

Цвет и свет

1.1. Что такое цвет

Прежде всего, необходимо определить, что такое цвет. За те годы, что существует наука о цвете, давались многочисленные оценки феномена цвета и цветового видения. Однако все их можно свести к одному простому определению: цвет есть совокупность психофизиологических реакций человека на световое излучение, исходящее от различных самосветящихся предметов (источников света) либо отраженное от поверхности несамосветящихся предметов, а также (в случае прозрачных сред) прошедшее сквозь них. Таким образом, человек имеет возможность видеть окружающие его предметы и воспринимать их цветными за счет света — понятия физического мира, но сам цвет уже не является физическим понятием, поскольку это субъективное ощущение, которое рождается в нашем сознании под действием света.

Очень точное и емкое определение цвета дали Джадд и Вышецки: «... сам по себе цвет не сводится к чисто физическим или чисто психологическим явлениям. Он представляет собой характеристику световой энергии (физика) через посредство зрительного восприятия (психология)» [1].

С точки зрения физики свет представляет собой один из видов электромагнитного излучения, испускаемого светящимися телами, а также возникающего в резуль-

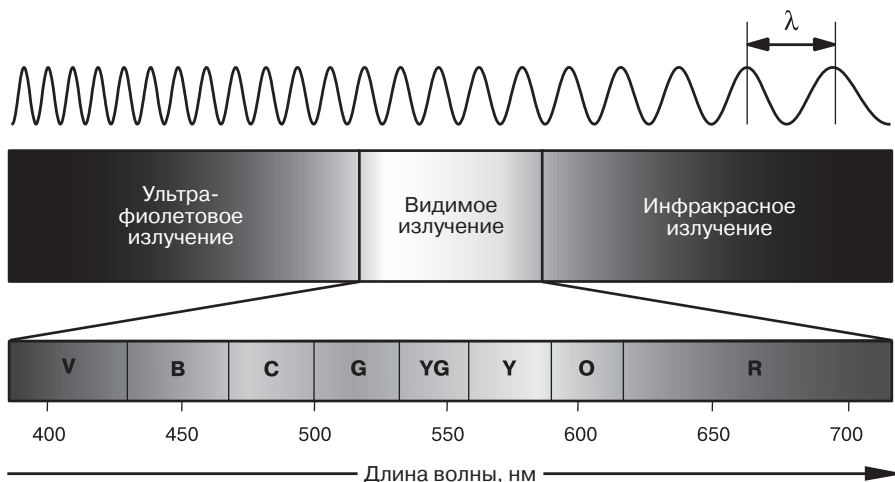


Рис. 1.1. Оптический диапазон электромагнитных излучений и спектр видимого света (цв. вклейка, рис. 1)

Таблица 1.1. Ощущение цвета в зависимости от длины волны светового излучения

Диапазон излучения, нм	Вызываемое им ощущение цвета	Обозначение	Диапазон излучения, нм	Вызываемое им ощущение цвета	Обозначение
От 380 до 430	Фиолетовый	V	От 530 до 560	Желто-зеленый	YG
От 430 до 470	Синий	B	От 560 до 590	Желтый	Y
От 470 до 500	Голубой	C	От 590 до 620	Оранжевый	O
От 500 до 530	Зеленый	G	От 620 до 760	Красный	R

тате ряда химических реакций. Это электромагнитное излучение имеет волновую природу, т. е. распространяется в пространстве в виде периодических колебаний (волн), совершаемых им с определенной амплитудой и частотой. Если представить такую волну в виде графика, то получится синусоида. Расстояние между двумя соседними вершинами этой синусоиды называется *длиной волны* и измеряется в нанометрах (*нм*). На такое расстояние распространяется свет за период одного колебания.

Человеческий глаз способен воспринимать (видеть) электромагнитное излучение только узкого диапазона длин волн, ограниченного областью от 380 до 760 нм, которая называется *видимым светом*. Излучения до 380 и выше 760 нм мы не видим, но они могут восприниматься нами другими механизмами осязания (как, например, инфракрасное излучение) либо регистрироваться специальными приборами (рис. 1.1).

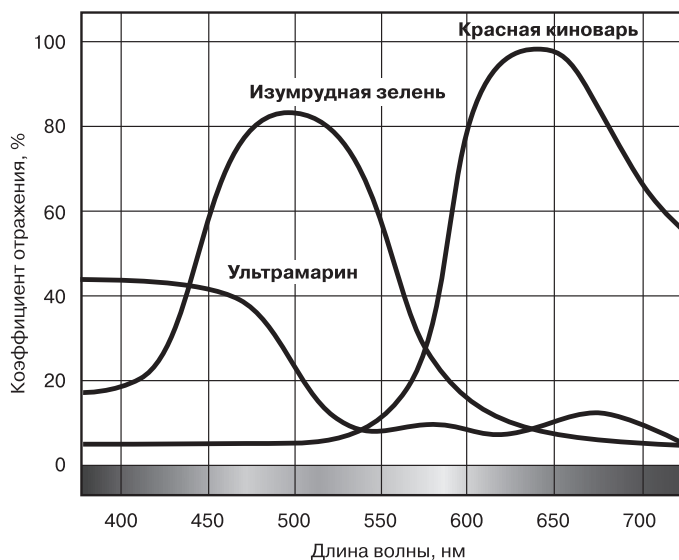


Рис. 1.2. Спектры отражения различных красок: изумрудной зелени, красной киновари, ультрамарина [2]

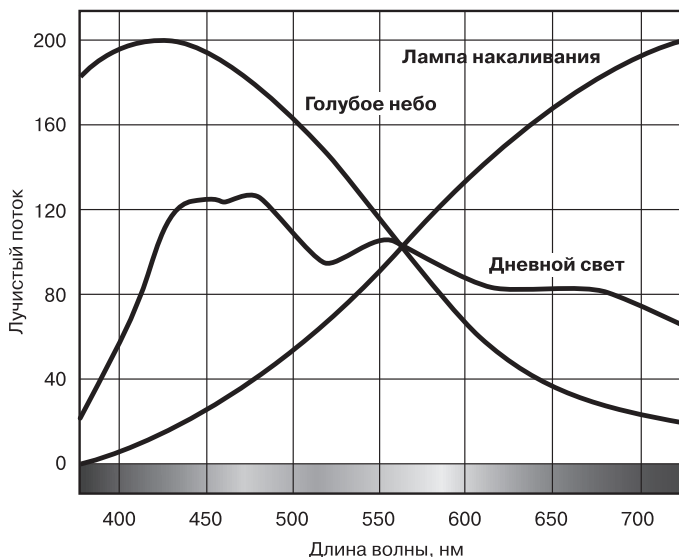


Рис. 1.3. Примеры спектрального распределения интенсивности излучения различных источников света: свет от ясного голубого неба, усредненный дневной свет, свет лампы накаливания

В зависимости от длины волны человеческий глаз воспринимает световое излучение окрашенным в тот или иной цвет: от фиолетового до красного. Если сказать строже, свет вызывает у человека ощущение того или иного цвета (табл. 1.1). Эта способность определяет возможность цветового зрения человека.

1.1.1. Спектр как характеристика цвета

В природе излучение от различных источников света редко является монохроматичным, т. е. представленным излучением только одной определенной длины волны, а имеет довольно сложный спектральный состав: в нем присутствуют излучения самых различных длин волн. Если представить эту картину в виде графика, где по оси ординат будет отложена длина волны, а по оси абсцисс — интенсивность, то мы получим зависимость, называемую *спектром излучения*. Спектр поверхностей окрашенных предметов определяется как зависимость коэффициента отражения ρ от длины волны λ , для прозрачных материалов — коэффициента пропускания τ от длины волны, а для источников света — интенсивности излучения от длины волны. Примеры спектров отражения некоторых красок и спектров излучения различных источников света приведены на рис. 1.2–1.3.

По форме спектральной кривой можно судить о цвете излучения, отраженного от поверхности предмета или испускаемого самосветящимся источником света. Чем более эта кривая будет стремиться к прямой линии, тем больше цвет излучения будет приближаться к ахроматическому. Чем меньше либо больше будет амплитуда спектра, тем цвет излучения или предмета будет менее или более ярким. Если спектр излучения равен нулю во всем диапазоне за исключением определенной узкой его части, мы будем наблюдать так называемый *чистый спектральный цвет*, соответ-

ствующий монохроматическому излучению, испускаемому в очень узком диапазоне длин волн.

