственно своему настроению мы выбираем цвета одежды, которую носим, а высокое положение в обществе часто отмечается каким-либо отличительным цветом, например пурпурным.

11.3. Цвет в атмосфере

Попробуем рассмотреть происхождение и назначение некоторых удивительных цветов в природе. Почему небо голубое? Этот феномен имеет чисто физическую основу. Мельчайшие молекулы, образующие земную атмосферу, рассеивают свет. Лорд Рэлей установил, что рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны. Это значит, что голубой свет с меньшей длиной волны рассеивается в 11 раз сильнее, чем красный, волны которого длиннее.

Метеорологические цветовые явления, такие, как радуга и ореолы (гало), тоже обусловлены физическими законами действия вещества на лучи света. Радуга возникает в результате преломления и отражения света дождевыми каплями (рис. 11.1). Угол между падающим лучом солнца

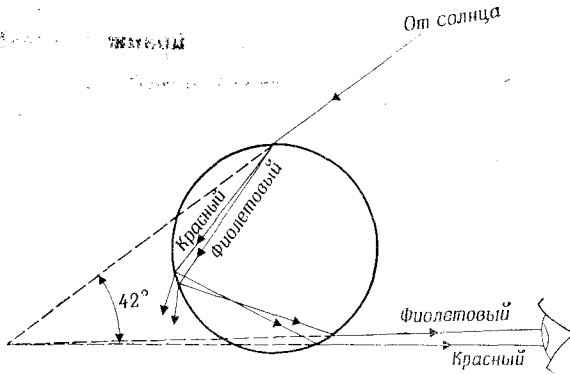


Рис. 11.1. Путь солнечного луча, отраженного в водяной капле при образовании радуги.

и отраженным лучом составляет около 42° . Это приводит к образованию дуги отраженного света (рис. 11.2), которая является проекцией на небо совокупности всех дождевых капель, лежащих на поверхности конуса с углом при вершине 42° . Поскольку коэффициент преломления воды различен в зависимости от длины волны света, лучи разного цвета отклоняются по-разному и дуга, расширяясь, превращается в спектр с вершиной в точке, где находится глаз наблюдателя. Центр дуги находится в точке неба, диаметрально противоположной солнцу. Поскольку для того, чтобы радуга вообще могла образоваться, солнце должно находиться на горизонте или выше горизонта, центр дуги лежит либо на горизонте, либо ниже его. Внутреннее

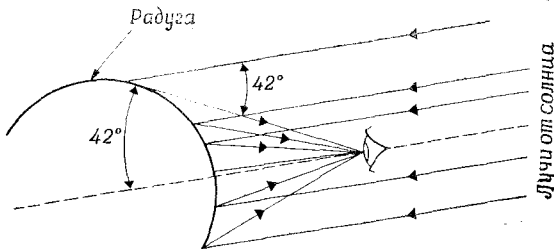


Рис. 11.2. Образование радуги.

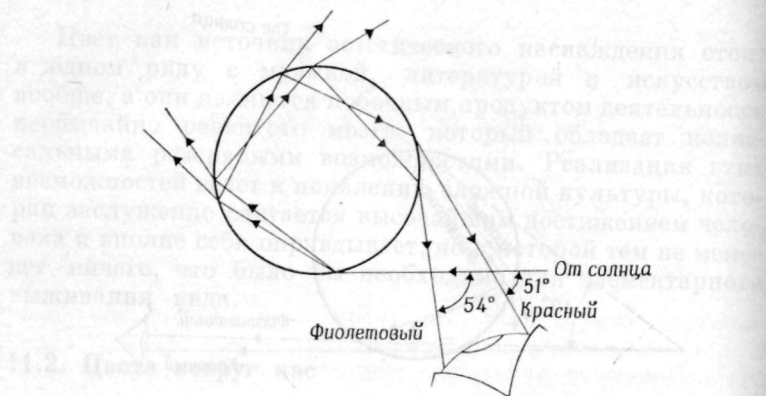


Рис. 11.3. Путь солнечного луча, отраженного в водяной капле при образовании вторичной радуги.

отражение лучей в капле воды приводит к частичной поляризации света в радуге. В этом легко убедиться, если смотреть на радугу через кусочек поляроида, медленно поворачивая его.

Иногда рядом с основной радугой можно видеть еще одну, вторичную радугу большего радиуса (около 52°). Последовательность цветов в ней обратная по сравнению с первичной радугой, т. е. красный цвет — с внутренней стороны, а фиолетовый — с наружной. Вторичную радугу образует свет, который подвергся двойному отражению внутри каждой капли дождя (рис. 11.3). Аналогично этому солнечный ореол и «ложное солнце», а также лунный ореол возникают в результате преломления солнечного или лунного света в кристалликах льда, находящихся в верхних слоях атмосферы, и часто бывают лишь слабо окрашенными.

После радуги наиболее эффектные цветовые явления — утренние зори, которые появляются в результате вхождения в земную атмосферу заряженных частиц, выбрасываемых солнцем.

Из всего сказанного ясно, что атмосферные цвета представляют собой чисто случайные для нас физические феномены, при которых свет изменяется и вызывает измененную реакцию механизмов нашего цветового зрения.

11.4. Цвета в живой природе

В растительном мире цвета обусловлены пигментами — веществами, поглощающими свет, химическая структура которых часто бывает невероятно сложной. Зеленый цвет травы зависит от присутствия хлорофилла, который имеет полосу поглощения в красной области спектра с максимумом при 660 нм. Это можно легко показать, если экстрагировать хлорофилл из растертых листьев жгучей крапивы этиловым спиртом (или денатуратом), а затем профильтровать экстракт и поместить его в прозрачный стеклянный сосуд (кювету) перед щелью спектро스코па. При использовании белого света будет хорошо видна полоса поглощения в красной области.

Поглощение света зелеными растениями составляет основу фотосинтеза, при котором световая энергия преобразуется в химическую. Этот процесс чрезвычайно важен, и именно от него в конечном счете зависит существование всего живого на Земле. То, что трава кажется нам зеленой, — факт случайный для нас, он не имеет фундаментального значения. Хлорофилл сильно отражает свет и в инфракрасной области спектра, и если бы наши глаза были чувствительны к этому излучению, то трава и листья казались бы нам гораздо более яркими и совсем другого цвета.

Во всех пигментах, содержащихся в цветках, имеется сопряженная система чередующихся двойных и одиночных связей между атомами углерода, как правило, с одной или несколькими хромофорными группами. Из этих пигментов наиболее важны антоцианины, придающие оттенки от красного до синего, каротиноиды (желтые) и флавоны (кремовые). Встречаются также азотистые и хиноноидные пигменты.

Окраска цветков несет функцию привлечения пчел и других насекомых-опылителей, что очень важно для жизненного цикла растений. Так как цветовое зрение пчел отличается от цветового зрения людей, цвета должны казаться им иными. Пчелы чувствительны даже к некоторым участкам ультрафиолетового спектра. Очевидно, что в данном случае важно то, какими представляются цветки пчелам, а не нам.

В животном мире цвета часто бывают на редкость яркими, особенно у некоторых жуков, бабочек и птиц. Особенно интересна изумительная окраска бабочек. Например, красивые африканские бабочки-данаиды (*Danaus chrysippus*), очень заметные благодаря своей оранжево-черно-белой окраске, опознаются птицами как сильно ядовитые, так как они содержат ряд сердечных ядов. У птиц хорошо развито цветовое зрение, поэтому у бабочек и выработалась окраска, которая видна птицам и служит защитой от них. То, что бабочки красивы для нас, — факт биологически несущественный.

