

**Информационные системы и программная инженерия**

---

# Программирование графических приложений

---

## **1.1. Растровая и векторная графика**

Изображения, получаемые на компьютере, различаются по своей структуре. Существуют два основных формата компьютерной графики: векторный и растровый. Это обусловлено применением двух различных подходов к построению компьютерного изображения.

Картинка или фотография в реальном мире представляют собою набор некоторых непрерывных элементов. Даже очень внимательно всматриваясь в штрих карандаша, мы не заметим обрыва, если он не был сделан намеренно. Области определенных цветов или оттенков серого на классической, нецифровой фотографии, также непрерывны — переходы могут быть плавными или, наоборот, резкими и грубыми, но области одного цвета непрерывны.

Представление компьютерного изображения основано на иных принципах. Здесь нет ничего непрерывного и изображение, выводимое на экран или принтер, получаемое со сканера или цифрового фотоаппарата, всегда дискретно, состоит из отдельных точек. Эти точки могут быть настолько мелкими, что их невозможно различить, но тем не менее, цифровая картинка по сути — мозаика, иначе говоря, растр.

### **1.1.1. Разрешение изображения и его размер**

Следует четко различать разрешение экрана, разрешение печатающего устройства и разрешение изображения. Все эти понятия относятся к разным объектам. Друг с другом эти виды разрешения никак не связаны, пока не потребуется узнать, какой физический размер будет иметь картинка на экране монитора, отпечаток на бумаге или файл на жестком диске.

Разрешение экрана – свойство компьютерной видеосистемы (зависит от параметров монитора и видеокарты) и операционной системы (зависит от настроек Windows). Разрешение экрана измеряется в пикселах на дюйм (ppi - pixel per inch) и определяет размер изображения, которое может быть размещено на экране целиком.

Разрешение принтера – свойство принтера, выражающее количество отдельных точек, которые могут быть напечатаны на участке единичной длины. Оно измеряется в единицах dpi (dots per inch – точки на дюйм) и определяет размер изображения при заданном качестве или, наоборот, качество изображения при заданном размере.

Разрешение изображения – свойство самого изображения. Оно измеряется в точках на дюйм (dpi) и задается при создании изображения в графическом редакторе или с помощью сканера. Значение разрешения изображения хранится в файле изображения и неразрывно связано с другим свойством изображения – его физическим размером.

Физический размер изображения. Может измеряться как в пикселах, так и в единицах длины (миллиметрах, сантиметрах, дюймах). Он задается при создании изображения и хранится вместе с файлом.

Если изображение готовят для демонстрации на экране, то его ширину и высоту задают в пикселах, чтобы знать, какую часть экрана оно занимает. Если изображение готовят для печати, то его размер задают в единицах длины, чтобы знать, какую часть листа бумаги оно займет. Нетрудно пересчитать размер изображения из пикселей в единицы длины и наоборот, если известно разрешение изображения

Связь между размером иллюстрации (в пикселах) и размером отпечатка (в мм) при разных разрешениях отпечатка

Размер иллюстрации в пикселах	Размер отпечатка, мм при разрешениях			
	75 dpi	150 dpi	300 dpi	600 dpi
640x480	212x163	108x81	55x40	28x20
800x600	271x203	136x102	68x51	34x26
1024x768	344x260	173x130	88x66	44x33
1152x864	390x292	195x146	98x73	49x37
1600x1200	542x406	271x203	136x102	68x51

### **1.1.2. Понятие растра**

Появление и широкое использование растра основано на свойстве человеческого зрения воспринимать изображение, состоящее из отдельных точек, как единое целое. Эту особенность зрения с давних пор использовали художники. На ней основана и технология полиграфической печати.

Изображение проецируется на светочувствительную пластину через стекло, на которое равномерно нанесена непрозрачная растровая решетка. В результате непрерывное полутоновое изображение оказывается разбитым на отдельные ячейки, которые называются элементами растра. Растр получил широкое распространение при изготовлении различного рода печатной продукции: газет, журналов, книг.

Понятие непрерывного полутонового изображения пришло из фотографии. На самом деле фотографический отпечаток при просмотре его через оптический прибор с очень большим увеличением тоже состоит из отдельных элементарных точек. Однако они настолько малы, что неразличимы невооруженным глазом.

Другие методы представления изображений: полиграфия, распечатка на принтере, вывод на монитор – используют сравнительно большие по размеру элементы растра.

### **1.1.3. Методы растривания**

В полиграфии плотность заполнения элемента растра черной краской определяет восприятие данной точки на отпечатке как более светлой или темной. Таким образом, интенсивность тона регулируют изменением размера растровой точки: чем темнее точка на отпечатке, тем больше степень заполнения черной краской ячейки растра. Такой метод называют растриванием с амплитудной модуляцией.

Интенсивность тона можно регулировать за счет изменения числа черных точек одинакового размера, размещаемых в растровой ячейке. Такой метод называют растриванием с частотной модуляцией.

Если черные точки расположены внутри растровой ячейки случайным образом, метод называют стохастическим растриванием.

Интенсивность тона (светлоту) принято подразделять на 256 уровней, т.е. для воспроизведения всего полутонового диапазона достаточно, чтобы размер растровой ячейки составил 16x16 точек. Таких ячеек, накладываемых на изображение, должно быть столько, чтобы не пропали какие-то мелкие детали изображения. Следовательно, чем больше ячеек растра содержится в каждой строке, тем более высокое качество мы получим при печати изображения.

Расстояние между центрами растровых ячеек одинаково, их число на единицу длины называется линиатурой растра и измеряется в линиях на дюйм (lpi - lines per inch). Чем выше значение lpi растра, тем более четким выглядит изображение, так как мелкие детали попадают в несколько ячеек растра. Современное качественное полиграфическое оборудование может

иметь линиатуру растра до 300 lpi. При печати на принтере линиатура растра составляет порядка 65-90 lpi. В полиграфической печати растровую сетку принято поворачивать на угол 45 градусов (для черной краски). Это связано с особенностью человеческого глаза фиксировать линии, близкие к вертикали или горизонтали. При использовании цветной печати угол поворота может быть иным, в зависимости от количества цветов.

В настоящий момент для ввода изображения используются, в основном, цифровые устройства (сканеры, фото- и видеокамеры). Эти устройства характеризуются постоянным размером пятна. Следовательно, чтобы заполнить растровую ячейку, попавшую в темную область изображения, в ней размещают много пятен одинакового размера. Такие пятна называют точками. Максимальное число точек одинакового размера, которые могут поместиться в отрезке фиксированной длины (по вертикали или горизонтали) отпечатка, называют разрешающей способностью печатающего устройства. В качестве единицы измерения используется dpi. Например, разрешение принтера 600x1200 dpi (разрешение по горизонтали – 600, по вертикали – 1200).

Тоновый диапазон, линиатура растра и разрешающая способность печатающего устройства связаны следующим соотношением:

$$\text{Число уровней} = (\text{разрешение, } dpi / \text{линиатура, } lpi)^2 + 1.$$

#### **1.1.4. Растровое представление компьютерной графики**

Принцип хранения и обработки некоторого изображения в виде матрицы точек называется растровой графикой. В виде раstra (битовой матрицы) хранятся фотоизображения и, как правило, полноцветная сложная графика, принципы работы с которой, в сущности, совпадают с подходом к обработке фотографий.

Итак, растровое изображение представляет из себя набор точек, которые последовательно (по строкам) формируют изображение. Такой подход пришел из телевизионной техники и первые мониторы представляли из себя телевизоры без электронных схем телеприема. Каждая точка запоминается, в том смысле, что запоминается ее цвет. Получившаяся цветная мозаика в конечном счете и производит впечатление единого целого.

Количество точек, приходящееся на некоторую единицу длины (традиционно - на дюйм), называется разрешением и определяет качество картинки. Чем выше разрешение (т.е. число точек, цвета которых сохранены) тем, в общем случае, выше качество изображения. Еще одна величина, характеризующая качество изображения - число линий на дюйм (линиатура), принята в типографском деле.

Кроме dpi (точек на дюйм) и lpi (линий на дюйм), разрешение может измеряться в пикселях (точках на экране монитора). Для примера — разрешение монитора компьютера может составлять, например, 1024x768 пикселей. Это означает, что в каждой горизонтальной линии точек на экране 1024 точки, а линий — 768. При этом разрешение экрана в точках на дюйм составляет порядка 72.



### **1.1.5. Векторное представление компьютерной графики**

Векторный способ кодирования изображения (векторная графика) состоит в следующем: рисунок "расчленяется" на простые геометрические фигуры (квадрат, круг, эллипс, прямые, кривые линии и т. д.) и каждый такой элемент хранится в памяти компьютера в виде математической формулы. Изображение составляется из контуров элементов; замкнутые контуры могут быть залиты цветом. Масштабирование изображения происходит при помощи простых математических операций, параметры примитивов просто умножаются на коэффициент масштабирования. Изображение может быть преобразовано в любой размер и качество его при этом не изменится. Именно векторные пакеты позволяют создать модель трехмерного объекта.

Пример редактора векторной графики - программа Corel Draw. Вектор можно задать всего лишь двумя парами чисел (координатами начала и конца), плюс информация о цвете - причем сразу для всех точек, а не для каждой. Такой подход резко снижает накладные расходы на хранение данных (объем векторного файла может быть в десятки и даже сотни раз меньше, чем у растрового для одного и того же изображения). Кроме того, в описанном примере изменение длины отрезка с точки зрения программирования произвести чрезвычайно просто - достаточно лишь изменить координаты одной из его границ. По тому же принципу можно хранить окружности (радиус + центр + цвет) и так далее.

### **1.1.6. Связь вектора и растра**

В принципе, можно преобразовать в векторный формат и растровое изображение, например, при помощи утилиты CorelTrace. Результат преобразования может быть весьма удачным при условии, что по своему содержанию изображение представляет собой именно штриховое изображение. Для фотографии результат преобразования будет грубоват.

Можно провести и обратный процесс - растеризацию векторной графики, экспорт из CorelDraw в один из форматов растровой графики. Возможно и одновременное использование импортированного растрового изображения совместно с векторной графикой.

В последнее время наблюдается тенденция к взаимному проникновению векторных программ в растровые и наоборот. Это вызвано тем, что при работе с векторным пакетом возникает потребность в готовом растровом изображении, а в процессе преобразования растровой картинки зачастую требуется дополнить рисунок простыми векторными графическими элементами. Поэтому графические пакеты одного формата теперь нередко укомплектованы простейшими функциями графики другого формата.

Выбор программного обеспечения зависит от поставленных задач и определяет удобство и производительность работы, содержание и качество конечного результата. Существует множество дизайнерских программных средств, используемых в самых разных областях творческой деятельности.

## 1.2. Структура изображений

Несколько определений.

Координатная точка – совокупность  $n$  значений координат, целых или вещественных (для трехмерного пространства -  $x, y, z$ ).

Примитив – любой графический фрагмент изображения, который генерируется одной отдельной командой. К графическим примитивам могут относиться, например, точки, отрезки прямых (векторы), буквенно-цифровые литеры, специальные символы, фрагменты специальных кривых (например дуга окружности), куски поверхностей. Точка определяется парой значений координат, вектор – двумя точками, дуга окружности – тремя точками, литера – кодом и т.д.

Элемент – упорядоченная совокупность примитивов, обладающих одинаковыми визуальными свойствами и статусом и идентифицируемых одним именем.

Графический объект – совокупность графических примитивов, элементов, координатных точек, составляющих законченный фрагмент изображения.

Совокупность графических объектов образует объект еще более высокого уровня, включающий в себя все, что изображено на экране, изображение.

Тогда любое изображение может быть представлено в виде иерархической структуры (рис. 1.2).

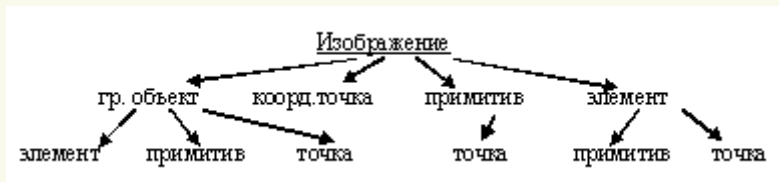


Рис. 1.2

Процесс генерации каждого объекта может быть условно разделен на три части:

1. Спецификация графического объекта, то есть описание элементов, примитивов, координатных точек, образующих объект.

2. Инициализация графического объекта, то есть задание имени и атрибутов, а если необходимо и начальной точки ранее специфицированного объекта, входящего в состав изображения.

3. Визуализация графического объекта - уже инициализированное изображение выводится на внешнее устройство.

В программном обеспечении КГ спецификация соответствует программному блоку, генерирующему объект определенного типа, инициализация – передаче данных (конкретных параметров объекта) в формирующий объект программный блок, визуализация – запуску программного блока на выполнение.

### 1.3. Основные понятия 2D - геометрических моделей

**Положение точки в пространстве  $\mathbf{R}^n$**  ( $n$ -мерном пространстве) задается радиус-вектором  $p=[p_1, p_2, \dots, p_n]$ , имеющим  $n$  координат  $p_1, p_2, \dots, p_n$  и разложение по  $n$  линейно-независимым базисным векторам  $e_1, e_2, \dots, e_n$  :

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_n] = \sum_{i=1}^n p_i e_i .$$

Таким образом **положение точки на плоскости** определяется радиус-вектором точки  $p=[p_x, p_y]=p_x e_x + p_y e_y$  или  $p=[r, \varphi]$  в полярной системе координат.

Расстояние между двумя точками  $p_1$  и  $p_2$  равно:

$$d = \begin{cases} |p_2 - p_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \\ |p_2 - p_1| = \sqrt{r_2^2 + r_1^2 - 2r_1 r_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)} . \end{cases}$$

**Линия на плоскости** может быть задана с помощью уравнения в неявной форме:

$$f(x,y)=0;$$

или в параметрической форме:

$$p(t)=[x(t), y(t)].$$

В любой регулярной (гладкой и некратной) точке на линии  $p_0=[x_0, y_0]=p(t_0)$  возможна *линеаризация* кривой, т.е. проведение к ней касательной прямой, уравнения которой имеют вид:

*неявная форма*

$$N_x(x - x_0) + N_y(y - y_0) = 0$$

или

$$N \circ (p - p_0) = 0,$$

*параметрическая форма*

$$x(t) = x_0 + V_x t,$$

$$y(t) = y_0 + V_y t$$

или

$$p(t) = p_0 + Vt.$$

**Вектор нормали**  $N=[N_x, N_y]$  ортогонален линии и направлен в ту сторону, где  $f(p) > 0$ .

**Направляющий вектор линии**  $V=[V_x, V_y]$  начинается в точке  $p_0$  и направлен по касательной к  $p(t)$  в сторону увеличения  $t$ .

Векторы  $N$  и  $V$  ортогональны, т.е.  $N \cdot V = 0$  или  $N_x V_x + N_y V_y = 0$ .

Связь вектора нормали и направляющего вектора:

$$N=[V_y, -V_x], \quad V=[-N_y, N_x]$$

## 2.1. Текстуры

Текстура - это стиль заполнения поверхностей, закрашивание, которое имитирует сложную рельефную объемную поверхность, выполненную из некоторого материала (рис.2.1).

Для обозначения в алгоритмах текстурирования операции засвечивания пикселя с координатами  $(x,y)$  цветом  $C$  будем использовать функцию  $putpixel(x,y,C)$ . Например, алгоритм построчного заполнения области в некотором интервале изменения координат  $(x,y)$  одним цветом  $C$  (простейшая текстура):

```
Определение  $xst, xen, yst, yen, C = const$ ;  
Цикл по  $y$ :  $(yst, yen)$   
  Цикл по  $x$ :  $(xst, xen)$   
     $putpixel(x, y, C)$ .
```

Чтобы ввести в алгоритм стиль заполнения, необходимо изменять цвет пикселей в соответствии с определенной функцией:

```
Определение  $xst, xen, yst, yen$ ;  
Цикл по  $y$ :  $(yst, yen)$   
  Цикл по  $x$ :  $(xst, xen)$   
    {  
       $C = fc(x, y)$ ;  
       $putpixel(x, y, C)$ .  
    }
```

Функция  $fc(x, y)$  определяет стиль заполнения и не обязательно зависит от координат. Например, иллюзию шершавой матовой поверхности дает функция  $C = \text{random}()$ .

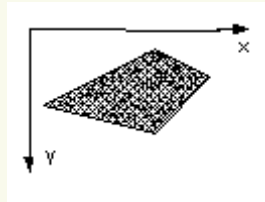


Рис. 2.1

Если для текстурирования необходимо копировать на поверхность растровое изображение, можно использовать алгоритм:

*Определение  $xst, xen, yst, yen$ ;*

*Цикл по  $y$ : ( $yst, yen$ )*

*Цикл по  $x$ : ( $xst, xen$ )*

```
{  
     $xt = fx(x, y);$   
     $yt = fy(x, y);$   
     $C = fc(xt, yt);$   
     $putpixel(x, y, C);$   
}
```



В последнем алгоритме обозначено:  $x_t, y_t$  – координаты растрового изображения (текстуры);  $x_t = f_x(x, y), y_t = f_y(x, y)$  – функции пересчета координат пикселя в координаты текстуры (каждой точке поверхности объекта соответствует точка на битовой текстуре).

Если растр текстуры – небольшое прямоугольное битовое поле, которое должно периодически повторяться на поверхности объекта, то преобразование координат пикселя поверхности  $(x, y)$  в координаты внутри образца текстуры  $(x_t, y_t)$  будет следующим:

$$x_t = \text{mod}(x, m), \quad y_t = \text{mod}(y, n),$$

где  $m, n$  – размеры растра текстуры по вертикали и горизонтали. При этом координаты  $(x_t, y_t)$  будут в диапазоне  $x_t = 0.. m-1, y_t = 0.. n-1$  для любых  $x, y$ . Таким образом, обеспечивается циклическое копирование фрагментов кисти внутри области заполнения фигуры (рис.2.2).

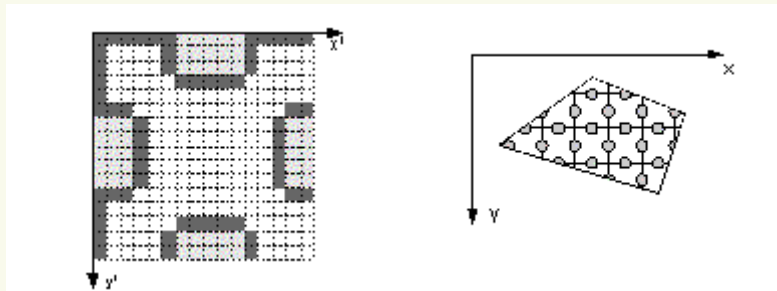


Рис. 2.2

Общая схема алгоритма заполнения контуров полигональных поверхностей для построения различных проекций объектов, аппроксимированных плоскими гранями, такая же, как и предыдущая. Однако растровый образец здесь представляет всю грань, а преобразование координат из  $(x, y)$  в  $(x^t, y^t)$  более сложное (рис.2.3).