В результате сложных процессов взаимодействия светового потока с атмосферой, окружающими предметами и другими световыми потоками энергетический спектр излучения реальных предметов, как правило, приобретает гораздо более сложную форму. В природе фактически нельзя встретить чистые цвета. К примеру, даже если принять излучение солнца в полдень за эталон белого цвета, то и оно на самом деле окажется не белым, а имеющим ту или иную окраску, возникающую вследствие изменения спектрального состава солнечного излучения в процессе его прохождения сквозь толщу земной атмосферы. Молекулы воздуха, а также находящиеся в атмосфере частички пыли и воды взаимодействуют с потоком солнечного излучения, причем этот процесс зависит от длины волны. Поэтому в вечерние и утренние часы, когда солнце находится низко над горизонтом и солнечные лучи должны проходить большее расстояние в атмосфере, чем в полдень, солнечный свет кажется нам не белым, а желтоватым, а освещенные им предметы — окрашенными в различные оттенки желтого, оранжевого, розового и красного. Это происходит из-за того, что атмосфера поглощает коротковолновую (условно синюю) и свободно пропускает длинноволновую (условно красную) составляющую излучения солнца.

Цвет предметов зависит от источника света, освещающего поверхность данного предмета. Точнее, световое излучение, отраженное от поверхности предмета либо прошедшее через нее и формирующее в зрительном аппарате ощущение цвета этого предмета, зависит как от свойств самого предмета отражать либо поглощать свет в зависимости от длины волны, так и от свойств источника света (рис. 1.4). Поэтому при проведении цветовых измерений необходимо всегда учитывать используемое при этом освещение и по возможности пользоваться только стандартными источниками света, причем не применять одновременно несколько разнотипных источников. То же самое касается любых работ с цветными изображениями, когда необходимо обеспечить высокую точность цветопередачи.

Более подробно спектры различных источников света и взаимодействие светового потока с поверхностями окрашенных предметов рассмотрены в [3].

1.1.2. Феномен цветового видения

При проведении своего знаменитого опыта по разложению солнечного света в спектр Ньютон сделал очень важное наблюдение. Он показал, что все многообразие спектральных цветов оказалось возможным свести к семи цветам. Они были названы Ньютоном *первичными*. Это красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, индиго (синий) и фиолетовый. Впоследствии различными исследователями было показано, что число первичных цветов можно сократить до трех, а именно до красного, зеленого и синего. Действительно, желтый и оранжевый есть комбинация зеленого и красного, голубой — зеленого и синего. Таким образом, все цветовые тона могут быть получены комбинацией красного, зеленого и синего цветов, названных поэтому *основными цветами*.

Юнг и Гельмгольц, занимавшиеся исследованиями цветового зрения, предположили, что подобные явления объясняются наличием в аппарате человеческого зрения трех цветочувствительных анализаторов, каждый из которых является

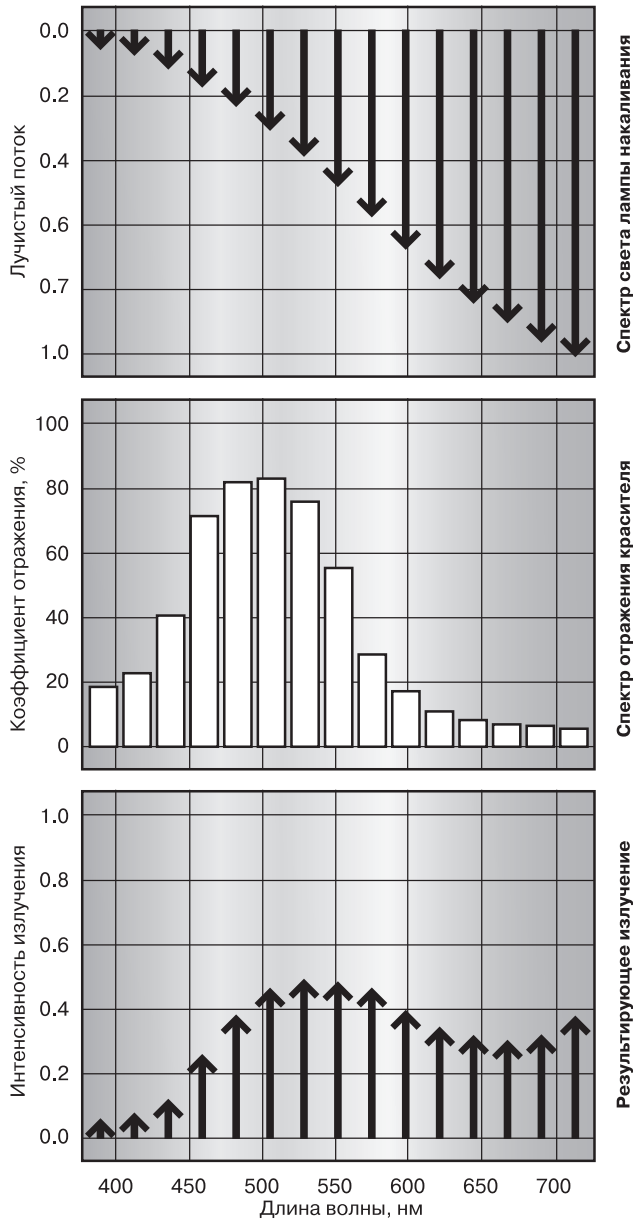
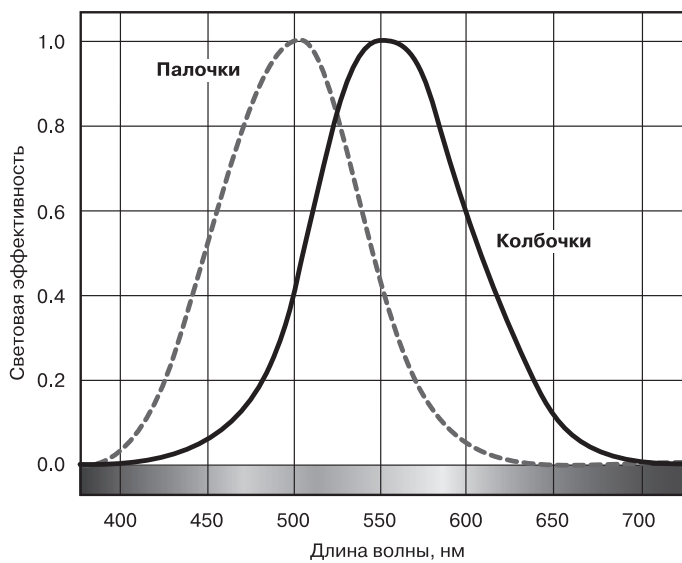
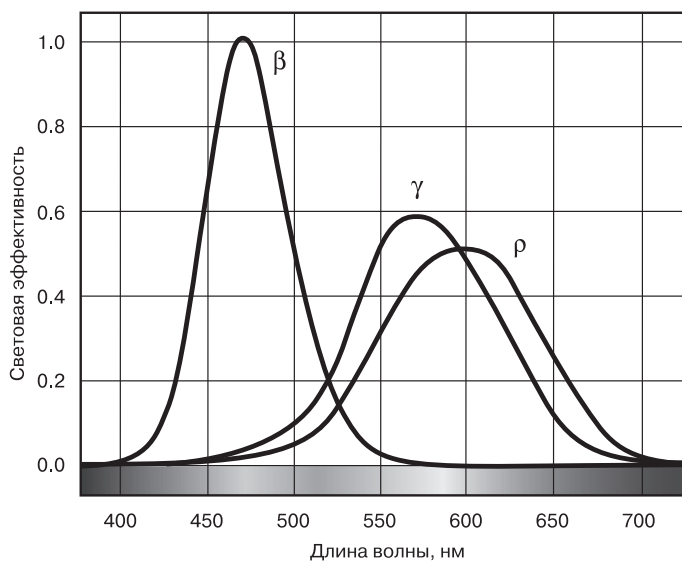


Рис. 1.4. Спектр излучения поверхности, окрашенной изумрудной зеленью, при освещении светом лампы накаливания. Из графика видно, что цвет красителя при освещении светом лампы накаливания приобретает теплый оттенок за счет усиления длинноволнового (оранжево-красного) и некоторого уменьшения коротковолнового (синего) излучения, отраженного от окрашенной поверхности



а)



б)

Рис. 1.5. Кривая относительной световой эффективности палочек (пунктирная линия) и колбочек (сплошная линия) (а) и кривые спектральной чувствительности колбочек (б), нормированные к единице

ответственным за восприятие красного, зеленого и синего световых излучений, попадающих в глаз. Позже это предположение получило достаточно веские научные подтверждения и легло в основу *трехкомпонентной теории цветового зрения*, которая объясняет феномен видения цвета существованием в глазу человека трех типов цветоощущающих клеток, чувствительных к свету различного спектрального состава.

