

серым экраном северных туманов». Голубые камни снижают кровяное давление, применяются для лечения остеохондроза, нормализации сердечной деятельности, лечения болезней гортани и голосовых связок, ревматизма, заболеваний глаз и печени. Однако, избыточное длительное воздействие может вызвать состояние страха и нарушение циркуляции крови. Голубые камни: бирюза, аквамарин, лазурит (голубой шпат), эвклаз, циркон...

Действие синего цвета на организм многосторонне и эффективно. Синий производит более успокаивающее действие, чем голубой; его даже можно назвать угнетающим. Поскольку этот цвет коротковолновой области оптического спектра, он обладает антисептическим действием. Применяется для лечения эндокринной сферы, почек, легких, верхних дыхательных путей, глазных заболеваний. Эффективен для лечения детских инфекций, коклюша, желтухи, кожных заболеваний [10]. Особенно сильно влияние этого цвета на нервную систему. Синим светом лечат бессонницу, ипохондрию, шизофрению, истерию, маниакально-депрессивный психоз, эпилепсию.

К. С. Петров-Водкин в своей книге «Самарканди» рассказывает местную историю о синем цвете: «В Константи-не, в северной Африке, до сей поры сохранился Голубой город. Историю его я узнал от образованных арабов. В семнадцатом веке местный правитель заболел странной формой удрученного состояния, сделавшей кошмарной его жизнь. Чтоб развлечь себя, этот бей прибежал то к жестоким расправам над подданными (в Константи-не одна из скал, примыкающая к дворцу, носит название «Скалы жен», с которой швырялись заподозренные больным беем

в неверности женщины его гарема), то ипохондрик-тиран отдавался благотворительности, то бросался в корсарские авантюры, то к врачам и знахарям, но ничто не помогало осилить болезнь.

Среди пленников бея случился один врач, который предпринял оригинальное лечение. Под его руководством комната правителя была окрашена в синий цвет, и мебель и все, по возможности, предметы, находившиеся в ней, приведены были к этой расцветке. В этой комнате больной начал чувствовать себя лучше; тогда было решено окрасить в синее весь дворец. Эффект оказался удивительным: бей вошел в норму, и, чтоб своим подданным доставить возможность пользоваться таким благом, он повелел, весь город окрасить по рецепту врача - цветолечителя в синюю гамму.

В городе голубого бея небо кажется тяжелым по контрасту с чистой синевою зданий. Среди его улиц испытываешь легкость в движениях, не чувствуешь удручения от жары, и четче, яснее думается в его расцветке.

При передозировке синий угнетает и вызывает торможение нервной системы. (Впрочем, передозировка искажает действие любого цвета). Синие камни: сапфир, лазурит, бирюза, топаз.

Фиолетовый цвет — самый коротковолновый, на нем заканчивается оптическая область электромагнитных волн — более короткие волны (ультрафиолетовые) уже невидимы. Фиолетовый обладает уникальным действием на функциональные системы человека, в том числе на психику (высшую нервную систему). Прочитируем Мориса Дерибери: «Фиолетовый действует на сердце, легкие и кро-

веносные сосуды, увеличивает выносливость ткани. Аметистовый свет имеет стимулирующее действие красного и тоническое действие голубого. ...Я поместил одного помешанного (буйного) в комнату с фиолетовыми окнами; на следующий день больной попросил отпустить его домой — он выздоровел. Он покинул психлечебницу, живет счастливо и совершенно здоров. Французский врач Шере замечает: «Насколько красный цвет возбуждает к деятельности, настолько фиолетовый, наоборот, задерживает ее и ослабляет».

Дополним эти заметки данными [10]. Фиолетовые камни излечивают психические заболевания, невралгию, болезни почек и печени, воспалительные заболевания. При передозировке фиолетовый вызывает угнетение нервной системы. Фиолетовые камни: аметист, чароит, сиреневый халцедон, сиреневый турмалин, гранат, топаз.

После того, как были перечислены физиологические воздействия различных цветов на человека, рассмотрим способность человека к восприятию цвета.

Основную долю предметов, вызывающих цветовые ощущения, составляют несамосветящиеся тела, которые лишь отражают или пропускают свет, излучаемый источниками. В общем случае цвет предмета обусловлен следующими факторами: его окраской и свойствами его поверхности; оптическими свойствами источников света и среды, через которую свет распространяется; свойствами зрительного анализатора и особенностями ещё недостаточно изученного психофизиологического процесса переработки зрительных впечатлений в мозговых центрах.

Эволюционно способность к восприятию цвета развилась для целей идентификации предметов вместе со способностями к восприятию других их свойств (размеров, твёрдости, теплоты и др.) и перемещений в пространстве, помогая обнаруживать и опознавать в жизненно важных ситуациях отдельные предметы по их окраске при всевозможных изменениях освещения и состояния окружающей их среды.

Эта необходимость распознавания объектов явилась главной причиной того, что их цвета определяются в основном их окраской, и при привычных для человека условиях наблюдения за счёт вносимой наблюдателем бессознательно поправки на освещение лишь в малой степени зависят от освещения.

Например, зелёная листва деревьев признаётся зелёной даже при красноватом освещении на закате солнца. Оговорка о привычных (в широком смысле) условиях наблюдения весьма существенна - если сделать их резко необычными, суждения человека о цветах предметов (следовательно, и его цветовые ощущения) становятся неуверенными или ошибочными. Так, описания и попытки воспроизведения цвета, т. н. космических зорь, сделанные разными космонавтами, сильно отличались одно от другого и от цвета этих "зорь", зафиксированных объективными методами цветной фотографии.

Вырабатывающееся и закрепляющееся в человеческом сознании устойчивое представление об определённом цвете как неотъемлемом признаке привычных объектов наблюдения называется "эффектом принадлежности цвета" или явлением константности цвета. Эта психологическая

особенность зрительного восприятия наиболее сильно проявляется при рассматривании несамосветящихся предметов и обусловлена тем, что в повседневной жизни мы одновременно рассматриваем совокупности предметов, подсознательно сравнивая их цвета, либо сравниваем цветовые ощущения от разноокрашенных или разноосвещённых участков этих предметов.

Эффект принадлежности цвета несамосветящихся объектов настолько значителен, что даже в неблагоприятных условиях рассматривания цвет предмета осознаётся в результате опознания предмета по другим признакам. Назименования многих цветов произошли от название объектов, окраска которых очень сильно выражена: малиновый, розовый, изумрудный. Нередко даже цвет источника света описывают цветом какого-либо характерного несветящегося объекта: кроваво-красный диск Солнца.

Эффект принадлежности цвета не столь силён для источников света, поскольку в обычных (не связанных с их производством) условиях их редко сопоставляют с другими источниками, и зрительный анализатор в значительной степени адаптируется к условиям освещения. Примером может служить неопределённость понятия белый свет, в отличие от полной определённости понятия "белый цвет поверхности несамосветящегося предмета" (цвет поверхности, на всех участках которой во всём видимом диапазоне минимально и одинаково по относительной интенсивности поглощения света).