Еще одно очень интересное явление — поразительное внешнее сходство некоторых бабочек с ядовитыми данаидами. Эти бабочки совершенно безвредны, но из-за их раздражательной окраски птицы не трогают их, так как ошибочно принимают их за ядовитые формы.

У животных цвета часто зависят не от присутствия пигментов. Например, окраска некоторых жуков, таких, как *Heterorrhina elegans*, обусловлена интерференционными явлениями в многослойной тонкой пленке, а синий цвет у южноамериканской бабочки морфо — результат трехмерной дифракции в сложной структуре чешуек на крыльях. Аналогичную основу имеют цвета в «глазах» крыльев у павлина.

Таким образом, природа использует очень сложные химические и физические средства для создания различных цветов, которые имеют гораздо большее значение для растений и животных, чем для нас.

11.5. Цвет и жизнь человека

Если не считать некоторых выгод, связанных с выживанием, например способности отличать зрелый плод от незрелого, создается впечатление, что другие преимущества, получаемые нами от цветового зрения, такие, как увеличение контраста и видимости предметов внешнего мира, не столь существенны и, во всяком случае, жизненно важного значения не имеют.

Конечно, в сумерках или ночью, в условиях слабого освещения, для нас создаются некоторые трудности, так как палочки сетчатки нашего глаза не обеспечивают

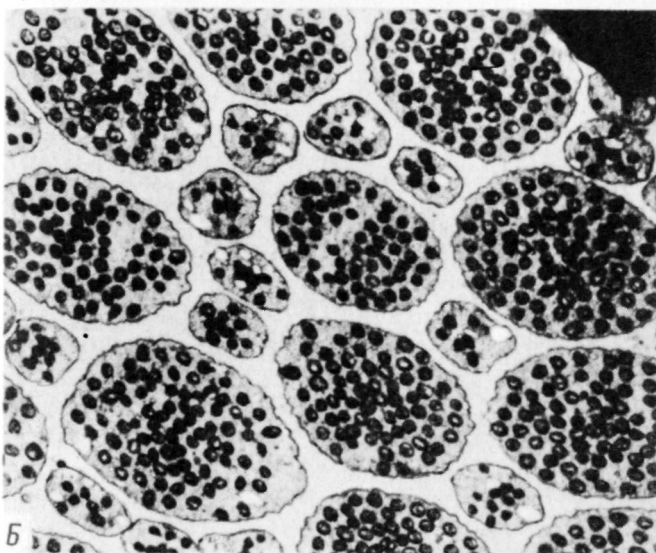
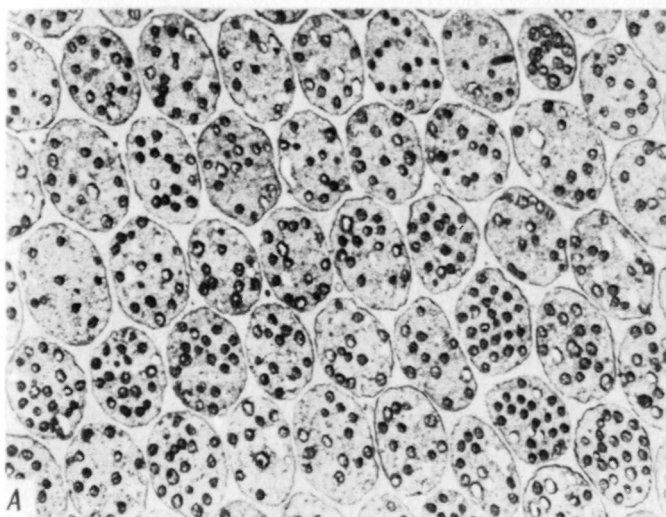


Фото 1. Срезы, проходящие через внутренние сегменты фоторецепторов (сетчатка обезьяны, препарат G. Ruskell). А. Колбочки в середине центральной ямки. Диаметр колбочек 1,25 мкм. Б. Палочки (профили меньшей величины) и колбочки около края области, не содержащей палочек. Диаметр палочек 0,9 мкм, колбочек — 2,5 мкм. По своим размерам рецепторы несколько отличаются от соответствующих рецепторов человека.

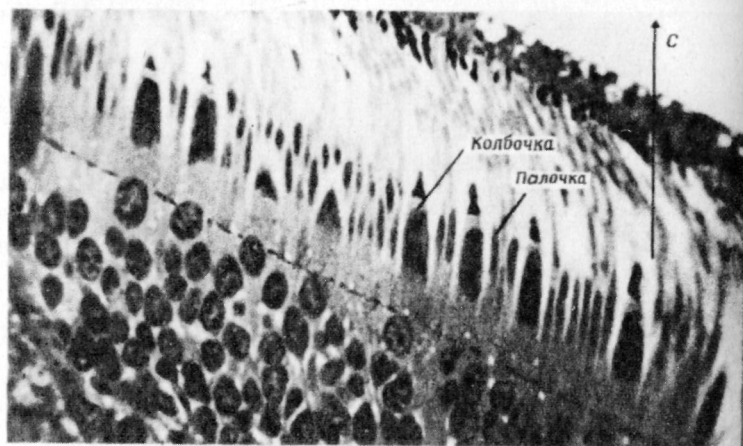
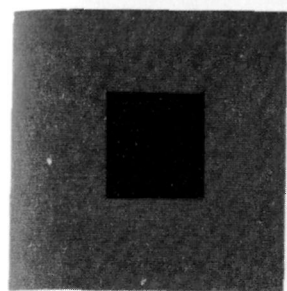
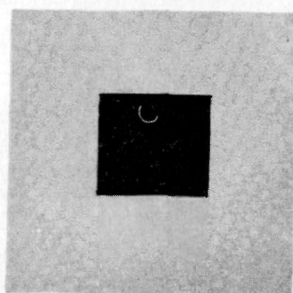


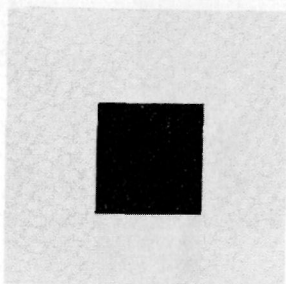
Фото 2. Поперечный срез сетчатки, проходящий вблизи слепого пятна (препарат G. Ruskell). *C* — направление падающего света.



А



Б



В

Фото 3. Изменение субъективного контраста с изменением светлоты фона. *А*. Слабый контраст. *Б*. Средний контраст. *В*. Сильный контраст.

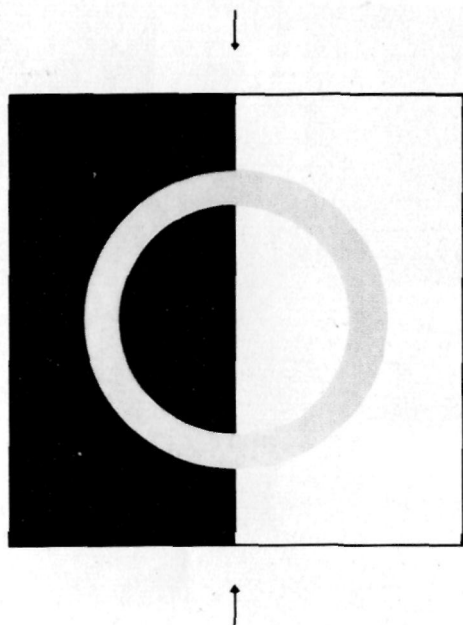


Фото 4. Влияние контраста светлоты на воспринимаемую светлоту. Часть круга, расположенная на черном фоне, кажется более светлой (менее серой). Этот эффект резко усилится, если прикрыть (например, карандашом) среднюю вертикальную линию, указанную стрелками. Посмотрите, что будет, если медленно сдвигать карандаш вправо или влево.