Эти клетки действительно удалось увидеть в сетчатке глаза, и поскольку под микроскопом они предстали в виде округлых продолговатых тел несколько неправильной формы, они были названы колбочками. Колбочки, в зависимости от их спектральной чувствительности, подразделяются на три типа и обозначаются греческими буквами β (бета), γ (гамма) и ρ (ро). Первый тип (β) имеет максимум чувствительности к световым волнам с длиной от 400 до 500 нм (условно «синяя» составляющая спектра), второй (γ) — к световым волнам от 500 до 600 нм (условно «зеленая» составляющая спектра) и третий (ρ) — к световым волнам от 600 до 700 нм (условно «красная» составляющая спектра) (рис. 1.5, б). В зависимости от длины и интенсивности световых волн колбочки разного типа возбуждаются сильнее или слабее.

Также было установлено наличие других клеток, которые не имеют чувствительности к строго определенным спектральным излучениям, а реагируют на весь поток светового излучения. Поскольку под микроскопом эти клетки видны как удлинённые тела, их называли палочками.

У взрослого человека насчитывается порядка 6–7 млн колбочек и около 110–125 млн палочек (соотношение 1:18). Условно говоря, видимое нами изображение, так же как и изображение цифровое, дискретно. Но поскольку число элементов изображения очень большое, мы этого просто не ощущаем.

Интересно отметить и другую особенность. Световая чувствительность палочек намного выше чувствительности колбочек, и потому в сумерках или ночью, когда интенсивность попадающего в глаз излучения становится очень низкой, колбочки перестают работать, и человек видит только за счет палочек. Потому в это время суток, а также в условиях низкого освещения человек перестает различать цвета и мир предстает перед ним в черно-белых (сумрачных) тонах. Причем световая чувствительность человеческого глаза настолько высока, что намного превосходит возможности большинства существующих систем регистрации изображения. Человеческий глаз способен реагировать на поток светового излучения порядка 10^{-16} Вт/см². Если бы мы захотели использовать эту энергию для нагревания воды, то для того, чтобы нагреть один кубический сантиметр воды на 1°, потребовалось бы накапливать энергию не один миллион лет. Если выразить чувствительность человеческого глаза в единицах чувствительности фотопленки, то она будет эквивалентна фотопленке с чувствительностью 15 млн единиц ASA.

Чувствительность палочек и колбочек к световому потоку в зависимости от длины волны описывается *кривыми спектральной чувствительности человеческого глаза* (рис. 1.5, б). Для характеристики общей спектральной чувствительности человеческого глаза к потоку светового излучения используется *относительная кривая световой эффективности*, либо, как ее называли раньше, *кривая видности*, определяющая общую чувствительность человеческого глаза к свету с учетом цветового (колбочки) или светового (палочки) зрения (рис. 1.5, а).

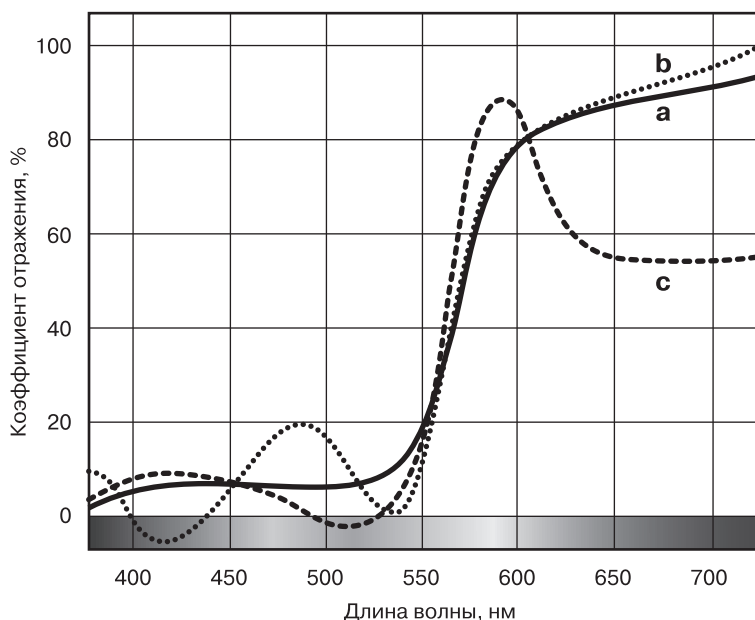


Рис. 1.6. Иллюстрация явления метамеризма. Три цветовых образца, имеющие разные спектральные коэффициенты отражения, кажутся при освещении их дневным светом одинаковыми. При воспроизведении этих образцов на фотопленке, спектральная чувствительность которой отлична от спектральной чувствительности зрительного аппарата человека, либо при изменении освещения они выглядят разноокрашенными (подробно этот пример рассматривается в главе 3)

Эти зависимости представляют большой интерес для специалистов, поскольку позволяют объяснить ряд известных феноменов человеческого зрения.

Так, по этим кривым можно видеть, что человек способен очень хорошо воспринимать зеленые и зелено-желтые цвета, в то время как его чувствительность к синим цветам заметно ниже.

Ситуация несколько меняется в сумерках, когда чувствительные к яркому световому излучению колбочки начинают терять свою эффективность, и соотношение между работающими палочками и колбочками изменяется — максимум спектральной световой эффективности смещается в сторону синих излучений (палочковое зрение).

Другая интересная особенность заключается в том, что главному хрусталику труднее фокусироваться на предметы, если они окрашены в сине-фиолетовые тона. Это объясняется падением спектральной чувствительности глаза в этих областях спектра. Поэтому очки иногда делают не нейтрально-прозрачными, а с окрашенными в желтый либо коричневый цвет стеклами, которые фильтруют сине-фиолетовую составляющую спектра.

Из-за того что кривые спектральной чувствительности частично перекрываются, человек может сталкиваться с определенными сложностями при различении некоторых чистых цветов. Так, из-за того что кривая спектральной чувствитель-

ности колбочек типа ρ (условно чувствительных к красной части спектра) сохраняет некоторую чувствительность в области сине-фиолетовых цветов, нам кажется, что синие и фиолетовые цвета имеют примесь красного.

Влияет на восприятие цвета и общая световая чувствительность глаза. Поскольку кривая относительной световой эффективности представляет собой гауссиану с максимумом в точке 555 нм (для дневного зрения), то цвета по краям спектра (синие и красные) воспринимаются нами менее яркими, чем цвета, занимающие центральное положение в спектре (зеленый, желтый, голубой).

Так как спектральная чувствительность человеческого глаза неравномерна по всей области спектра, при ощущении цвета могут возникать явления, когда два разных цвета, имеющих разные спектральные распределения, будут нам казаться одинаковыми за счет того, что вызывают одинаковое возбуждение глазных рецепторов. Такие цвета называются *метамерными*, а описанное явление — *метамеризмом*. Причем если мы попытаемся воспроизвести цвет этих предметов, скажем, на фотопленке, использующей отличный от зрительного аппарата человека механизм регистрации изображения, эти два предмета, скорее всего, окажутся различно окрашенными.

На использовании явления метамеризма основана вся современная технология воспроизведения цветного изображения: не имея возможности в цветной репродукции в точности повторить спектр того или иного цвета, наблюдаемый в естественных условиях, его заменяют цветом, синтезированным с помощью определенного набора красок или излучателей и имеющим иное спектральное распределение, но вызывающее у наблюдателя то же самое цветовое ощущение.

Знание особенностей человеческого зрения очень важно при проектировании систем регистрации и обработки изображения. Именно для того, чтобы в максимальной степени учесть особенности человеческого зрения, производители фотоматериалов вводят дополнительные цветочувствительные слои, производители принтеров — дополнительные печатные краски и т. д. Однако никакие усовершенствования современных технологий все же не позволяют создать систему воспроизведения изображения, которая бы могла сравниться с аппаратом человеческого зрения.

1.2. Классификация цветов

Как уже было указано, человеческий глаз воспринимает излучение цветным в зависимости от его длины волны. Характеристика, определяющая цвет, называется *цветовым тоном*. Принято считать, что человеческий глаз способен различить до 150 различных цветовых тонов *чистых спектральных цветов*. К этому числу следует прибавить еще 30 пурпурных цветов, которые отсутствуют в спектре, но могут быть получены путем смешения синего и красного спектральных излучений.

