

Машинная графика Computer Graphics

Лекция 13.

«Цвет в машинной графике»

План лекции

- Физика света и цвета
- Восприятие цвета человеком
- Системы цветowych координат. Графики МКО
- HSV и HSL системы
- RGB и CMYK системы
- Полосы Маха
- Устройство монитора

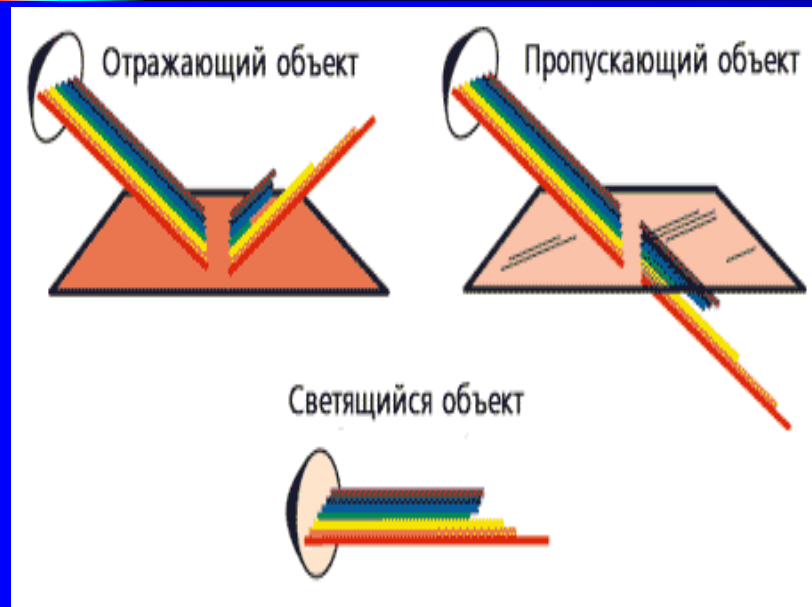
Цвет – зрительное ощущение

Цвет - одно из свойств материальных объектов, воспринимаемое как осознанное зрительное ощущение.

Тот или иной цвет **«присваивается»** человеком объекту в процессе зрительного восприятия этого объекта. В большинстве случаев цветовое ощущение возникает в результате воздействия на глаз потоков видимого излучения (воспринимаемого глазом электромагнитного излучения с длинами волн от 380 до 760 нм).

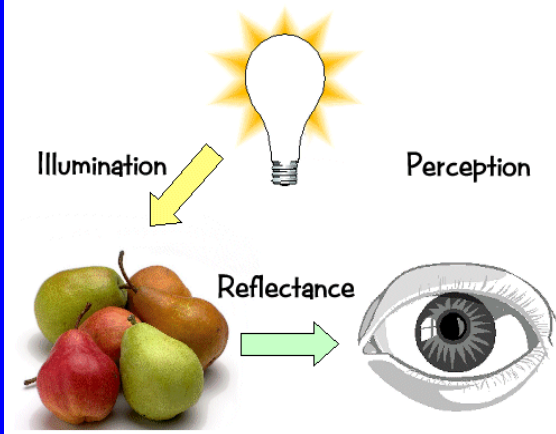
Цвет - чрезвычайно сложная проблема как для физики, так и для физиологии, т.к. он имеет как психофизиологическую, так и физическую природу.

Цвет – зрительное ощущение

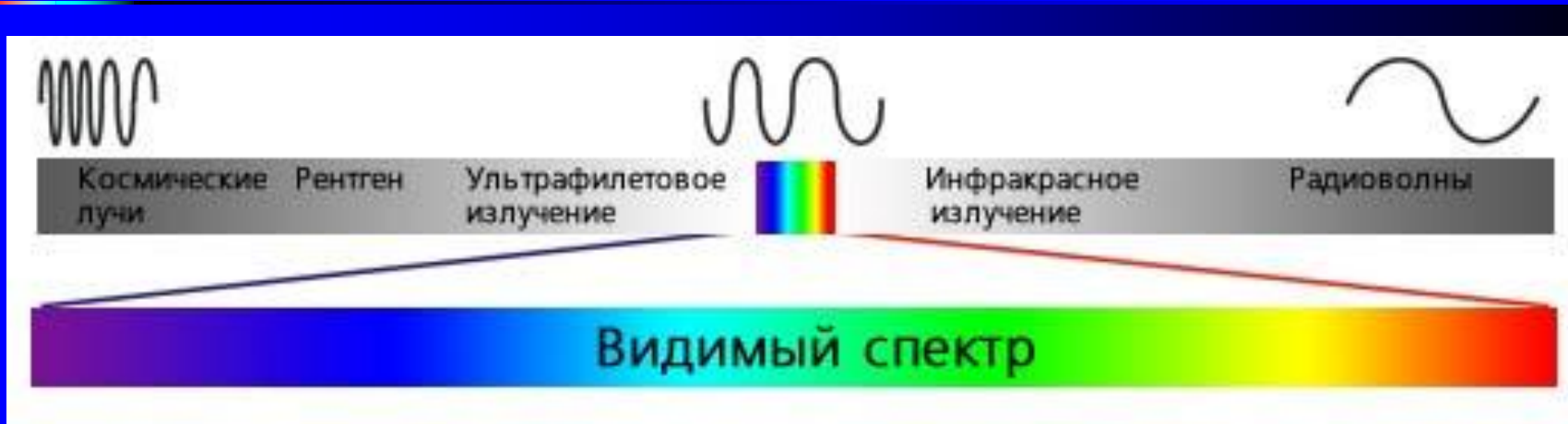


Восприятие цвета зависит от физических свойств света, то есть электромагнитной энергии, от его взаимодействия с физическими веществами, а также от их интерпретации зрительной системой человека.

Зрительная система человека воспринимает либо непосредственно от источника, например электрической лампочки, либо косвенно при отражении от поверхности объекта или преломлении в нем.