Например, при линейном преобразовании:

$$x^t = A \cdot x + B \cdot y + C,$$

$$y^t = D \cdot x + E \cdot y + F,$$

где коэффициенты  $A, B, \dots, F$  – константы при пересчете координат всех пикселей для отдельной текстурированной грани.

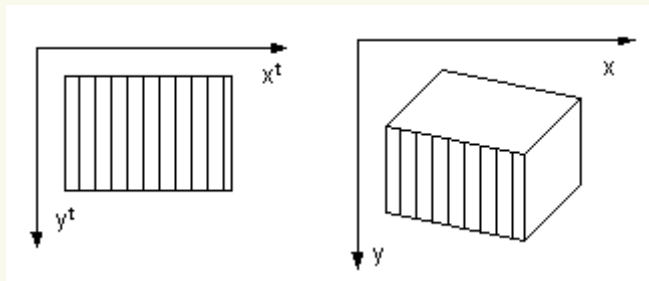


Рис. 2.3

Такое преобразование координат можно использовать, если привязать текстуру к грани по трем опорным точкам, что соответствует уравнениям:

$$x_{ti} = A \cdot x_i + B \cdot y_i + C,$$

$$y_{ti} = D \cdot x_i + E \cdot y_i + F,$$

где  $i=1, 2, 3$ . По известным координатам  $(x_{ti}, y_{ti})$  и  $(x_i, y_i)$  можно найти коэффициенты  $A, B, \dots, F$ , если решить систему линейных уравнений, которая распадается на две независимые системы третьего порядка:

$$x_{t1} = A \cdot x_1 + B \cdot y_1 + C,$$

$$x_{t2} = A \cdot x_2 + B \cdot y_2 + C,$$

$$x_{t3} = A \cdot x_3 + B \cdot y_3 + C,$$

и

$$y_{t1} = D \cdot x_1 + E \cdot y_1 + F,$$

$$y_{t2} = D \cdot x_2 + E \cdot y_2 + F,$$

$$y_{t3} = D \cdot x_3 + E \cdot y_3 + F.$$

Наложение текстур в перспективной проекции сложнее, чем в аксонометрической. Более сложные преобразования координат применяются также для текстурирования криволинейных поверхностей.

В рассмотренных методах текстура наносится на гладкую поверхность, и она после этого остается гладкой. Для того чтобы поверхность казалась шероховатой, можно отобразить на поверхность объекта нерегулярную текстуру. Однако при этом будет казаться, что неровности нарисованы на гладкой поверхности. Дело в том, что в векторе нормали к настоящей

шероховатой поверхности и, следовательно, в направлении отражения есть небольшая случайная составляющая. На этой основе может быть построен метод возмущения нормали для построения неровных поверхностей.

Нормаль к поверхности в некоторой точке совпадает с нормалью к плоскости, касательной к поверхности в этой точке, и определяется векторным произведением двух векторов, лежащих в плоскости и исходящих из той же точки:  $n = Q_1 \times Q_2$ .

Для построения новой поверхности, которая выглядит шероховатой, в направлении нормали вносится функция возмущения  $W$ :

$$Q' = Q + W \frac{n}{|n|}.$$

Нормаль к возмущенной поверхности имеет вид:  $n' = Q'_1 \times Q'_2$ , поэтому

$$n' = Q_1 \times Q_2 + \frac{W_1 \cdot (n \times Q_2)}{|n|} + \frac{W_2 \cdot (n \times Q_1)}{|n|} = n + \frac{W_1 \cdot (n \times Q_2)}{|n|} + \frac{W_2 \cdot (n \times Q_1)}{|n|}.$$

В качестве  $W$  можно использовать различные функции, в том числе табличные.

Другой метод наложения нерегулярной текстуры на поверхность основан на фрактальных поверхностях. Фрактальная поверхность состоит из случайно заданных полигональных или полиномиальных поверхностей. Для того, чтобы получить полигональную фрактальную поверхность, исходный многоугольник рекурсивно разбивается на фрагменты, например, случайным образом смещая центр и середины сторон многоугольника, причем и исходный, и полученный многоугольники необязательно должны быть плоскими.

## 2.2. Цвет

Цвет имеет как психофизическую, так и физическую природу, то есть его восприятие зависит от физических свойств света – электромагнитной энергии и ее взаимодействия с физическими веществами, а также от интерпретации зрительной системой человека. Рассмотрим физические аспекты цвета.

Зрительная система человека воспринимает электромагнитную энергию с длинами волн от 400 нм (фиолетовый цвет) до 700 нм (красный цвет) как видимый свет ( $1\text{нм} = 10^{-9}\text{ м}$ ). Источник света (или объект, отражающий свет) является ахроматическим, если наблюдаемый свет содержит все видимые длины волн примерно в равных количествах. Ахроматический источник кажется белым, а отраженный или преломленный свет – белым, серым или черным. Белый объект – ахроматически отражающий более 80% падающего света от белого источника, а черный – менее 3%; между ними – серый. Интенсивности тогда удобно градуировать от 0 до 1.

Различаются понятия светлоты и яркости. Светлота – свойство несветящихся, то есть отражающих объектов, яркость – самосветящихся (излучающих). Светлота или яркость зависят от относительной чувствительности глаза к разным длинам волн.

Если свет содержит длины всех волн в произвольных неравных количествах, то он называется хроматическим.

Сама по себе электромагнитная энергия не имеет цвета. Ощущение цвета возникает в результате физических явлений в глазу и мозге человека.

При взаимодействии цветов падающего, отраженного и преломленного света могут быть получены различные эффекты. Например, при отражении зеленого света от красного объекта он (объект) кажется черным (свет не отражается).

Психофизическое представление света определяется цветовым тоном (т.е. длиной волны или частотой), насыщенностью (степенью разбавления белым цветом: у чистого цвета – 100%, у ахроматического – 0%) и светлотой (т.е. интенсивностью). Эквивалент тона, насыщенности, светлоты – длина волны, чистота, яркость.

Монохроматический цвет имеет одну спектральную составляющую (рис. 2.4, слева); на рис. 2.4 справа представлен белый цвет с энергией  $E_2$  плюс доминирующий цвет с энергией  $E_1$ . Тогда цвет определяется доминирующим цветом, чистота= $(E_1 - E_2)/(E_1 + E_2)$ . Если  $E_2 > 0$ , чистота  $> 100\%$ ; если  $E_2 > E_1$ , чистота  $> 0\%$ .

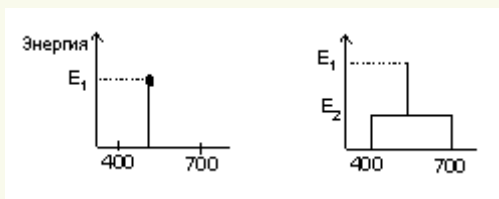


Рис. 2.4

Яркость пропорциональна энергии света и равна интенсивности на единицу площади.

### **2.2.1 Свет и цвет**

Как уже было отмечено в рассмотренном выше примере, наличие света является неизменным условием визуального восприятия всего цветового богатства окружающего нас мира. В то же время из курса элементарной физики большинству из вас известно, что белый свет вне зависимости от его источника — солнце, лампочка или экран монитора — в действительности представляет собой смесь цветов. Если пропустить луч белого света через простую призму, он разложится на цветной спектр. Цвета этого спектра, называемого **видимым спектром** света, условно классифицируют как красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Любой из них, в свою очередь, представляет собой электромагнитное излучение, перекрывающее достаточно широкий диапазон длин волн видимого спектра (рис. 2.5).

Для нашего глаза каждый кусочек этого видимого спектра обладает своими уникальными характеристиками, которые и называются **цветом**. Поскольку в видимом спектре содержатся миллионы цветов, то различие между двумя соседними цветами практически неощутимо.

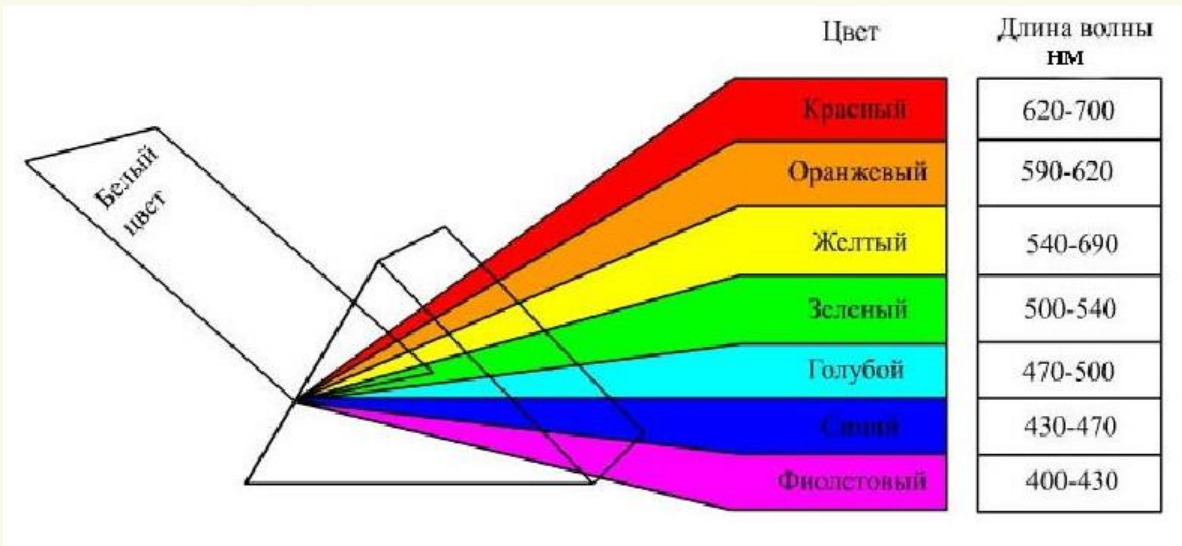


Рис. 2.5. Спектральный состав видимого цвета

**Спектральный** состав цвета можно представить в виде графика распределения энергии излучения по разным длинам волн. Та длина волны, на которую приходится максимальная интенсивность излучения, называется **доминирующей**. Именно она в значительной степени определяет окраску цвета, хотя основные параметры воспринимаемого нашим глазом цвета определяются результатом воздействия на него всего спектрального состава цвета.



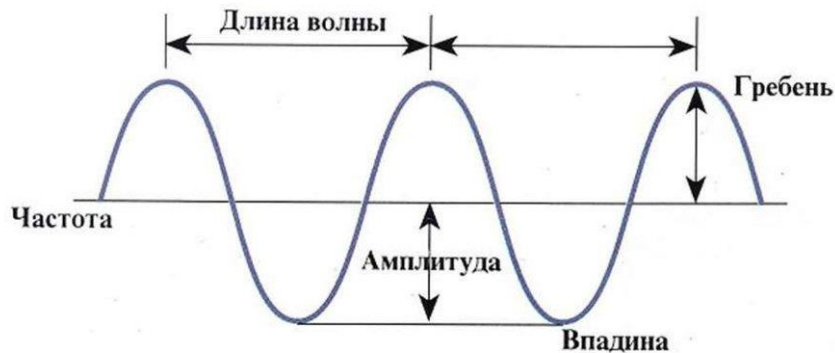
### ***2.2.2. Физическая природа света и цвета***

Напомним, что свет представляет собой электромагнитное излучение, связанное с флуктуацией электрического и магнитного полей. Иными словами, свет представляет собой энергию, а цвет есть продукт взаимодействия этой энергии с веществом. Однако для понимания природы цвета необходимо совершить небольшой экскурс в физику световых явлений и коснуться природы источников цвета.

Свет имеет двойственную природу, обладая свойствами волны и частицы. Корпускулы света, называемые ***фотонами***, излучаются источником света в виде волн, распространяющихся с постоянной скоростью порядка 300000 км/с. Аналогично морским волнам световые волны имеют гребни и впадины. Поэтому в качестве характеристики световых волн используют ***длину волны***, представляющую собой расстояние между двумя гребнями (единица измерения — метры или ангстремы, равные  $10^8$ м), и ***амплитуду***, определяемую как расстояние между гребнем и впадиной (рис.2.6).

Разные длины волны воспринимаются нами как разные цвета: свет с большой длиной волны будет красным, а с маленькой — синим или фиолетовым. В случае если свет состоит из волн разной длины (например, белый цвет содержит все длины волн, то наш глаз смешивает разные длины воли в одну, получаем таким образом один результирующий цвет.

## Параметры волны



- Длина [нм]
- Частота [Гц]
- Амплитуда [дБ]
- Период колебания [нс]

Рис. 2.2. Характеристики световой волны

Альтернативными характеристиками электромагнитного излучения являются **частота** (измеряемая в герцах или циклах/с) и **энергия** (измеряемая в электроно-вольтах). Чем короче длина волны, тем больше ее частота и выше энергия. И наоборот, чем больше длина волны, тем меньше частота и ниже энергия.

### ***2.2.3. Излученный и отраженный свет***

Все, что мы видим в окружающем нас пространстве, либо излучает свет, либо его отражает.

***Излученный цвет*** — это свет, испускаемый активным источником. Примерами таких источников могут служить солнце, лампочка или экран монитора. В основе их действия обычно лежит нагревание металлических тел либо химические или термоядерные реакции. Цвет любого излучателя зависит от спектрального состава излучения. Если источник излучает световые волны во всем видимом диапазоне, то его цвет будет восприниматься нашим глазом как белый. Преобладание в его спектральном составе длин волн определенного диапазона (например, 400 - 450 нм) даст нам ощущение доминирующего в нем цвета (в данном случае сине-фиолетового). И наконец, присутствие в излучаемом свете световых компонент из разных областей видимого спектра (например, красной и зеленой) дает восприятие нами результирующего цвета (в данном случае желтого). Но при этом в любом случае попадающий в наш глаз излучаемый цвет сохраняет в себе все цвета, из которых он был создан.

***Отраженный свет*** возникает при отражении некоторым предметом (вернее, его

поверхностью) световых волн, падающих на него от источника света. Механизм отражения цвета зависит от цветового типа поверхности, которые можно условно разделить на две группы:

- ахроматические;
- хроматические.

Первую группу составляют *ахроматические* (иначе бесцветные) цвета: черный, белый и все серые (от самого темного до самого светлого). Их часто называют нейтральными. В предельном случае такие поверхности либо отражают все падающие на них лучи, ничего не поглощая (идеально белая поверхность), либо полностью лучи поглощают, ничего не отражая (идеальная черная поверхность). Все остальные варианты (серые поверхности) равномерно поглощают световые волны разной длины. Отраженный от них цвет не меняет своего спектрального состава, изменяется только его интенсивность.

Вторую группу образуют поверхности, окрашенные в хроматические цвета, которые по-разному отражают свет с разной длиной волны. Так, если вы осветите белым цветом листок зеленой бумаги, то бумага будет выглядеть зеленой, *потому что ее* поверхность поглощает все световые волны, кроме зеленой составляющей *белого* цвета. Что же произойдет, если осветить зеленую бумагу красным или *синим* цветом? Бумага будет восприниматься черной, потому что падающие *на нее красный* и *синий* цвета она не отражает. Если же осветить зеленый предмет зеленым светом, это позволит выделить его на фоне окружающих его предметов другого цвета.

Процесс отражения света сопровождается не только связанным с ним процессом

поглощения в приповерхностном слое. При наличии полупрозрачных предметов часть падающего света проходит через них (рис. 2.7). На этом свойстве основано действие фильтров фотоаппаратов, вырезающих из области видимого *спектра* нужный цветовой диапазон (иначе — отсекающих нежелательный цветовой *спектр*). Чтобы лучше понять этот эффект, прижмите к поверхности лампочки пластину *цветного* оргстекла. В результате наш глаз «увидит» цвет, не поглощенный пластиком.

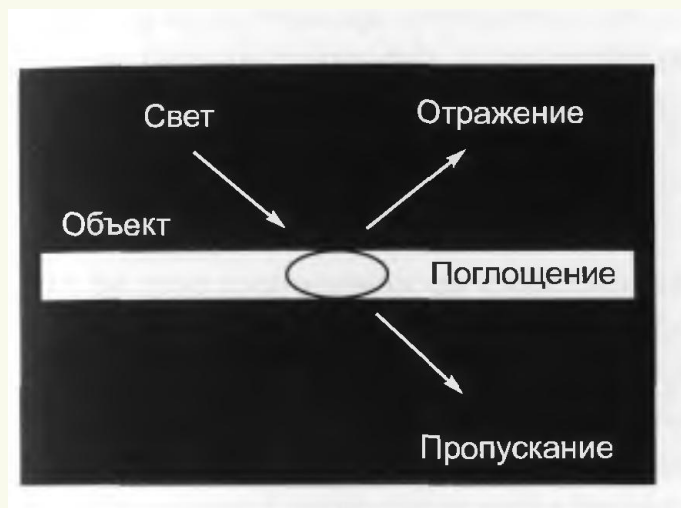


Рис. 2.7. Процессы отражения, поглощения и пропускания света объектом

Каждый объект имеет спектральные характеристики отражения и *пропускания*. Эти характеристики определяют, как объект отражает и пропускает *свет с определенными длинами волн*.

- Спектральная кривая отражения определяется путем измерения отраженного света при освещении объекта стандартным источником.
- Спектральная кривая пропускания определяется путем измерения света, *яро-шедшего* сквозь объект.

Некоторые измерительные устройства позволяют даже вводить поправки, *компенсирующие* изменение условий внешнего освещения.

Спектральные характеристики отражения и пропускания связаны с явлением *метамерии*, суть которого состоит в том, что объекты с разными спектральными характеристиками могут выглядеть одинаково при одном освещении и по-разному — при другом. Такое различие обусловлено как составом объектов, так и спектральным составом внешнего освещения. Для определения спектральных характеристик объектов используют специальные приборы, *спектрофотометры*, со стандартными источниками света.

Указанные различия в механизмах формирования излученного и отраженного цвета важны для понимания восприятия цвета глазом человека.

### 2.2.4. Яркостная и цветовая информация

Как уже отмечалось, излучаемый источником цвет, как правило, представляет собой смесь световых волн различной длины (рис. 2.8). Единственным исключением являются так называемые монохроматические источники света, примерами которых могут служить различные типы лазеров и широко распространенные натриевые лампы. Последние излучают свет только одной длины волны в оранжевой области спектра.