Помимо чистых спектральных и чистых пурпурных цветов также существует ряд цветов, которые называются *ахроматическими* или *нейтральными цветами*, т. е. цветами, лишенными окраски. К ним относятся черный, белый и лежащие между ними различные оттенки серого. Ощущение белого цвета возникает тогда, когда на человеческий глаз воздействует поток максимальной интенсивности. Когда световое излучение не воздействует на глаз, то цвет — черный. Ощущение серого цвета возникает тогда, когда воздействующий на глаз световой поток возбуждает цветочув-

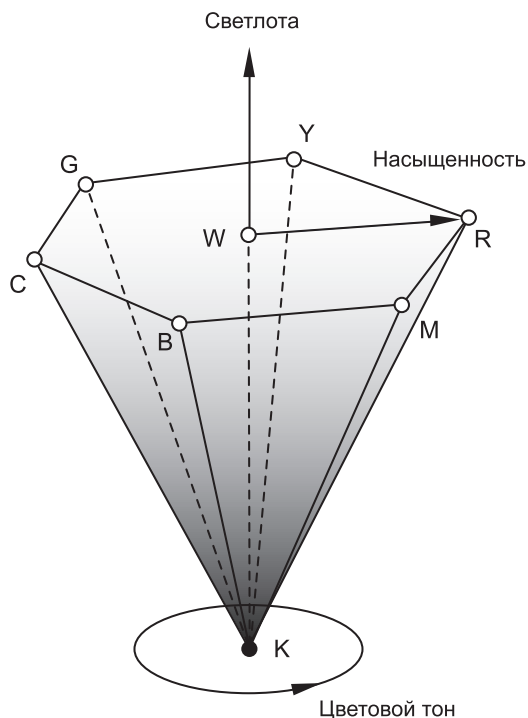


Рис. 1.7. Геометрическая модель расположения цветов в соответствии с цветовым тоном, насыщенностью и светлотой (цв. вклейка, рис. 2)

ствительные анализаторы (колбочки) в равной степени. Причем спектр излучения этого цвета не обязательно должен быть равномерным (равноэнергетическим), достаточно только, чтобы он вызывал одинаковое возбуждение трех цветоощущающих центров глаза (рис. 1.6).

Если смешивать чистый спектральный цвет с белым либо серым, то цвет начнет терять свою чистоту и постепенно переходить в белый или серый цвет. В этой связи для характеристики цвета, помимо цветового тона, используют также характеристику, называемую *насыщенностью* или *чистотой* цвета. Чистота цвета — характеристика цветового ощущения, позволяющая оценить долю чистой хроматической составляющей в общем цветовом ощущении. Насыщенность — характеристика зрительного ощущения, служащая для оценки отличия данного цвета от ахроматического цвета той же светлоты (цв. вклейка, рис. 3). На самом деле, чистых спектральных цветов в природе можно встретить не так уж много,

и вместо них мы гораздо чаще наблюдаем цвета в той или иной степени меньшей насыщенности. Считается, что для каждого цветового тона человеческий глаз способен различить до 200 ступеней насыщенности.

Характеристики цветового тона и насыщенности часто объединяют вместе и называют *цветностью*, которая может служить качественной характеристикой восприятия цвета.

Два цвета одинакового цветового тона могут отличаться друг от друга не только насыщенностью, но и яркостью (силой) их излучений, что при характеристике свойств несамосветящихся объектов принято характеризовать понятием *светлоты цвета*.

Светлота — характеристика ощущения, согласно которой предмет кажется пропускающим или диффузно отражающим более или менее значительную долю падающего света (цв. вклейка, рис. 4).

Цвет в пространстве часто представляют в соответствии с тремя рассмотренными характеристиками. Вдоль вертикальной оси располагаются цвета от черного до белого. Это меняется светлота. Насыщенность изменяется по радиусу, по мере удаления цвета от центра графика насыщенность возрастает. Цветовой тон характеризуется угловой координатой, как это показано на рис. 1.7. Теоретически такая

модель должна представлять собой цилиндр, но ее чаще располагают в виде перевернутого конуса, вершина которого соответствует точке черного, а основание — максимальному значению светлоты. Это хорошо согласуется с тем фактом, что при малых значениях яркости излучения человек начинает хуже различать цвета, а при минимальном значении яркости не различает их вообще.

Если взять сечение модели плоскостью, перпендикулярной оси светлоты, т. е., оставить только цветовой тон, то получим построение, которое принято именовать *цветовым кругом* (рис. 1.8). Он представляет собой окружность, вдоль которой располагаются цветовые тона от красного до пурпурного. Каждый цветовой тон в цветовом круге имеет численную координату, выраженную в градусах от 0 до 360°. Красный цвет начинает и замыкает цветовой круг, соответствуя точке 0 (360°). Желтому соответствует координата 60°, зеленому — 120°, голубому — 180°, синему — 240°, пурпурному — 300°. Все эти цвета располагаются на цветовом круге на равном интервале друг от друга 60°.

Цвета, находящиеся в цветовом круге друг напротив друга, называются дополнительными цветами. Например, красный и голубой, зеленый и пурпурный, синий и желтый и т.д. Эти цветовые пары имеют ряд интересных свойств, которые используются в технологии воспроизведения изображения, и о них будет подробно рассказано ниже.

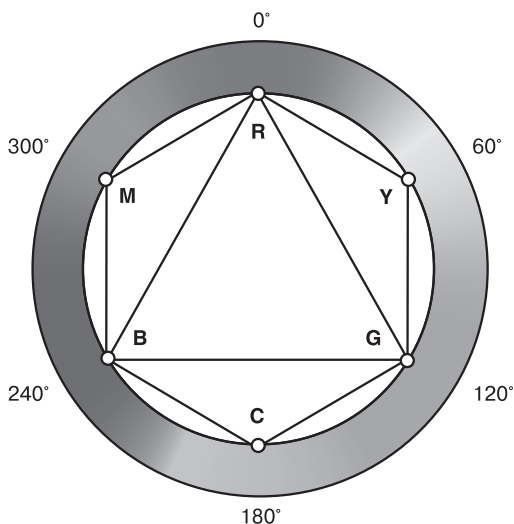


Рис. 1.8. Цветовой круг (цв. вклейка, рис. 5)

Таблица 1.2. Краски и их цветовые значения в координатах цветового тона (λ), насыщенности (P) и светлоты (W)*

Наименование краски	Характеристики цвета			Наименование краски	Характеристики цвета		
	λ , нм	P, %	W		λ , нм	P, %	W
Кадмий красный	620	60.0	0.16	Хромовая зеленая	530	48.0	0.19
Киноварь красная	610	97.5	0.15	Кобальт зеленый	530	50.0	0.09
Мумия	600	41.0	0.19	Зелень изумрудная	520	60.0	0.06
Охра жженная	598	45.0	0.21	Кобальт синий	463	70.0	0.12
Кадмий желтый	589	75.0	0.52	Ультрамарин синий	460	78.0	0.04

* Данные заимствованы из Атласа архитектурных цветов. Цитируется по [2].

Характеристики цветового тона, насыщенности и светлоты являются наиболее часто используемыми *субъективными* характеристиками цвета. Средством определения цвета могут также служить *атласы цветов*, в которых приводятся образцы цвета, воспроизведенные в различных материалах и сгруппированные по определенному признаку. Такие атласы широко используются в полиграфии, текстильной промышленности и архитектуре. Например, каталоги цветов системы Pantone [13], каталоги образцов цвета красок, пластмасс, тканей и т.п. Каждый цвет в цветовом атласе имеет свое обозначение, по которому можно определить его положение в атласе. В отдельных случаях приводится рецептура (рис. 1.9).

В колориметрии широко используется цветовой атлас Манселла [9], разработанный американским художником Альбертом Манселлом в начале XX столетия и позднее усовершенствованный Американским оптическим обществом. Манселл сгруппировал цвета по трем координатам: цветовому тону (Hue), насыщенности (Chroma) и светлоте (Value).

Манселл разделил цветовой круг на 10 основных тонов, которые обозначил соответствующими буквенными индексами: **R** (красный), **YR** (желто-красный), **Y** (желтый), **GY** (желто-зеленый), **G** (зеленый), **BG** (сине-зеленый), **B** (синий), **PB** (пурпурно-синий) и **RP** (красно-пурпурный). Сектор каждого цветового тона он разделил на 10 частей, получив таким образом 100 чистых цветовых тонов. Используя центр полученной окружности как точку ахроматических цветов, Манселл в соответствии с увеличением насыщенности (Chroma) расположил цветовые образцы от центра окружности к ее краю. Из центра окружности он построил ось, вдоль которой цвета группировались по мере изменения их светлоты (Value). Светлота изменялась от 0 (черный) до 10 (белый), причем шкала яркости была выбрана не линейная, а логарифмическая, что соответствовало восприятию изменения яркости человеком. А вот по степени увеличения насыщенности цвета не имели четкого и одинакового деления, поскольку спектральная чувствительность человеческого глаза в разных областях спектра не одинакова, и потому различия насыщенности для разных цветовых тонов отличаются. Так, для **5Y** при Value = 2 Манселл выделил только 3 степени насыщенности, а для **5PB** при той же светлоте — 28. При этом для разных значений светлоты возможное число цветовых образцов, имеющих разную насыщенность, было также неодинаковым, что согласовалось с тем фактом, что человек не способен хорошо различать цвета при слишком низких и слишком высоких яркостях. Если сгруппировать цветовые образцы атласа Манселла в пространственное тело, то полученное геометрическое построение будет несколько асимметричным, напоминая немного яблоко слегка неправильной формы либо деформированный шар. Кстати говоря, именно таким образом цветовой атлас Манселла часто и представлялся потребителю (рис. 1.10).