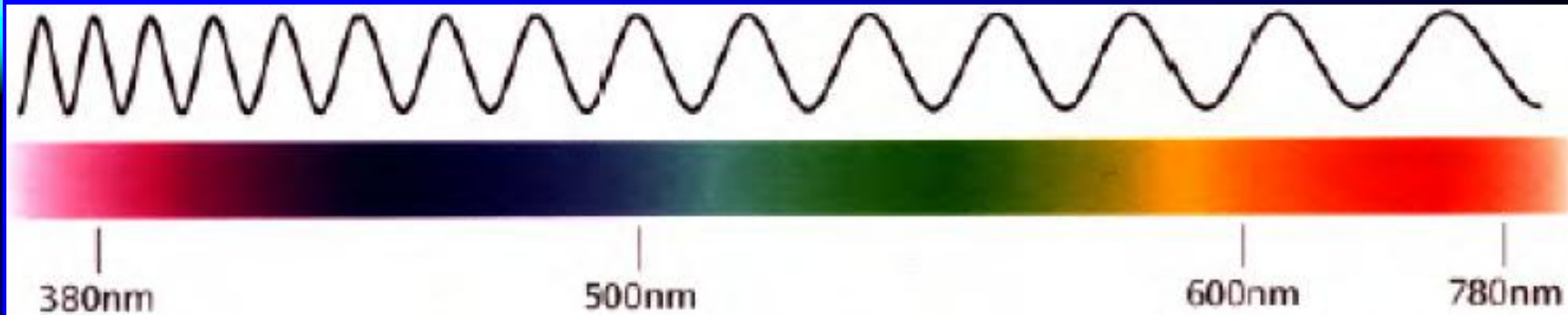


Физика света и цвета



Область электромагнитного спектра, видимая человеческим глазом, занимает диапазон примерно от 400 до 700 нанометров. Этот диапазон составляет всего лишь малую часть огромного спектра электромагнитных волн. Хотя остальную его часть мы не видим, помимо видимых волн человек научился использовать и многие другие невидимые волны: начиная с самых коротких волн — рентгеновских лучей — и кончая длинными волнами, которые улавливаются теле- и радиоприемниками.

Физика света и цвета



Излучения с длинами волн:

от 380 до 470 нм имеют фиолетовый и синий цвет,

от 470 до 500 нм - сине-зеленый,

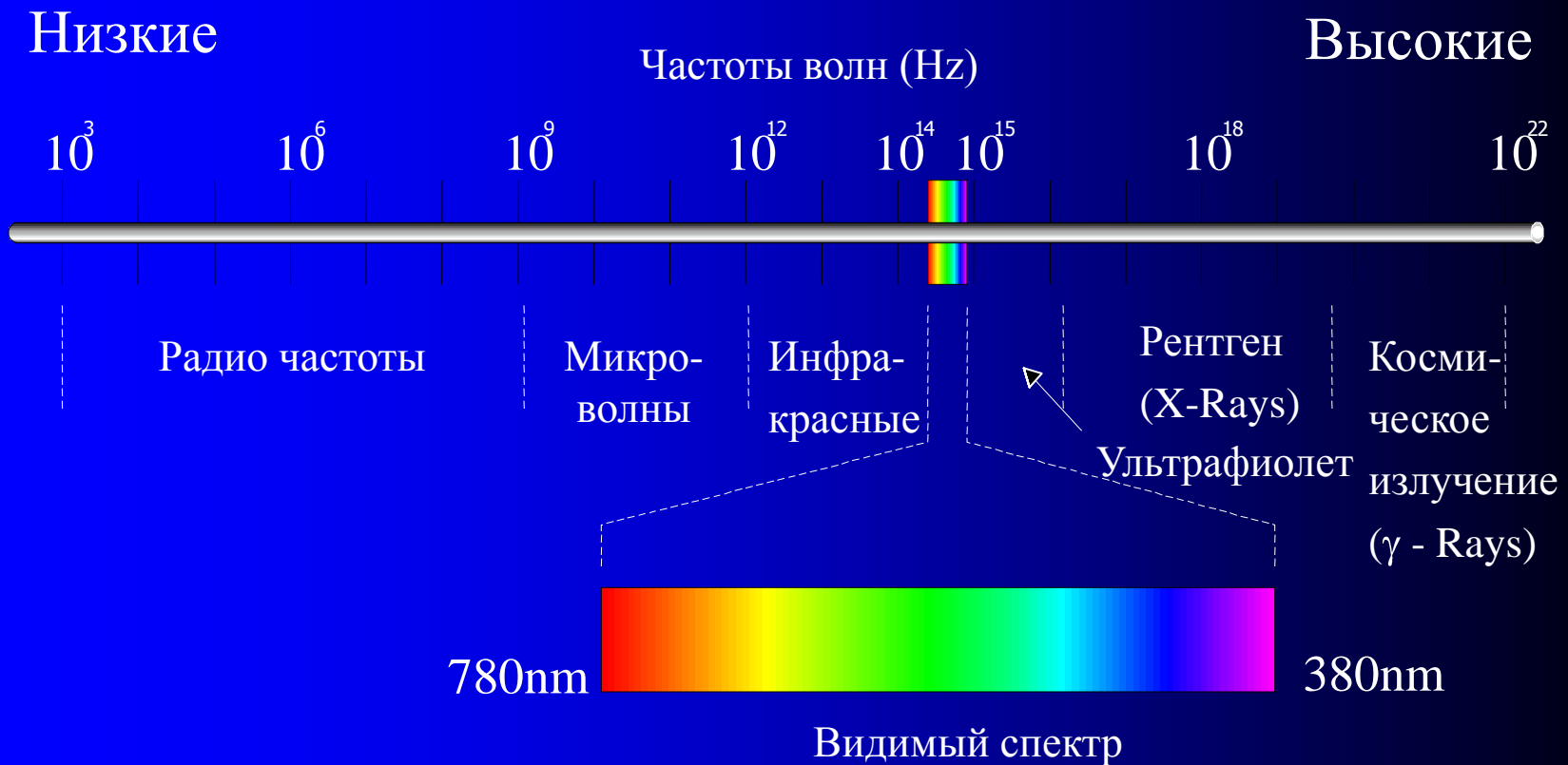
от 500 до 560 нм - зеленый,

от 560 до 590 нм - желто-оранжевый,

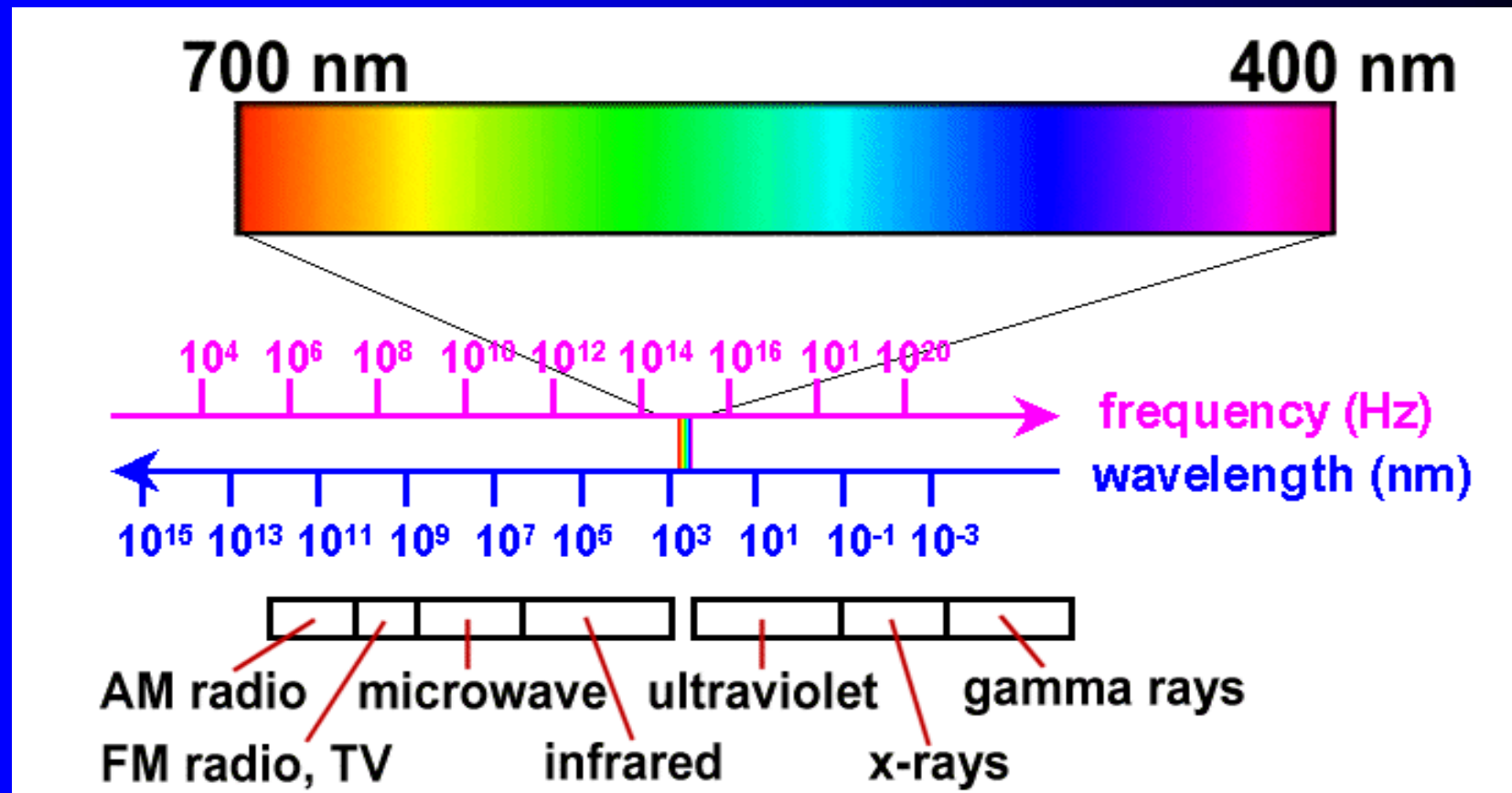
от 590 до 760 нм – красный

(в более мелких участках этих интервалов цвет излучений соответствует различным оттенкам указанных цветов).

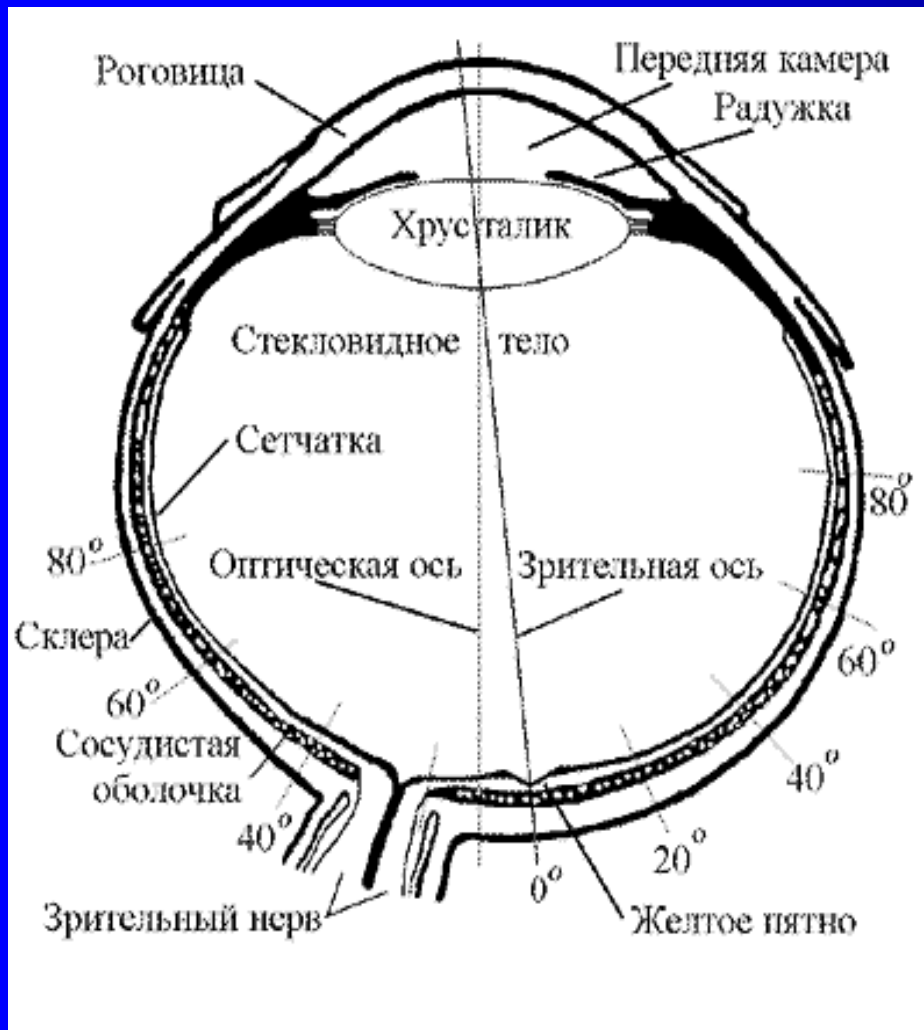
Спектр электромагнитных волн (Electromagnetic Spectrum)