Восприятие цвета может частично меняться в зависимости от психофизиологического состояния наблюдателя,

например, усиливаться в опасных ситуациях, уменьшаться при усталости.

Несмотря на адаптацию глаза к условиям освещения, оно может довольно заметно отличаться от обычного при изменении интенсивности излучения (того же относительного спектрального состава) - явление, открытое немецкими учёными В. Бецольдом и Э. Брюкке в 1870-х гг. Оно наглядно демонстрируется в т. н. бинокулярной колориметрии, основанной на независимой адаптации одного глаза от другого. Всё это указывает на ведущую роль мозговых центров, ответственных за восприятие цветов, и степени их "тренированности" (при неизменном фотохимическом аппарате цветового зрения).

Цвета излучений, длины волн которых располагаются в определённых интервалах из диапазона видимого света вокруг длины волны какого-либо монохроматического излучения, называются спектральными цветами. Излучения с длинами волн от 380 до 470 нм имеют фиолетовый и синий цвет, от 480 до 500 нм - сине-зелёный, от 510 до 560 нм - зелёный, от 570 до 590 нм - жёлто-оранжевый, от 600 до 730 нм - красный (в более мелких участках этих интервалов цвета излучений соответствуют различным оттенкам указанных цветов, большее количество которых легко различается тренированным наблюдателем).

Развитие способности к ощущению цветов эволюционно обеспечивалось формированием специальной системы цветового зрения, состоящей из трёх типов цветочувствительных фоторецепторов в центральном участке сетчатки глаза (т. н. колбочек) с максимумами спектральной чувствительности в трех разных спектральных участках: крас-

ном, зелёном и синем, а также и четвёртого типа рецепторов (палочек), не обладающих преимущественной чувствительностью к какому-либо одному спектральному цвету, расположенных по периферии сетчатки и играющих главную роль в создании ахроматических (см. ниже) зрительных образов.

Часто недооцениваемое значение палочек в механизме распознавания цветов становится тем выше, чем ниже освещённость наблюдаемых предметов. Воздействие различных по спектральному составу и интенсивности потоков лучистой энергии на эти четыре типа рецепторов сетчатки и является физико-химической основой различных восприятий цветов. Комбинации разных по интенсивности раздражений фоторецепторов, перерабатываемые и в периферийных проводящих нервных путях, и в мозговых зрительных центрах, дают всё многообразие цветовых ощущений.

Суммарная спектральная чувствительность глаза, обусловленная действием фоторецепторов всех типов, максимальна в "зелёной" области (длина волны около 555 нм), а при понижении освещённости смещается в "сине-зелёную" область. Предполагавшаяся ранее сводимость всех цветовых ощущений к сочетаниям различных раздражений только трёх типов цветочувствительных элементов послужила основой для разработки способов количественного выражения цветов в виде набора трёх чисел. Подобный подход имеет рациональную основу (см. ниже), однако при разработке таких способов не могли быть учтены влияние вариаций освещённости и интенсивности излучения, роль

(весьма значительная) зрительных мозговых центров и общего психофизиологического состояния наблюдателя.

При уточнённом качественном описании цвета используют три его субъективных атрибута: цветовой тон (ЦТ), насыщенность и светлоту.

Разделение признака цвета на эти взаимосвязанные компоненты есть результат мысленного процесса, существенно зависящего от навыка и обучения. Наиболее важный атрибут цвета - ЦТ (оттенок цвета) - ассоциируется в человеческом сознании с обусловленностью окраски предмета определённым типом пигмента, краски, красителя. Например, зелёный тон присваивают предметам с окраской, близкой к окраске естественной зелени, содержащей хлорофилл. Насыщенность характеризует степень, уровень, силу выражения ЦТ. Этот атрибут в человеческом сознании связан с количеством (концентрацией) пигмента, краски, красителя.

Серые тона называются ахроматическими (бесцветными) и считают, что они не имеют насыщенности и различаются лишь по светлоте. Светлоту сознание обычно связывает с количеством чёрного или белого пигмента, реже - с освещённостью. Светлоту разноокрашенных объектов оценивают, сопоставляя их с ахроматичными объектами. Ахроматичность несамосветящихся объектов обусловлена более или менее равномерным, одинаковым отражением ими излучений всех длин волн в пределах видимого спектра. Цвет ахроматичных поверхностей, отражающих максимум света, называется белым.

Несмотря на то, что по такому определению белыми могут оказаться предметы, которые при непосредственном

сравнении дают разные цветовые ощущения, среди ахроматических цветов несамосветящихся объектов белый цвет занимает исключительное положение. Поверхности с белой окраской часто служат своеобразными эталонами: они всегда сразу узнаются и именно сопоставление с ними, наряду с адаптацией глаза, позволяет бессознательно вводить поправку на освещение. Даже если наблюдаются только белые предметы, по ним опознаётся цвет самого освещения. При узнавании цветов объектов в отсутствии эталонных белых поверхностей решающую роль играют т. н. цветотеневые соотношения, которые даёт сопоставление объектов, различающихся по светлоте и ЦТ, и ахроматических объектов.

Насыщенность и светлота несамосветящихся предметов взаимосвязаны, т.к. усиление избирательного спектрального поглощения при увеличении количества (концентрации) красителя всегда сопровождается уменьшением интенсивности отражённого света, что вызывает ощущение уменьшения светлоты. Так, роза более насыщенного пурпурного цвета воспринимается более тёмной, чем роза с тем же, но менее выраженным ЦТ.

Одновременное рассматривание одних и тех же несамосветящихся предметов или источников света несколькими наблюдателями с нормальным цветовым зрением (в одинаковых условиях рассматривания) позволяет установить однозначное соответствие между спектральным составом сравниваемых излучений и вызываемыми ими цветовыми ощущениями. На этом основаны цветовые измерения (колориметрия). Хотя такое соответствие и однозначно, но не взаимно-однозначно: одинаковые цветовые ощу-

щения могут вызывать потоки излучений различного спектрального состава.

Определений цвета, как физической величины, существует много.