Для точного обозначения того или иного цвета Манселл предложил задать последовательно все три характеристики цвета: Hue (цветовой тон), Value (светлота) / Chroma (насыщенность). Например, красно-пурпурный цвет обозначается в атласе как **6RP4/8**, где **6RP** — цветовой тон, расположенный между пурпурным и красным цветом (чуть ближе к красному), имеющий светлоту **4** и насыщенность **8**.

Помимо Манселла, разработкой подобных цветowych атласов занимались и другие исследователи. В Германии аналогичный цветовой атлас, причем практически в то же самое время, что и Манселл, разработал Оствальд. Аналогичные работы были предприняты в Канаде, США и ряде других стран. В Советском Союзе

Таблица 1.3. **Названия цветов и их сокращения, используемые в системе ISCC-NBS**

Название цвета	Обозначение	Название цвета	Обозначение
Красный	R	Пурпурный	P
Красновато-оранжевый	rO	Пурпурновато-красный	pR
Оранжевый	O	Красновато-пурпурный	rP
Оранжевато-желтый	OY	Пурпурновато-розовый	pPk
Желтый	Y	Розовый	Pk
Зеленовато-желтый	gY	Желтовато-розовый	yPk
Желто-зеленый	YG	Коричневато-розовый	brPk
Желтовато-зеленый	yG	Коричневато-оранжевый	brO
Зеленый	G	Красновато-коричневый	rBr
Синевато-зеленый	bG	Коричневый	Br
Зеленовато-синий	gB	Желтовато-коричневый	yBr
Синий	B	Оливково-коричневый	OlBr
Пурпурно-синий	pB	Оливковый	Ol
Фиолетовый	V	Оливково-зеленый	OlG

были разработаны и использовались цветовой атлас Рабкина и атласы ВНИИМ им. Д. И. Менделеева на 500 и 1000 цветов.

Помимо цветковых атласов были также разработаны многочисленные системы классификации цветов по их наименованиям. Самый простой пример классификации цветов — их порядок следования в спектре, состоящий во всем известную формулу про охотника и фазана: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый.

Таблица 1.4. **Названия основных цветов в стандарте HTML***

№	Название	16-ричный код**	№	Название	16-ричный код**
1	Yellow (желтый)	#FFFF00	9	Green (зеленый)	#008000
2	Lime (ярко-зеленый)	#00FF00	10	Purple (фиолетовый)	#800080
3	Aqua (бирюзовый)	#00FFFF	11	Maroon (темно-красный)	#800000
4	Fuchsia (лиловый)	#FF00FF	12	Olive (коричнево-зеленый)	#808000
5	Blue (синий)	#0000FF	13	Gray (серый)	#808080
6	Red (красный)	#FF0000	14	Silver (светло-серый)	#C0C0C0
7	Navy (темно-синий)	#000080	15	Black (черный)	#000000
8	Teal (сине-зеленый)	#008080	16	White (белый)	#FFFFFF

* В таблице приведено только 16 цветов. Полную спецификацию см. в [18].

** В соответствии со стандартом HTML цвет можно задавать указанием его названия либо 16-ричным кодом, представляющим собой 8-разрядные координаты цвета в колориметрической системе sRGB.

Термины, которыми привыкли оперировать художники, являются более сложными и, естественно, многочисленными. Если мы возьмем наборы красок, продающихся в магазинах для художников, то обнаружим среди названий красок такие, как охра, кобальт, киноварь и т.д., которые являются общепринятыми терминами и у любого профессионального художника будут ассоциироваться с определенными цветами. Безусловно, неизбежно будут существовать и различия в том, какой именно цвет подразумевает под тем или иным наименованием конкретный человек.

Предпринимались также многочисленные попытки разработки более строгих в научном отношении систем именования цветов. Так, Мэрц и Пауль создали цветовой словарь, содержащий почти 4000 названий, из которых около 36 представлены собственными названиями, 300 представляют собой сложные слова, состоящие из названия цвета и соответствующего прилагательного [10]. В 1931 г. Межведомственный совет по цвету (ISCC) США по заказу Фармакологического комитета разработал систему наименований цветов для описания цвета окрашенных поверхностей. Эта система охватывала 267 обозначений, в основу которых были положены названия цветов, предложенные Манселлом. Сюда входили названия основных тонов — «красный» (**R**), «желтый» (**Y**), «зеленый» (**G**), «синий» (**B**), «пурпурный» (**P**), «оливковый» (**Ol**), «коричневый» (**Br**) и «розовый» (**Pk**), — к которым для обозначения дополнительных цветов добавлялись прилагательные «слабый», «сильный», «светлый», «темный», а также термины «бледный», «блестящий», «глубокий», «сумеречный», «живой» [11] (табл. 1.3).

Все остальные системы, разработанные другими исследователями, строятся по сходному способу и обычно насчитывают до нескольких сотен названий. В качестве примера такой системы, широко используемой в настоящее время в интернет-приложениях, можно привести систему из 216 цветов, рекомендованных интернет-консорциумом W3C в качестве стандартных цветов, которые можно использовать для спецификации цвета в рамках языка HTML [12] (табл. 1.4).

1.3. Характеристика источников света

Среди многообразия световых излучений, которые в состоянии воспринимать человеческий глаз, особо выделяют собственные излучения тех или иных самосветящихся объектов — источников света, таких как солнце, лампа накаливания, фотографическая лампа-вспышка и т.д. Поскольку источники света играют очень важную роль при определении цвета предметов и материалов, их подробно изучили и разработали специальную систему классификации, в основу которой положено понятие цветовой температуры.

Как известно, если нагревать металлический предмет до высокой температуры, он начнет испускать световое излучение. Чем выше температура накала, тем более интенсивным будет это свечение. При этом, в зависимости от температуры накала, будет также меняться и его цвет. Вначале он будет темно-красным, затем красным, потом оранжевым, затем белым. Как оказывается, это явление свойственно не только металлу, но наблюдается при нагревании многих твердых тел с высокой температурой плавления. Именно на использовании этого свойства построены электрические лампы накаливания: по тонкой вольфрамовой проволо-

Таблица 1.5. **Ощущение цвета светового потока
в зависимости от его цветовой температуры**

Цв. темп.	Ощущение цвета	Цв. темп.	Ощущение цвета
600K	Темно-красный	8000K	Голубовато-белый
1000K	Красный	10000K	Голубой
1400K	Красно-оранжевый	12000K	Насыщенный голубой
1800K	Оранжевый	16000K	Сине-голубой
4000K	Желтый	20000K	Синий
6500K	Белый	и выше	

ке пропускается электрический ток, в результате чего проволока нагревается и испускает свет. Причем цвет свечения предмета может быть довольно точно оценен в зависимости от температуры нагрева вольфрама: при нагревании до температуры в несколько сот градусов он имеет красноватый оттенок, при нагревании до температуры 1000 К — оранжевый, 2000 К — желтый; свечение тела, нагретого до нескольких тысяч градусов, воспринимается нами уже как белое. Свет солнца также обусловлен излучением, возникающим в результате реакций, протекающих на его поверхности, нагретой до температуры около 6500 К. Поверхность некоторых звезд имеет температуру свыше 10 000 К и потому цветность их излучения является голубой (табл. 1.5). По мере изменения температуры соответствующим образом изменяется и спектральный состав излучения (рис. 1.11).

Поскольку излучение большинства самосветящихся источников подчиняется одним и тем же законам, в качестве характеристики цветности излучения было предложено использовать температуру. Так как для разных тел, в зависимости от их химического состава и физических свойств, нагревание до заданной температуры дает несколько различный спектр излучения, в качестве эталона цветовой температуры используется гипотетическое абсолютно черное тело. Оно представляет собой полный излучатель, излучение которого зависит только от его температуры, а не от каких-либо других его свойств.

Спектр свечения абсолютно черного тела в зависимости от температуры его нагревания можно определить по закону Планка:

$$M_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (1.1)$$

где

$$c_1 = 3.74150 \cdot 10^{-6} \text{ (Вт} \cdot \text{м}^2), c_2 = 3.74150 \cdot 10^{-6} \text{ (Вт} \cdot \text{К)}.$$

Примеры спектральных кривых излучения абсолютно черного тела для разных значений цветовой температуры, рассчитанные по формуле (1.1), приведены на рис. 1.11.