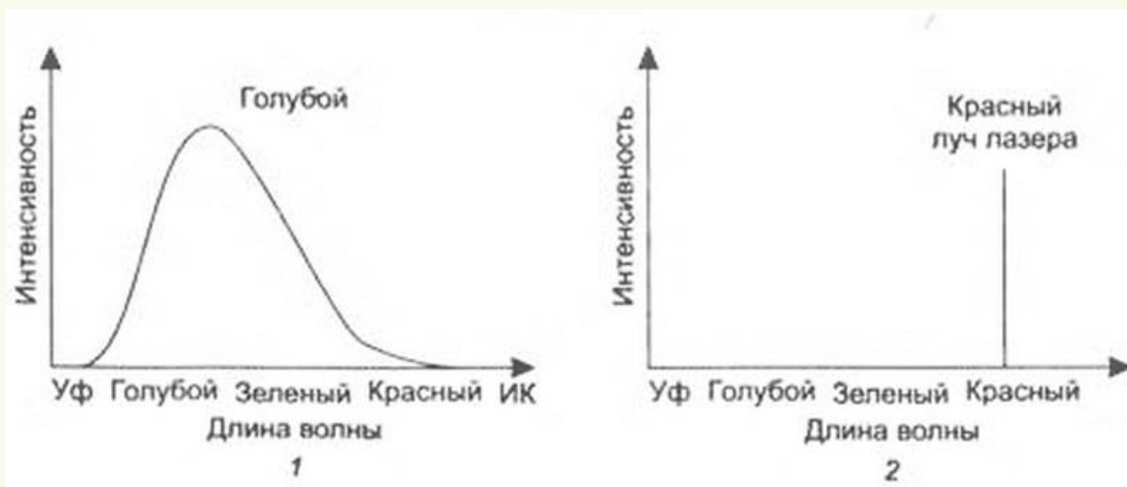


Рис. 2.8. Источники света: 1 - в виде смеси длин волн, воспринимаемой как голубой цвет в

соответствии с цветом доминирующей длины волны; 2 - монохроматический красный цвет

Длина световых волн выражается в нанометрах (нм), представляющих собой миллиардные доли метра ( $10^{-9}$ ). Наш глаз может воспринимать электромагнитные волны с длинами в диапазоне от 400 до 700 нм, что составляет ничтожно малую часть всего спектра электромагнитных волн (от  $10^4$  до  $10^{14}$  м).

В действительности человеческий глаз может воспринимать цвет в более широком диапазоне длин волн — от 380 до 780 нм. Однако воздействие, оказываемое светом за пределами диапазона 400-700 нм, пренебрежимо мало.

Как уже отмечалось, энергия, переносимая электромагнитной волной, связана с длиной волны обратно пропорциональной зависимостью. Поэтому фиолетовая область видимого спектра, являясь коротковолновой, обладает более высокой энергией по сравнению с красной областью спектра.

С физической точки зрения свет можно охарактеризовать двумя параметрами: *энергией* (интенсивностью) и длиной волны. Однако в теории цвета, живописи, телевидении и компьютерной графике наибольшее распространение получили два производных от них параметра: яркость и цветность.

Яркость (или интенсивность) пропорциональна сумме энергий всех составляющих цветового спектра света.

Цветность, наоборот, связана с доминирующими длинами волн в этом спектре. Ахроматические цвета, то есть белые, серые и черные, характеризуются только яркостью. Это



проявляется в том, что одни цвета темнее, а другие светлее. В отличие от них хроматические цвета для своего описания требуют задания и яркости, и цветности.

Распространенность указанных параметров обусловлена физиологическими особенностями нашего зрения, связанными с наличием в сетчатке глаза уже упоминавшихся ранее двух типов нервных клеток: палочек, реагирующих на яркостную составляющую света, и колбочек, воспринимающих цветовую информацию.

Яркость является количественной характеристикой цвета. С ее помощью мы можем сравнивать интенсивность излучения различных источников между собой. В отличие от нее цветность имеет качественный характер. Поэтому для того, чтобы сравнить два цвета по цветности, желательно было бы отделить их от яркости. Практически это невозможно, но теоретически вполне доступно с помощью имеющейся всех графических пакетах цветовой модели Lab. Присутствующие в ней абстрактные цветовые компоненты (собственно цветности) а и b обладают нулевой яркостью, а канал L содержит только яркостную информацию.

### 2.2.5 Цвет и окраска

Для правильной интерпретации восприятия цвета необходимо различать понятия цвета и окраски предмета.

Окраска — это способность предмета отражать излучение в том или ином диапазоне длин волн.

Цвет является более широким понятием, включающим окраску и условия освещения.

Чтобы представить имеющееся между ними различие, вспомните, как, например, выглядит снег при различных условиях освещения (зимний, мартовский или в сумерках). Несмотря на то, что чистый снег всегда имеет белую окраску, его цвет в зависимости от освещения может не только быть белым, но иметь голубой, розовый и даже желтый оттенки. Эту разницу очень важно понимать при использовании цвета в прикладных целях, поскольку различия в освещении при настройке цветопередачи изображения разработчиком и последующем просмотре изображения потребителем дадут совершенно разные результаты.

Цвет - это один из факторов нашего восприятия светового излучения. Светом и цветом исследователи интересовались давно. Одним из первых выдающихся достижений в этой области являются опыты *Исаака Ньютона* в 1666 г. по разложению белого света на составляющие. Ранее считалось, что белый цвет — простейшей. Ньютон опроверг это. Суть опытов Ньютона такова. Белый луч света (использовался солнечный свет) направлялся на стеклянную треугольную призму. Пройдя сквозь призму, луч преломлялся и, будучи направленный на экран, давал в результате цветную полосу — спектр. В спектре присутствовали цвета радуги, которые плавно переходили друг в друга. Эти цвета уже не раскладывались на

составляющие. Ньютон разбил весь спектр на семь участков, соответствующих ярко выраженным различным цветам. Он считал эти семь цветов основными — красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый. Почему именно семь? Некоторые объясняют это убежденностью Ньютона в мистических свойствах семерки. Лучи, прошедшие сквозь призму, направлялись на вторую призму, с помощью которой удалось снова получить белый свет. Таким образом, *было* доказано, что белый цвет — это смесь множества разных цветов. Семь основных цветов Ньютон расположил по кругу (рис. 2.9).



Рис. 2.9. Цветовой круг Ньютона

Ньютон предположил, что определенный цвет получается путем смешивания основных цветов, взятых в определенной пропорции. Если в точках на границе цветового круга, которые соответствуют основным цветам, расположить грузы, пропорциональные количеству каждого цвета в смеси, то суммарный цвет будет соответствовать точке центра тяжести, Белый цвет соответствует центру цветового круга.

Последующие исследования цвета выполняли *Томас Юнг*, *Джеймс Максвелл* и другие ученые. Исследования человеческого цветовосприятия являлись довольно важной задачей, но основные усилия были направлены на изучение объективных свойств света. В настоящее время физики полагают, что свет имеет двойственный характер. С одной стороны, свет представляется в виде потока частиц (еще Ньютон выдвинул так называемую корпускулярную теорию). С другой стороны, свету присущи волновые свойства. С помощью волновой теории, выдвинутой *Х.Гюйгенсом* в 1678 году, были объяснены многие свойства света, в частности, законы отражения и преломления.

С позиций волновых свойств цвет описывается следующим образом. Одна из волновых характеристик света - длина волны - расстояние, которое проходит волна в течение одного периода колебания. Монохроматическим называется излучение, спектр которого состоит из единственной линии, соответствующей единственной длине волны. Радуга, полученная Ньютоном, состоит из бесчисленного множества монохроматических излучений (равно как и радуга, наблюдаемая нами после дождя). Довольно качественным источником монохроматического излучения является лазер - именно поэтому его луч легко сфокусировать.

Цвет монохроматического излучения определяется длиной волны. Диапазон длин волн для видимого света простирается от 380-400 нм (фиолетовый) до 700-780 нм (красный). В указанном диапазоне чувствительность человеческого зрения непостоянная. Наибольшая чувствительность наблюдается для длин волн, соответствующих зеленому цвету (рис.2.10).

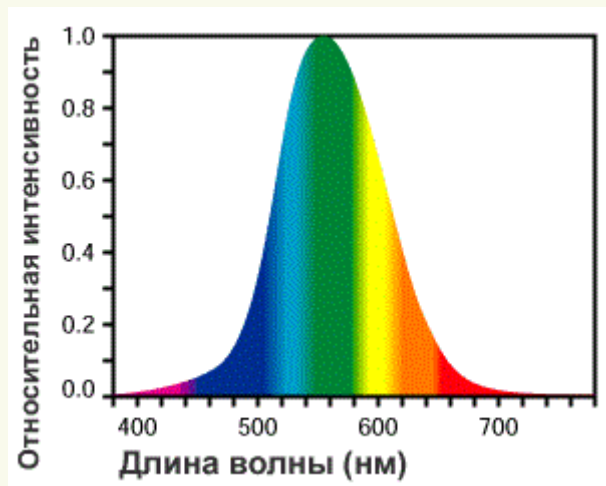


Рис. 2.10. Зависимость чувствительности человеческого зрения от длины волны светового излучения

Как показал Ньютон, **белый** цвет можно представить смесью всех цветов радуги. Другими словами, спектр белого является бесконечным, **сплошным** - в нем присутствуют излучения всех длин **волн** видимого диапазона.

## 2.3 Характеристики источника света

### 2.3.1 Стандартные источники

Для имитации различного освещения измерительные устройства используют стандартизованные источники излучения - D50, D65, D93, A, B, C, а также F2 или F8 (флюоресцентные лампы). Эти источники имеют определенные стандартизованные спектральные характеристики, установленные в 1931 г. международной комиссией по освещению (**CIE**):

- *источник A* — норма среднего искусственного света эквивалентна цветовой температуре 2854°K, что соответствует излучению лампы накаливания;
- *источник B* — норма прямого солнечного света с цветовой температурой, близкой к 4800°K;
- *источник C* - норма рассеянного дневного света с температурой около 6500°K;
- *источник D65* имеет температуру, почти равную 6500°K (применяется во всем мире, кроме Германии, где стандартным считается D50 с цветовой температурой 5000°K).

Источники B и C в действительности получают из источника A путем изменения спектральной характеристики последнего с помощью соответствующего фильтра.

### 2.3.2 Особенности восприятия цвета человеком

Световые волны, излучаемые или отражаемые объектом, собираются хрусталиком и через стекловидное тело проецируются на сетчатку (рис. 2.11). Там они возбуждают определенные нервные клетки, физиологическое назначение которых состоит в распознавании световых волн. В результате возбуждения в нервных клетках возникает электрический сигнал, который по зрительному нерву поступает в зрительный центр мозга, где с помощью пока еще до конца не понятных механизмов и возникает зрительное восприятие цвета.

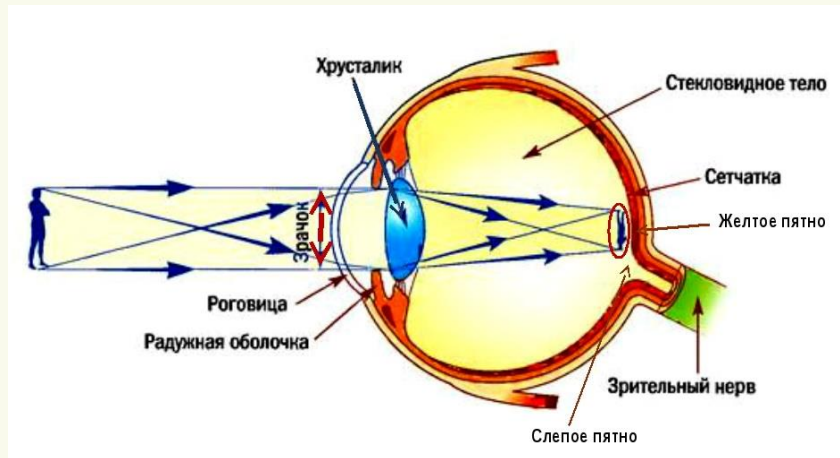


Рис. 2.11. Схема функционирования человеческого глаза

На самой сетчатке можно выделить две области, которые называют *желтым пятном* и *слепым пятном*. На слепом пятне нервные пути сетчатки переходят в зрительный нерв. Поскольку в этом месте нервных клеток нет, то свет, попадающий на слепое пятно, не обнаруживается. На желтом пятне имеет место обратная картина. Оно расположено по центру зрительной оси и содержит много зрительных клеток, чувствительных к цвету (колбочек; см. ниже). При хорошем освещении глаз обычно фокусирует падающий свет на желтом пятне. Наоборот, ночью сильной фокусировки приходится избегать, поскольку из-за низкой чувствительности колбочек зрительное восприятие значительно ослабляется.

### ***Колбочки и палочки***

За цветовое и яркостное восприятие человеческого глаза отвечают два различных типа нервных клеток (рецепторов), называемых соответственно *колбочками* и *палочками*.

Процесс функционирования палочек и колбочек не имеет принципиальных отличий. В обоих случаях происходит поглощение световых волн и по достижении определенного порога вырабатывается нервный импульс. При этом оба вида нервных клеток реагируют на интенсивность падающего света. В чем же тогда проявляется их различие?

*Палочки* «отвечают» за черно-белое зрение, поскольку способны регистрировать только



суммарную энергию света. Этот тип рецепторов равномерно распределен по сетчатке глаза и обладает очень высокой чувствительностью, примерно в 1000 раз превышающей чувствительность колбочек. Именно благодаря им обеспечивается возможность распознавания предметов в условиях плохой освещенности («ночью все кошки серы»).

*Колбочки* предназначены для распознавания цветовой информации. В отличие от палочек имеются три сорта колбочек, каждая из которых реагирует на определенный диапазон длин волн. Из экспериментальных данных видно, что первый тип воспринимает световые волны с длинами волн в диапазоне 400-500 нм («синяя» составляющая спектра), второй — от 500 до 600 нм («зеленая» составляющая спектра) и третий — от 600 до 700 («красная» составляющая спектра). В зависимости от того, световые волны какой длины и интенсивности присутствуют в спектре, те или иные группы колбочек возбуждаются сильнее или слабее (рис.2.12). Полученная с помощью зрительных рецепторов информация поступает в виде сигналов в мозг, который определяет, в каких соотношения возбуждены три вида колбочек, создавая на базе этого цветное восприятие.

Таким образом, исходя из особенностей строения человеческого глаза можно сделать вывод, что цвет *трехмерен* по своей природе.

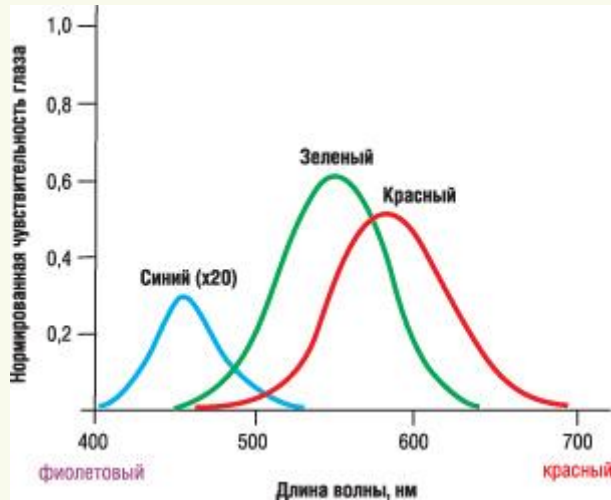


Рис. 2.12. Спектральная чувствительность различных типов колбочек

Принцип действия большинства технических устройств, предназначенных для обработки содержащейся в свете цветовой информации, также базируется на раздельном распознавании красной, зеленой и синей составляющих света.

Настало время разобраться с тем, как свойства палочек и колбочек влияют на чувствительность зрения к яркости света.

### *Спектральная чувствительность глаза к яркости*

Как можно увидеть из рис. 2.12, области чувствительности различных типов колбочек значительно перекрываются. Поэтому, как правило, в процессе восприятия глазом падающего на него света возбуждаются все три сорта колбочек. А поскольку чувствительности разных типов колбочек отличаются очень сильно, то глаз человека имеет неодинаковую чувствительность к разным длинам волн. Особенно хорошо воспринимается зеленый цвет, красный — несколько слабее, а чувствительность к синему цвету чрезвычайно низка. В результате отдельные цветовые составляющие цветного изображения вносят разный вклад в ощущение яркости.

На практике в качестве яркостной характеристики чувствительности глаза обычно используют кривую спектральной чувствительности (рис. 2.13). Для дневного освещения ее можно получить путем суммирования приведенных на рис. 2.13 спектральных составляющих трех типов колбочек с последующим нормированием полученной кривой (путем деления всех ее составляющих на максимальное значение яркости). По существу этот график представляет собой не что иное, как КПД человеческого глаза. По графику можно легко оценить, какая часть попавшего в глаз света вносит наибольший вклад в формирование ощущения цвета. Так, для получения с помощью синего цвета такого же ощущения яркости, как от зеленого цвета, его реальная энергия должна быть в несколько раз выше.



Рис. 2.13. Кривые спектральной чувствительности глаза при различных условиях внешнего освещения в сумерках и при дневном освещении

*При получении кривой спектральной чувствительности в качестве нормирующего коэффициента используется принятая за единицу спектральная эффективность желто-зеленого излучения с длиной волны 555 нм. Для отображения интенсивности составляющей спектра используется обозначение  $V_\lambda$ .*

При оценке яркостной чувствительности цвета следует учитывать, что свой вклад в ощущение яркости вносят как колбочки, так и палочки (рис. 2.14). А поскольку максимальная чувствительность палочек по сравнению с колбочками лежит в более коротковолновой области спектра (соответственно 500 нм против 555 нм), то именно этим фактором объясняется зависимость спектральной чувствительности от внешней освещенности.

Вклад палочек и колбочек в результирующее значение яркости определяется условиями освещенности. Так, в темноте работают только палочки. В сумерках в формировании яркостного восприятия участвуют и **палочки**, и колбочки, а при повышении уровня освещенности начинают доминировать палочки.