Но даже в лучших из них с колориметрической точки зрения часто опускается упоминание о том, что указанная (невзаимная) однозначность достигается лишь в стандартизованных условиях наблюдения, освещения и т.д., не учитывается изменение восприятия цвета при изменении интенсивности излучения того же спектрального состава (явление Вецольда - Брюкке), не принимается во внимание т. н. цветовая адаптация глаза и др. Поэтому многообразие цветовых ощущений, возникающих при реальных условиях освещения, вариаций угловых размеров сравниваемых по цвету элементов, их фиксация на разных участках сетчатки, разных психофизиологических состояниях наблюдателя и т.д., всегда богаче колориметрического цветового многообразия. Например, в колориметрии одинаково определяются как оранжевые или жёлтые цвета, которые в повседневной жизни воспринимаются (в зависимости от светлоты) как бурые, каштановые, коричневые, шоколадные, оливковые и т.д. В одной из лучших попыток определения цвета, принадлежащей Э. Шредингеру, трудности задачи "снимаются" простым отсутствием каких-либо указаний на зависимость цветовых ощущений от многочисленных конкретных условий наблюдения. По Шредингеру, цвет есть свойство спектрального состава излучений, общее всем излучениям, визуально неразличимым для человека.

При цветовых измерениях (в колориметрии) цвет обозначают совокупностью трёх чисел. Существует много систем, отличающихся методикой определения таких трёх чисел. Широко применяется, например, система, в которой численные значения придаются описанным выше субъективным атрибутам цвета. Придание им численных значений осуществляют либо компараторным методом (сравнение с эталонами цветов, составляющими цветовые таблицы или атласы), либо инструментально-расчётным методом, в котором ЦТ выражается через объективно определяемую длину волны (длину волны излучения, воспроизводящего - в смеси с белым цветом - измеряемый цвет), насыщенность цвета - через его чистоту (соотношение интенсивностей монохроматического и белого цвета в смеси), а светлота выражается через также объективно устанавливаемую яркость измеряемого излучения ("гетерохромную", т. е. "разноцветную" яркость), определяемую экспериментально или рассчитываемую по кривой спектральной световой эффективности излучения (его видности, как говорили раньше). Количественное выражение субъективных атрибутов цвета неоднозначно, поскольку оно сильно зависит от различия между конкретными условиями рассматривания и стандартизованными колориметрическими. В частности, поэтому существует много формул, определяющих светлоту.

В колориметрии особое значение придают измерению спектральных цветов и определению по ним т. н. кривых сложения, характеризующих спектральную чувствительность зрительного анализатора относительными количествами трёх излучений, смешение которых даёт определён-

ное цветовое ощущение. Цвета излучений разного спектрального состава, которые при одинаковых условиях рассматривания визуально воспринимаются одинаковыми, называются метамерными цветами, или метамерами. Метамерия цвета увеличивается с уменьшением его насыщенности, т. е. чем менее насыщен цвет, тем большим числом комбинаций смесей излучений разного спектрального состава он может быть получен. Для белых цветов характерна наибольшая метамерия. Цвета любых двух излучений, создающих в смеси белый цвет, называются дополнительными цветами. Например, дополнительными при получении белого цвета от источника с цветовой температурой 4800 K^0 являются сине-зеленые и красные монохроматические излучения с длинами волн 490 и 595 нм, либо 480 и 580 нм.

Наблюдатель с нормальным цветовым зрением при сопоставлении различно окрашенных предметов или источников света может различать при внимательном рассматривании большое количество цветов.

Натренированный наблюдатель различает по ЦТ около 150 цветов, по насыщенности около 25, по светлоте от 64 при высокой освещённости, до 20 при пониженной освещённости (разумеется, здесь речь идёт о тренированности мозговых зрительных центров, ответственных за цветовые ощущения).

При аномалиях цветового зрения различается меньшее число цветов. Около 90% всех людей обладают нормальным цветовым зрением и около 10% - частично или полностью "цветнослепые". Характерно, что из этих 10% людей с аномалиями цветового зрения 95% - мужчины. Суще-

вует три вида таких аномалий: краснослепые (протанопы) не отличают красных цветов от близких к ним по светлоте ахроматических цветов и дополнительных по ЦТ тёмно-голубых цветов; зелёнослепые (дейтеранопы) не отличают или плохо отличают зелёные цвета от близких к ним по светлоте ахроматических цветов и дополнительных пурпурных; синеслепые (тританопы) не отличают синих цветов от близких по светлоте ахроматических и дополнительных темно-жёлтых цветов. Очень редки случаи полной цветовой слепоты, когда воспринимаются лишь ахроматические образы. Аномалии цветового зрения не мешают нормальной трудовой деятельности при условии, что к ряду профессий цветнослепые не должны допускаться.

Одно из основных свойств зрительного анализатора - адаптация зрения, которая обеспечивает опознание предметов по цвету (за счёт эффекта принадлежности цвета) при вариациях условий освещения и рассматривания в весьма широких пределах. Вместе с тем при изменении спектрального состава освещения, визуально воспринимаемые различия между одними цветами усиливаются, а между другими ослабевают. Например, при желтоватом освещении, создаваемом лампами накаливания, синие и зелёные ЦТ различаются хуже, чем красные и оранжевые, а при синеватом освещении в пасмурную погоду, наоборот, хуже различаются красные и оранжевые ЦТ. При слабом освещении все цвета различаются хуже и воспринимаются менее насыщенными ("эффект сумеречного зрения"). При очень сильном освещении цвета воспринимаются тоже менее насыщенными и "разбелёнными". Эти особенности зрительного восприятия широко используют-

ся в изобразительном искусстве для создания иллюзии того или иного освещения.

2.2. Строение глаза и цветовое зрение

Прежде рассмотрим строение глаза. На рис. 2.1 приведена схема строения глаза человека. Свет попадает в глаз через роговую оболочку (а) и отверстие в радужной оболочке (г) — зрачок; далее свет проходит через глазную линзу — хрусталик (б) и стекловидное тело (центральная область глаза) и далее попадает на светочувствительную поверхность глаза — сетчатку (е). Так же на рисунке можно отметить мышцы (в), изменяющие кривизну хрусталика: нижняя часть хрусталика показана в состоянии покоя, а верхняя — в состоянии аккомодации. Эта способность хрусталика обеспечивает фокусировку изображения объектов, расположенных на различных расстояниях от глаза.

Сетчатка образована огромным количеством светочувствительных клеток. Строение этих клеток и их работа во многом объясняют механизм зрительного восприятия света, в том числе механизм цветового зрения. Каждая клетка или небольшая их группа соединены с отдельными нервными волокнами и могут рассматриваться как окончания этих волокон в глазу. Другой конец каждого нервного волокна находится в соответствующих "зрительных" участках головного мозга. При выходе из глаза все волокна собираются в единый пучок — зрительный нерв (и).

Светочувствительные клетки сетчатки делятся на две группы, из-за своей характерной формы эти клетки получили название *палочек* и *колбочек* (рис. 2.2).

Палочки и колбочки плотно примыкают друг к другу удлинёнными сторонами. Размеры их очень малы: длина палочек 0,06мм, диаметр 0,002мм, длина и диаметр колбочек — 0,035мм и 0,006мм, соответственно. Число палочек в сетчатке 125–130 миллионов; колбочек 6–7 миллионов.