Несмотря на существующие различия, все другие тела ведут себя при нагревании подобно идеальному черному телу. Именно поэтому использование цветовой температуры в качестве характеристики цветности излучения самосветящихся источников, как природных, так и искусственных, оказывается оправданным для очень большого числа случаев. Под цветовой температурой понимается тем-

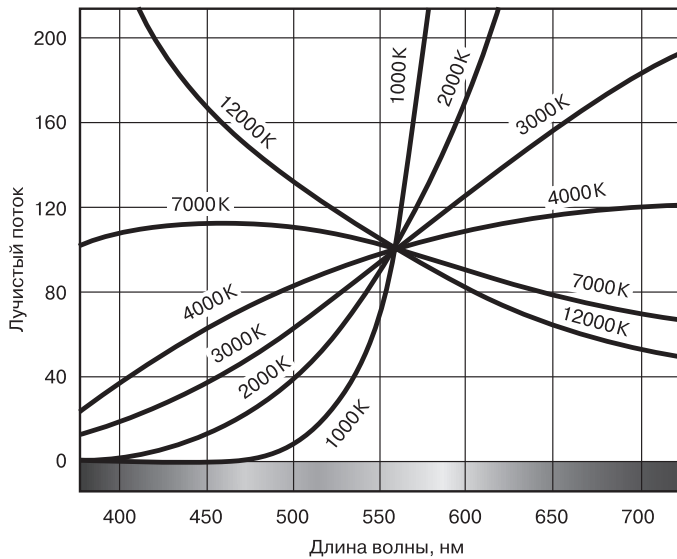


Рис. 1.11. Нормированные спектральные распределения излучения абсолютно черного тела при разных цветовых температурах

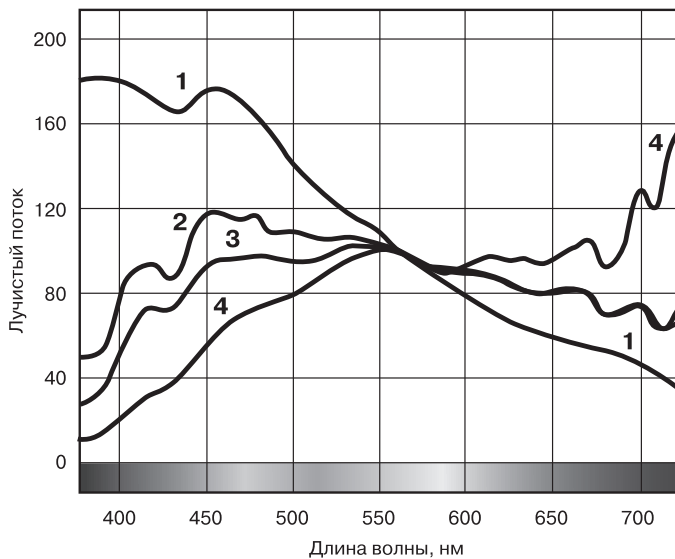


Рис. 1.12. Нормированные спектральные распределения различных фаз дневного света: 1) свет неба в зените; 2) свет неба, полностью покрытого облаками; 3) прямой солнечный свет в полдень; 4) прямой солнечный свет за один час до захода

Таблица 1.6. **Цветовая температура некоторых естественных и искусственных источников света**

Естественные источники света			
1700K	Пламя зажженной спички	6000K	Свет от облачного неба
1900K	Пламя свечи	6500K	Свет от летнего северного неба
2000K	Свет закатного солнца	6770K	Рассеянный солнечный свет
3500K	Свет солнца за один час до заката	7100K	Легкая летняя тень
4000K	Лунный свет	7500K	Свет от северного неба
4300K	Свет солнца незадолго до заката	8000K	Полная летняя тень
4870K	Прямой солнечный свет	8000K	Свет от летнего безоблачного неба
5400K	Свет летнего полуденного солнца	и выше	
Искусственные источники света			
2650K	40-ваттная лампа накаливания	3250K	Кварцевая галогенная лампа
2850K	100-ваттная лампа накаливания	5500K	Фотографическая лампа-вспышка
2950K	500-ваттная лампа накаливания		

пература черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение. Поскольку спектральное распределение излучения и, соответственно, цветность реального тела в редких случаях точно совпадает со спектральным распределением и цветностью идеально черного тела при данной цветовой температуре, при характеристике излучения реально существующих тел используют понятие коррелированной цветовой температуры. Оно соответствует цветовой температуре, полученной путем определения на равноконтрастном цветовом графике точки на линии черного тела, ближайшей к точке, представляющей собой цветность рассматриваемого источника света. При этом спектральный состав излучения и физическая температура, как правило, оказываются различными, что вполне логично следует из различия физических свойств реального и идеального черного тела.

Соответственно, сколько существует в мире источников света, эксплуатируемых при разных условиях, столько существует и спектральных распределений их излучения. Так, фазы солнечного света и их коррелированные цветовые температуры меняются в очень широких пределах в зависимости от географического положения, времени суток и состояния атмосферы (рис. 1.12, табл. 1.6). То же самое касается и искусственных источников света, например ламп накаливания, цветовая температура которых меняется в зависимости от их конструкции, рабочего напряжения и режима эксплуатации (см. табл. 1.6).

Однако, несмотря на существующее разнообразие различных источников света, большинство используемых в промышленности и технологии источников света могут быть стандартизированы. Международная комиссия по освещению (МКО) предложила несколько так называемых *стандартных колориметрических излучений*, которые были обозначены латинскими буквами **A, B, C, D, E и F** (табл. 1.7). В отличие от реальных источников света, стандартные излучения МКО описывают классы источников света, основываясь на усредненных значениях их спектральных распреде-

лений. Подобная стандартизация показала достаточную эффективность, поскольку, несмотря на имеющиеся различия, излучения большинства реальных источников света могут быть довольно точно сопоставлены с соответствующими стандартными излучениями МКО.

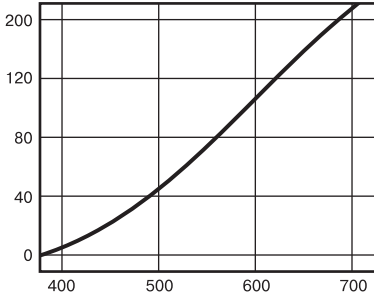
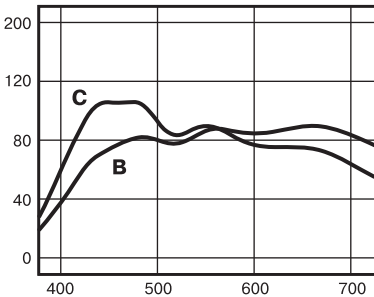
Относительные спектральные распределения некоторых стандартных излучателей МКО в диапазоне от 380 до 730 нм, табулированные с шагом в 10 нм, приведены в приложении 1.

Наряду с цветовой температурой иногда используется ее обратная величина, именуемая *миред* (обозначается μrd) либо *обратный микрокельвин*:

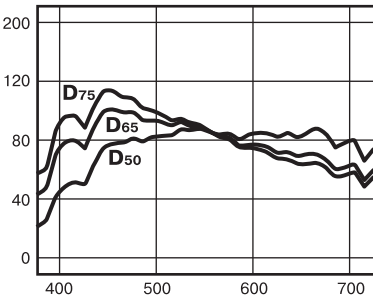
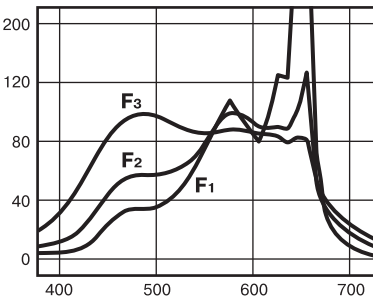
$$\mu\text{rd} = 10^6 / T_K.$$

Использование μrd вместо шкалы Кельвина имеет два преимущества: во-первых, одна единица μrd примерно соответствует заметному на глаз единичному порогу изменения цветности светового потока, и потому характеризовать цвет-

Таблица 1.7. Стандартные колориметрические излучатели МКО

Обозначение	Характеристика излучения и его спектр	
А	Под этим источником МКО обозначила полный световой излучатель (идеальное черное тело) при температуре 2856 К. Для его воспроизведения используется лампа накаливания с вольфрамовой нитью с коррелированной цветовой температурой 2856 К, а для более точного воспроизведения всего спектра источника А рекомендуется использовать лампы с колбой из плавленного кварца	
	Воспроизводят дневной солнечный свет: В — прямой солнечный свет с коррелированной цветовой температурой 4870 К, С — рассеянный солнечный свет с коррелированной цветовой температурой 6770 К. При расчете этих излучателей был допущен целый ряд неточностей и потому в колориметрических расчетах они практически не используются, заменяясь стандартным излучателем D. По этой причине в спецификации стандартных излучателей МКО они часто вообще не указываются	