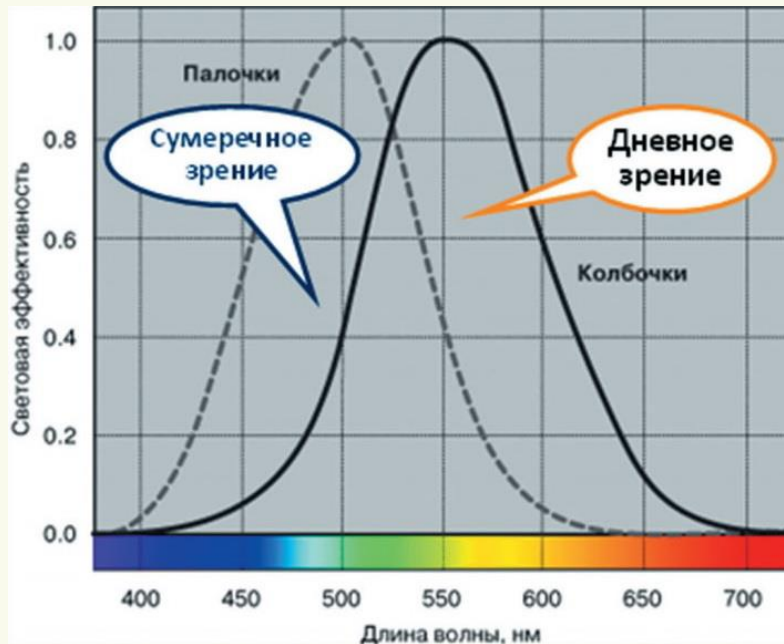


Рис. 2.14. Спектральная чувствительность палочек и колбочек

Это легко проверить на практике. Если вам приходилось встречать рассвет за рыбалкой на реке или озере, то вы можете вспомнить, что поначалу серый окружающий фон с восходом

солнца понемногу расцветивается в цветовые тона.

В результате проведения многочисленных психологических тестов наряду с теоретическими исследованиями было установлено, что для большинства людей ощущение яркости при восприятии цветных изображений определяется на 71,5% зеленой составляющей, 21 % — красной и 7,2% — синей. Таким образом, если известны зеленая, синяя и красная составляющие источника цвета, то воспринимаемая нашим глазом результирующая яркость такого источника может быть определена по формуле:

$$\text{Яркость} = 0,715160 \times \text{зеленый} + 0,212671 \times \text{красный} + 0,072169 \times \text{синий}.$$

Существуют и другие выражения для определения яркости.  
Для стандарта в области NTSC телевидения:

$$\text{Яркость} = 0,59 \times \text{зеленый} + 0,11 \times \text{красный} + 0,3 \times \text{синий}.$$

### ***Спектральная чувствительность наблюдателя***

***Спектральная чувствительность*** определяет диапазон принимаемых наблюдателем или приемником цветов. На рис. 2.15 представлена спектральная чувствительность глаза. Левее синей области частот — ультрафиолетовые волны, правее красной — инфракрасные волны. Наилучшую чувствительность глаз имеет в районе 555 нм (зеленый цвет). На спектральную чувствительность влияют качество источника света, а также различия в цветах

фона и в углах обзора.

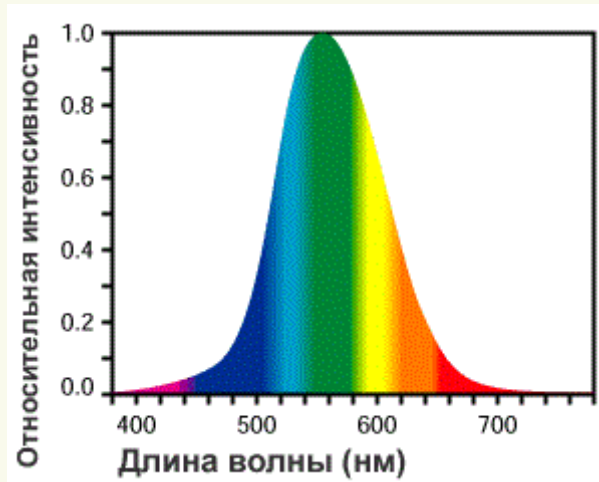


Рис. 2.15. Спектральная чувствительность глаза

Роль фона легко понять, так как его цвет воспринимается теми же чувствительными органами, что и цвет объекта.

От углов обзора (углов, под которыми наблюдается данный объект) зависит интенсивность отражаемого света (для отражающих поверхностей), а также появление теней и



различие в интенсивности излучения (для излучающих поверхностей). Прямое излучение является более сильным, чем излучение под углами.

Путем измерения спектральной чувствительности наблюдателя (или принимающего устройства) мы регистрируем его способность воспринимать свет с различными длинами волн.

#### ***2.4. Цветовой и динамический диапазоны***

Для эффективной организации передачи информации между различными устройствами, входящими в состав издательских систем, важно понимать разницу между цветовым и динамическим диапазонами.

***Цветовой диапазон*** — диапазон цветов, которые могут восприниматься или воспроизводиться наблюдателем или приемным устройством.

***Динамический диапазон*** характеризует различие между наиболее светлым и наиболее темным элементами в изображении или в поле зрения.

Человеческое зрение имеет широчайший цветовой и динамический диапазон. Глаз человека способен различать градации миллионных долей яркости.

Компьютерные устройства имеют сравнительно узкие цветовой и динамический диапазоны. Кроме того, имеются различия в характеристиках разных устройств. Например, цветовые и динамические диапазоны сканеров и мониторов шире, чем соответствующие диапазоны принтеров.

В совокупности цветовой и динамический диапазоны определяют область воспри-

нимаемых нами цветов и области цветов (цветовое пространство), в которых работают устройства ввода, вывода и обработки изображений. Для представления этих областей используются два способа:

1. В виде различных цветовых моделей.

2. С помощью набора цветов (палитр), доступных в системах соответствия цветов. Для каждой из таких систем - DIC, DuPont, FOCOLTONE, PANTONE, TOYO и TRUMATCH — определены специальные цвета, которые можно выбирать по каталогам образцов. За исключением плашечных цветов палитры PANTONE, эти системы подстановки цветов связываются с цветовыми моделями. Системы DIC и TOYO базируются на совместном использовании основных цветов и специальных красителей.

Современные графические пакеты оперируют большим количеством специфических терминов, включающих определение цветовые, цвет. Перечислим их:

- цветовые модели;

- цветовые палитры, которые в свою очередь подразделяются на плашечные цветовые палитры и основные цветовые палитры;

- системы соответствия цветов;

- системы управления цветами.

Их обилие и внешняя схожесть могут смутить не только новичка в области обработки компьютерных изображений. Далее будет дано последовательное разъяснения смысла и назначения этих терминов.

Для характеристики цвета используются следующие атрибуты.

1. Цветовой тон. Его можно определить преобладающей длиной волны в спектре излучения. Цветовой тон позволяет отличать один цвет от другого — например, зеленый от красного, желтого и других.

2. Яркость. Определяется энергией, интенсивностью светового излучения. Выражает количество воспринимаемого света.

3. Насыщенность или чистота тона. Выражается долей присутствия белого цвета. В идеально чистом цвете примесь белого отсутствует. Если, например, к чистому красному цвету добавить в определенной пропорции белый цвет (у художников это называется "разбелом"), то получится светлый бледно-красный цвет.

Указанные три атрибута позволяют описать все цвета и оттенки. То, что атрибутов именно три, является одним из проявлений трехмерных свойств цвета. Далее мы увидим, что имеются и другие трехмерные системы описания цвета.

Мы попытались объяснить цвет с помощью длин волн и спектра. Как оказывается, это неполное представление о цвете, а вообще говоря, оно неправильное. Во-первых, глаз человека - это не спектрометр. Зрительная система человека, скорее всего, регистрирует не длину волны и спектр, а формирует ощущения другим способом. Во-вторых, без учета особенностей человеческого восприятия невозможно объяснить смешение цветов. Например, белый цвет действительно можно представить равномерным спектром смеси бесконечного множества монохроматических цветов. Однако тот же белый цвет можно создать смесью всего двух специально подобранных монохроматических цветов (такие цвета называются взаимно дополнительными), Во всяком случае, человек воспринимает эту смесь как белый цвет. А

можно получить белый цвет, смешав три или более монохроматических излучений. Излучения, различные по спектру, но дающие один и тот же цвет, называются метамерными.

Необходимо также уточнить, что понимается под цветовым тоном. Рассмотрим два примера спектра (рис. 2.16).

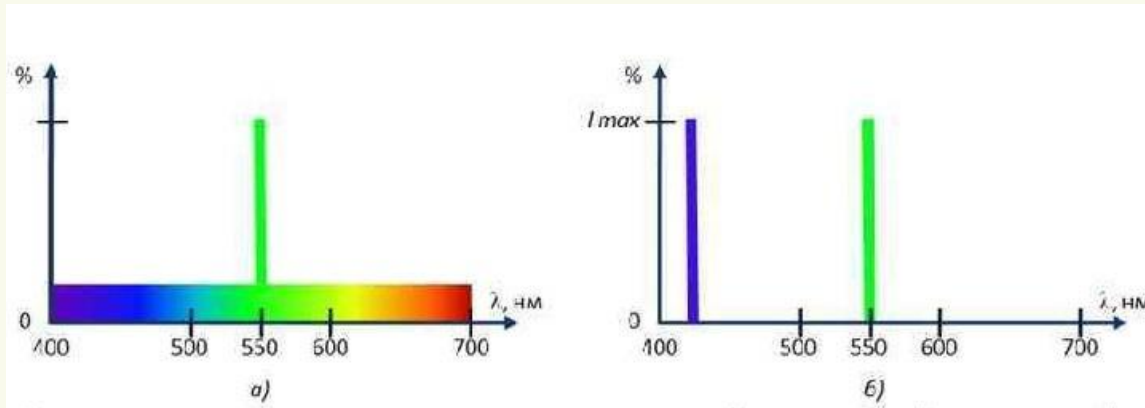


Рис. 2.12. Спектры: а - в сплошном спектре имеется явное преобладание одной составляющей: б - в дискретном спектре две составляющие с одинаковой интенсивностью

Анализ спектра, изображенного на рис. 2.16 (а), позволяет утверждать, что излучение имеет светло-зеленый цвет, поскольку четко выделяется одна спектральная линия на фоне

равномерного спектра белого. А какой цвет (цветовой тон) соответствует спектру варианта (б)? Здесь нельзя в спектре преобладающую составляющую, поскольку присутствуют красная и зеленая линии одинаковой интенсивности. По законам смешения цветов, это может дать оттенок желтого цвета — однако в спектре нет соответствующей линии монохроматического желтого. Поэтому, под цветовым тоном следует понимать цвет монохроматического излучения, соответствующего суммарному цвету смеси. Впрочем, как именно «соответствующего» — это также требует уточнения.

Наука, которая изучает цвет и его измерения, называется колориметрией. Она описывает общие закономерности цветового восприятия света человеком. Одними из основных законов колориметрии являются законы смешивания цветов. Эти законы в наиболее полном виде были сформулированы в 1853 году немецким математиком Германом Грассманом.

1. Цвет - трехмерен, для его описания необходимы три компонента. Любые четыре цвета находятся в линейной зависимости, хотя существует неограниченное число линейно-независимых совокупностей из трех цветов.

Другими словами, для любого заданного цвета ( $\mathcal{C}$ ) можно записать такое цветовое уравнение, которое выражает линейную зависимость цветов:

$$\mathcal{C} = \kappa_1 \mathcal{C}_1 + \kappa_2 \mathcal{C}_2 + \kappa_3 \mathcal{C}_3,$$

где  $\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3$  - некоторые базисные, линейно-независимые цвета, коэффициенты  $\kappa_1, \kappa_2$  и  $\kappa_3$  указывают количество соответствующего смешиваемого цвета, Линейная независимость

цветов Ц1, Ц2, Ц3 означает, что ни один из них не может быть выражен взвешенной суммой (линейной комбинацией) двух других. Первый закон можно трактовать и в более широком смысле, а именно, в смысле трехмерности цвета. Необязательно для описания цвета использовать смесь других цветов можно применять и другие компоненты, но их обязательно должно быть три.

2. Если в смеси трех цветовых компонентов один меняется непрерывно, в то время как два других остаются постоянными, цвет смеси также изменяется непрерывно.

3. Цвет смеси зависит только от цветов смешиваемых компонентов и не зависит от их спектральных составов. Смысл третьего закона становится более понятным, если учесть, что один и тот же цвет (в том числе и цвет смешиваемых компонентов) может быть получен разными способами. Например, смешиваемый компонент может быть получен, в свою очередь, смешиванием других компонентов.

На теоретической базе этих законов существуют все современные цветовые модели.

#### 1.4. Представление прямой линии в векторной графике

Следует хорошо представлять себе математические основы КГ, чтобы правильно использовать основы программного обеспечения КГ.

*Точка* в двумерной прямоугольной системе координат представляется парой координат  $(x, y)$  или вектором  $P=(x, y)$ .

*Отрезок прямой линии* может быть представлен аналитически с помощью различных методов описания:

- 1) явного: в виде выражения  $y=f(x)$ .
- 2) неявного:  $f(x,y)=0$ .
- 3) параметрического:  $x=X(\mu)$ ,  $y=Y(\mu)$ .

*Явное и неявное* аналитическое описание прямой линии сводится к уравнению  $ay = bx + c$ .

Если  $a=0$ , линия параллельна оси  $y$ .

Если  $b=0$ , линия параллельна оси  $x$ .

Если  $c=0$ , линия проходит через центр системы координат.

Если  $a \neq 0$ , можно вычислить угол наклона прямой относительно оси  $x$  (рис. 1.3).

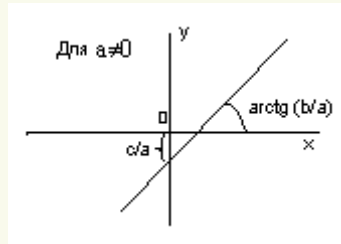


Рис. 1.3

*Параметрическое представление:* координата каждой точки отрезка вычисляется относительно некоторого параметра  $\mu$ . Параметрический способ представления линии – зафиксировать две точки:  $P_1(x_1, y_1)$  и  $P_2(x_2, y_2)$ .

Тогда любая точка на данной линии  $P=(x,y)$  задается векторной комбинацией для некоторого действительного  $\mu$ :

$$P = (1-\mu)P_1 + \mu P_2.$$

То есть  $(x,y) = ((1-\mu)x_1 + \mu x_2), (1-\mu)y_1 + \mu y_2)$ .

Координата текущей точки  $p$  (рис. 1.4):

$$x_p = ((1-\mu)x_1 + \mu x_2),$$

$$y_p = ((1-\mu)y_1 + \mu y_2).$$



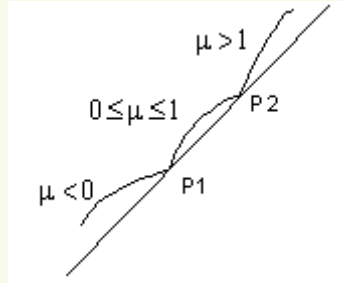


Рис. 1.4

Параметр  $\mu$  - это отношение расстояния от  $P$  до  $P_1$  (с учетом знака) к расстоянию от  $P_1$  до  $P_2$  (с учетом знака):

$$\mu = \frac{\text{расстояние } (P_1 - P)}{\text{расстояние } (P_2 - P_1)},$$

где расстояние положительно, если  $P$  лежит по ту же сторону от  $P_1$ , что и  $P_2$ , и отрицательно в противном случае. Если  $0 \leq \mu \leq 1$ , то  $P$  лежит на линии между  $P_1$  и  $P_2$ .

### 1.5. Взаимное расположение графических элементов на плоскости

1. Три точки  $p_1, p_2, p_3$  коллинеарны, т.е. лежат на одной прямой, если

$$\begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} p_2 - p_1 \\ p_3 - p_1 \end{vmatrix} = 0.$$

2. Точка  $p$  лежит на отрезке  $ab$  при нулевом угле между векторами  $p-a$  и  $b-p$ :

$$(p - a) \cdot (b - p) = |p - a| \cdot |b - p|,$$

$$t = \frac{(p - a) \cdot (b - a)}{(b - a) \cdot (b - a)}.$$

*Взаимное расположение прямых.*

1. Две прямые совпадают, если  $F_1 \times F_2 = 0_3$  (векторное произведение равно нулевому вектору).

2. Две прямые параллельны, если

$$\begin{vmatrix} N_1 \\ N_2 \end{vmatrix} = 0, \quad \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \end{vmatrix} = 0.$$

3. Две прямые ортогональны, если  $N_1 \circ N_2 = 0$  или  $V_1 \circ V_2 = 0$ .

*Взаимное расположение точки и прямой*

1. Уравнение перпендикуляра, опущенного из точки  $q=[q_x, q_y]$  на прямую, выглядит следующим образом:

$$(НФ): N_y(x-q_x) - N_x(y-q_y) = 0,$$

$$(ПФ): p_{\perp}(t) = q + Nt \text{ или } p_{\perp}(t) = q + V_{\perp}t, \text{ где } V_{\perp} = [V_y, -V_x] = N.$$

2. Расстояние от точки  $q$  до прямой равно:

$$d = \frac{|\tilde{q} \cdot F|}{|N|} = |(q - p_0) \cdot \bar{N}|, \quad d = \frac{|Aq_x + Bq_y + D|}{\sqrt{A^2 + B^2}}.$$

3. Зеркальное отражение точки  $q$  относительно прямой лежит на перпендикуляре к прямой на расстоянии  $2d$  от  $q$  в сторону, противоположную проекции вектора  $q-p_0$  на нормаль  $N$ :

$$q' = q - 2((q - p_0) \cdot \bar{N})\bar{N}.$$

*Пересечение двух прямых.*

Пусть имеются две прямые, заданные уравнениями в НФ:

$$A_1x + B_1y + D_1 = 0 \quad \text{и} \quad A_2x + B_2y + D_2 = 0,$$

тогда координаты точки пересечения вычисляются следующим образом:

$$x = -\frac{\begin{vmatrix} D_1 & B_1 \\ D_2 & B_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}}, y = -\frac{\begin{vmatrix} A_1 & D_1 \\ A_2 & D_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ A_2 & B_2 \end{vmatrix}}.$$

Возможны следующие три случая:

1.  $A_1B_2 - A_2B_1 \neq 0$ , т.е.  $A_1/A_2 \neq B_1/B_2$  – прямые не параллельны, точка пересечения единственная и ее координаты вычисляются по вышеприведенным формулам.

2.  $A_1B_2 - A_2B_1 = 0$ ,  $D_1B_2 - D_2B_1 \neq 0$  или  $A_1D_2 - A_2D_1 \neq 0$  – прямые параллельны и точек пересечения нет.

3.  $A_1B_2 - A_2B_1 = 0$ ,  $D_1B_2 - D_2B_1 = 0$  и  $A_1D_2 - A_2D_1 = 0$ , т.е. прямые совпадают во всех точках.