Плотность размещения палочек и колбочек на различных участках сетчатки составляет от 20 до 200 тысяч на квадратный миллиметр. При этом колбочки преобладают в центральной части сетчатки, палочки — на периферии. В центре сетчатки находится так называемое *желтое пятно* овальной формы (длина 2мм, ширина 0,8мм). В этом месте находятся почти одни колбочки. "Желтое пятно" является участком сетчатки, обеспечивающим наиболее отчетливое резкое зрение.

Палочки и колбочки различаются между собой содержащимися в них светочувствительными веществами. Вещество палочек — *родопсин* (зрительный пурпур). Максимальное светопоглощение родопсина соответствует длине волны примерно 500нм (зеленый свет). Значит, палочки имеют максимальную чувствительность к излучению с длиной волны 500нм. Предполагают, что светочувствительное вещество колбочек (йодопсин) состоит из смеси трех веществ, каждое из которых имеет максимальное поглощение, а следовательно, и максимальную светочувствительность в коротко-, средне- и длинноволновой зонах спектра.

Под действием света молекулы светочувствительных веществ диссоциируют (распадаются) на положительно и отрицательно заряженные ионы. Это вызывает импульс тока в нервном волокне, который распространяется по направлению к мозгу со скоростью до 100 метров в секунду. Реакции светового распада родопсина и йодопсина обратимы, т.е. через некоторое время после того, как под действием света они были разложены на ионы, происходит их восстановление в своей первоначальной чувствительной к свету форме. Таким образом, в глазу устанавливается непрерывный цикл разрушения и последующего восстановления светочувствительных веществ. Это обеспечивает нормальную работу глаза в течение продолжительного времени.

Недавно ученые открыли новый вид светочувствительных клеток глаза. Ранее считалось, что фоточувствительными элементами глаза, преобразующими энергию света в электрические импульсы, являются только палочки и колбочки. Ученые из Университета Брауна (Род-Айленд) полагают, что обнаруженные ими клетки играют важную роль в регуляции работы биологических часов. По их словам, обнаруженные клетки располагаются в сетчатке глубже, чем палочки и колбочки. От них берут начало нервные волокна, которые проходят в составе зрительного нерва к участку мозга, отвечающему за чувство времени. Пока ученые нашли эти клетки только у крыс, однако, по их мнению, существует большая вероятность того, что такие же есть и в глазу человека.

Если уровень действующего на глаз света не изменяется во времени, то устанавливается динамическое равнове-

сие между концентрацией двух форм светочувствительных веществ. Очевидно, что чувствительность глаза пропорциональна концентрации светочувствительных веществ в первоначальной форме. Но величина этой концентрации зависит от количества света в предшествующий момент времени. Из этого следует, что световая чувствительность глаза изменяется при различных уровнях действующего света.

Известно, что если войти с яркого света в очень слабо освещенное помещение, то в начальный момент глаза ничего не различают. Постепенно способность глаз различать предметы восстанавливается. После длительного пребывания в темноте (около 1 часа) чувствительность глаза становится максимальной. Если теперь выйти на свет, то в первый момент глаза будут ослеплены: восстановление светочувствительных веществ отстает от очень интенсивного их распада. Постепенно глаза приспособляются к уровню освещения и начинают работать нормально. Свойство глаза приспособляться к уровню освещения, которое выражается в изменении его чувствительности, называется *адаптацией*.

Известную роль при адаптации играют и другие процессы, в частности непроизвольное изменение размера зрачка. Когда яркость увеличивается, зрачок сужается, когда яркость уменьшается — зрачок увеличивается. Поэтому диапазон яркости света на сетчатке меньше, чем его значение на роговице глаза. Предельные размеры зрачка 2 и 8 мм можно наблюдать ярким днем и темной ночью, соответственно.

2.3. Дневное и ночное зрение. Эффект Пуркинье

Установлено, что при яркости более 0,1 нт (яркость белой освещенной поверхности при полной луне 0,07 нт, днем в комнате 3–100 нт) распад родопсина в палочках идет настолько интенсивно, что восстановление все время отстает от распада и концентрация его резко снижается. В результате — палочки "слепнут". При этом в процессе зрения участвуют почти исключительно колбочки, и такое состояние называют *дневным* зрением. Вместе с тем колбочки менее чувствительны, чем палочки. При яркости менее нескольких сотых нт колбочки практически выключаются из процесса зрения. В этом случае в зрении участвуют только палочки, и оно называется *ночным*.

Как уже отмечалось, палочки и различные типы колбочек обладают различной спектральной чувствительностью. При этом суммарные относительные чувствительности трех видов колбочек к однородным излучениям определяют спектральную чувствительность глаза при дневном зрении, которая приведена на рисунке ниже, точнее сказать приведен ее стандартный вариант — согласно **ГОСТ 11093–64** (рис. 2.3) [11].

Палочки в целом более чувствительны к коротковолновым излучениям, чем колбочки. Поэтому в сумерках синие предметы кажутся более светлыми, а красные более темными, чем при дневном свете. Еще *Леонардо да Винчи* (1452–1519, итальянский живописец, скульптор, архитектор, ученый, инженер, и т.д., и т.п.) отмечал, что "зеленый и голубой усиливают свой цвет в полутени, а красный и

желтый выигрывают в цвете в своих освещенных частях, и то же самое делает белый".

Обратите внимание днем на контраст между пламенно алой геранью в бордюре газона и фоном из темно-зеленых листьев. В сумерки и поздно вечером этот контраст совершенно противоположен: цветы кажутся теперь много темнее листьев. Возможно, вас удивит сравнение яркости красного с яркостью зеленого цвета, однако различия выражены здесь настолько хорошо, что сомнениям нет места.

Если в картинной галерее найти красный и голубой цвета, которые днем представляются одинаково яркими, то в сумерки можно обнаружить, как голубой цвет становится ярче до такой степени, что кажется, будто краска светится.

Удайтесь подальше от городского освещения. Вначале вам ночь покажется очень темной; потом, когда ваши глаза привыкнут к темноте (в работу включатся палочки), вы начинаете различать окрестности. Взгляните на сильно окрашенную бумагу — она вам покажется бесцветной. Красный лист бумаги вам покажется черным, а голубой и фиолетовый — серо-белым. Мы становимся цвето-слепыми!

В то же время на небе появятся тысячи звезд со своим серебристым блеском. Если смотреть на них пристально, то большинство из них исчезнут, а останутся лишь самые яркие, которые будут казаться нам маленькими световыми точками. Эти наблюдения лучше всего проводить в темные ночи и вдали от городов, но и при лунном освещении ландшафт становится для нас, если можно так сказать, "палочным ландшафтом".