Продолжение табл. 1.7

Обозначение	Характеристика излучения и его спектр
D	Является одним из наиболее часто используемых стандартных источников света, под который калибруется большинство оборудования ввода/вывода изображения. Воспроизводит различные фазы среднедневного света в диапазоне коррелированных цветовых температур от 4000 К до 7500 К. Данные спектрального распределения излучения D были определены путем усреднения данных многочисленных измерений спектра дневного света, выполненных в различных районах Великобритании, Канады и США. Для различных целей было определено несколько спектральных распределений источника D для различных значений цветовой температуры: D50, D55, D60, D65, D70, D75 с коррелированными цветовыми температурами соответственно 5000 К, 5500 К, 6000 К, 6500 К, 7000 К, 7500 К, соответствующих определенным фазам дневного света. Источник D65 следует считать наиболее универсальным, поскольку он наиболее точно аппроксимирует среднедневной свет. Источник D50 принят в качестве стандартного в полиграфии, поскольку лучше всего подходит для характеристики изображения, напечатанного стандартными типографскими красками на бумаге. Источник D55 принят в качестве стандартного в фотографии: именно лампы с цветовой температурой 5500 К используются в просмотровом оборудовании для слайдов, и эту цветовую температуру имеет свет лампы-вспышки. В отличие от других стандартных источников, в точности воспроизвести стандартные источники D довольно сложно, поскольку искусственных источников света с таким спектральным распределением излучения не существует. В качестве наиболее употребимых решений, удовлетворяющих потребителя как качественно, так и экономически, можно назвать использование люминесцентных ламп с соответствующей коррелированной цветовой температурой, спектр излучения которых дополнительно откорректирован с помощью специальных светофильтров 
E	Воображаемый источник излучения, имеющий равноэнергетический (не меняющийся с изменением длины волны) спектр с цветовой температурой 5460 К. Реально не существует в природе и используется в колориметрии только в расчетных целях
F	Стандартный излучатель, описывающий спектральное распределение излучения различных люминесцентных ламп. F_1 — излучение теплой люминесцентной лампы с коррелированной цветовой температурой 3000 К, F_2 — люминесцентной лампы холодного дневного света с коррелированной цветовой температурой 4230 К, F_7 — люминесцентной лампы дневного света с коррелированной цветовой температурой 6500 К 

ность излучения в этих единицах удобнее; во-вторых, μrd удобно использовать для характеристики цветных конверсионных и цветобалансирующих светофильтров: изменение цветовой температуры, обеспечиваемое фильтром, выраженное в μrd , не изменится при переходе от излучения с одной цветовой температурой к излучению с другой цветовой температурой:

$$\mu\text{rd} = 1000 (1000/T_1 - 1000/T_2),$$

где T_1 — цветовая температура светового потока, T_2 — цветовая температура, к которой будет приведен световой поток (в Кельвинах).

К примеру, оранжевый конверсионный фильтр 85-й серии понижает цветовую температуру среднедневного цвета с 5500 К до 3400 К на 2100 К (112 μrd). Однако, если его использовать для понижения цветовой температуры светового потока с цветовой температурой 4000 К, изменение цветовой температуры выраженное в Кельвинах будет не 2100 К, а 7246 К, а выраженное в μrd — не изменится.

1.4. Сложение цветовых излучений

Получение нового цвета путем смешения нескольких основных цветов определяет возможность получения цветного изображения в фотографии, кино, телевидении, полиграфии и компьютерной технологии. Оно основано на явлении смешения излучений, образованных окрашенными поверхностями либо световыми излучателями. В результате получается новый цвет, имеющий свой собственный спектр (рис. 1.13 и 1.14).

Если, к примеру, взять три источника света, снабженных красным, зеленым и синим светофильтрами, и спроецировать их излучения в одной точке на белом экране, то мы получим белое пятно. Если один из источников выключить и смешивать только излучение красного излучателя с зеленым, синего с зеленым и зеленого с красным, то на экране мы получим вначале желтый, затем пурпурный, а потом голубой цвет. Если же взять все три излучения в разной пропорции, то мы сможем получить довольно большое число цветов и их оттенков. Чем меньше будет различие интенсивности трех источников, тем меньшей будет насыщенность цвета и тем более он будет стремиться к нейтральному. Если, не изменяя пропорции трех излучений, уменьшить их интенсивность, то мы получим тот же самый цвет, но меньшей яркости. В предельном случае, когда интенсивность всех трех источников уменьшена до нуля, мы получим черный цвет. Математически это можно записать с помощью следующего выражения:

$$\mathbf{A(RGB)} = r \cdot \mathbf{R} + g \cdot \mathbf{G} + b \cdot \mathbf{B} \quad (1.2)$$

где $\mathbf{A(RGB)}$ — цвет, получаемый смешением красного, зеленого и синего излучений; $\mathbf{R}$, $\mathbf{G}$, $\mathbf{B}$ — излучения красного, зеленого и синего цветов; r , g , b — их интенсивности (рис. 1.13).

Для случая, когда берутся только два основных цвета:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} + \mathbf{G} &= \mathbf{Y} \\ \mathbf{G} + \mathbf{B} &= \mathbf{C} \\ \mathbf{B} + \mathbf{R} &= \mathbf{M} \end{aligned}$$

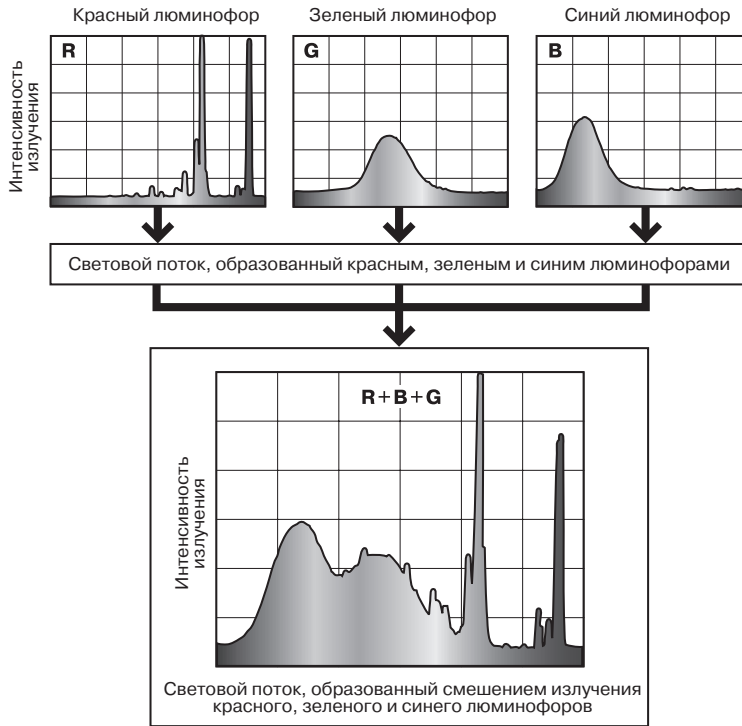


Рис. 1.13. Аддитивное смешение цветов. Рисунок иллюстрирует получение аддитивной цветовой смеси на примере цветного монитора Sony Trinitron. Излучения от трех люминофоров красного (**R**), зеленого (**G**) и синего цветов (**B**), спектральные излучения которых показаны на рисунке, суммируются для каждой длины волны, что позволяет получить цветовую смесь, воспроизводящую, в зависимости от интенсивности свечения каждого люминофора, большое число различных цветов и их оттенков. Обратите внимание, что свечение красного люминофора имеет практически линейчатый спектр, что обусловлено присутствием в его составе редкоземельных элементов (цв. вклейка, рис. 8)

На самом деле, вместо красного, зеленого и синего мы могли бы взять какие угодно цвета, но просто путем смешения красного, зеленого и синего можно получить наибольшую комбинацию цветов. Очевидным объяснением этого факта являются особенности человеческого зрения и наличие в зрительном аппарате человека трех цветоощущающих рецепторов, каждый из которых является чувствительным к красным, зеленым и синим лучам. Таким образом, образование цвета с помощью трех излучателей синего, зеленого и красного цветов можно рассматривать как направленное возбуждение трех цветовых рецепторов глаза, в результате чего получается возможность вызывать у зрителя ощущение того или иного цвета.