**Угол между двумя пересекающимися прямыми** находится как угол между векторами нормали или направляющими векторами  $ang(N_1, N_2) = ang(V_1, V_2)$ .

### 1.6. Уравнения пучка прямых

Уравнение пучка прямых, заключенных между двумя прямыми (рис. 1.5), определяется следующим образом:

( неявная форма )

$$\begin{cases} f_1(p) = \tilde{p} \cdot F_1 \\ f_2(p) = \tilde{p} \cdot F_2 \end{cases} \Rightarrow f_{\lambda+1}(p) = (1 - \lambda)f_1(p) + \lambda f_2(p) .$$

( параметрическая форма )

$$\begin{cases} p_1(t) = p_{1,0} + V_1 t \\ p_2(t) = p_{2,0} + V_2 t \end{cases} \Rightarrow q \Rightarrow \begin{cases} p_{\lambda+1}(t) = q + V_{\lambda+1} t \\ V_{\lambda+1} = (1 - \lambda)V_1 + \lambda V_2 \end{cases} .$$

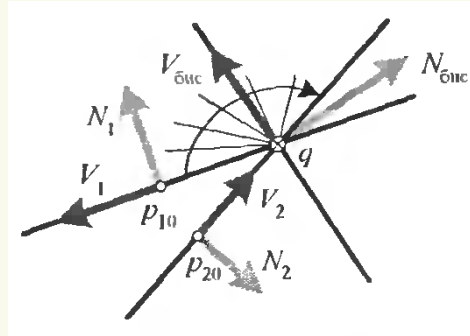


Рис. 1.5

Изменение параметра пучка в интервале  $0 \leq \lambda \leq 1$  дает такие промежуточные прямые, что вращение происходит по кратчайшим углам.

Последнее уравнение можно также рассматривать как параметрическую (с параметром  $\lambda$ ) модель прямой линии, соединяющей точки исходных прямых  $p_1 = q + V_1 t$  и  $p_2 = q + V_2 t$  при фиксированном значении параметра  $t$ . На основе этой модели несложно без вычисления углов решается задача построения дуги окружности радиуса  $r$ , заключенной в створе между векторами  $V_1$  и  $V_2$ , выходящими из точки  $q$  (рис. 1.6).

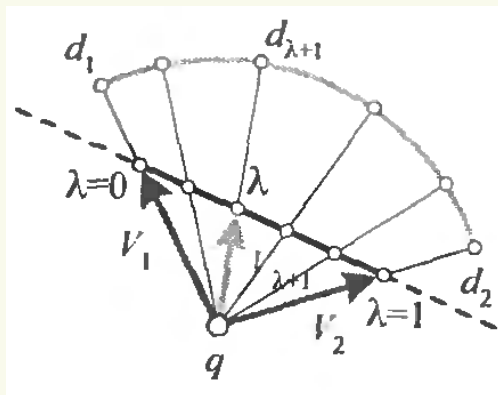


Рис. 1.6

Уравнение биссектрисы угла между двумя прямыми получается при  $\lambda=0,5$ , если  $|N_1|=|N_2|$  или  $|V_1|=|V_2|$ . В результате параметры биссектрисы можно найти по формулам

$$F_{\text{бис}} = |N_2/F_1 + |N_1/F_2, \quad p_{\text{бис}}(t) = q + V_{\text{бис}}t, \quad V_{\text{бис}} = |V_2/V_1 + |V_1/V_2.$$

Расчет биссектрис бывает необходим, например, при построении окружности, вписанной в треугольник. Как известно, ее центр лежит в точке пересечения биссектрис внутренних углов этого треугольника (рис. 1.7).

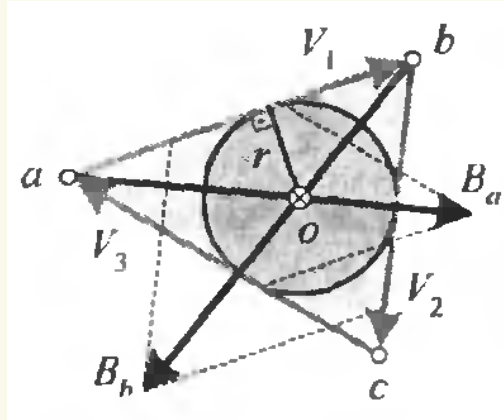


Рис. 1.7

При построении биссектрисы внутреннего угла следует учитывать направления подставляемых в формулу векторов сторон треугольника: они должны либо оба выходить из вершины, либо оба входить в нее. При несоблюдении этого правила по указанной формуле будет проведена биссектриса дополнительного угла треугольника, а окружность окажется внеписанной.



### **3.1. Трехкомпонентная теория света**

В центральной части сетчатки глаза находится три типа колбочек: чувствительных к зеленому, синему и красному цветам. Относительная чувствительность глаза максимальна для зеленого и минимальна для синего цвета. Если на все три типа колбочек воздействует одинаковый уровень энергетической яркости (энергия в единицу времени), то цвет кажется белым. Ощущение белого – серого - черного может быть получено смешиванием трех любых цветов, если ни один из них не является линейной комбинацией двух других. Это возможно из-за особенностей глаза, содержащего три типа колбочек. Такие цвета называются основными (рис. 3.1).

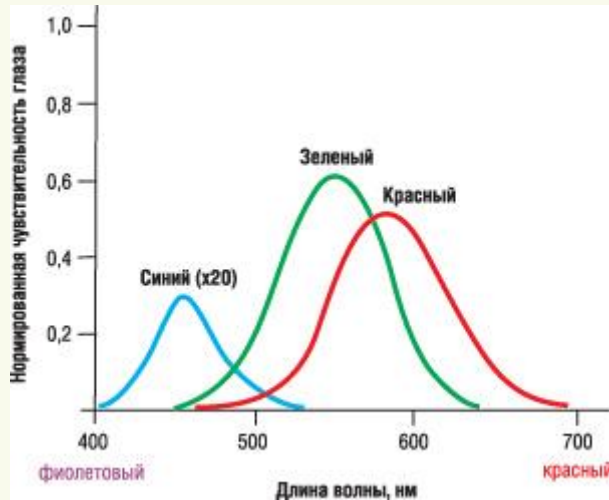


Рис. 3.1

Из опытов известно, что зрительная система человека способна различать примерно 350 тысяч цветовых оттенков, причем различаются в центре спектра цвета, отличающиеся на 1 нм, на краю спектра – 10 нм. Различимы примерно 128 цветовых тонов (т.е. чистых однотонных цветов). Если меняется только насыщенность, различается уже меньше цветов: 16 степеней насыщенности желтого, 23 – красного и т.д.

В КГ применяются две системы смешения основных цветов: аддитивная (RGB – красный, зеленый, синий) и субтрактивная (СМУ – голубой, фиолетовый, желтый) (рис. 3.2).

Цвета одной системы являются дополнительными к другой: С к R (голубой к красному), М к G, Y к B. Дополнительный цвет – это разность белого и данного цвета:  $C=W-R$ ,  $M=W-G$ ,  $Y=W-B$ . Традиционно RGB – основные цвета, СМУ – дополнительные.

Для отражающих поверхностей (красок, пленок и т.д.) применяется субтрактивная система СМУ. Здесь из спектра белого цвета вычитаются длины волн дополнительного.

Например, при отражении или преломлении света сквозь фиолетовый объект поглощается зеленая часть спектра:  $W-G=M$ . Если получившийся свет отражается или преломляется в желтом объекте, то поглощается синяя часть спектра и остается только красный:  $W-B=Y$ , т.е.  $W-G-B=R$ . После его отражения или преломления в голубом объекте цвет становится черным, т.к.  $W-R=C$ , т.е.  $W-G-B-R=0$  (black), то есть исключается весь видимый спектр. По этому принципу работают светофильтры.

Аддитивная цветовая система RGB удобна для излучающих поверхностей (экран, лампа, и т.д.).

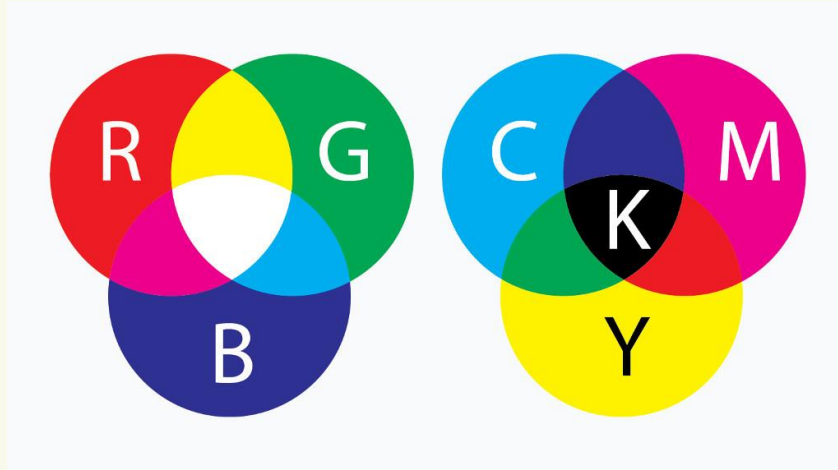


Рис. 3.2

Минимальное количество цветов для составления практически всех цветов видимого спектра равно трем. То есть любой цвет  $C$  может быть получен:  $C = r \cdot R + g \cdot G + b \cdot B$ , где  $r, g, b$  – относительные количества потоков света  $R, G, B$  со значениями в диапазоне от 0 до 1 (рис. 3.3).

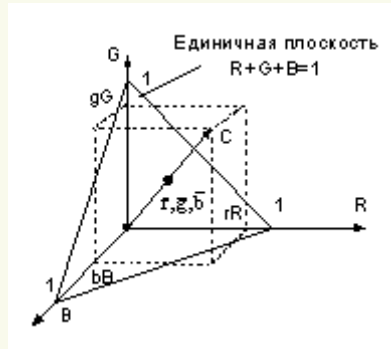


Рис. 3.3

Однако математически точно результат получается, если коэффициенты  $r, g, b$  лежат в диапазоне от  $-1$  до  $1$ , но тогда некоторая из компонент источника света может быть отрицательной интенсивности, что нереализуемо. То есть чисто математически все цвета не могут быть отражены в системе  $R, G, B$ .

### 3.2 Типы цветковых моделей

Большинство графических пакетов позволяют оперировать широким кругом цветковых моделей, часть из которых создана для специальных целей, а другая - для особых типов красок. Перечислим их:

- CMY;

- CMYK;
- RGB;
- HSB;
- HLS;
- Lab;
- YIQ;
- YCC.

По принципу действия перечисленные цветовые модели можно условно разбить на три класса:

- аддитивные (RGB), основанные на сложении цветов;
- субтрактивные (CMY, CMYK), основу которых составляет операция вычитания цветов (субтрактивный синтез);
- перцепционные (HSB, HLS, Lab, YCC), базирующиеся на восприятии.

Перед тем как перейти к непосредственному рассмотрению конкретных цветовых моделей, уделим немного внимания общим физическим закономерностям, свойственным природе цвета.

### ***3.3. Аддитивные цветовые модели***

Эта модель используется для описания цветов, которые могут быть получены с помощью устройств, основанных на принципе излучения. В качестве основных цветов берется красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue). Другие цвета и оттенки могут быть получены

смешиванием определенного количества любого из основных цветов.

**Аддитивный цвет** получается на основе законов Грассмана путем соединения лучей света разных цветов. В основе этого явления лежит тот факт, что большинство цветов видимого спектра могут быть получены путем смешивания в различных пропорциях трех основных цветовых компонент. Этими компонентами, которые в теории цвета иногда называются первичными цветами, являются красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue) цвета. При попарном смешивании первичных цветов образуются вторичные цвета: голубой (Cyan), пурпурный (Magenta) и желтый (Yellow). Следует отметить, что первичные и вторичные цвета относятся к базовым цветам.

Базовыми цветами называют цвета, с помощью которых можно получить практически весь спектр видимых цветов.

Для получения новых цветов с помощью аддитивного синтеза можно использовать и различные комбинации из двух основных цветов, варьирование состава которых приводит к изменению результирующего цвета. На рис. 3.4 приведена схема получения новых цветов на базе двух первичных путем использования источников зеленого и красного цветов, интенсивностью каждого из которых можно управлять с помощью фильтра. Можно увидеть, что равные пропорции первичных цветов дают желтый цвет (1, 2); снижение в смеси интенсивности зеленого цвета при той же интенсивности красного позволяет синтезировать оранжевый цвет (3, 4); подобные координатные схемы позволяют создать желтый и оранжевый цвета в виде геометрического места цветовых точек — *локуса* (2,4). Однако таким способом нельзя получить некоторые цвета, например голубой, для

создания которого требуется наличие третьего первичного цвета — синего.

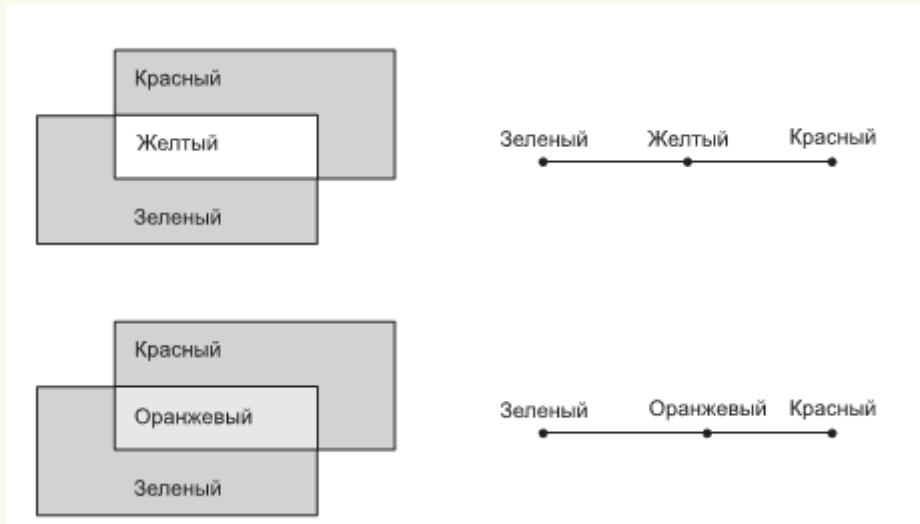


Рис. 3.4. Аддитивный синтез новых цветов на базе разного процентного соотношения двух первичных цветов - красного и зеленого.

Аддитивные цвета нашли широкое применение в системах освещения, видеосистемах, устройствах записи на фотопленку, мониторах, сканерах и цифровых камерах.



Используемые для построения RGB-модели первичные, или аддитивные, цвета имеют еще одно название. Иногда, чтобы подчеркнуть тот факт, что при добавлении света интенсивность цвета увеличивается, эту модель называют добавляющей. Такое обилие терминов, используемых для описания RGB-модели, связано с тем, что она возникла задолго до появления компьютера и каждая область ее применения внесла свой вклад в терминологию.

### **RGB - модель**

Вкратце история модели RGB такова. *Томас Ют* (1773-1829) взял три фонаря и приспособил к ним красный, зеленый и синий светофильтры. Так были получены источники света соответствующих цветов. Направив на белый экран свет этих трех источников, Т.Ют получил такое изображение (рис. 3.5).

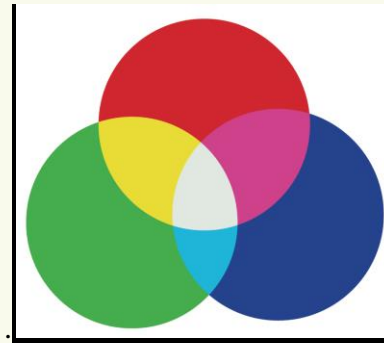


Рис. 3.5. Модель Т. Юта

На экране свет от источников давал цветные круги. В местах пересечения кругов наблюдалось смешивание цветов. Желтый цвет давало смешивание красного и зеленого, голубой — смесь зеленого и синего, пурпурный — синего и красного, а белый цвет образовался смешением всех трех основных цветов. Некоторое время спустя, *Джеймс Максвелл* (1831-1879) изготовил первый колориметр, с помощью которого человек мог сравнивать монохроматический цвет и цвет смешивания в заданной пропорции компонентов RGB. Регулируя яркость любого из смешиваемых компонентов, можно добиться уравнивания цветов смеси и монохроматического излучения. Это описывается следующим образом:

$$C = rR + gG + bB,$$

где  $r$ ,  $g$  и  $b$  — количество соответствующих основных цветов. Эта модель используется для описания цветов, которые могут быть получены с помощью устройств, которые основаны на принципе излучения. В качестве основных цветов выбран красный (Red), зеленый (Green) и синий (Blue). Другие цвета и оттенки могут быть получены смешиванием определенного количества основных цветов.

Соотношение коэффициентов  $r$ ,  $g$  и  $b$  Максвелл наглядно показал с помощью треугольника, со временем названного его именем. Треугольник Максвелла является равносторонним, в его вершинах располагаются основные цвета —  $R$ ,  $G$  и  $B$  (рис. 3.6). Из

заданной точки проводятся линии, перпендикулярные сторонам треугольника. Длина каждой линии и показывает соответствующую величину коэффициента  $r$ ,  $g$  или  $b$ . Одинаковые значения  $r=g=b$  имеют место в центре треугольника и соответствуют белому цвету. Следует также указать, что некоторые цвета отображаются точками вне треугольника RGB, — это означает отрицательное значение соответствующего цветового коэффициента. Сумма коэффициентов равняется высоте треугольника, а при высоте, равной единице, составляет  $r + g + b = 1$ .

В качестве основных цветов, Максвелл использовал излучения с такими длинами волн: 630, 528 и 457 нм.

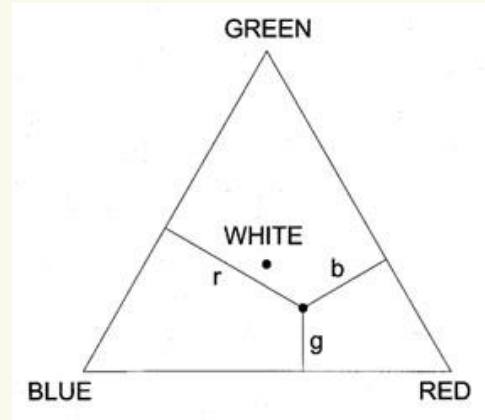


Рис. 3.6. Треугольник Максвелла

К настоящему времени система RGB — это официальный стандарт. Решением Международной Комиссии по Освещению — *MKO (CIE — Commission International de VEclairage)* в 1931 году были стандартизированы основные цвета, которые было рекомендовано использовать в качестве *R*, *G* и *B*. Это монохроматические цвета светового излучения с длинами волн соответственно:

*R* — 700нм, *G* — 546.1нм, *B* — 435.8нм.