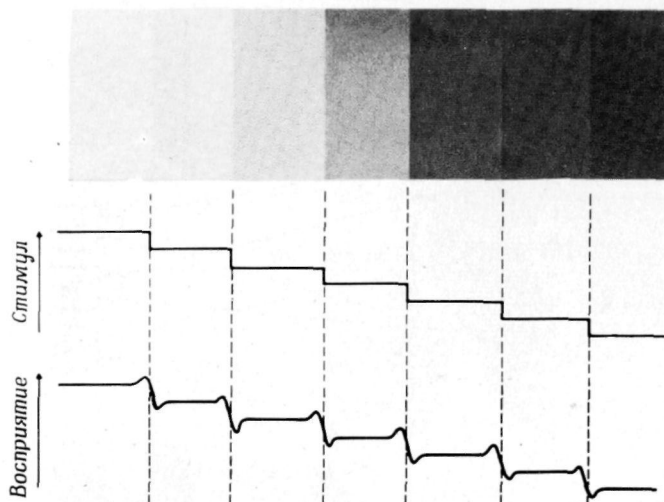


фото 5. Полосы Маха. Отражательная способность каждого из серых прямоугольников везде одинакова (поэтому кривая светлоты имеет ступенчатую форму). Однако узкая полоска слева от каждой границы кажется более светлой, а справа — более темной (нижняя кривая), что объясняется эффектом контраста.

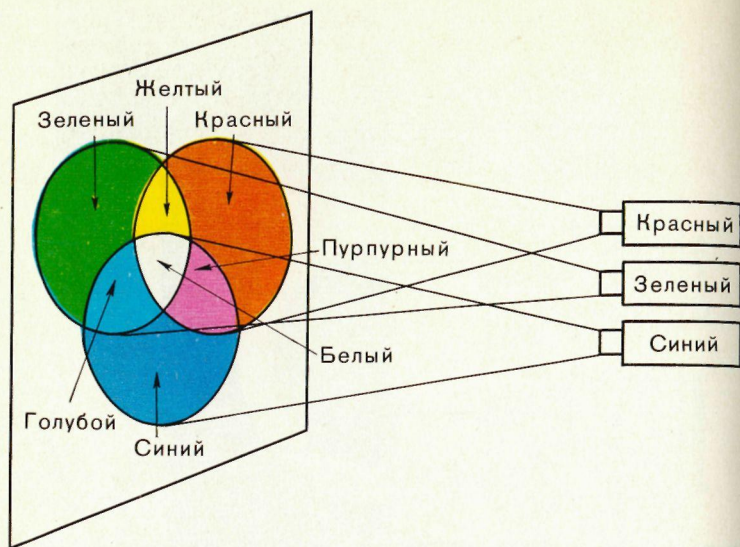


Фото 6. Опыт Томаса Юнга по смешению цветов.

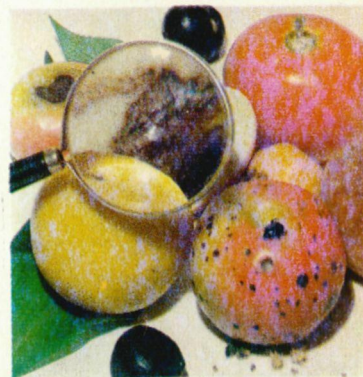
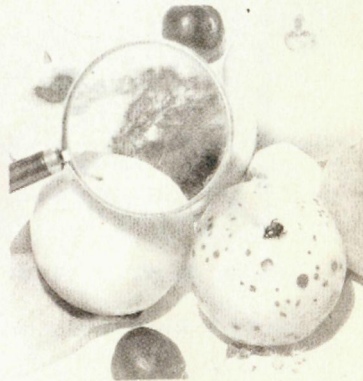
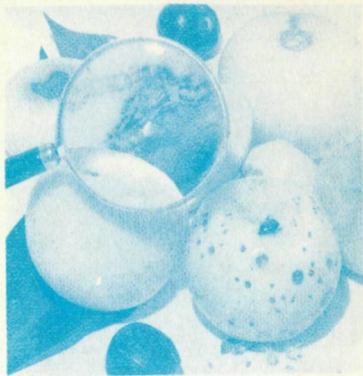


Фото 7. Три цветных позитивных и черно-белое изображения по отдельности и наложенные друг на друга.



Фото 8. Полутонная печать при большом увеличении.



Фото 9. Часть фотографии, полученной методом высокой печати, при большом увеличении.

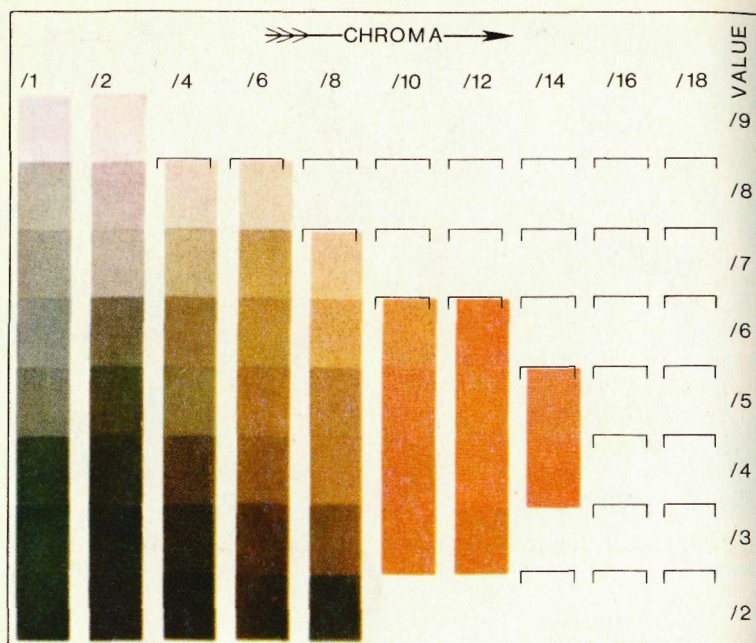
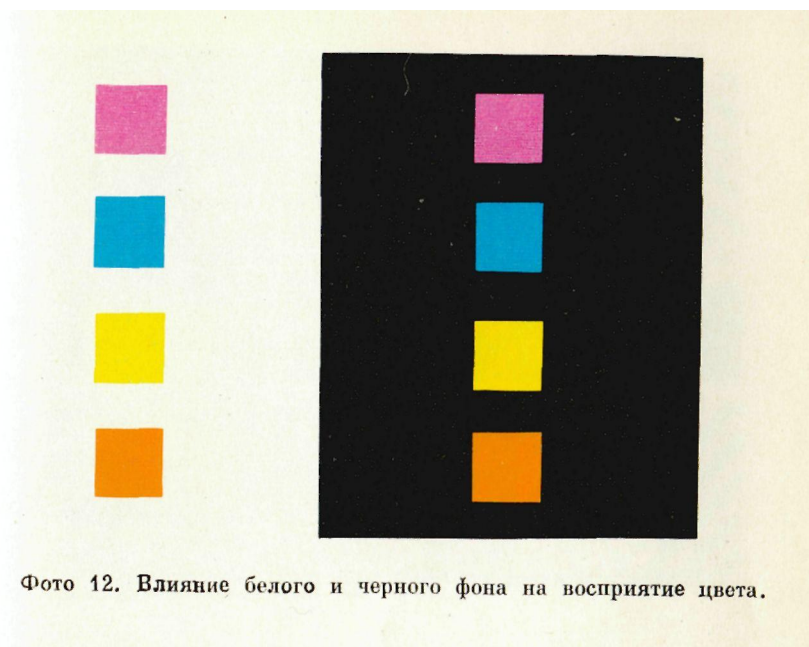


Фото 10. Страница Атласа цветов Мензелла с образцами одного и того же тона (5K).