Взаимосвязь частоты и длины волны



Восприятие цвета человеком



На рисунке показан поперечный разрез глазного яблока человека.

Свет попадает в глаз через роговицу и фокусируется хрусталиком на внутренний слой глаза, называемый сетчаткой.

Сетчатка преобразует свет в импульсы в нервных волокнах и состоит из трех слоев клеток..

Восприятие цвета человеком

Информация от светочувствительных рецепторов (колбочек и палочек) передается другим типам клеток, которые соединены между собой. Специальные клетки передают информацию в зрительный нерв. Таким образом волокно зрительного нерва обслуживает несколько светочувствительных рецепторов, т.е. некоторая предварительная обработка изображения выполняется непосредственно в глазу, который по сути представляет собой авангардную часть мозга.

Область сетчатки, в которой волокна зрительного нерва собираются вместе и выходят из глаза, лишена светочувствительных рецепторов и называется **слепым пятном**.

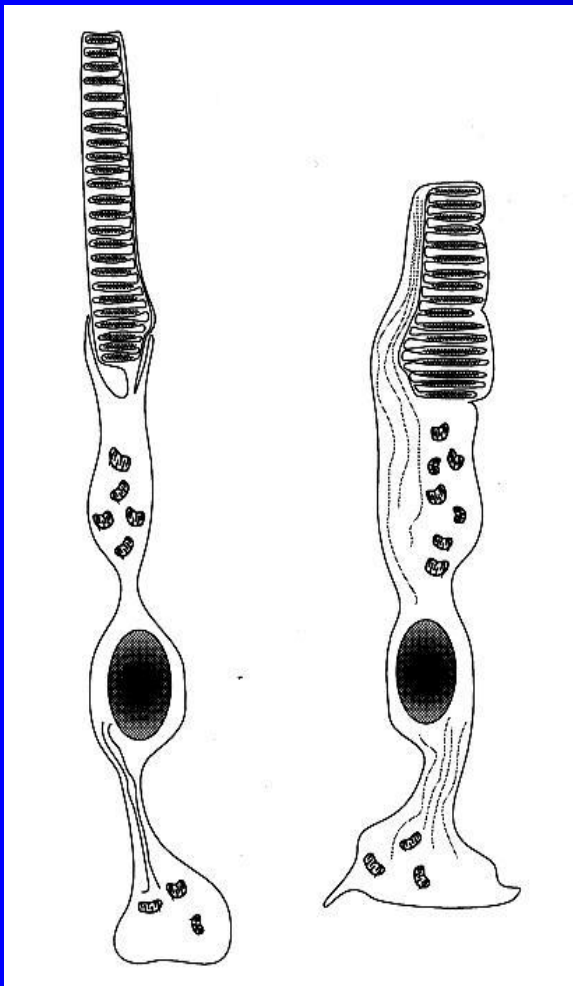
Радужная оболочка действует как диафрагма, изменяя количество света, проходящего в глаз. Диаметр зрачка меняется от ~ 2 мм (при ярком свете) до ~ 8 мм (при малой освещенности).

Палочки чувствительны к очень низким световым уровням, но достигают своего наибольшего выхода только при умеренной световой интенсивности. Поэтому они дают постоянный выход независимо от увеличений в световом уровне. Колбочки менее чувствительны, но могут обрабатывать большие интенсивности света.

Световой чувствительный пигмент в палочках, названный **родопсин**, является белковой связью в форме витамина А. Поглощение одиночного фотона света заставляет молекулу родопсина изменяться от низкой энергии до высокоэнергетической формы. Это малое изменение энергии значительно усиливается каскадом химических реакций для производства сигнала возбуждения. В отличие от большинства нервных клеток, которые передают импульсы в цифровом виде (вкл\выкл), **клетки рецептора выдают аналоговый сигнал о световой интенсивности подобно экспонометру**.

На низких световых интенсивностях, когда глаз адаптирован к темноте, активны только палочки. Это называется ночной системой зрения, повышенная чувствительность **в зеленой области (510 нм)**. В более ярком свете палочки не работают - активны колбочки; максимальная эффективность такой дневной системы зрения сдвигается в желтую/зеленую область (**555 нм**). Этот эффект назван **сдвигом Пуркинье**.