Красный цвет получается с помощью лампы накаливания с фильтром. Для получения чистых зеленых и синих цветов используется ртутная лампа. Также стандартизировано значение светового потока для каждого основного цвета.

Еще одним важным параметром для системы RGB является цвет, полученный после смешивания трех компонентов в равных количествах. Это белый цвет. Оказывается, для того, чтобы смешиванием компонентов *R*, *G*, и *B* получить белый цвет, яркости соответствующих источников не должно быть равным, и должны находиться в пропорции

$$L_R : L_G : L_B = 1 : 4,5907 : 0,0601$$

Если расчеты цвета делаются для источников излучения с одинаковой яркостью, то указанное соотношение яркостей можно учесть соответствующими масштабными коэффициентами.

Теперь рассмотрим другие аспекты. Цвет, создаваемый смешиванием трех основных компонентов, можно представить вектором в трехмерной системе координат *R*, *G* и *B*, изображенной на рис. 3.3.

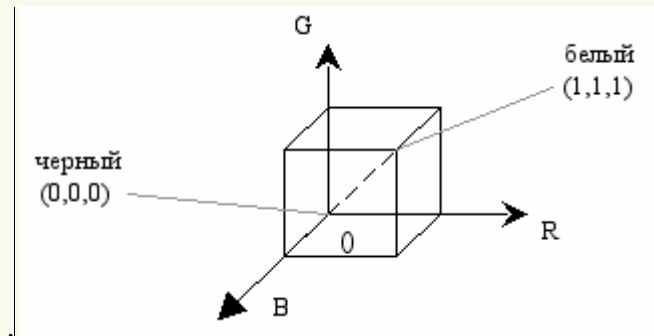


Рис. 3.3. Трехмерные координаты RGB

Черному цвету соответствует центр координат - точка  $(0,0,0)$ . Белый цвет выражен максимальным значением компонентов. Пусть это максимальное значение вдоль каждой оси равняется единице. Тогда белый цвет - это вектор  $(1,1,1)$ . Точки, которые лежат на диагонали куба от черного к белому, имеют одинаковые значения координат:  $R_I=G_I=B_I$ . Это градации серого - их можно считать белым цветом разной яркости. Следовательно, если все компоненты вектора  $(r, g, b)$  умножить на одинаковый коэффициент ( $k=0\dots1$ ), то цвет  $(kr, kg, kb)$  сохраняется, изменяется только яркость. Поэтому для анализа цвета важно соотношение компонентов. Если в цветовом уравнении

$$Ц = rR + gG + bB$$

разделить коэффициенты  $r$ ,  $g$  и  $b$  на их сумму:

$$r' = \frac{r}{r + g + b}, \quad g' = \frac{g}{r + g + b}, \quad b' = \frac{b}{r + g + b},$$

то можно записать такое цветное уравнение

$$Ц = r' R + g' G + b' B.$$

Это уравнение представляет векторы цвета  $(r', g', b')$ , которые лежат в единичной плоскости  $r' + g' + b' = 1$ . Иными словами, мы перешли от куба к треугольнику Максвелла.

В ходе колориметрических экспериментов были определены коэффициенты  $(r', g', b')$ , *это призма из белого гипса, грани которой освещаются источником света*. На левую грань направлен источник чистого монохроматического излучения, а правая грань освещается смесью трех источников RGB. Наблюдатель видит одновременно две грани, что позволяет фиксировать равенство цветов.

Результаты экспериментов можно изобразить графически (рис.3.8).

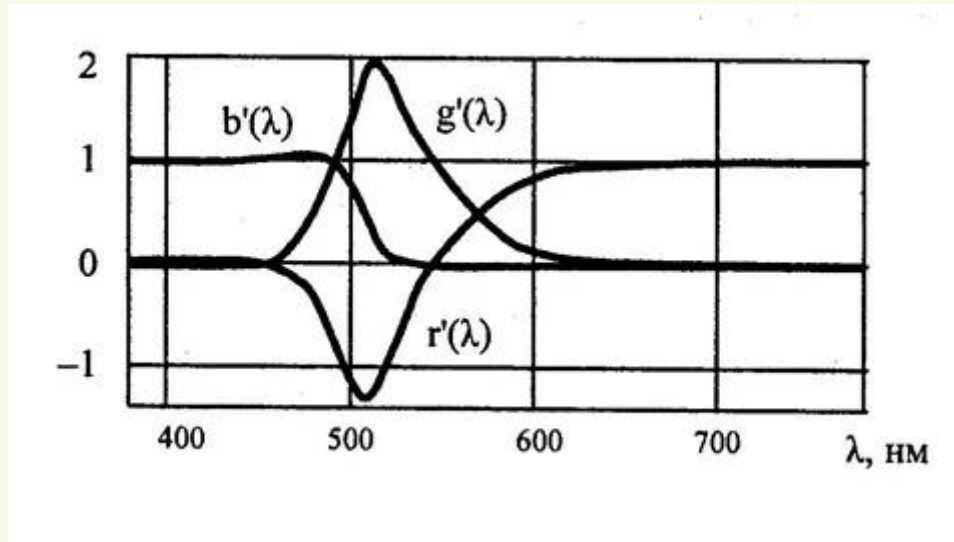


Рис. 3.8. Трехцветные коэффициенты смешивания RGB

Как видим, коэффициенты  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  могут быть и положительными, и отрицательными, суммой компонентов R, G, B. Но как отнять то, чего нет? Для уравнивания цвета пришлось прибавить к монохроматическому излучению один из компонентов R, G или B. Например, если монохроматическое излучение для некоторого значения  $\lambda$  разбавлялось красным, то это можно выразить так:

$$C(\lambda) + r'(\lambda)R = g'(\lambda)G + b'(\lambda)V$$

Как оказалось, ни один цвет монохроматического излучения не может быть представлен только положительными значениями коэффициентов смешивания. Это наглядно можно изобразить с помощью цветового графика, построенного на основе треугольника Максвелла (рис.3.9). Верхняя часть кривой линии соответствует чистым монохроматическим цветам, а нижняя линия - от 380нм до 780нм - представляет так называемые пурпурные цвета (смесь синего и красного), которые не являются монохроматическими. точки, которые лежат внутри контура кривой, соответствуют реальным цветам, а вне этого контура - нереальным цветам. Точки внутри треугольника соответствуют положительным значениям коэффициентов  $r'$ ,  $g'$ ,  $b'$  и представляют цвета, которые можно получить смешиванием компонентов RGB.



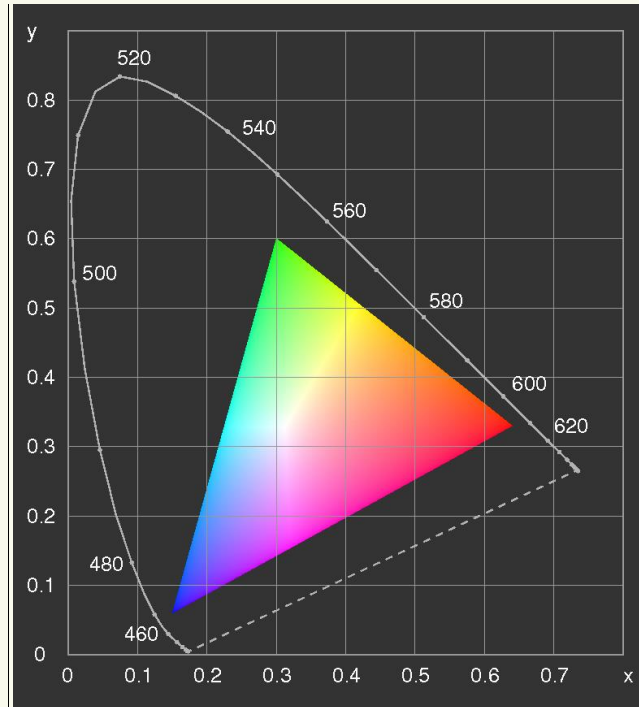


Рис. 3.9. Цветовой график RGB

Таким образом, система RGB имеет неполный цветовой охват - некоторые насыщенные цвета не могут быть представлены смесью указанных трех компонентов. В первую очередь, это цвета от зеленого к синему, включая все оттенки голубого - они соответствуют левой части кривой цветового графика. Ещё раз подчеркнем, что речь здесь идет о насыщенных цветах, так как ненасыщенные голубые цвета получить можно смешиванием компонентов RGB. Несмотря на неполный охват, система RGB широко используется в данное время - в первую очередь, в цветных телевизорах и дисплеях компьютеров. Отсутствие некоторых оттенков цвета не слишком заметно.

Ещё одним фактором, способствующим популярности системы RGB, является ее наглядность - основные цвета находятся в трех четко различимых участках видимого спектра. Кроме того, одна гипотеза, объясняющая цветное зрение человека - трехкомпонентная теория - утверждает, что в зрительной системе человека есть три типа светочувствительных элементов. Один тип элементов реагирует на зеленый, другой тип - на красный, а третий тип - на синий цвет. Впрочем, трехкомпонентная теория не является единственной теорией цветового зрения человека.

### **Достоинства модели RGB**

В графических пакетах цветовая модель RGB используется для создания цветов изображения на экране монитора, основными элементами которого являются три электронных прожектора и экран с нанесенными на него тремя разными люминофорами. Точно так же, как и зрительные пигменты трех типов колбочек, эти люминофоры имеют разные спектральные

характеристики. Но в отличие от глаза они не поглощают, а излучают свет. Один люминофор под действием попадающего на него электронного луча излучает красный цвет, другой — зеленый и третий — синий.

Мельчайший элемент изображения, воспроизводимый компьютером, называется *пикселом* (pixel от picture element). При работе с низким разрешением отдельные пикселы не видны. Однако если вы будете рассматривать белый экран включенного монитора через лупу, то увидите, что он состоит из множества отдельных точек красного, зеленого и синего цветов, объединенных в RGB-элементы в виде триад основных точек. Цвет каждого из воспроизводимых кинескопом пикселов (RGB-элементов изображения) получается в результате смешивания красного, синего и зеленого цветов входящих в него трех люминофорных точек. При просмотре изображения на экране с некоторого расстояния эти цветовые составляющие RGB-элементов.

Для назначения цвета и яркости точек, формирующих изображение монитора, нужно задать значения интенсивностей для каждой из составляющих RGB-элемента (пиксела). В этом процессе значения интенсивностей используются для управления мощностью трех электронных прожекторов, возбуждающих свечение соответствующего типа люминофора. В то же время число градаций интенсивности определяет цветовое разрешение, или, иначе, глубину цвета, которые характеризуют максимальное количество воспроизводимых цветов. На рис. 3.10 приведена схема формирования 24-битового цвета, обеспечивающая возможность воспроизведения  $256 \times 256 \times 256 = 16,7$  млн. цветов.

Профессиональные графические редакторы (**CorelDRAW**, **Corel Photo-Paint**, **Photoshop**

и др.) наряду со стандартной 8-битовой глубиной цвета поддерживают 16-битовую глубину цвета, которая позволяет воспроизводить **65 536** оттенков серого.



Рис. 3.10. Каждый из трех цветовых компонентов RGB - триады может принимать одно из 256 дискретных значений - от максимальной интенсивности (255) до нулевой, соответствующей черному цвету

На рис. 3.11 приведена иллюстрация получения с помощью аддитивного синтеза шести (из 16,7 млн.) цветов. Как уже упоминалось ранее, в случае, когда все три цветные компоненты имеют максимальную интенсивность, результирующий цвет кажется белым. Если все компоненты имеют нулевую интенсивность, то результирующий цвет — чистый черный.

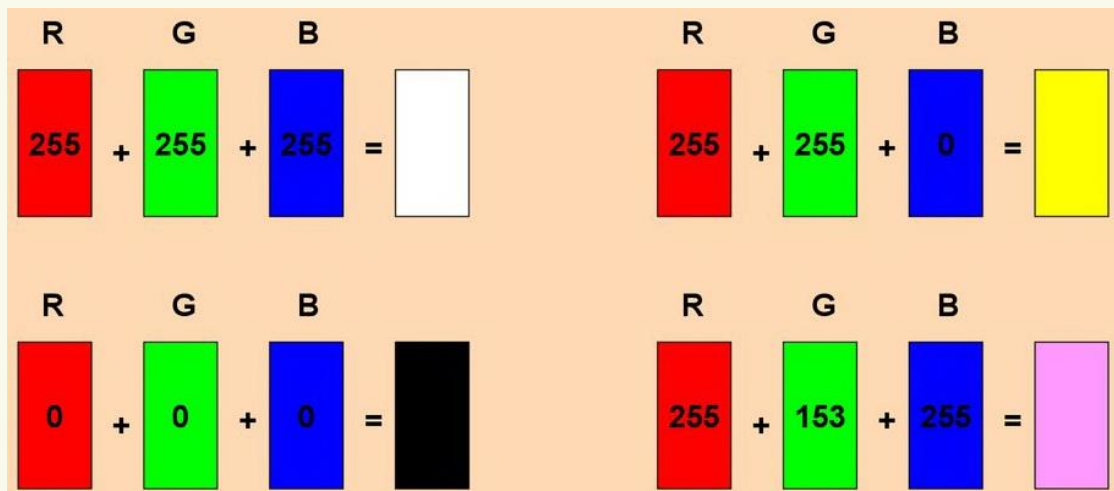


Рис. 3.11. Пример. Формирование 6 из 16,7 млн. возможных цветов путем вариации интенсивностей каждой из трех компонентов R, G и B цветовой модели rgb.

### Ограничения RGB-модели

Несмотря на то, что цветовая модель RGB достаточно проста и наглядна, при ее практическом применении возникают две серьезные проблемы:

- аппаратная зависимость;
- ограничение цветового охвата.

Первая проблема связана с тем, что цвет, возникающий в результате смешения цветовых составляющих RGB элемента, зависит от типа люминофора. А поскольку в технологии производства современных кинескопов находят применение разные типы люминофоров, то установка одних и тех же интенсивностей электронных лучей в случае различных люминофоров приведет к синтезу разного цвета. Например, если на электронный блок монитора подать определенную тройку RGB-значений, скажем  $R = 98$ ,  $G = 127$  и  $B = 201$ , то нельзя однозначно сказать, каков будет результат смешивания. Эти значения всего лишь задают интенсивности возбуждения трех люминофоров одного элемента изображения. Какой получится при этом цвет, зависит от спектрального состава излучаемого люминофором света. Поэтому в случае аддитивного синтеза для однозначного определения цвета наряду с установкой триады значений интенсивностей необходимо знать спектральную характеристику люминофора.

Существуют и другие причины, приводящие к аппаратной зависимости RGB-модели даже для мониторов, выпускаемых одним и тем же производителем. Это связано, в частности, с тем, что в процессе эксплуатации происходит старение люминофора и изменение

эмиссионных характеристик электронных прожекторов. Для устранения (или по крайней мере минимизации) зависимости RGB-модели от аппаратных средств используются различные устройства и программы градуировки. Цветовой охват (color gamut) — это диапазон цветов, который может различать человек или воспроизводить устройство независимо от механизма получения цвета (излучения или отражения).

Ограниченность цветового охвата объясняется тем, что с помощью аддитивного синтеза принципиально невозможно получить все цвета видимого спектра (это доказано теоретически). В частности, некоторые цвета, такие как чистый голубой или чистый желтый, не могут быть точно воссозданы на экране. Но несмотря на то, что человеческий глаз способен различать цветов больше, чем монитор, RGB-модели вполне достаточно для создания цветов и оттенков, необходимых для воспроизводства фотореалистических изображений на экране вашего компьютера.

### Цветовая модель МКО

Трехмерная природа света допускает интерпретацию по осям ортогональной системы, определяющей трехкомпонентное цветовое пространство.

Любой цвет  $C$  может быть представлен как вектор с составляющими  $rR$ ,  $gG$ ,  $bB$ . Пересечение вектора  $C$  с единичной плоскостью дает относительные веса его  $R$ ,  $G$ ,  $B$  компонент. Они называются значениями или координатами цветности:

$$r' = \frac{r}{r + g + b}, \quad g' = \frac{g}{r + g + b}, \quad b' = \frac{b}{r + g + b}.$$

Следовательно,

$$r' + g' + b' = 1.0.$$

Проецируя единичную плоскость, получаем цветовой график (рис. 3.12). Внутри треугольника будут укладываться все возможные цвета. Если цвет  $S$  находится на оси  $R$ , то компонент  $G$  и  $B$  в нем нет, если в точке – начале координат, то присутствует только цвет  $B$  и т.д. График явно отображает функциональную связь двух цветов и неявно – связь с третьим, например

$$b' = 1.0 - r' - g'.$$

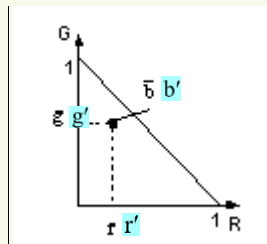


Рис. 3.12

В 1931 году в Англии состоялось заседание Международной комиссии по освещению (МКО), на котором установлены международные стандарты определения и измерения цветов. В качестве стандарта были приняты три абстрактных гипотетических цвета  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (они на самом деле не существуют), которые в сумме дают белый цвет. В пирамиду  $0XYZ$  входит весь



видимый спектр, причем коэффициенты  $x$ ,  $y$ ,  $z$  уравнения для любого цвета видимого спектра  $C=x\cdot X+y\cdot Y+z\cdot Z$  лежат в интервале от 0 до 1. Проекция на плоскость  $XOY$  всех видимых цветов, попадающих в пирамиду  $OXYZ$ , дает график цветов системы МКО.

Контур графика МКО – это геометрическое место точек всех видимых длин волн, то есть линия спектральных цветностей от 400нм до 700нм (рис.3.13).



Рис. 3.13

Внутри контура (графика МКО) определены несколько стандартизованных точек. Одна из основных - E (опорный белый цвет)–точка равных энергий ( $x=y=0,333$ ).

Другие стандартные источники МКО:

А – цвет газонаполненной лампы накаливания с вольфрамовой нитью при  $t^{\circ}=2856^{\circ}\text{K}$  ( $x=0,448, y=0,408$ ) – ближе к красному;

В - солнечный свет в полдень ( $x=0,349, y=0,352$ );

С – полуденное освещение при сплошной облачности ( $x=0,310, y=0,316$ ) – стандарт опорного белого NTSC;

D – излучение абсолютно черного тела при  $6504^{\circ}\text{K}$  ( $x=0,313, y=0,329$ ) – опорный белый во многих телемониторах.