Все это — примеры эффекта Пуркинье (*Ян Эвангелиста Пуркинье*, 1787–1869, фундаментальные труды по физиологии, анатомии, гистологии и эмбриологии, в 1839г. основал первый в мире физиологический институт во Вроцлаве, классические исследования по физиологии зрительного восприятия, в 1825г. открыл ядро яйцеклетки) - объясняется тем, что палочки дают нам впечатление света, а не цвета [11].

Вернемся к более научному изложению вопроса.

Говоря об относительной спектральной чувствительности глаза при дневном зрении, мы говорили об интегральной характеристике трех групп колбочек. Колбочки каждой из трех групп имеют наибольшие чувствительности в длинно-, средне- и коротковолновой зонах спектра; что и представлено ниже на рис. 2.4.

Существование в глазу трех видов колбочек и ощущение различных цветов при действии излучений на различные типы колбочек являются причиной цветового зрения. Так как колбочки работают только при высоких уровнях яркости — только дневное зрение является цветовым, а следовательно — *"ночью все кошки серы"* — вспомним эффект Пуркинье.

2.4. Зрительное восприятие излучения

2.4.1. Яркость и светлота

Как уже отмечалось ранее, при действии света на глаз возникает раздражение сетчатки. От сетчатки возбуждение передается в зрительный нерв и далее в мозг, вызывая ощущение света. Свойство зрительного ощущения, согласно которому предметы кажутся испускающими больше или меньше света, называется *светлотой*. Как мы уже знаем, на сетчатку попадают только определенные доли всей световой энергии, испускаемой предметами в окружающее пространство. Они выражаются величинами *яркостей*. Таким образом, интенсивность светового раздражения определяется величинами яркостей, а интенсивность светового ощущения — величинами светлот. Чем больше яркость, тем больше светлота. Поэтому можно сказать, что светлота есть мера ощущения яркости.

В повседневной жизни между понятиями яркости и светлоты часто не делают отчетливого различия, но при изучении зрительного восприятия света их необходимо четко различать. Яркость — объективная величина, ее можно измерить соответствующим прибором (как вы уже догадались, он называется яркометром). Светлота — величина субъективная, как и все ощущения. Например, лист белой бумаги на солнечном свете летом имеет яркость порядка 30000нт, а при свете настольной лампы — порядка 10–30нт. Однако никто не скажет, что один и тот же лист бумаги в одном случае более светлый, чем в другом. В

числе ряда особенностей зрительного восприятия здесь проявляется его способность отделять характеристику освещения от характеристики освещаемого предмета. Это явление относится к разряду психологических, и, в частности, связано с памятью.

Из сказанного следует, что светлота не может быть непосредственно измерена и выражена абсолютными числами. Однако возможна количественная оценка, выражаемая словами: больше, меньше, равно, намного больше или меньше, едва различается. Причем этим выражениям можно вполне определенно сопоставить разности измеряемых яркостей. Таким образом, можно изучить зависимость ощущения от раздражения.

В середине прошлого века немецкий физик **Вильгельм Эдуард Вебер** (1804–1891) ставил опыты для того, чтобы найти зависимость между величинами раздражения и ощущения. В 1851г. Вебер открыл закон, общий для всех органов чувств: и данная величина раздражения (яркость света, вес, сила звука, и др.) является мерой замечаемости его изменений [12].

Говоря проще, мерой чувственно воспринимаемых различий является не минимальная величина разности двух раздражений при данном уровне раздражения, а относительная величина, которая остается неизменной при изменении раздражения.

$$\frac{\Delta P}{P} = const. \quad . \quad (2.1)$$

Позднее в 1858г., **Густав Фехнер** (1801–1887, немецкий физик и врач) проводил опыты по зрительному разли-

чению яркостей. Он установил, что в случае яркостей отношение $\Delta P/P$ постоянно в большом практически используемом диапазоне яркостей. Фехнер вывел математическую формулу зависимости изменения величины ощущения от изменения величины яркости.

$$\Delta S = k \cdot \Delta \lg P \quad (2.2)$$

Так выглядит закон Вебера–Фехнера ($k \sim 100$). Эта формула имеет важное значение. Она, в частности, объясняет, почему надо пользоваться величинами оптических плотностей, а не соответствующими им величинами коэффициентов пропускания и отражения. Действительно, если построить шкалу яркостей, оптические плотности которой составляют равномерный ряд, то она будет восприниматься как равномерная шкала светлот.

Выше мы рассматривали разницу двух яркостей, абстрагируясь от их окружения, неявно предполагая, что разница между ними много меньше их значений. При рассмотрении реальных образов это не так — мы имеем некоторый диапазон яркостей и некоторый средний уровень яркости — и наше восприятие изменится. Было установлено, что в натуральном объекте с максимальной яркостью 6000нт, интервалом яркостей 2.3 (200:1) и уровнем адаптации глаза 1500нт человеческий глаз может различить 100 уровней яркости. Эти показатели соответствуют ландшафту при среднем уровне освещения его дневным светом. В объекте с максимальной яркостью 40нт, интервалом яркостей 1.6 (40:1) и уровнем адаптации 10нт глаз может различить около 70 уровней яркости. Эти показатели соответ-

ствуют фотоотпечатку на бумаге выше упомянутого ландшафта и рассматриваемого при среднем искусственном освещении.

2.4.2. Цветовой тон и насыщенность

Вторым параметром, характеризующим зрительное восприятие излучения, является цвет. Если мы возьмем ряд спектральных цветов и перечислим их по порядку, то получим следующий ряд: **красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый**. Свойство зрительного ощущения, обозначаемое этими словами, называют *цветовым тоном*.

Перечисленные выше названия цветовых тонов сложились исторически до того, как начали изучать и систематизировать цвета. Они условны и недостаточно точно определены. Из спектра можно выделить значительно больше различающихся по цветовому тону излучений. Например: **красно–оранжевый, оранжево–желтый, желто–зеленый, сине–зеленый, сине–фиолетовый**. Для определенности обозначения цветового тона указывают длину волны. Исключение составляет только один тон, которого нет в спектре, а именно пурпурный. Пурпурный цвет получается смешением крайних спектральных цветов — фиолетового и красного. Цветовой тон пурпурных цветов указывается длинами волн излучений зеленых цветов, дополнительных к данным пурпурным.

Если взять излучение какого–нибудь цветового тона и смешать его с белым в различных пропорциях, то мы по-

лучим новые различные цвета. Однако все они будут одного цветового тона. Их отличие принято характеризовать **чистотой цвета**, т.е. отношением яркости спектрального излучения к яркости смеси.

Чистота цвета является объективной величиной, т.к. она выражается через объективные величины яркостей. Свойство зрительного восприятия, позволяющее оценивать пропорцию чистого хроматического цвета в полном цветовом ощущении, называется **насыщенностью цвета**. Подобно тому, как ощущение яркости мы называем светлотой, насыщенность цвета можно считать ощущением его чистоты.