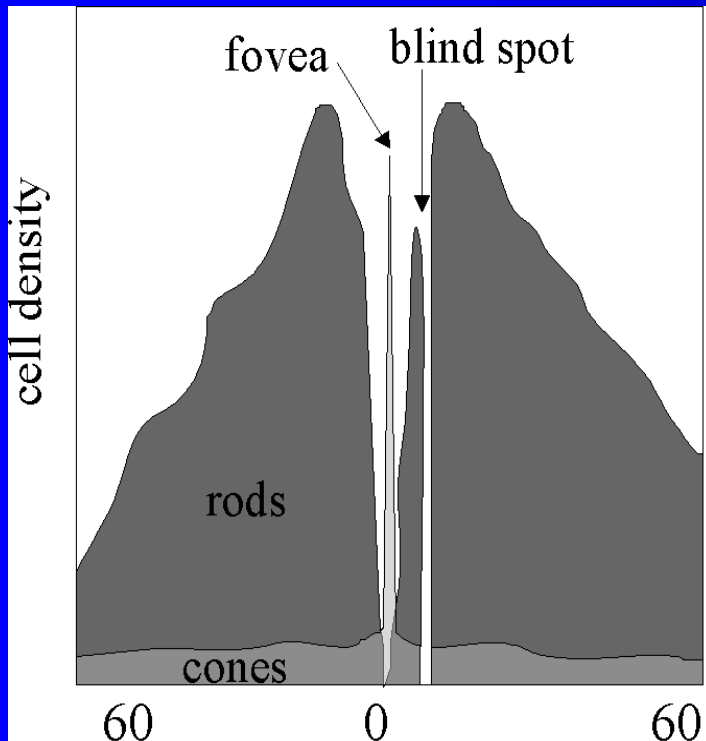
Восприятие цвета человеком



Внутренний слой сетчатки глаза содержит два типа светочувствительных рецепторов, занимающих область с углом охвата $\approx 170^\circ$ относительно зрительной оси:

- **100 млн. палочек** (длинные и тонкие рецепторы, воспринимающие ахроматический свет, т.е. предназначены для «ночного» зрения),
- **6.5 млн. колбочек** (короткие и толстые рецепторы регистрирующие цвет, т.е. особо полезные для «дневного» зрения).