Фото 11. Эффект тританопии малого поля.



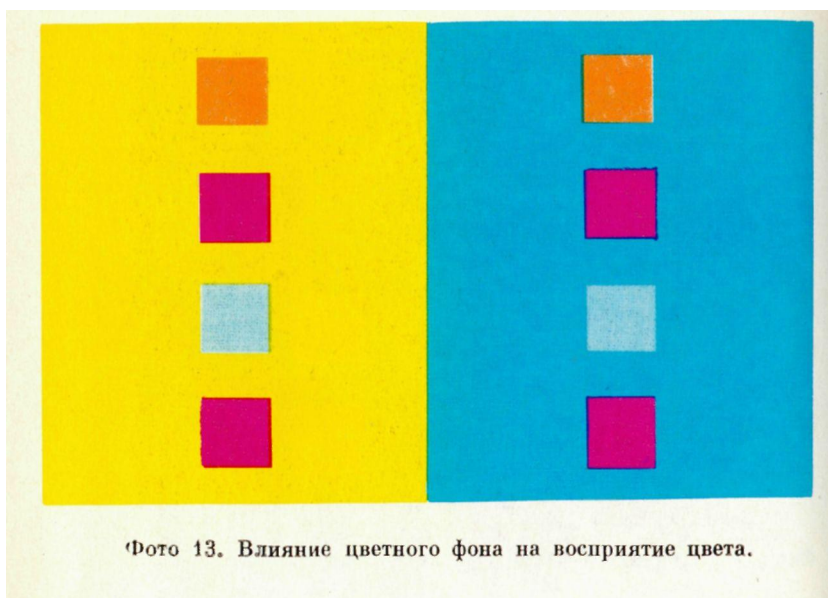


Фото 13. Влияние цветного фона на восприятие цвета.



Фото 14. Одновременный цветовой контраст (узор С. Харри).

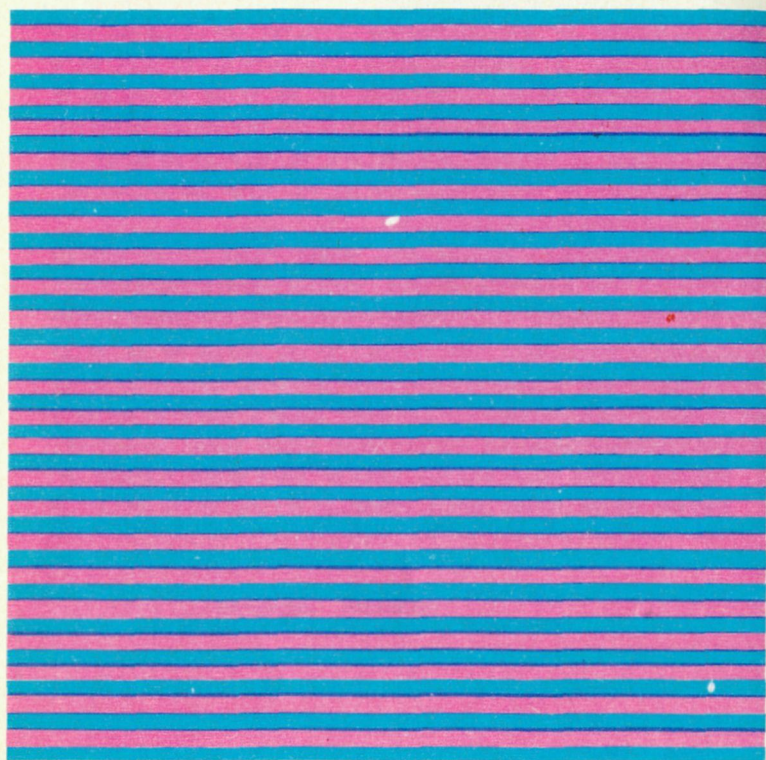


Фото 15. Здесь возникает эффект смешения красного и синего цветов, хотя они пространственно разделены.

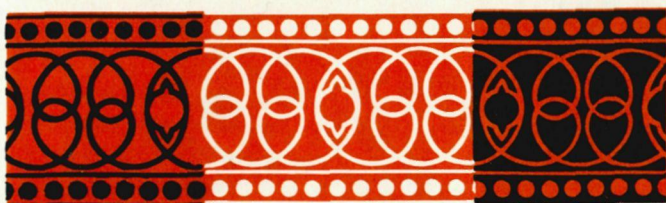
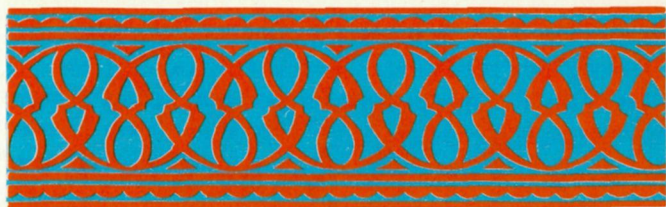


Фото 16. Эффект распространения. Хотя цвет фона по всей длине каждой полосы одинаков, он кажется темнее там, где на него накладывается черный узор, и светлее — там, где узор белый (из книги R. M. Evans, *An Introduction to Colour*).

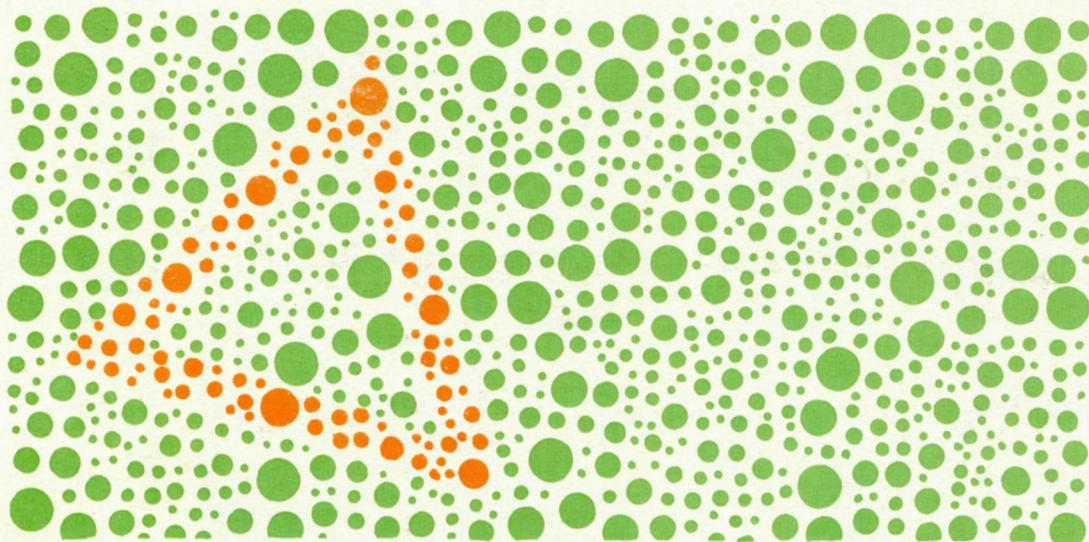


Фото 17. Псевдоизохроматическая таблица (автор J. Birch). Испытуемый с нормальным цветовым зрением будет видеть оранжевый треугольник на зеленом фоне. Протаноп или протоаномальный трихромат совсем не увидит этого треугольника или не сможет точно указать его контур.