Цветовой график очень удобен. Чтобы получить дополнительный цвет, следует проложить прямую через данный цвет и опорный белый до пересечения с другой стороной кривой. Например, дополнительный к красно-оранжевому с  $\lambda=610\text{нм}$  является сине-зеленый ( $\lambda=490\text{нм}$ ). При сложении в определенной пропорции цвета и его дополнения получаем белый.

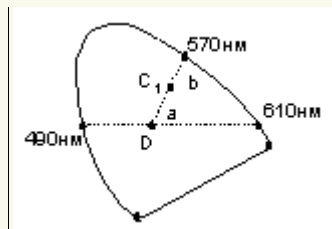


Рис. 3.14

Чтобы найти доминирующую длину волны цвета, следует проложить прямую, проходящую через этот цвет и опорный белый. Например, для цвета С1 доминирующая длина волны 570нм (желто-зеленый). Чистые (на 100% насыщенные) цвета лежат на линии спектральных цветностей. Опорный белый цвет имеет чистоту 0%.

Чистота промежуточных цветов определяется отношением расстояний. Например, для С1 она равна  $a/(a+b)$ .

Координаты цветности МКО для смеси двух цветов определяются сложением основных компонент:  $C = (x1+x2) + (y1+y2) + (z1+z2)$ .

Еще один вариант графика МКО – с разделением на обычные воспринимаемые цвета (R, O, Y, G, C, B, M). Переходные цвета обозначаются, например, так: yG – желтовато-зеленый. Оттенки зеленого занимают всю верхнюю часть графика, а красные и синие собраны внизу.

Цветное TV, кино, типографская печать и т.д. не покрывают весь диапазон цветов видимого спектра, что тоже может быть отражено на графике МКО. На графике (рис.3.15) видно, что некоторые цвета, которые получены на киноплёнке, не могут быть воспроизведены на TV-экране.

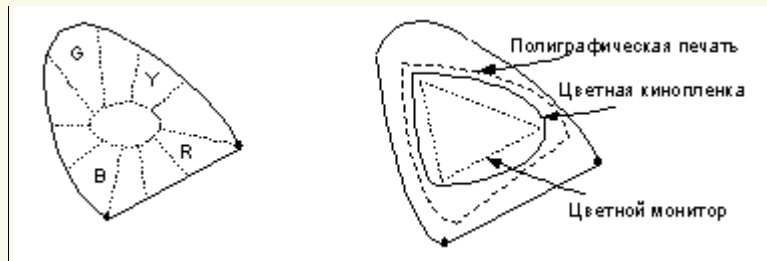


Рис. 3.15

Стандарт МКО используют при пересчете цветовых систем – передаче информации из одного цветового стандарта в другой (в различных отраслях промышленности они разные), в том числе в систему RGB цветных мониторов:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_r & x_g & x_b \\ y_r & y_g & y_b \\ z_r & z_g & z_b \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix},$$

где  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  – цвета для получения координаты единичного количества основного цвета  $i$ . Например, если  $R=1$ ,  $G=0$ ,  $B=0$ , то  $x=x_r$ ,  $y=y_r$ ,  $z=z_r$ .

### 3.4. Субтрактивные цветовые модели

В отличие от экрана монитора, воспроизведение цветов которого основано на излучении света, печатная страница может только отражать цвет. Поэтому RGB-модель в данном случае неприемлема. Вместо нее для описания печатных цветов используется модель CMY, базирующаяся на субтрактивных цветах (рис. 3.16).

Субтрактивные цвета в отличие от аддитивных цветов (той же RGB-модели) получаются вычитанием вторичных цветов из общего луча света. В этой системе белый цвет появляется как результат отсутствия всех цветов, тогда как их присутствие дает черный цвет.

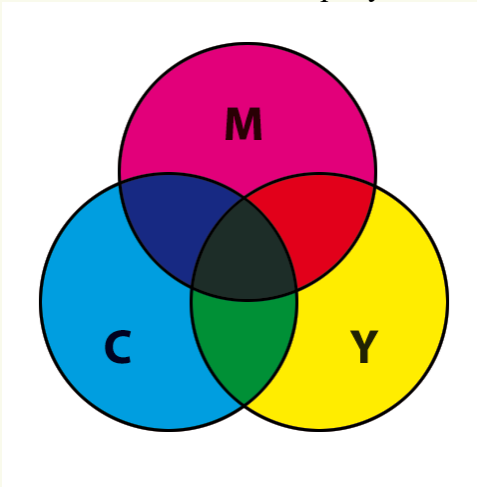


Рис. 3.16. Субтрактивная цветовая модель CMY

*В последнее время в качестве синонима термина «субтрактивная» иногда используют термин «исключающая». Происхождение этого названия связано с явлением отражения света от покрытой красителем поверхности, а также с тем фактом, что при добавлении красителей интенсивность света уменьшается, поскольку свет поглощается тем больше, чем больше красителя нанесено на поверхность.*

*Нанесение на бумагу трех базовых цветов: голубого (Cyan), пурпурного (Magenta) и желтого (Yellow) позволяет создать множество субтрактивных цветов.*

*Уточним практические нюансы использования этой модели. Для этого нам запишем соотношения, связывающие аддитивные (R, G, B) и субтрактивные (C, M, Y) цвета:*

*Зеленый + Синий = Голубой;*

*Зеленый + Красный = Желтый;*

*Красный + Синий = Пурпурный;*

*Зеленый + Синий + Красный = Белый;*

*Голубой + Желтый + Пурпурный = Черный.*

*Что происходит, когда на лист бумаги с нанесенным на него красителем падает белый свет? Если краситель голубой (сине-зеленый), то он поглощает из спектра красный цвет и отражает голубой. Соответственно пурпурный краситель поглощает комплиментарный ему зеленый цвет, а желтый краситель — синий цвет. Если при печати наложить друг на друга пурпурный и желтый цвета, то получится красный цвет, поскольку*

пурпурный краситель устранил зеленую составляющую, а желтый — синюю составляющую падающего цвета. Соответственно при печати с наложением всех трех субтрактивных цветов результирующий цвет будет черным.

На базе этих рассуждений можно сформулировать правило коррекции цветового разбаланса при цветной печати: если изображение имеет излишне синий оттенок, то следует увеличить желтую составляющую, поскольку желтый поглощает синие составляющие. Соответственно избыточность зеленого цвета можно скорректировать увеличением пурпурной составляющей, а избыточность красного цвета — увеличением голубой составляющей.

### **Цветовая модель CMY**

Используется для описания цвета при получении изображений на устройствах, которые реализуют принцип поглощения цветов. В первую очередь, она используется в устройствах, которые печатают на бумаге. Название данной модели состоит из названий основных субтрактивных цветов: голубого (Cyan), пурпурного (Magenta) и желтого (Yellow) (рис.3.17).

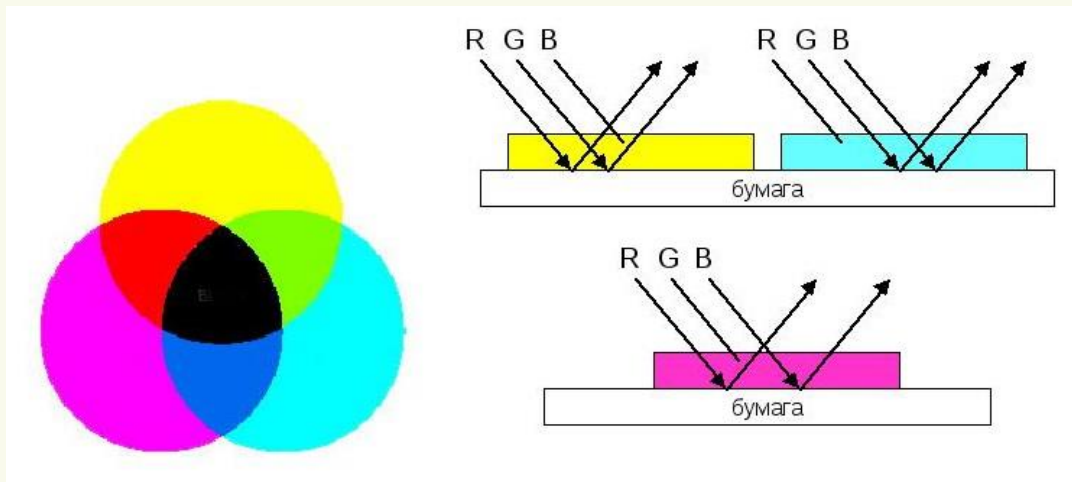


Рис. 3.13. Цветовая модель CMY - поглощение (вычитание) цветов)

Нанесение желтой краски на белую бумагу означает, что поглощается отраженный синий цвет. Голубая краска поглощает красный цвет. Пурпурная краска — зеленый. Комбинирование красок позволяет получить цвета, которые остались — зеленый, красный, синий и черный. Черный соответствует поглощению всех цветов при отражении.

На практике добиться черного смешиванием сложно из-за неидеальности красок, поэтому в принтерах используют еще и краску черного цвета (black). Тогда модель называется



СМΥК, Необходимо также отметить, что не всякие краски обеспечивают указанное выше вычитание цветов СМΥ.

В таблице 3.1 для сравнения представим описание некоторых цветов в моделях RGB и СМΥ.

Таблица 3.1. Описание цветов в моделях RGB и СМΥ

Цвет	Модель RGB			Модель СМΥ		
	R	G	B	C	M	Y
Красный	1	0	0	0	1	1
Желтый	1	1	0	0	0	1
Ярко-Зеленый	0	1	0	1	0	1
Голубой	0	1	1	1	0	0
Синий	0	0	1	1	1	0
Пурпурный	1	0	1	0	1	0
Черный	0	0	0	1	1	1
Белый	1	1	1	0	0	0

Соотношение для перекодировки цвета из модели CMY в RGB:

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix}$$

*Здесь считается, что компоненты кодируются числами в диапазоне от 0 до 1. Для другого диапазона чисел можно записать соответствующее обратное соотношение.*

### **CMY и CMYK**

Существуют две наиболее распространенные версии субтрактивной модели: CMY и CMYK. Первая из них используется в том случае, если изображение или рисунок будут выводиться на черно-белом принтере, позволяющем заменять черный картридж на цветной (color upgrade). В ее основе лежит использование трех субтрактивных (вторичных) цветов: голубого (Cyan), пурпурного (Magenta) и желтого (Yellow). Теоретически при смешивании этих цветов на белой бумаге в равной пропорции получается черный цвет.

Однако в реальном технологическом процессе получение черного цвета путем смешивания трех основных цветов для бумаги неэффективно по трем причинам.

Невозможно произвести идеально чистые пурпурные, синие и желтые краски. Поэтому цвет получается не чисто черным, а грязно-коричневым.

На создание черного цвета с помощью модели CMY тратится в три раза больше краски.

В силу перечисленных факторов при печати чистого черного цвета используется добавка дополнительной черной компоненты цвета. Эта технология приводит также к улучшению качества теней и серых оттенков. Интенсивность каждой из четырех компонент цвета может изменяться в диапазоне от 0 до 100 %.

В аббревиатуре модели CMYK используется буква «К» (последняя буква слова Black) для того, чтобы избежать путаницы, поскольку в английском языке с буквы «В» начинается не только слово Black (черный), но и слово Blue (синий). Встречается еще один вариант трактовки использования этой буквы как аббревиатуры термина Key color (ключевой цвет).

### ***Ограничения модели CMYK***

CMYK-модель имеет те же два типа ограничений, что и RGB-модель: аппаратная зависимость; ограниченный цветовой диапазон.

В CMYK-модели также нельзя точно предсказать результирующий цвет только на базе численных значений ее отдельных компонентов. В этом смысле она является даже более аппаратно-зависимой моделью, чем RGB. Это связано с тем, что в ней имеется большее количество дестабилизирующих факторов, чем в RGB-модели. К ним в первую очередь можно отнести вариацию состава цветных красителей, используемых для создания печатных цветов. Цветовое ощущение определяется еще и типом применяемой бумаги, способом печати и, не в последнюю очередь, внешним освещением. Последнее неудивительно — ведь никакой объект не может отразить цвет, отсутствующий в источнике излучения.

В силу того что цветные красители имеют худшие характеристики по сравнению с

люминофорами, цветовая модель СМУК имеет более узкий цветовой диапазон по сравнению с RGB-моделью (рис. 3.18). В частности, она не может воспроизводить яркие насыщенные цвета, а также ряд специфических цветов, таких, например, как металлический или золотистый.

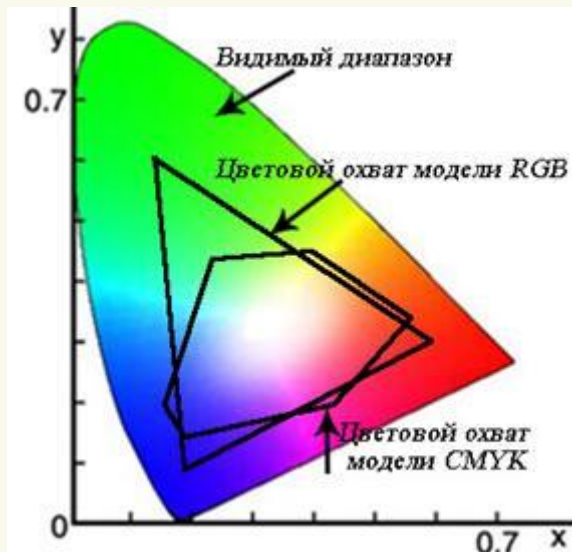
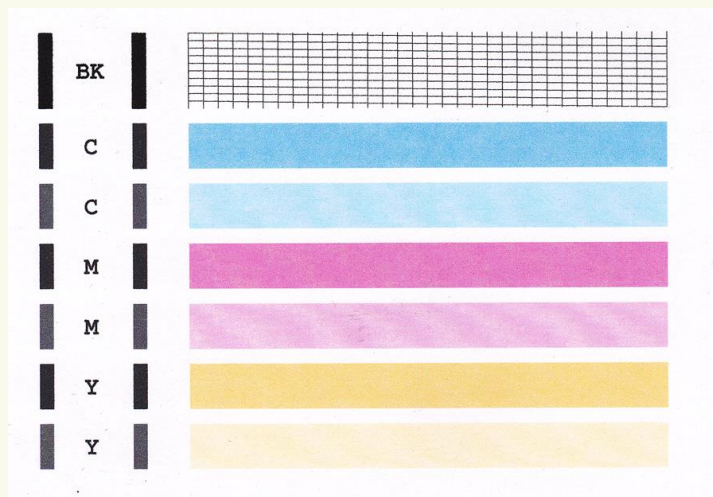


Рис. 3.18. Сопоставление цветовых охватов RGB и СМУК – моделей

Об экранных цветах, которые невозможно точно воссоздать при печати, говорят, что они лежат вне цветового охвата (gamut alarm) модели CMYK (рис. 3.18). В большинстве графических пакетов под такими цветами понимаются цвета, которые могут быть представлены в формате RGB или HSB, но при этом не имеют печатных аналогов в цветовом пространстве CMYK (рис. 3.19).



*Рис. 3.19. Несовпадение цветов, отображаемых на экране монитора, с печатаемыми на принтере. При распечатке цвета становятся темными и приглушенными.*

Несоответствие цветовых диапазонов RGB- и CMYK-моделей представляет серьезную проблему. Судите сами: полученная вами на экране монитора в результате напряженной работы прекрасная картинка при распечатке вдруг превращается в унылое и блеклое подобие оригинала. Для предотвращения подобной ситуации разработчиками графических программ предусмотрен комплекс специальных средств.

Наиболее простые основаны на выявлении и коррекции несоответствующих цветов непосредственно в процессе редактирования.

Более кардинальные предназначены для расширения цветового пространства CMYK-модели.

И наконец самый «продвинутый» — использование систем управления цветом — CMS (color management systems).

К первой группе средств, используемых при подготовке изображения для печати, можно отнести следующие.

Редактирование изображения в формате CMYK-модели. Хотя относительно целесообразности применения этого способа существуют противоположные мнения, не вдаваясь в физические аспекты дискуссии, отметим, что полученное в этом случае при печати изображение будет соответствовать наблюдаемому на мониторе.

### ***Возможности расширения цветового охвата СМΥΚ***

И профессионалы в области полиграфии, занимающиеся подготовкой и изданием красочных буклетов по живописи, и специалисты в области рекламы, чьи доходы напрямую связаны с воздействием цветных публикаций на покупателя, уже давно имеют претензии к стандартной СМΥΚ-модели из-за относительно узкого диапазона воспроизводимых ею цветов. С помощью четырехцветной печати можно воспроизвести достаточно реалистичные красные цвета, но невозможно добиться ярких розовых, синих, фиолетовых и многих других цветов. Но даже те цвета, которые хорошо воспроизводятся с помощью этой модели, часто оказываются недостаточно насыщенными. По этой причине на базе СМΥΚ-модели разработан ряд новых технологий.

#### *Технология HiFi Color*

К настоящему времени создано несколько вариантов HiFi Color. Их общей чертой является расширение используемых при цветовой печати гаммы цветов за счет добавления новых цветов к четырем базовым цветам СМΥΚ.

Одна из таких цветовых систем разработана фирмой Pantone. Ее компьютерный вариант Pantone Hexachrome Colors впервые введен в интегрированный пакет CorelDRAW 3. Палитра базируется на цветовой модели СМΥΚ, дополнительно к четырем цветам которой добавлены два новых цвета: зеленый (G) и оранжевый (O). Это позволяет существенно расширить диапазон воспроизводимых цветов при офсетной печати и заметно поднять качество цветопередачи.

В настоящее время наряду с шестицветной цветовой системой фирмы Pantone

реализованы и другие системы. Так, в системе HiFi Color3000 фирмы LinoTipe-Hell для получения ярких красных, зеленых и синих цветов используется семь цветов (три аддитивных RGB-модели и четыре субтрактивных цвета СМΥК-модели).

### ***Использование плашечных цветов***

Плашечными (простыми, смесовыми) цветами называются цвета, которые воспроизводятся на бумаге готовыми смесовыми красками, созданными с помощью специальной технологии, базирующейся на использовании для каждого цвета соответствующего ему уникального красителя (чернил). Поскольку они в отличие от триадных (СМΥК) цветов не прозрачны, то отражают свет поверхностным слоем. Это позволяет добиться воспроизведения очень ярких тонов и специальных эффектов типа металлизации и иризации (перелива оттенков при разных углах зрения).