По подобной схеме происходит образование цветного изображения на экране видео- и компьютерного монитора, телевизора, ЖКИ-проектора и в других устройствах, которые используют излучения трех основных цветов для синтеза цвета. Поскольку для получения цвета в этом случае излучения трех основных цветов

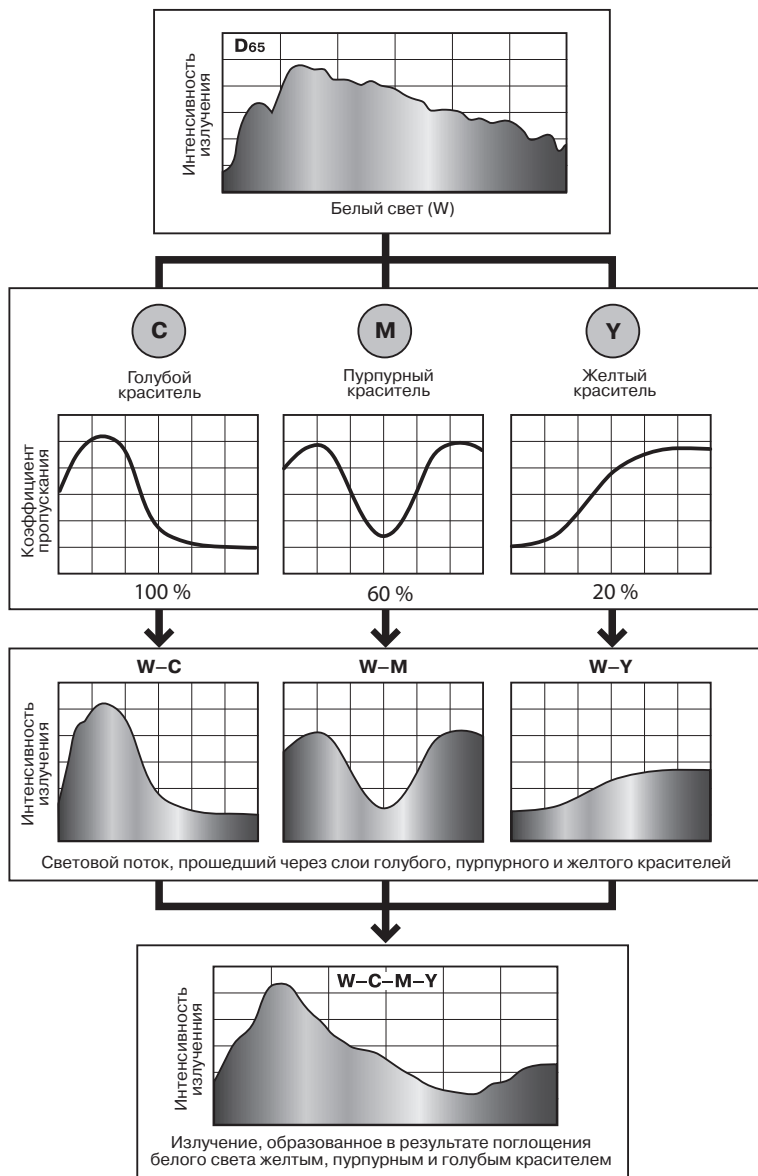


Рис. 1.14. Субтрактивное смешение цветов. Рисунок иллюстрирует получение субтрактивной цветовой смеси на примере цветной обрабатываемой фотопленки путем последовательного поглощения голубым (C), пурпурным (M) и желтым (Y) красителями с плотностями $C = 100 \%$, $M = 60 \%$, $Y = 20 \%$ излучения источника дневного света (D65) в каждом интервале длин волн. Получаемый в результате смешения цвет является одним из оттенков синего. Излучение, полученное в результате частичного поглощения светового потока красителями, может в этом случае рассматриваться как произведение спектра излучения источника света и спектров отражения красителей (цв. вклейка, рис. 9)

смешиваются (складываются), этот способ цветосинтеза получил наименование *аддитивного* (от глагола *add* — складывать).

Однако в большинстве случаев, например в кино, фотографии, полиграфии, текстильной и лакокрасочной промышленности, для образования цвета не представляется технологически возможным складывать световые потоки трех излучателей.

В фотографии световой поток белого света проходит через три красочных слоя фотоматериала, сформированных желтым, пурпурным и голубым красителями. В полиграфии световой поток проходит через слой желтой, пурпурной, голубой и черной краски и, отражаясь от поверхности бумаги, проходит в обратном направлении, формируя цветное изображение, а точнее, *цветовые стимулы*, вызывающие ощущение того или иного цвета и формирующие таким образом в сознании наблюдателя зрительную картину изображения.

В результате прохождения светового потока белого света через слой красителя либо пигмента происходит избирательное поглощение части энергии спектра излучения, в результате чего световой поток приобретает ту или иную окраску:

$$\mathbf{A}(\mathbf{CMY}) = \mathbf{W} - c \cdot \mathbf{C} - m \cdot \mathbf{M} - y \cdot \mathbf{Y} \quad (1.3)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{CMY})$ — цвет, получаемый смешением желтого, пурпурного и голубого красителей; $\mathbf{C}, \mathbf{M}, \mathbf{Y}$ — световое излучение, прошедшее через слои голубого, пурпурного и желтого красителей; c, m, y — плотности красочных слоев (рис. 1.14).

Последовательно пройдя через слой пурпурного и желтого красителей, световой поток окрашивается в красный цвет, пурпурного и голубого — в синий, голубого и желтого — в зеленый:

$$\begin{aligned} \mathbf{W} - \mathbf{M} - \mathbf{Y} &= \mathbf{R} \\ \mathbf{W} - \mathbf{M} - \mathbf{C} &= \mathbf{B} \\ \mathbf{W} - \mathbf{C} - \mathbf{Y} &= \mathbf{G} \end{aligned}$$

Таким образом, получается возможным, используя в качестве модулятора светового излучения желтый, пурпурный и голубой красители, освещаемые световым потоком белого света, получать потоки красного, зеленого и синего излучений, с помощью которых можно управлять возбуждением трех цветоощущающих центров глаза.

В печати и полиграфии к трем краскам — желтой, пурпурной и голубой — добавляется еще черная:

$$\mathbf{A}(\mathbf{CMYK}) = \mathbf{W} - c \cdot \mathbf{C} - m \cdot \mathbf{M} - y \cdot \mathbf{Y} - k \cdot \mathbf{K}, \quad (1.4)$$

где $\mathbf{A}$ — цвет, получаемый смешением желтого, пурпурного, голубого и черного красителей; $\mathbf{C}, \mathbf{M}, \mathbf{Y}, \mathbf{K}$ — желтый, пурпурный, голубой и черный красители; c, m, y, k — их плотности.

Это продиктовано, во-первых, экономическими соображениями, поскольку позволяет уменьшить расход более дорогих цветных красок, а во-вторых, позволяет решить некоторые принципиальные проблемы, возникающие в процессе трехцветной типографской печати вследствие несовершенства используемых печатных красок, спектр отражения которых на практике не ограничивается только желтым, только пурпурным и только голубым.

Расчет красок СМΥΚ (произносится «си-мак») по координатам цвета RGB (цветоделение) производится следующим образом [42]:

$$\begin{aligned}K &= \min(1 - R, 1 - G, 1 - B), \\C &= (1 - R - K) / (1 - K), \\M &= (1 - G - K) / (1 - K), \\Y &= (1 - B - K) / (1 - K),\end{aligned}\tag{1.5}$$

где **C**, **M**, **Y**, **K** — нормированные к диапазону [0 . . . 1] плотности голубой, пурпурной, желтой и черной красок; **R**, **G**, **B** — числовые координаты красного, зеленого и синего цветов, нормированные к диапазону [0 . . . 1].

Приведенная выше методика расчета является обобщенной. Более точная методика, используемая специальным программным обеспечением для цветоделения, учитывает в расчетах также целый ряд дополнительных факторов, призванных улучшить качество цветоделения с целью получения более качественных печатных копий изображения.

Поскольку для получения цвета световые потоки не складываются, а световой поток белого света частично поглощается в результате взаимодействия с красителем, такой способ цветосинтеза получил наименование *субтрактивного* (от глагола *subtract* — вычитать).

На самом деле истинно субтрактивным можно назвать лишь процесс синтеза цвета, используемый в фотографии при получении цветного изображения на светочувствительном фотоматериале за счет использования желтого, пурпурного и голубого красителей. В печати, хотя для получения изображения также используются желтый, пурпурный и голубой красители (плюс черный, который часто интерпретируют как смесь трех субтрактивных красок), помимо образования цвета по субтрактивному механизму, имеет место также образование цвета и по аддитивному механизму за счет сложения световых потоков, отраженных от растровых элементов изображения. В полиграфической литературе метод получения цветного изображения по подобному механизму именуется *автотипией* [36].