нам ни хорошей остроты зрения, ни различения цветов. И все же ночью можно заниматься довольно многими делами.

Но как разительно изменяется наше ощущение уверенности в зависимости от того, находимся ли мы на ярком солнечном свете в полдень или же в ночной тьме. Глаз может адаптироваться к чрезвычайно большим изменениям освещенности сетчатки, но он не может видеть цвета ночью. Даже днем истинная яркость и насыщенность цветов не воспринимаются полностью до тех пор, пока не выйдет солнце. Только тогда мы начинаем понимать, что значит цвет для нашей жизни и для нашего духовного и культурного существования.

Интересно, конечно, отметить, что мы часто можем обходиться без цвета. Большинство газет печатает только черно-белые иллюстрации; цвет не используется во многих фильмах и телевизионных передачах.

И все же воспроизведение цвета в иллюстрациях и на телеэкране в огромной степени повышает реализм изображения и доставляемое удовольствие, и это почти необходимо в фильмах, например, об изобразительном искусстве (живописи) или в фильмах о природе, например о флоре и фауне.

Трудно не прийти к выводу о том, что эстетическое удовольствие от красок ландшафта, морского пейзажа или бесценного произведения искусства — результат почти случайного сенсорного преимущества, которым мы обладаем благодаря цветовому зрению. Это можно сравнить с другим аналогичным фактом: что наши уши и мозг устроены таким образом, что обыкновенные физические колебания воздуха, соответствующим образом регулируемые, могут вызывать исключительно приятные восприятия мелодии и вообще музыки. Иными словами, наши глаза, уши и мозг приобрели такую сложную организацию, что они уже слишком сложны и утончены для решения одних лишь задач выживания и продолжения рода. Их потенциальные возможности огромны. Когда человек в своем развитии прошел тот этап, на котором все его время бодрствования необходимо было затрачивать на обеспечение жизни, и когда он научился искусственно удлинять естественный светлый период суток, тогда

резервы его сенсорных систем и его мозга начали раскрываться, развиваться и использоваться. С того времени и начинается развитие эстетического и художественного восприятия.

Среди всех живых организмов мы выделяемся тем, что наше культурное бытие подчас доминирует над нашим базисным физическим существованием, и мы с полным правом высоко ценим доставшееся нам культурное и художественное наследие.

Цвет был одним из факторов, которые способствовали этому необычайному расширению перцептивной сферы нашего бытия. Он неизмеримо повышает радость жизни и удовлетворение, которые мы от нее получаем. Может быть, эта небольшая книжка помогла читателю хотя бы немного лучше познакомиться с проблемой восприятия цвета — одной из самых увлекательных и фундаментальных проблем.

11.6. Цвет и сновидения

Механизмы восприятия не выключаются полностью даже тогда, когда мы засыпаем. Как показали современные исследования, существует два типа сна — так называемый нормальный, или ортодоксальный, сон и парадоксальный сон.

Парадоксальный сон называется так потому, что во время такого сна у человека осуществляются мозговые и некоторые другие функции, которые обычно связаны с состоянием бодрствования.

Именно во время этих парадоксальных фаз сна (вероятно, трех или более периодов длительностью около 25 мин каждую ночь) возникают быстрые движения глаз под закрытыми веками и отмечаются сновидения. Видимо, существует какой-то внутренний механизм, обеспечивающий забывание большинства снов, но, когда мы их все-таки можем вспомнить, они кажутся нам весьма реальными и жизненными переживаниями. Как это ни удивительно, только половина наших сновидений цветная. Кроме того, в некоторых снах, состоящих из черно-белых образов, бывают лишь один или два предмета, выделяющихся своей яркой окраской. Почему сны бывают такими реали-

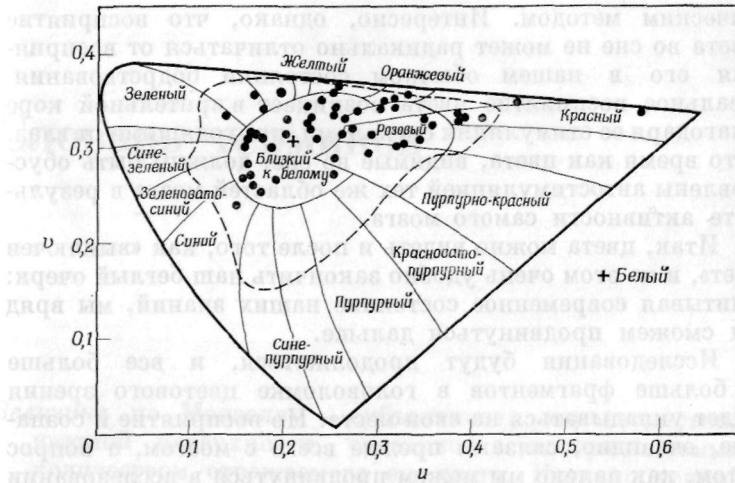


Рис. 11.4. Цвета, видимые во сне, нанесенные на диаграмму цветности СIE (u , v). Пунктирной линией обведена область цветов, видимых в повседневной жизни, которые могут быть изображены с помощью красок и чернил.

стичными и в то же время часто не цветными, пока неясно; может быть, причина этого в том, что цвет воспринимается не тем участком мозга, который воспринимает светлоту и форму. Области, воспринимающие цвет, иногда могли бы быть во время сновидения «выключены».

Тренируясь, можно научиться лучше запоминать содержание своих снов, и часто удается вспомнить цвета, виденные во сне. Один из авторов этой книги и некоторые из его студентов в течение нескольких месяцев записывали свои сны и тут же как можно скорее определяли некоторые из виденных ими цветов с помощью атласа цветов Мензелла и других средств. На рис. 11.4 показаны отметки этих цветов на диаграмме СIE. Здесь выясняется ряд интересных моментов. Как правило, это цвета не полностью насыщенные. Можно также заметить преобладание красных и желтых тонов и большой дефицит синих. Это могло бы быть связано с тем, что в мозгу мало элементов, воспринимающих синий цвет. Ясно, что видимые во сне цвета никогда нельзя будет точно определить колоримет-

рическим методом. Интересно, однако, что восприятие цвета во сне не может радикально отличаться от восприятия его в нашем обычном состоянии бодрствования. Реальное восприятие цвета возникает в зрительной коре благодаря ее стимуляции сигналами, приходящими от глаз, в то время как цвета, видимые во сне, должны быть обусловлены автостимуляцией тех же областей мозга в результате активности самого мозга.