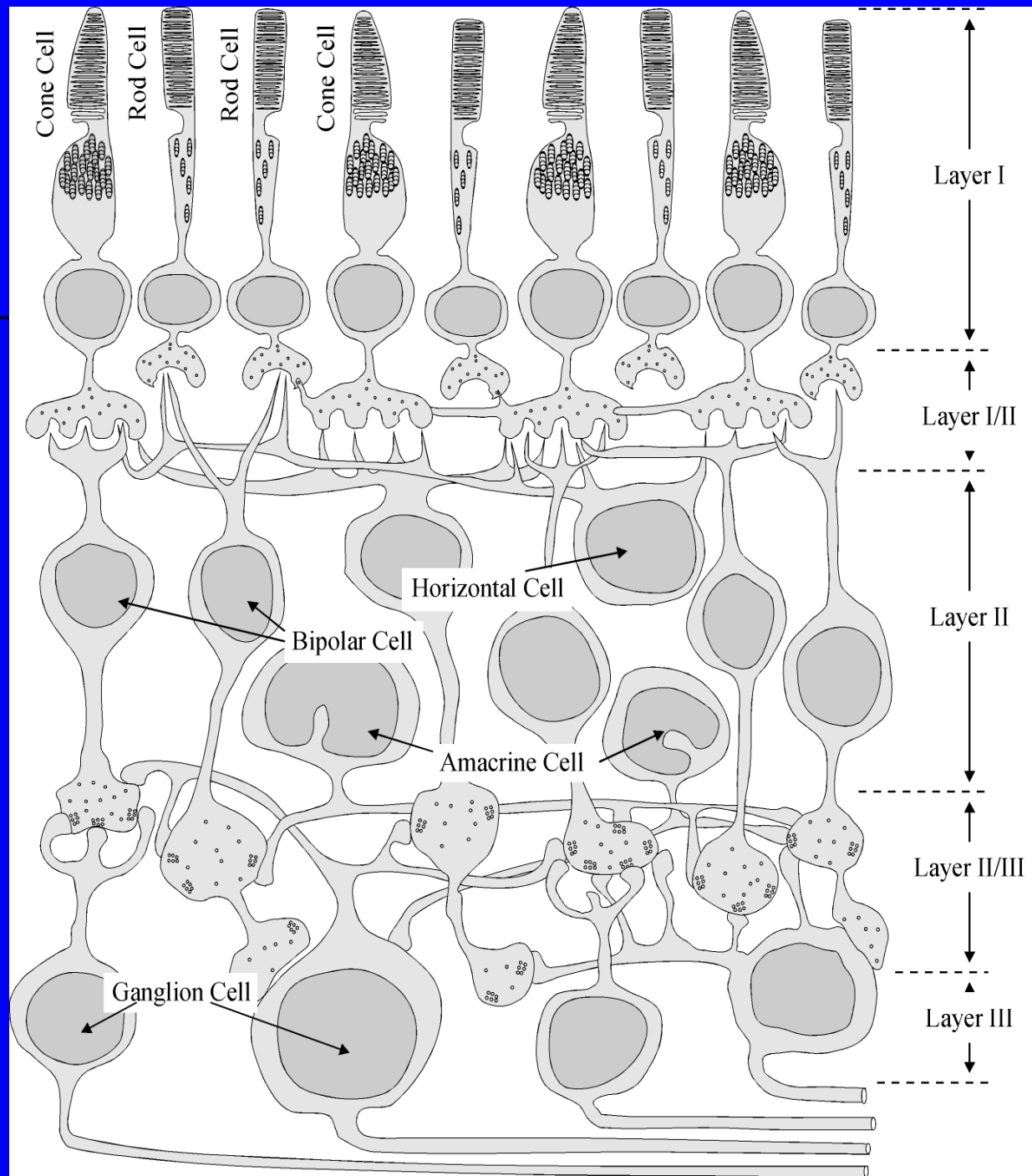
Восприятие цвета человеком



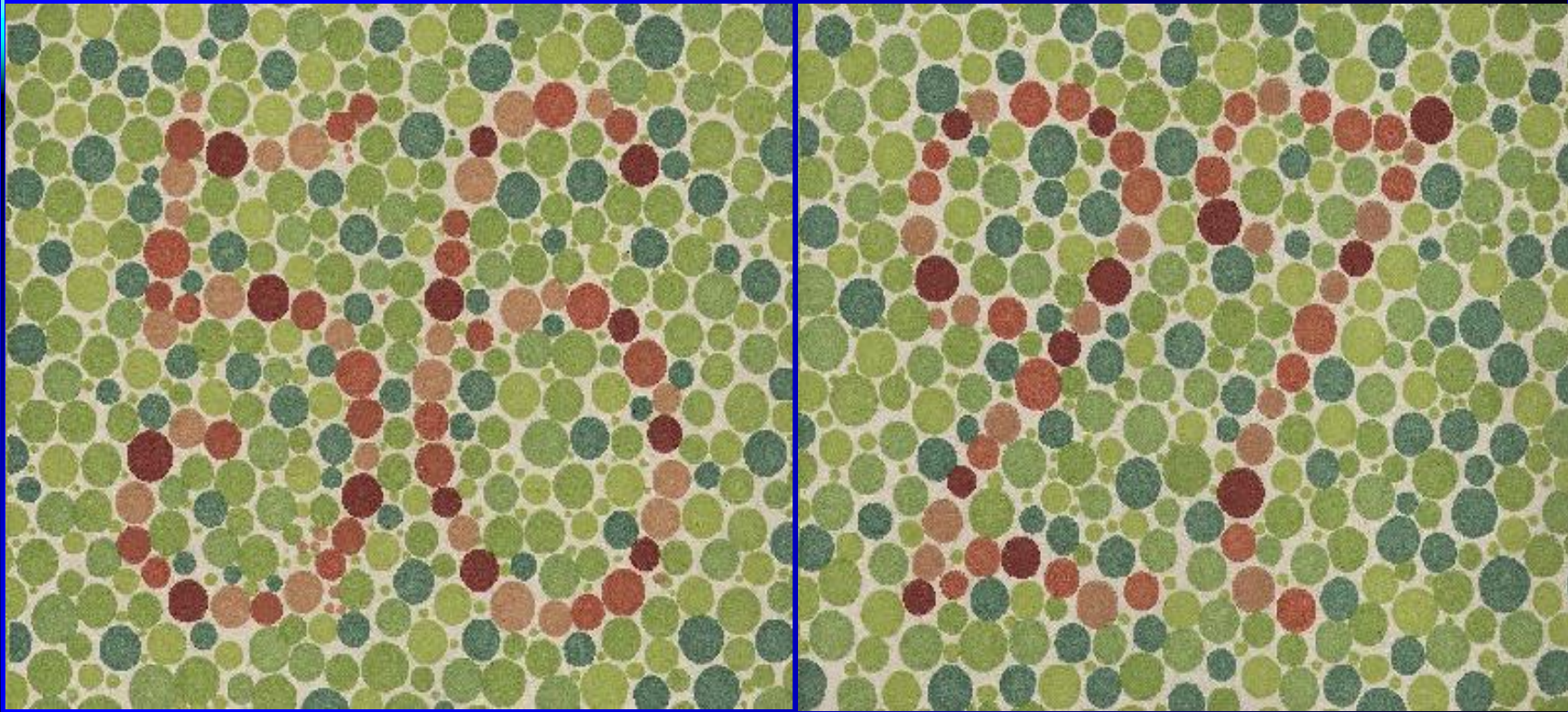
Плотность распределения колбочек и палочек по сетчатке в зависимости от удаления от зрительной оси

- **RODS** – палочки (100 млн.): чувствительность к интенсивности света (яркости)/освещённости
 - **CONES** – колбочки (6,5 млн.): чувствительность к цвету/длине волны/частоте излучения
 - Распределение клеток по сетчатке не равномерно:
 - Колбочки абсолютно доминируют в области жёлтого пятна (**fovea**).
 - Палочки доминируют в периферийных областях сетчатки.
- ⇒ Цвет лучше всего определяется в области жёлтого пятна.
- ⇒ Освещённость лучше всего – периферическим зрением.

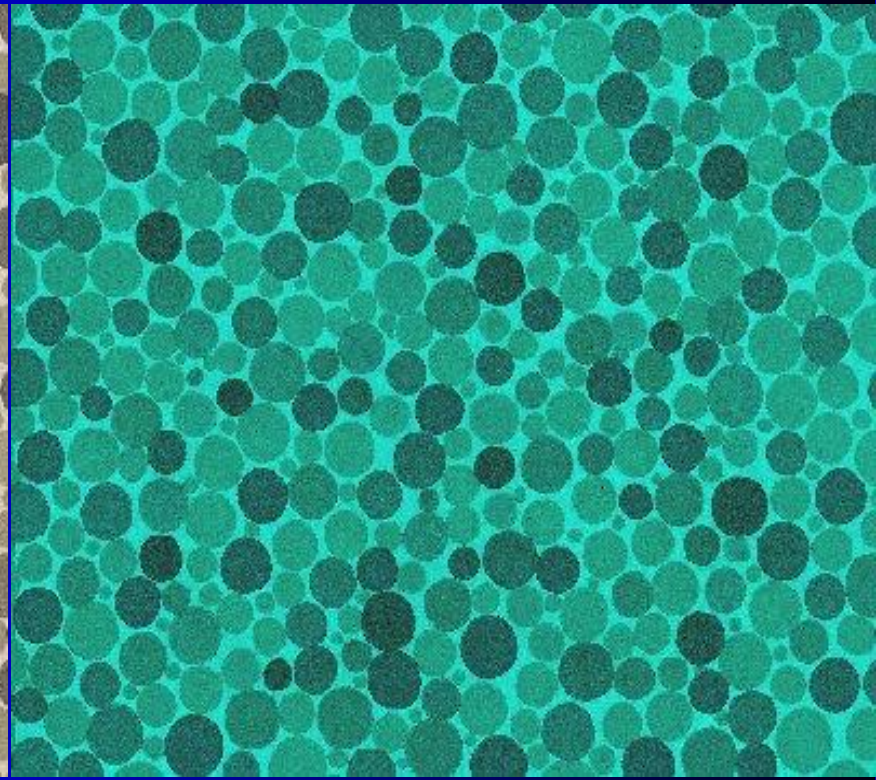
Сетчатка (Retina)