Также как и в случае со светлотой, человеческий глаз различает ограниченное количество цветов. Результаты соответствующих исследований приведены в таблице ниже.

Величины пороговых разностей для длин волн и количества спектральных цветов, различающихся по цветовому тону (таблица 2.1).

Мы видим, что в общей сложности человеческий глаз может различить 130 спектральных цветов, обычно к этой цифре добавляют еще 20 пурпурных тонов. Таким образом, можно считать, что глаз в состоянии различать не более 150 цветовых тонов.

Если в смеси белого цвета с данным спектральным цветом изменять соотношение их количеств, т.е. чистоту цвета смеси, поддерживая яркость смеси постоянной, то можно определить минимальные разности чистоты, различаемые глазом. При данном спектральном цвете и посто-

янной яркости эти величины будут разностями по насыщенности.

Таблица 2.1. Величина пороговых различий для спектральных цветов [29]

Гран. участков длин волн в спектре, нм	Величина участков длин волн, в нм	Ср. вел. Пороговой разности длин волн, в нм	Число цветов, разл. по цветовому тону на дан. участке, n
700	-	-	1
700-678	22	22	1
678-665	13	13	1
665-659	6	6	1
659-649	9	5	2
649-620	29	3	10
620-596	24	2	12
596-575	21	1	17
575-549	26	2	13
549-521	28	3	9
521-505	16	2	8
505-483	22	1	18
483-475	8	2	5
475-427	48	2	23
427-406	21	3	7
Число цветов, различающихся по цветовому тону в целом по всему спектру: ~ 130			

Из графика (рис. 2.5) видно, что минимальные числа ступеней насыщенности (около 4) наблюдаются для жел-

тых цветов, максимальное — для красных (около 25) и синих (около 22).

2.4.3. Общее число цветов

Из приведенных данных видно, что число цветов, которые может "видеть" глаз, не является бесконечно большим, хотя число возможных спектральных составов излучений, действующих на глаз и вызывающих ощущение цвета, бесконечно.

Числа порогов показывают, сколько цветов можно видеть, изменяя одну из трех указанных выше характеристик излучения. Но по ним можно рассчитать число цветов, которые можно видеть при одновременном изменении всех трех характеристик во всех их комбинациях, т.е. вообще возможное число цветов.

Произведя подсчет, мы получим около **210000** возможных цветов.

Но такой расчет весьма неточен и недостаточно строг. Вспомним, что при малых яркостях число ступеней цветового тона и насыщенности значительно меньше, чем при некотором оптимальном уровне яркостей. При яркостях меньше 1нт мы вообще не различаем цветностей, а различаем излучения только по светлоте. Кроме того, ступени светлоты были определены для белого света при определенном уровне адаптации глаза. Произведя коррекцию наших расчетов, мы получим, что общее число различаемых глазом цветов равно примерно, **нескольким десяткам тысяч**.

Таким образом, мы установили три объективные характеристики цвета: яркость, цветовой тон (выраженный длиной волны) и чистоту цвета, а также три субъективные характеристики: светлоту, цветовой тон (выражаемый словами красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый и т.п.) и насыщенность цвета. Каждая из трех характеристик независима от двух других. Кроме того, мы установили верхнюю границу для числа различаемых человеческим глазом цветов. Это является хорошей базой для систематизации цветов.

2.4.4. Систематизация и количественное выражение цветов

В практике и научных исследованиях применяются два способа систематизации и количественного описания цветов. Первый способ — *измерительный* или *колориметрический*, второй способ — *цветных эталонов* [13].

Колориметрический способ основан на том, что каждому цвету соответствуют три вполне определенные величины основных возбуждений (КЗС–приемников глаза). Измерить эти три величины — значит выразить цвет тремя числами. Такие числа называются *цветовыми координатами*.

В способе *цветовых эталонов* заранее изготавливают наборы закрасок (рис. 2.6). Их издают в виде *атласа цветов*. Подбор цвета атласа к цвету объекта производится путем непосредственного зрительного сравнения этих цветов.

Количественное выражение цветов в колориметрическом способе непосредственно связано с объективными характеристиками цвета: яркостью, цветовым тоном и чистотой цвета.

Закраски в атласе цветов располагаются по определенной системе в виде цветных таблиц или шкал цветов, как это показано на рис. 2.7.

Широко известен цветовой **атлас Манселла** (1858–1918, американский исследователь, создатель системы выражения цветов при помощи атласа), содержащий систематизированный набор стандартных цветов, представленный в трехмерном пространстве *цветового тона, светлоты* (количества света) и *насыщенности* (чистоты цвета). Каждый цвет имеет имя и воспринимается как "равноудаленный" в цветовом пространстве (по мнению многих наблюдателей) от своих соседей, т.е. цветовое пространство равномерно "покрыто" стандартными цветами. Существует похожая **система Освальда**, но она используется реже. В 1982г. появилась еще одна относительно новая **система Coloroid**, предложенная Немчицем. В России, как правило, используется "**1000–цветный Атлас стандартных образцов цвета**", разработанный и выпускаемый **НПО ВНИИМ им. Д.И. Менделеева** (атлас Юстовой).

Художники пользуются иными принципами и характеризуют цвета как различные *разбелы, оттенки и тона* предельно насыщенных или чистых пигментов к чистому пигменту. *Разбел* получается при добавлении белого пигмента к чистому пигменту при этом уменьшается насыщенность. *Оттенок* получается при добавлении черного пигмента к чистому пигменту, в результате чего снижается

светлота. *Тона* получаются при добавлении черного и белого пигментов к чистому пигменту. Во всех этих случаях получаются различные цвета одного и того же цветового тона, отличающиеся насыщенностью и светлотой. При смешивании только черного и белого пигментов получаются серые цвета.

Современные графические редакторы имеют электронные аналоги выше рассмотренных атласов цветов — так называемые *Swatch Libraries*. Наиболее известные библиотеки выпускают фирмы **Trumatch** и **Pantone**. Но этого недостаточно, т.к. различные периферийные устройства (дисплеи, принтеры, плоттеры, сканеры) имеют различные характеристики цветопередачи (и, что хуже всего, изменяющиеся). Немного улучшить ситуацию может использование специальной калибровочной аппаратуры или, хотя бы, специальных профайлов для каждого устройства (например, используя рекомендации **ICC — International Color Consortium**). Но подобными свойствами обладает только профессиональное аппаратное и программное обеспечение.

Каждый из двух рассмотренных способов систематизации и количественного выражения цветов имеет свои достоинства и недостатки. Система цветовых атласов отличается простотой и наглядностью. Для оценки цвета не требуется никаких приборов и вычислений. Цвет выражается в величинах цветовых ощущений, и можно непосредственно видеть его изменение с изменением этих величин.