Итак, цвета можно видеть и после того, как «выключен свет», и на этом очень удобно закончить наш беглый очерк: учитывая современное состояние наших знаний, мы вряд ли сможем продвинуться дальше.

Исследования будут продолжаться, и все больше и больше фрагментов в головоломке цветового зрения будет укладываться на свои места. Но восприятие и сознание, очевидно, связаны прежде всего с мозгом, а вопрос о том, как далеко мы можем продвинуться в исследовании внутренней деятельности мозга, заставляя мозг изучать самого себя, относится скорее к области философии.

Список литературы

- Gregory R. L.* (1966). *Eye and Brain, the psychology of seeing*. World University Library, Weidenfeld and Nicolson.
- Helmholtz H. von* (1885—1895). *Helmholtz's Treatise on Physiological Optics*, vols I, II and III, Ed. J.P.C.S. Southall, Dover reprint, 1962.
- Niven W. D.* (ed.) (1965). *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover reprint.
- Pirenne M. H.* (1967). *Vision and the Eye*. Science Paperbacks, Chapman and Hall.
- Weale R. A.* (1968). *From Sight to Light*. Contemporary Science Paperbacks No. 24, Oliver and Boyd.
- Scientific American published monthly often has excellent articles on vision. Single reprints of past articles can be obtained from W. H. Freeman and Co. Ltd., 58 Kings Road, Reading, RG1 3AA.

Дополнительная литература

- Cornsweet T. N.* (1970). *Visual Perception*. Academic Press.
- Hunt R. W. G.* (1974). *The Reproduction of Colour*, 3rd Ed. Fountain Press.
- Judd D. B.* and *Wyszecki G.* (1963). *Color in Business Science and Industry*. Wiley.
- Wright W. D.* (1969). *The Measurement of Colour*, 4th Ed. Adam Hilger.

Словарь терминов

Величина по Мензеллу — субъективная характеристика цветной поверхности, связанная с воспринимаемым количеством отражаемого ею цвета. Истинно черной поверхности приписывается номер 0, а истинно белой — 10.

Восприятие представляет осознанное внутреннее отображение окружающей действительности. Оно основано на интерпретации сигналов, поступающих от органов чувств, в свете прошлого опыта, хранилищем которого служит память. Зрительное восприятие позволяет нам осознавать присутствие, цвет, форму и расположение внешних объектов.

Диоптрия. Оптическая сила линзы — это величина, обратная ее фокусному расстоянию, измеряемому в метрах; единицей измерения служит диоптрия. Например, оптическая сила линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м, составляет 1 диоптрию, а линзы с фокусным расстоянием 0,5 м — 2 диоптрии.

Доминирующая длина волны определяет положение цветового раздражителя на диаграмме цветности аналогично тому, как это делается в системе координат цветности. Любой цвет (кроме пурпурных цветов) можно получить смешением соответствующих количеств монохроматического света доминирующей длины волны с белым светом. Поскольку пурпурные цвета таким способом получить нельзя, вместо доминирующей длины волны пользуются понятием дополнительной длины волны (см. рис. 7.9).

Интенсивность цвета (см. цветовую шкалу Мензелла) представляет собой качество цветового ощущения, связанное с содержанием в образце чистого цвета. Интенсивность цвета однозначно связана с насыщенностью. Цвет поверхности высокой насыщенности характеризуется интенсивностью, равной 16 или выше; интенсивность белого цвета равна 0.

Контраст (субъективный) представляет собой субъективную оценку различия в яркости и (или) цвете между двумя объектами.

Насыщенность — один из параметров ощущения цвета, отражающий содержание в образце чистого цвета. Максимальная насыщенность имеет место при рассмотрении спектрального цвета высокой яркости, а минимальная — белой поверхности. Воспринимаемая насыщенность цветных поверхностей выражается в единицах шкалы интенсивностей цветов Мензелла.

Оптическая плотность среды определяется как $\log_{10} (1/\tau)$, где τ — коэффициент пропускания, или отношение прошедшего света к падающему. Так, например, оптическая плотность, равная 1,0, соответствует коэффициенту пропускания 0,1, а оптическая плотность 2,0 — коэффициенту пропускания 0,01. Если в пучок света поместить два или более фильтра, их оптические плотности будут суммироваться.

Освещенность поверхности определяется как световой поток (или количество света в секунду), падающий на единицу площади. Измеряется в люменах на 1 м^2 ($\text{лм} \cdot \text{м}^{-2}$), или люксах.

Освещенность сетчатки представляет собой световой поток (или количество света в секунду), падающий на единицу площади сетчатки. За единицу освещенности сетчатки принят люкс или (чаще) троланд. Число троландов определяется площадью зрачка глаза наблюдателя (в мм^2) и яркостью (в $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$) наблюдаемой поверхности.

Ощущение представляет собой первичную основу восприятия. Так, мы ощущаем свет, цвет, звук, температуру, боль, запах, вкус и т. д. Восприятие формируется в результате интерпретации ощущений мозгом.

Раздражитель — это фактор окружающей среды (например, источник света или звука), который передает энергию органам чувств и вызывает ощущение и восприятие.

Светлота — это характеристика поверхности, связанная с ее отражательной способностью.

Световой поток выражается в люменах. Люмен — это световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1стерадиан при силе света 1 кандела. Поскольку полная сфера содержит 4π стерадиан, источник с силой света 1 кд испускает во всех направлениях световой поток 4π люменов. Световой поток — это мера мощности излучения источника и количества света, которое он испускает.

Тон представляет собой характеристику цвета по его восприятию, обозначаемую различными названиями: красный, желтый, зеленый, синий, фиолетовый и т. д. Связан с физическим понятием доминирующей длины волны.

Цветность — качество цвета раздражителя, которое на диаграмме цветности характеризуется координатами x и y . При увеличении содержания красного цвета возрастает координата x , а при увеличении содержания зеленого — y . Существует три координаты (независимыми являются лишь две из них), которые в сумме дают единицу: $x + y + z = 1$. Координата z увеличивается при повышении содержания синего цвета.

Цветовая температура. При нагревании полностью поглощающее тело (абсолютно черное тело) испускает свет, цвет которого определяется температурой.

По мере повышения температуры он меняется от красновато-белого до желтовато- и синевато-белого. Поэтому метод описания близких к белому цветов основан на измерении в градусах Кельвина (К) температуры абсолютно черного тела, имеющего такую же или почти такую же окраску.

Чистота возбуждения определяется расстоянием на диаграмме цветности от «белой» точки до цветной по отношению к расстоянию до точки, соответствующей спектральному свету той же длины волны. Вместе с доминирующей длиной волны чистота определяет положение

ние цветового раздражителя на диаграмме цветности (рис. 7.9). Ко всем цветам, кроме пурпурных, можно подобрать совпадающие с ними цвета, смешивая в соответствующих пропорциях монохроматический и белый свет. Отношение яркостей монохроматического и белого света называется *колориметрической чистотой*. Она математически связана с чистотой возбуждения. При одних и тех же условиях наблюдения высокая или низкая чистота соответствует высокой или низкой насыщенности.

Яркость поверхности представляет собой силу света, испускаемого или отражаемого единицей площади плоской поверхности в перпендикулярном ей направлении. Измеряется в канделах на 1 м^2 ($\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$).