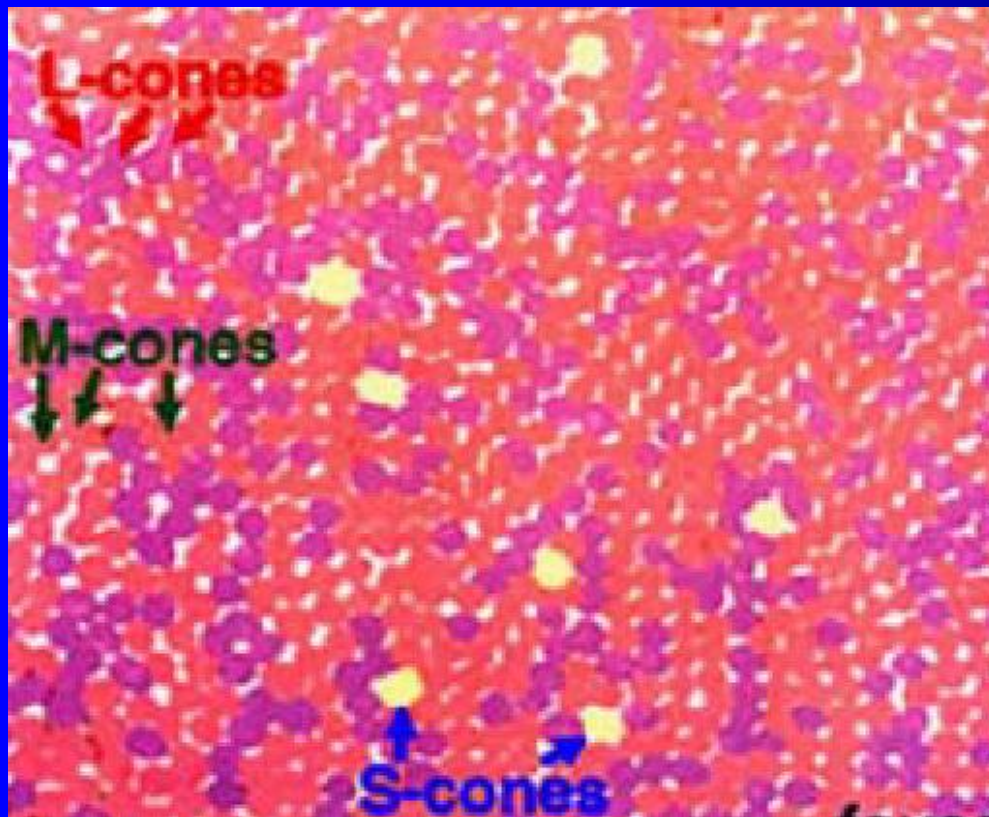
Восприятие цвета человеком



Восприятие цвета человеком



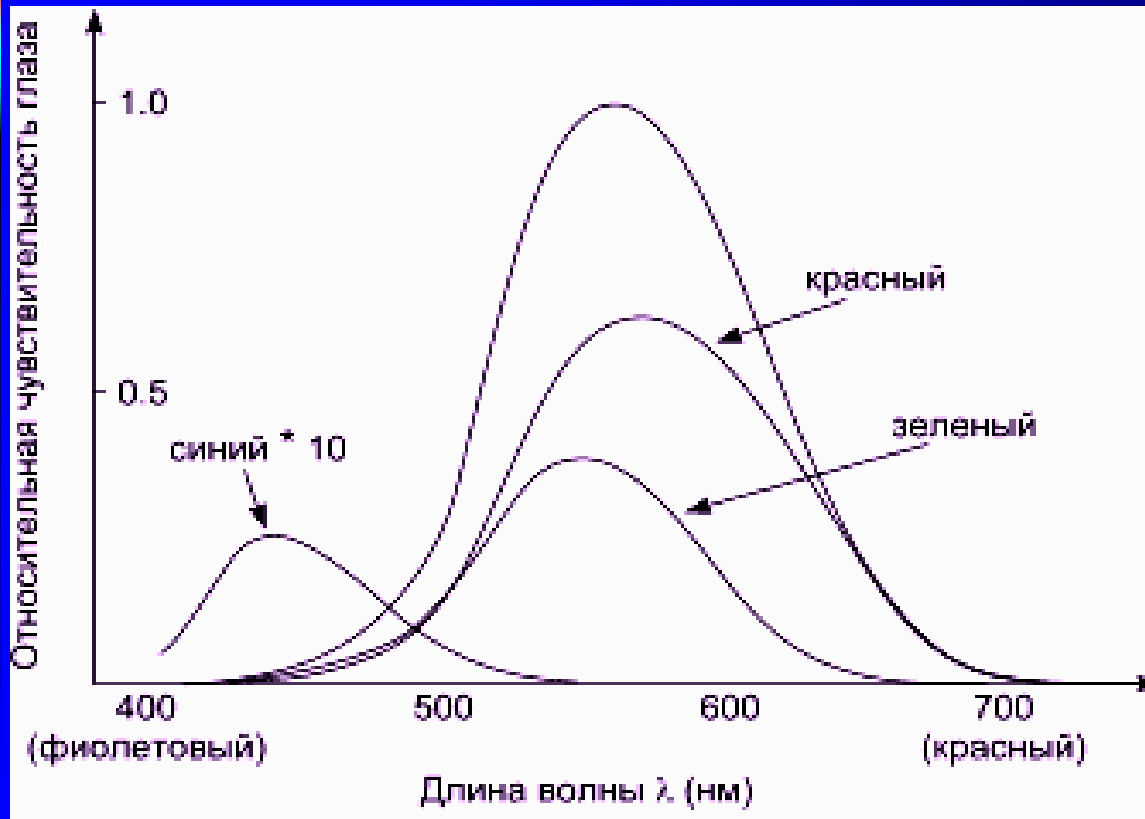
Восприятие цвета человеком



Три типа колбочек, реагирующие на:

- длинные волны (красные) L-колбочки,
- средние волны (зелёные) M-колбочки,
- короткие волны (синие) S-колбочки.