В колориметрическом способе для определения цветовых координат требуются достаточно сложные приборы — колориметры. Если координаты вычисляются по спек-

тральным составам излучений, необходим спектрофотометр для их измерения. Само вычисление координат очень трудоемко. Цвет выражается тремя отвлеченными числами — координатами, которые непосредственно не связаны с характеристиками цветовых ощущений. Поэтому нельзя представить изменение цвета по изменению цветовых координат. Этот недостаток в известной мере устраняется, когда по измеренным координатам точки цветов наносят на цветовой график, и когда используется система "цветовой тон — чистота цвета", которая основана на колориметрических измерениях и графическом выражении цветностей.

Колориметрический способ отличается большей универсальностью, чем способ цветковых атласов. Цвета атласов можно сравнивать только с цветами поверхностей, рассматриваемых в отраженном свете. При пользовании атласами необходима стандартизация освещения по уровню освещенности и цветовой температуре. Сравнение становится затруднительным уже при различии фактур поверхностей (глянцевая/матовая). Сравнить же цвет светофильтра с цветом атласа вовсе нельзя. Нельзя при помощи атласа выразить и цвет источника света.

Колориметрическим способом можно выразить цвет любого излучения независимо от его происхождения: источник света, свет, рассеянный при прохождении через среду или отражении от поверхности, в том числе и от поверхности красок атласов. Выражение цвета тремя числами просто и точно. Если эти три числа где-то описаны, то по ним можно найти точку на цветовом графике и получить представление о цветовом ощущении. Более того, по

заданным величинам координат можно опытным путем воспроизвести цвет. По величинам координат можно произвести цветовые расчеты: определить координаты цветов, получаемых смешиванием цветов, координаты которых известны; определять величины различий между цветами.

Указанные достоинства колориметрического способа, особенно универсальность и точность, сделали его наиболее распространенным способом систематизации и количественного описания цветов.

2.5. Цветовой график

Если посмотреть на цветовое уравнение, то можно обратить внимание, что его вид подобен записи вектора через его координаты в некотором пространстве. Конечно, цвета не являются векторными величинами, но это представление очень удобно, т.к. все операции с цветами находят свою аналогию в операциях с векторами (но не наоборот). Таким образом, можно говорить о пространстве цветов и о его графическом представлении — *пространственном цветовом графике* [14].

В виду условности пространства цветов углы между осями координат не имеют значения. Если в пространстве цветов провести линию:

$$M(t) = r \cdot t + g \cdot t + b \cdot t \quad (2.3)$$

(будем сразу считать, что мы сбалансировали единичные основные цвета), то мы получим множество серых тонов. Эту линию называют *ахроматической осью*. Если теперь провести плоскость перпендикулярную ахроматической

оси, то мы получим *цветовой треугольник* (Рис. 2.8), в котором представлены все цветности при данной яркости.

Цветовой треугольник очень удобен для наглядных вычислений. Например, для нахождения дополнительного цвета одному из основных достаточно провести линию из вершины основного цвета через ахроматическую ось, и на пересечении этой линии с противоположной вершине стороной мы получим искомый цвет.

Любое излучение состоит из однородных излучений, взятых во всевозможных сочетаниях. Следовательно, цвет любого излучения является суммой цветов однородных излучений, входящих в его состав. Поэтому в исходном опыте достаточно определить трехцветные коэффициенты только для цветов однородных излучений. Если полученные данные нанести на цветовой график (рис. 2.9), то мы получим линию спектральных цветов. Линия получается незамкнутой, т.к. спектр имеет два конца: красный и фиолетовый. Если мы добавим не спектральные пурпурные цвета, то линия замкнется.

2.6. Цветовые уравнения

Результат измерения какого-либо цвета M , выраженного тремя координатами, записывается в виде *цветового уравнения* [15]:

$$m'M = r'R + g'G + b'B, \quad (2.4)$$

где $m' = r' + g' + b'$.

Качественная характеристика цвета — цветность — определяется соотношением количеств трех основных цве-

тов, в которых они воспроизводят данный цвет. Поэтому, если нас интересует только цветность, мы пользуемся относительными величинами координат:

$$r = \frac{r'}{r'+g'+b'}, \text{ аналогично для } g, b. \quad (2.5)$$

откуда следует, что $r + g + b = 1$.

Это последнее соотношение необходимо применять для проверки вычислений.

Относительные координаты цвета называются *координатами цветности* или *трехцветными коэффициентами*. Цветовое уравнение, записанное с использованием трехцветных коэффициентов, имеет вид:

$$M = rR + gG + bB. \quad (2.6)$$

Таким образом, любой цвет выражается тремя числами — *цветовыми координатами*.

Если яркость какого-либо из основных единичных цветов принять за единицу, например цвета **R**, то относительные яркости основных единичных цветов **R**, **G** и **B**, называемые также яркостными коэффициентами и обозначаемые L_R , L_G и L_B , определяются из соотношения:

$$L_R : L_G : L_B = 683 : 3135 : 41 = 1 : 4,59 : 0,06. \quad (2.7)$$

Яркость цвета M , получаемого смешением трех основных, в данном случае может быть записана в виде:

$$B_M = 683 \cdot (r' \cdot L_R + g' \cdot L_G + b' \cdot L_B), \quad \text{нт.}$$

или:

$$B_M = 683 \cdot m' \cdot (r \cdot L_R + g \cdot L_G + b \cdot L_B), \quad \text{нт.} \quad (2.8)$$

Величина в скобках представляет собой относительную яркость цвета, полученного смешением основных единичных цветов:

$$L_M = r \cdot L_R + g \cdot L_G + b \cdot L_B.$$

Понятие единичного цвета используется для цветов, получаемых смешением трех основных цветов так же, как и для самих основных цветов. Яркости единичных цветов определяются величинами L .

Используя выражение цветов при помощи цветовых уравнений и определив цветности и яркости основных единичных цветов, можно по координатам цветов одной системы вычислить координаты цветов в другой системе.

2.6.1. Величины для количественной характеристики цветов, используемые в колориметрии

Основные цвета — (K, Z, C) , (R, G, B) , (X, Y, Z) , где (K, Z, C) , (R, G, B) и (X, Y, Z) - три цвета, каждый из которых нельзя получить смешением двух других и смешением которых в разных соотношениях можно получать всевозможные другие цвета.

Единичные цвета

Цвета, для измерения количеств которых в качестве единиц взяты различные величины яркостей.

В качестве единиц для измерения количеств основных цветов берут такие их яркости, при которых смесь равных количеств этих цветов воспроизводит белый цвет равноэнергетического излучения гипотического источника Е.

Удельные координаты цвета — (k, z, c) , (r, g, b) , (x, y, z) .