Приложение

Ниже мы приводим некоторые сведения о фильтрах и цветных образцах, упоминаемых в тексте, а также адреса фирм в Великобритании, где их можно приобрести.

Цветные фильтры «Синемоид»

Дешевые, прочные невоспламеняющиеся цветные фильтры «Синемоид» выпускаются в виде ацетатных пленок следующих цветов:

Основной красный № 6	}	Аддитивные основные цвета
Основной зеленый № 39		
Темно-синий (основной) № 20		
Желтый № 1	}	Субтрактивные основные цвета
Пурпурный № 13		
Бирюзовый (голубой) № 62		

Полезный нейтральный фильтр — светло-серый № 60, имеющий оптическую плотность около 0,5.

Адрес фирмы: Rank Strand Electric, P. O. Box 70,
Great West Road, Brentford, Middlesex,
TW8 9HR, England.

Теплопоглощающий фильтр

При работе с интенсивными источниками света возникает необходимость защищать глаза от теплового излучения; для этого можно использовать теплопоглощающий

стеклянный фильтр Чанса — Пинкингтона НА толщиной 3—4 мм. Этот фильтр сильно поглощает в инфракрасной области спектра и слабо — в видимой.

Адрес фирмы: Precision Optical Instruments (Fulham) Ltd., 158 Fulham Palace Road, London W. 6, England.

Цветные образцы Мензелла

Бумажные цветные образцы Мензелла и наборы цветных таблиц для студентов можно приобрести в фирме Tintometer Sales Ltd., The Colour Laboratory, Waterloo Road, Salisbury, Wiltshire, England.

Для проведения опытов Максвелла с вращающимися дисками можно использовать следующие цветные образцы:

Основной красный	Мензелл 5R 4/14
Основной зеленый	Мензелл 5G 4/6
Основной синий	Мензелл 5B 4/8

Предметный указатель

- Агфаколор 128
Адаптация световая и темновая 28, 30, 31, 65—67
Аддитивное смещение цветов 101—102, 119—120, 127, 132, 147, 158—159
Аддитивность восприятия яркости 83—84, 189
Аккомодация 44
Аксон 24, 32, 33
«Альмагест» 87
Альфа-ритм 56
Амакринные клетки 22, 23, 35
Аномалии цветового зрения и профессия 232—234
— — — объективные тесты 227
Аномалоскопы 226
Атласы цветов 138—147
Аутотопия 131
Аутохромная пластинка 128
- Белый свет 169
Бенжема круг, 210, 211
Бецольда — *Брюкке* эффект 190—194
Бидвелла диск 205
Бинокулярное зрение 41—45
Биполярные клетки 22—24, 34, 35
Блескость 197
- Вебера* закон 76—78
Величина по *Мензелу* 86, 139, 141, 144, 152, 153, 245
- Визуальные колориметры — 173 177
Водянистая влага 18, 20
Волоконная оптика 177
«Всё или ничего» закон 32
Вызванные потенциалы 54—59
Высокая печать 130
- Гало 236
Ганглиозные клетки 22—24, 34—38
Гельмгольца — *Кольрауша* эффект 84, 143, 188—190
Гены цветового зрения 231
Геринга теория 109—110
Глаз 17—50
— движения 45—50, 242
Глазные среды 18, 20, 21, 62
— — поглощение света 19
Глубина окраски 139
Головной мозг 13, 14, 16, 34, 50—59
Горизонтальные клетки 23, 24, 35
Градуальный потенциал 33, 35, 41
- Движения глаз 45—50, 242
Двойное лучепреломление 123
Двойственности теория 19
Дейтаны 218, 231
Дейтераномалы 216
Дейтеранопия 217, 219, 221
Дейтеранопы 216, 220

- Дендриты 32
 Денситометрия 67, 229
 Детекторы (нейроны) 50, 51
 Диаграмма цветности CIE 162, 163, 167, 169
 — — — однородная 152, 153, 171—173
 — — — UCS 194, 195
 — — — *u*, *v* 154, 173
 — — — *x*, *y* 152, 153, 168, 172
 Диоптрия 245
 Дифракция 123
 Дифференциальные цветные сигналы 133
 Дифференциальный порог 150
 Дихроматы 214—218
 Доминатор 110
 Доминирующая длина волны 143—144, 149, 170—171, 245
 Дополнительные цвета 171
- Единичная освещенность 67
- Затемняющий экран 134
 Звездная величина 68—69
 Зеркальный ящик 174
 Зрачок 18—19
 Зрительная зона (коры) 14, 34, 42, 51—52
 Зрительные пигменты 27—28
 — — — выпцветание 28, 66
 Зрительный нерв 33, 42
- Избирательное отражение и поглощение 96—98
 Индукция 80—83
 Интегральная цветная трехслойная пленка 129
- Каландр 130
 Кандела 247
 Карты Британских стандартов 147—148
 — красок 147
 Кванты 29, 62
 Кинопроектор 200
 Классификация цветов 148—149
 Клише 131
- Колбочки 23, 24, 26—28
 — пороги 66
 — спектральная чувствительность 38—41
 Колориметры 173—181
 Контраст 39, 60, 246
 — освещенности 61
 — цветовой 39, 61, 184
 Контрастность светлоты 89
 — формы и величины 90
 — цвета 136—137
 Контуры 45, 83
 Координаты *u v w* 172
 Кора мозга 13, 34, 50—54, 244
 — — зрительная 14, 34, 42, 51—52
 Коричневый цвет 197
 Кривая совокупности частот 63, 77
- Лантерна* тест 229
 Латеральное коленчатое тело 41—43, 51, 112
 Летающее пятно 201
 Линейный элемент 155
 Линии различения цветов 223—225
 Литография 130
 Ловибонда колориметр (анализатор цветового зрения) 175—177, 228
 — единицы света 176
 Люкс 19, 246
 Люмен 159, 246, 247
- Мак-Адама эллипсы 152—154, 225
 Максвелла цветные диски 106—107
 — цветовой ящик 107—109
 Макулярный пигмент 22, 215
 Маха полосы 83
 Медиаторы химические 16, 152
 Международная осветительная комиссия (CIE) 166—168
 Мезопическое зрение 83
 Мензелла Величина 86, 139, 141, 144, 152, 153, 245
 — насыщенность 138, 141—142
 — светлота 139, 141, 142

- Мензелла* система цветов 144
 — цветовая шкала 142, 246
 — цветовое пространство 142, 143, 151
 — цветовой тон 139—142
 Метамеризм 121—122
 Метод градуировки 86
 Микроспектрофотометрия рецепторов 30, 31
 Микроэлектроды 34, 36, 40, 43
 Мимикрия 240
 Модулятор *Гранита* 110
 Мозаичная цветная фотография 127, 128
 Монохроматические основные цвета 163, 166
 Монохроматичность 149, 150
 Монохроматы 214, 216

 Насекомые, зрение 100
 Насыщенность (цвета) 103, 138, 141—142, 171, 246
 Небо, цвет 236
 Нейроны 13, 32
 Нейтральная точка 224
 Нервные импульсы, передача 32
Ньютона кольца 122
 — опыты 92—96

 Обесцвечивание зрительных пигментов 28, 30, 31, 66—67, 193, 204
 Объемные цвета 188
 Однородная диаграмма CIE 173
 Оптическая плотность 246
 Освещенность 18, 19, 67, 77, 246
Оствальда атлас цветов 144—147
 Относительная видность 72
 Ощущение 14, 61, 246