Плашечные краски используют вместо триадных (СМΥК) красок или в добавление к ним. Несколько фирм занимаются производством таких цветов. Это в первую очередь *Pantone*, *Trumatch* и *Focoltone*. Более подробно плашечные цвета будут рассмотрены далее в разделе «Системы соответствия цветов и палитры».

*На рис. 3.20 приведен пример сопоставления цветового охвата модели СМΥК с цветами Pantone.*



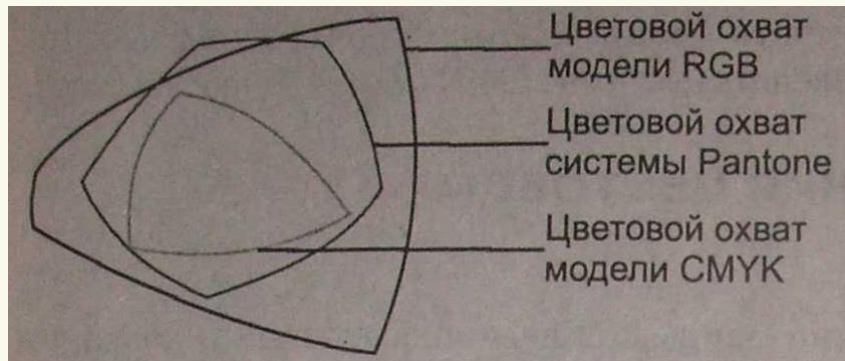


Рис. 3.20. Варианты расширения цветового охвата CMYK-модели путем использования технологии HiFi Color и плашечных цветов.

### 3.5. Перцепционные цветовые модели

Для дизайнеров, художников и фотографов основным инструментом индикации и воспроизведения цвета служит глаз. Этот естественный «инструмент» обладает цветовым охватом, намного превышающим возможности любого технического устройства, будь то сканер, принтер или фотоэкспонирующее устройство вывода на пленку.

Как было показано ранее, используемые для описания технических устройств цветовые системы RGB и CMYK являются аппаратнозависимыми. Это значит, что воспроизводимый или создаваемый с помощью них цвет определяется не только составляющими модели, но и зависит от характеристик устройства вывода. Для устранения аппаратной зависимости был

разработан ряд так называемых перцепционных (иначе — интуитивных) цветовых моделей. В их основу заложено раздельное определение яркости и цветности. Такой подход обеспечивает ряд преимуществ:

- позволяет обращаться с цветом на интуитивно понятном уровне;
- значительно упрощает проблему согласования цветов, поскольку после установки значения яркости можно заняться настройкой цвета.

Прототипом всех цветовых моделей, использующих концепцию разделения яркости и цветности, является HSV-модель. К другим подобным системам относятся HSI, HSB, HSL и YUV. Общим для них является то, что цвет задается не в виде смеси трех основных цветов — красного, синего и зеленого, а определяется путем указания двух компонентов: цветности (цветового тона и насыщенности) и яркости.

### **Цветовая модель HSB**

Модель HSB (Hue — цветовой тон, Saturation — насыщенность, Brightness — яркость) или ее ближайший аналог HSL представлены в большинстве современных графических пакетов. Из всех используемых в настоящее время моделей эта модель наиболее точно соответствует способу восприятия цветов человеческим глазом. Она позволяет описывать цвета интуитивно ясным способом.

В HSB-модели все цвета определяются с помощью комбинации трех базовых параметров (рис. 3.21): цветовой тон (H); насыщенность(S); яркость (B).



Рис. 3.21. Цветовой тон определяет положение цвета на цветовом круге, насыщенность и яркость задают количество «чистого» цвета и света в данном тоне.

Для лучшего понимания природы HSB-модели давайте познакомимся с физическим смыслом ее основных компонентов.

### **Цветовой тон**

Как уже отмечалось, каждый реальный источник света воспроизводит его в виде смеси волн, имеющих разные длины. Под *цветовым тоном* (hue) понимается свет с доминирующей длиной волны. Обычно для описания цветового тона (в некоторых источниках применяется термин *оттенок*) используется название цвета, например, красный, оранжевый или зеленый. В традиционной интерпретации *этой* модели каждый цветовой тон занимает определенное положение на периферии *цветового круга* и характеризуется величиной угла в диапазоне от  $0$  до  $360^\circ$  (рис. 3.22). Обычно для красного цвета берется угол  $0^\circ$ , для чисто зеленого  $-120^\circ$  и для чисто синего —  $240^\circ$ .

На цветовом круге первичные цвета расположены на равном расстоянии друг от друга. Вторичные цвета находятся между первичными. В свою очередь, каждый цвет расположен напротив дополняющего его (комплиментарного) цвета, причем он находится между цветами, с помощью которых получен. Например, сложение желтого и голубого цветов дает зеленый. Таким образом, на цветовом круге зеленый цвет должен располагаться между желтым и голубым. Хотя оранжевый *или* фиолетовый не являются первичными *или* вторичными цветами (они представляются комбинацией первичного и вторичного цветов), они показаны на *круговой* диаграмме цветов, чтобы проиллюстрировать их положение относительно *других* цветов.

Однако само по себе понятие цветового тона не содержит всей полноты информации о цвете. Например, свет, в котором преобладает компонента с длиной волны около 450 нанометров, будет восприниматься большинством людей с нормальным зрением, как оттенок, обычно ассоциируемый с синим цветом (ему соответствует на цветовом круге угол  $240^\circ$ ).

Чтобы усилить в изображении какой-либо цвет, нужно ослабить дополняющий его цвет (расположенный напротив него на цветовом круге). Например, чтобы изменить общее цветовое содержание изображения в сторону зеленого цвета, следует снизить в нем содержание пурпурного цвета. Именно на этом принципе основана цветовая коррекция изображения.



Рис. 3.22. Расположение цветов на цветовом круге

Вопрос в том, что понимать под понятием синий? Темно-синее или голубое небо лазурное море, полевой василек и незабудка — это все примеры цветов, в которых доминирует синий цвет, но, несмотря на это, они воспринимаются нашим глазом как разные. Что обуславливает их различие, как много или, наоборот, мало содержат они в своем составе других компонентов, которые наш глаз интерпретирует как составные части цвета? Этими дополнительными компонентами являются насыщенность (saturation) и яркость (brightness).

### ***Насыщенность***

Цветовой тон не единственный атрибут цвета, различаемый людьми. Другой компонент — насыщенность — характеризует чистоту цвета. Он определяет соотношение между основной, доминирующей компонентой цвета и всеми остальными длинами волн (количеством серого), участвующими в формировании цвета. Количественное значение этого параметра выражается в процентах от 0% (серый) до 100% (полностью насыщенный).

По другому определению, насыщенности отражает, насколько далеко отстоит данный цвет от равного с ним по яркости белого цвета. В этом случае насыщенность можно измерять числом едва заметных переходов (градаций), лежащих между данным цветом и белым.

Чем выше значение насыщенности, тем сильнее и яснее ощущается цветовой тон. Например, пастельный синий цвет воспринимается как размытый синий цвет из-за незначительного содержания в нем чистого оттенка. Снижение насыщенности приводит к тому, что цвет становится нейтральным, без четко выраженного тона.

Если вы возьмете цветную фотографию и понизите насыщение до 0%, то в итоге

получите черно-белую фотографию (в градациях серого). Примерами цветов с максимальной насыщенностью могут служить спектральные цвета, в частности желтый цвет, соответствующий линии спектра натрия с длиной волны 536 нм. В то же время желтый цвет, полученный путем аддитивного сложения красного с зеленым цветом, характеризуется пониженной насыщенностью. И совсем низкую насыщенность имеет желтый свет солнечного диска, содержащего практически полный спектр видимых цветов.

Примерами «полностью» нейтральных (ахроматических) цветов могут служить серый, белый и черный цвета. По мере перемещения к центру круга цвет приближается к серому, поскольку при этом все базовые цвета смешиваются в равной пропорции.

Естественные цвета имеют низкую насыщенность, поэтому слишком насыщенные цвета выглядят ненатуральными и подчеркнутыми.

Перемещение поперек цветового круга (в отличие от движения по окружности) приводит к уменьшению доли цвета, от которого вы удаляетесь, и возрастанию доли цвета, к которому вы приближаетесь. В итоге это приводит к понижению насыщенности, которая имеет максимальное значение (100%) на поверхности окружности и минимальное (0%) — в центре круга.

### ***Яркость***

Яркость (В) характеризует интенсивность, с которой энергия света воздействует на рецепторы нашего глаза. Ее можно интерпретировать также как относительную освещенность или затемненность цвета (светлоту цвета). Солнечный зайчик — пример высокой



интенсивности освещения (яркого). В то же время тлеющие угли — низкой. Любые цвета и оттенки независимо от их цветового тона можно сравнить по яркости, то есть определить, какой из них темнее, а какой светлее.

Яркость никоим образом не влияет на цветность, но от нее зависит, насколько сильно цвет будет восприниматься нашим глазом. При нулевой яркости мы не видим ничего, поэтому любой цвет будет восприниматься как черный. Исходя из этого яркость иногда трактуют подобно насыщенности, то есть как величину, обратную степени разбавленности цвета черным. В этом случае при отсутствии черного мы получаем чистый спектральный цвет, а максимальная яркость вызывает ощущение ослепительно белого цвета.

Когда говорят о яркости как атрибуте цвета, под белым цветом понимают абсолютную яркость, а под черным цветом — полное отсутствие яркости. Серый цвет характеризует промежуточное значение яркости.

Ахроматические цвета, то есть белые, серые и черные, характеризуются только яркостью. Это проявляется в том, что одни цвета темнее, а другие светлее.

Величина яркости измеряется в процентах в диапазоне от 0% (черный) до 100% (белый). По мере снижения процентного содержания яркости цвет становится темнее, стремясь к черному. Данная компонента является нелинейной, что соответствует нашему восприятию светлых и темных цветов.

Яркость и цветовой тонне являются полностью независимыми параметрами. Изменение яркости изображения влияет на изменение цветового тона, что создает нежелательный цветовой отлив (сдвиг) в изображении. Так, при значительном уменьшении яркости зеленые

цвета синеют, синие приближаются к фиолетовым, желтые — к оранжевым, а оранжевые — к красным. Сильное увеличение яркости излучения вызывает другой эффект. Красные цвета переходят в оранжевые, затем в желтые и, наконец, — в белые.

### ***Универсальность яркостной компоненты***

Яркость (светлота) — качество, присущее как хроматическим, так и ахроматическим цветам. Поэтому по яркости можно сравнивать между собой любые цвета и оттенки: бледно-зеленый с темно-зеленым, розовый с синим, красный с фиолетовым и т. д. Это свойство находит применение при конвертировании цветных изображений в черно-белые или полутоновые.

У художников принято светлотные отношения называть тональными. Поэтому различают светлотный и цветовой тон. Когда говорят, что картина написана в светлых тонах, то прежде всего имеют в виду светлотные отношения, а по цвету она может быть и серо-белой, и розовато-желтой, и светло-сиреневой — словом, самой разной.

Различие между HSB- и HSL-моделями состоит в замене нелинейного компонента brightness (яркость) на линейный компонент lightness (светлота).

### ***Достоинства и ограничения HSB-модели***

Модель HSB в отличие от моделей RGB и CMYK носит абстрактный характер. Отчасти это связано с тем, что цветовой тон и насыщенность цвета нельзя измерить непосредственно. Любая форма ввода цветовой информации всегда начинается с определения красной, зеленой

и синей составляющих, на базе которых затем с помощью математического пересчета получают компоненты HSB-модели. В результате эта цветовая модель имеет то же цветовое пространство, что и RGB-модель, а значит, и присущий ей недостаток — ограниченное цветовое пространство.

Вместе с тем HSB-модель обладает по сравнению с RGB- и CMYK-моделями двумя важными преимуществами:

Аппаратной независимостью. Задание составляющих этой модели в виде значений цветового тона, насыщенности и яркости позволяют однозначно определить цвет без необходимости учета параметров устройства вывода.

Более простым и интуитивно понятным механизмом управления цветом.

Это связано с тем, что цветовой тон, насыщенность и яркость представляют собой независимые характеристики цвета. Например, чистый красный цвет расположен на цветовом круге под углом  $0^\circ$ . Если нужно сместить красный тон к оранжевому тону, то следует лишь несколько увеличить угол, определяющий цветовой тон. Для получения более блеклого цвета достаточно лишь снизить насыщенность, а для придания ему большей яркости соответственно увеличить значение яркости. Получение таких эффектов с помощью RGB-модели практически **невозможно**, поскольку значения ее цветовых компонентов очень сильно зависят друг от друга. Поэтому при изменении одной из ее составляющих, например, красной, это окажет влияние не только на цветовой тон, но одновременно и на насыщенность и яркость.

### Другие цветовые модели

Цветовые пространства RGB и CMY трехмерны и условно могут быть изображены в виде куба (рис.3.23).

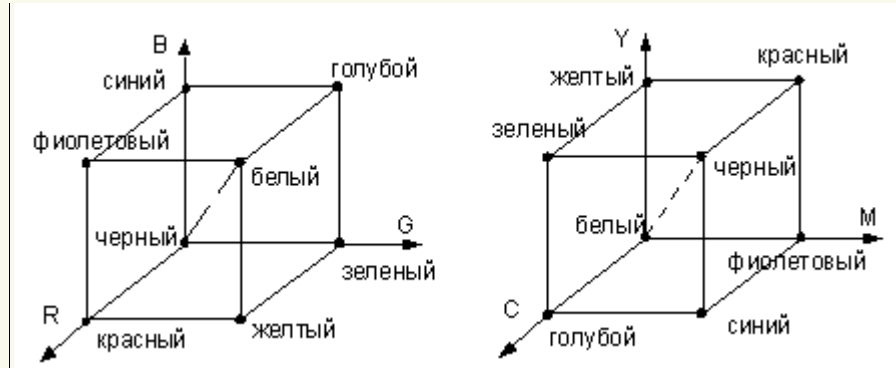


Рис. 3.23

Начало координат в RGB – черный цвет, в CMY – белый. Ахроматические (серые) цвета расположены на главной диагонали. Дополнительные цвета лежат в противоположных вершинах.

Преобразование между пространствами:  $[RGB]=[111]-[CMY]$ .

Однако субъективное восприятие цветов в этих системах описывать неудобно. В обозначениях МКО, RGB, CMY сложно задать цвет, описываемый в привычных в полиграфии или искусстве терминах, например, пастельный красновато-оранжевый.

Художники характеризуют цвет с помощью понятий “разбелы”, “оттенки”, “тона”. Разбелы получаются, если добавить в чистый цвет белый, оттенки – если добавить в него черный, тона – если добавить и белый, и черный цвета.

Это удобно изобразить на треугольнике, на котором представляется один чистый цвет (рис. 3.24). Если отобразить подобным образом графически все цвета, то получится конус с черно-белой осью.

Такая модель называется цветовой системой Оствальда для субъективного представления цвета.

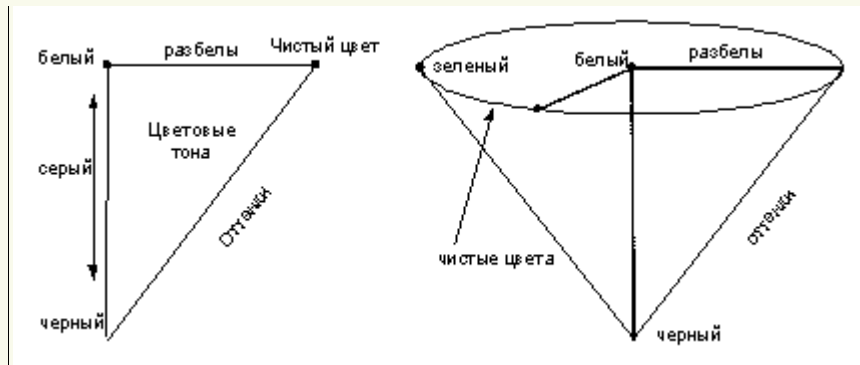


Рис. 3.24

Другие субъективные модели также возникли из практики использования цветов в различных отраслях промышленности и искусства.

Например, модель субъективного восприятия Смита. Она представляется в виде объемного HVS-тела (H - цветовой тон, S - насыщенность, V - светлота). Эта модель получается преобразованием куба в объемный шестигранный конус вдоль черно-белой диагонали (рис. 3.25).

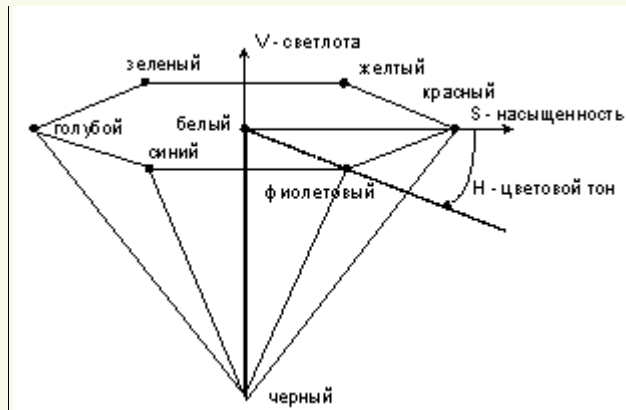


Рис. 3.25

Интенсивность вдоль оси конуса возрастает от 0 до 1. Насыщенность определяется расстоянием от оси, а тон – углом  $0...360^\circ$ , отсчитываемым от красного цвета. Насыщенность меняется от 0 до 1 на границе шестиугольника.

Модель HVS легко соотносится с субъективной моделью Оствальда: чистым цветам соответствуют значения  $V=1, S=1$ ; разбелам –  $S<1$ ; оттенкам –  $V<1$ ; тону –  $S, V<1$  (рис. 3.26).



Рис. 3.26

Преобразования цветowych пространств  $HSV \rightarrow RGB$  и обратно выполняются непосредственно с помощью геометрических соотношений между цветowym шестигранным конусом и кубом.

Субъективных моделей существует несколько, но все они основаны на аналогичных подходах. Например, модель Манселла – это HSV-модель в виде цилиндра. Модель HLS (тон, яркость, насыщенность) представляется в виде двойной шестигранной пирамиды и используется для самосветящихся объектов (рис. 3.27).



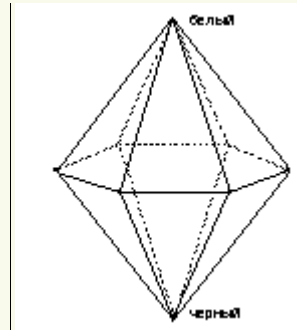


Рис. 3.27

Все такие модели получаются преобразованием, проекцией, вращением основной RGB-модели в виде куба.