Координаты цветов однородных излучений с единичными лучистыми яркостями B_0^{\exists} связаны с трехцветными коэффициентами однородных излучений (r_0 и др.), с кривой видности V_0 и относительными яркостями единичных цветов однородных излучений L_0 отношениями:

$$r_0 = V_0/L_0 \text{ и др.}$$

Координаты цвета (цветовые координаты) — $(\kappa', z', c'), (r', g', b'), (x', y', z')$

Количества трех основных цветов, позволяющие при смешении воспроизвести рассматриваемый цвет в определенной цветовой системе.

Для цветов однородных излучений определяются по формулам: $r'_0 = r_0 \cdot B_0^{\exists}$ и др. Для цветов излучений сложных спектральных составов равны суммам соответствующих координат однородных излучений, входящих в состав данного сложного излучения.

Трехцветные коэффициенты (координаты цветности) — $(\kappa, z, c), (r, g, b), (x, y, z)$

Относительные цветовые координаты, определяемые по формулам:

$$r_{\lambda} = \frac{r'_{\lambda}}{r'_{\lambda} + g'_{\lambda} + b'_{\lambda}} \quad \text{и др.}$$

Яркостные коэффициенты цветов — $(L_K, L_Z, L_C), (L_R, L_G, L_B), (L_X, L_Y, L_Z)$

Относительные яркости цветов, получаемые путем смешения единичных основных цветов, в количествах, оп-

ределяемых трехцветными коэффициентами, определяемые по формулам:

$$L = r \cdot L_r + g \cdot L_g + b \cdot L_b .$$

2.7. Основы колориметрии

В колориметрии любой цвет выражается тремя числами цветовых координат. Числа координат представляют собой количества, в которых необходимо смешать три **основные цвета**, чтобы получить данный цвет.

Существует множество различных триад основных цветов. Принципиальное требование, которому должны удовлетворять три основные цвета, состоит в том, что ни один из них не должен получаться смешением двух других. Иными словами, основные цвета должны быть независимыми друг от друга. Естественно, что цветовые координаты одного и того же цвета относительно разных основных триад различны.

Основные цвета бывают реальными и нереальными. **Реальные цвета** можно получить практически, действуя на глаз излучениями определенных спектральных составов. **Нереальные цвета** практически получить нельзя, т.к. не существует излучений, которые вызывали бы ощущения таких цветов при нормальных условиях зрения. Но характеристику любого нереального цвета (цветовой тон, чистота, яркость) можно вычислить, если представить его как комбинацию реальных цветов. Примером трех нереальных основных цветов являются физиологические цвета **К**, **З** и **С**, т.е. цвета основных возбуждений [16].

Если в качестве основных цветов используются физиологические цвета **К**, **З** и **С**, то цветовыми координатами являются уровни основных возбуждений. Они вычисляются по спектральным составам излучений и спектральным чувствительностям трех приемников глаза.

Однако практически цвета **К**, **З** и **С** в качестве основных не используются. Непосредственное измерение спектральных чувствительностей **КЗС**–приемников глаза невозможно. Представленные ниже кривые получены косвенным опытно–расчетным методом, точность которого считается недостаточной (рис. 2.10).

Поэтому для колориметрического выражения цветов используют обходной путь, в котором принцип выражения цветов величинами возбуждений **КЗС**–приемников сохраняется, но практически пользуются другими тремя величинами координат — **RGB**. Эти новые три величины вполне определенно связаны с величинами основных возбуждений и могут быть определены опытным путем очень точно.

Процедура их определения достаточно проста и заключается в визуальном сравнении некоторого измеряемого цвета и регулируемой смеси трех основных цветов **RGB**. Уравняв эти цвета, мы можем утверждать, что величины возбуждений **КЗС**–приемников от действия излучения как измеряемого цвета, так и излучения смеси основных цветов **RGB** — одинаковы, т.к. одинаковы их цвета. Самих величин возбуждений в этом случае мы не знаем. Но мы знаем, что они возникают от действия излучений с цветами **R**, **G** и **B**, откуда следует, что цвета **R**, **G** и **B** представляют собой смеси цветов **К**, **З** и **В**. В идеальном случае было бы желательно, чтобы каждый из цветов **R**, **G** и **B** со-

ответствовал одному из цветов **К**, **З** и **С**. Но это неосуществимо, т.к. цвета **Р**, **Г** и **В** — реальные цвета, а ни одно реальное излучение не может действовать только на один из трех приемников, вызывая чистые ощущения цветов **К**, **З** и **С**.

При выборе трех реальных излучений стремятся все же к тому, чтобы каждое из них действовало преимущественно на один из типов приемников. Обычно берут следующую триаду: $\lambda_R = 700$ нм, $\lambda_G = 546,1$ нм, $\lambda_B = 435,8$ нм. [16].

Две последние величины особенно удачны с точки зрения их практической реализации, т.к. они соответствуют мощным спектральным линиям в спектре паров ртути.

Проведение исходных колориметрических опытов связано с большими трудностями. Это объясняется, в частности, тем, что характеристики цветового зрения различных людей не совпадают. Чтобы данные исходных опытов были применимы для большинства людей, необходимо подобрать наблюдателей с нормальным цветовым зрением, а данные, полученные для многих наблюдателей, усреднить. Для получения надежных данных в этих опытах необходима довольно сложная специальная аппаратура. Поэтому исходные колориметрические опыты за всю историю проводились считанное число раз. В настоящее время мы используем данные, полученные в 1931г. в двух опытах, которые были выполнены Райтом (США) и Гилдом (Англия). Эти опыты проводились с разными основными цветами и на различной аппаратуре для десяти наблюдателей у Райта и семи у Гилда. Но их результаты, пересчитанные на основные цвета **RGB**, очень хорошо совпали. Поэтому они

были приняты в качестве исходных данных для международной системы измерения цветов.

В 1959г. были предложены новые данные по определению удельных координат цвета. Они получены в опытах, проводившихся по новому методу в СССР (Сперанской) и в Англии (Стайлсом и Берчем), и должны обеспечить лучшее соответствие между цветовыми координатами, измеренными непосредственно и вычисленными по спектральным составам. При опытной проверке оказалось, что расхождения в результатах, получаемых с использованием старых и новых данных, малы. Поэтому данные опытов 1931г. снова рекомендованы как основные, а данные опытов 1959г. — как дополнительные к ним.

Кривые смещения по международной системе RGB приведены на графике рис. 2.11.

Вычисления цветовых координат состоят в перемножении удельных координат на лучистые яркости и суммировании полученных произведений. Такие вычисления, особенно для излучений сложного спектрального состава, длительны и трудоемки. Сложность вычислений зависит от выбора основных цветов. Чтобы упростить цветовые расчеты, была создана система **XYZ**, основанная на несуществующих реально цветах: **X**, **Y** и **Z**. Эта система рассчитана на основе тех же опытных данных, которые использованы для системы **RGB**. В настоящее время система **XYZ** получила всеобщее международное признание (Рис. 2.12).