 Палочки 22—24
 — пороги 66
 — спектральная чувствительность 38—39
 Парадоксальный сон 242
 Параллакс 44
 Первичные цвета аддитивные 101
 — — реальные 166
 — — XYZ 166—168

 Перекрест зрительных нервов 42
 Пигментный эпителий 30, 34
 Поздний рецепторный потенциал 55
 Полутонная печать 131
 Поляризационные цвета 122—124
 Пороги различения 65—71
 Пороговая яркость 63
 Последовательные образы 49, 174, 202—211
 — — цветные 207
 — поля 132
L-потенциал 40, 41
S-потенциал 40, 41
 Потенциал действия (спайк) 33, 38, 41, 73, 200
 Преадаптация 79—80
 Протаномалы 216
 Протанопы 216, 219, 220
 Протаны 218, 231
 Псевдоизохроматические таблицы 227
 Психофизика 150
Пуркине дерево 49, 50
 — эффект 73
 Пурпурные цвета 164

 Радуга 236—238
 Радужная оболочка 18
 Раздражитель 247
 Ранний рецепторный потенциал 55
 Регенерация пигментов 28, 66
 Рефлектометрия 29, 30
 Рецептивные поля 36, 37, 51—53
 Рецепторы зрительные 23
 Роговица 18, 20
 Родопсин 28, 29

 Саккадические движения 46—48
 Светимость 61
 Светлота 19, 89, 159, 247
 — порог различения 75
 Световой поток 159, 247
 Светорассеяние в атмосфере 45, 124—125
 — в глазных средах 21
 — закон *Рэлея* 125, 236—237
 Сенсорные клетки 13—14

- Сетчатка 18—20
 — денситометрия 29, 67, 229
 — освещенность 18, 67, 77, 246
 — спектрофотометрия 30, 31
 Синапс 32, 33
 Синемойд (Cinemoid) 193, 207, 249
 Система естественных цветов 144
 — CIE (U*, V*, W*) 153
 — DIN 143, 144
 Склера 17—18
 Скотопическое зрение 19, 59, 66, 72, 136
 Слияние мельканий, критическая частота 199—200
 Сновидения (цветные) 243—244
 Спайк 32, 38, 41, 73, 200
 Спектр 94—96
 — поглощения 30
 Спектральная чистота 170—171
 — чувствительность 38—41, 104, 111, 219—221
 — — дифференциальная 219, 220
 — — относительная 220
 Спектральные трехстимульные величины 164, 165, 167, 168
 Спектральный колориметр с рамкой 180—181
 Стабилизация изображения (на сетчатке) 47
 Стайлса — Кроуфорда эффект 19
 Стандартная белая поверхность 178
 Стандартные источники света 169—170, 179
 Субтрактивное смешение цветов 115—119
 Суммация 24, 35, 70
 Телевидение 114, 132—135, 201, 234
 Телескоп 70, 71, 92
 Темновая адаптация 28, 30, 31, 65—67
 Теплопоглощающий фильтр 21, 191, 193, 207, 249
 Торможение 24, 35
 Трemor 46—48
 Трехстимульные величины 164, 165, 167, 168
 Тританопия 184, 215
 Тританопы 215, 216, 219, 221
 Тританомалы 216
 Тританы 218
 Трихроматическая единица 161
 — теория 30
 Трихроматы 216
 — аномальные 217—220
 Троланд 19, 246
 Уравнения измерения цвета 159—163
 Ухо 71
 Фабри — Перо интерферометр 122
 Ферри — Портера закон 200
 Фовеа (центральная ямка) 24, 27, 59, 214
 Фовеола 24, 25, 30
 Фосфоресцирующие точки 135
 Фосфоры 234
 Фотометрия 78
 Фотопическое зрение 19, 30, 59, 66, 71, 136
 Фотохимия 27—32
 Хиазма 42
 Хлорофилл 239
 Хрусталик 18, 20
 Хьюбеля — Визеля теория (и эксперименты) 50—53
 Цвет, анализ 38—39
 — восприятие 136—141, 182—198
 — измерение 156—181
 — классификация 138—139
 — константность 136—137
 — насыщенность 141—142
 — различие 149—153
 Цвета поверхности 119, 187—188
 Цветки, окраска 147, 235, 239
 Цветная фотография 126—130, 196
 — — субтрактивная 128

- Цветное телевидение 114, 126, 132—135
Цветности диаграмма 152—154, 162—169, 223—225
— координаты 164, 168
— относительные величины 164
Цветность 137, 152—154, 247
Цветные тени 185—186
Цветовая адаптация 186
— температура 169, 179, 247
Цветовое зрение 101—102, 232
— — аномальное 213, 227, 230—234
— — нормальное 213
— — теории 103—114
— — у животных 98—100, 239—240
Цветовой контраст 38—39, 61, 137
— тон 139—142
— ящик 107—109
Цветовые сигналы (дифференциальные) 113—114, 133—135
— уравнения 159—163
Цветощущение, дефекты 229
Цилиарная мышца 20
- Чистота (цвета) 104, 145, 146, 150—151, 170
— различение 152
Чтение 47
- Электроды поверхностные 54—55, 57
Электроретинограмма (ЭРГ) 230
Электроэнцефалограмма (ЭЭГ) 56—58, 230
Эммерта закон 205—206
Эмметропический глаз 20
- Юнга* — *Гельмгольца* теория цветового зрения 105, 110, 114
Юнга теория цветового зрения 103—104, 114
— цветовой треугольник 107
- Яркость 60—61, 73—91, 248
— контраст 39, 61, 75, 89
— поверхности 159, 161
— пороги 75—77
— фона 183
— шкалы 79, 152

Оглавление

От редактора перевода	5
Предисловие к английскому изданию	8
Предисловие авторов	9
1. Введение	13
2. Глаз и мозг	17
3. Восприятие яркости	60
4. Что такое цвет?	92
5. Получение цвета	115
6. Системы классификации цветов	136
7. Измерение цвета	156
8. Восприятие цвета	182
9. Последовательные образы и субъективный цвет	199
10. Аномалии цветового зрения	212
11. Цвет в нашей жизни	235
Список литературы	244
Словарь терминов	245
Приложение	249

Ч. Падхем, Дж. Сондерс

ВОСПРИЯТИЕ СВЕТА И ЦВЕТА

Научн. ред. Н. Н. Шафрановская. Мл. науч. ред. З. В. Соллертинская
Художник В. А. Медников. Художественный редактор Н. К. Бисенгалиев
Технический редактор В. П. Сизова. Корректор Н. В. Синичкина

ИБ № 1057

Сдано в набор 24.02.78. Подписано к печати 20.09.78. Формат 84×1081/32.
Бумага тип. № 1. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Объем:
4,25 бум. л., 14,28 усл. печ. л., в т/ч вкл. 0,84. Уч.-изд. л. 12,83.
Изд. № 4/9228. Тираж 10 000 экз. Зак. 0631. Цена 1 р. 20 к.

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР» Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ордена Трудового Красного Знамени Московская типография № 7
«Искра революции» Союзполиграфпрома Государственного комитета
СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва 103001, Трехпрудный пер., 9.

1 р. 20 к.

Ч. Пэдхем, Дж. Сондерс

Восприятие
света
и цвета