Восприятие цвета человеком



Функция спектральной чувствительности глаза. Она может использоваться как мера световой энергии/ интенсивности с учетом свойств глаза.

Светлота или яркость объекта зависит от относительной чувствительности глаза к разным длинам волн.

Из рисунка видно, что при дневном свете чувствительность глаза максимальна при длине волны порядка 550 нм, а на краях види-мого диапазона спектра она резко падает.

Восприятие цвета человеком



a



b

Психофизическими эквивалентами цветового тона, насыщенности и светлоты являются доминирующая длина волны, чистота и яркость. Электромагнитная энергия одной длины волны в видимом спектре дает **монохроматический цвет**. На рисунке **a** изображено распределение энергии монохроматического света с длиной волны **525 нм**, а на рисунке **b** — для белого света с энергией E_2 и одной доминирующей длины волны **525 нм** с энергией E_1 .

Восприятие цвета человеком



a



b

На рисунке *b* цвет определяется доминирующей длиной волны, а чистота — отношением E_1 и E_2 . Значение E_2 — это степень разбавления чистого цвета с длиной волны 525 нм белым: если E_2 приближается к нулю, то чистота цвета приближается к 100%, а если E_2 приближается к E_1 , то свет становится близким к белому и его чистота стремится к нулю. **Яркость** пропорциональна энергии света и рассматривается как интенсивность на единицу площади.

Восприятие цвета человеком



a



b



Приблизительные цвета, соответствующие указанным излучениям

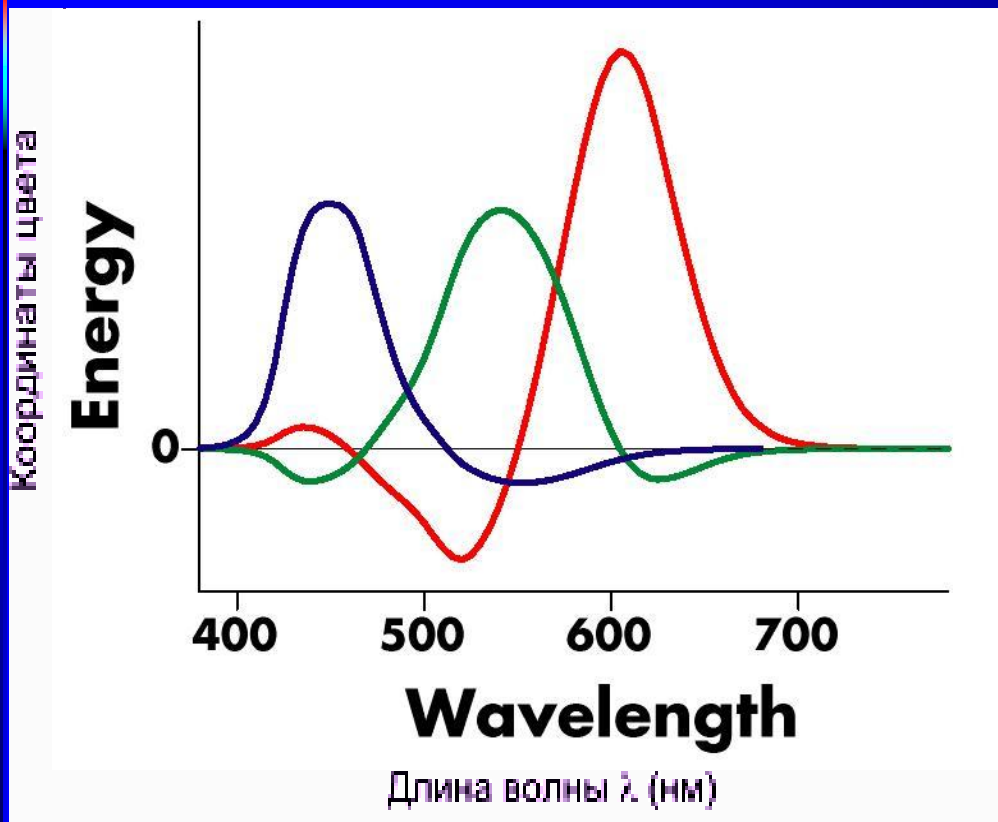
Законы Грассмана

—глаз реагирует на **три различных стимула**, что подтверждает трехмерность природы цвета. В качестве стимулов можно рассматривать, например, доминирующую длину волны (цветовой фон), чистоту (насыщенность) и яркость (светлоту) или красный, зеленый и синий цвета;

—четыре цвета всегда линейно зависимы, то есть $cC = rR + gG + bB$, где $c, r, g, b \neq 0$. Следовательно, для смеси двух цветов $(cC)_1$ и $(cC)_2$ имеет место равенство $(cC)_1 + (cC)_2 = (rR)_1 + (rR)_2 + (gG)_1 + (gG)_2 - (bB)_1 + (bB)_2$. Если цвет C_1 равен цвету C и цвет C_2 равен цвету C , то цвет C_1 равен цвету C_2 независимо от структуры спектров энергии C, C_1, C_2 ;

—если в смеси **трех цветов один непрерывно изменяется**, а другие остаются постоянными, то цвет смеси будет меняться непрерывно, то есть **трехмерное цветовое пространство непрерывно**.

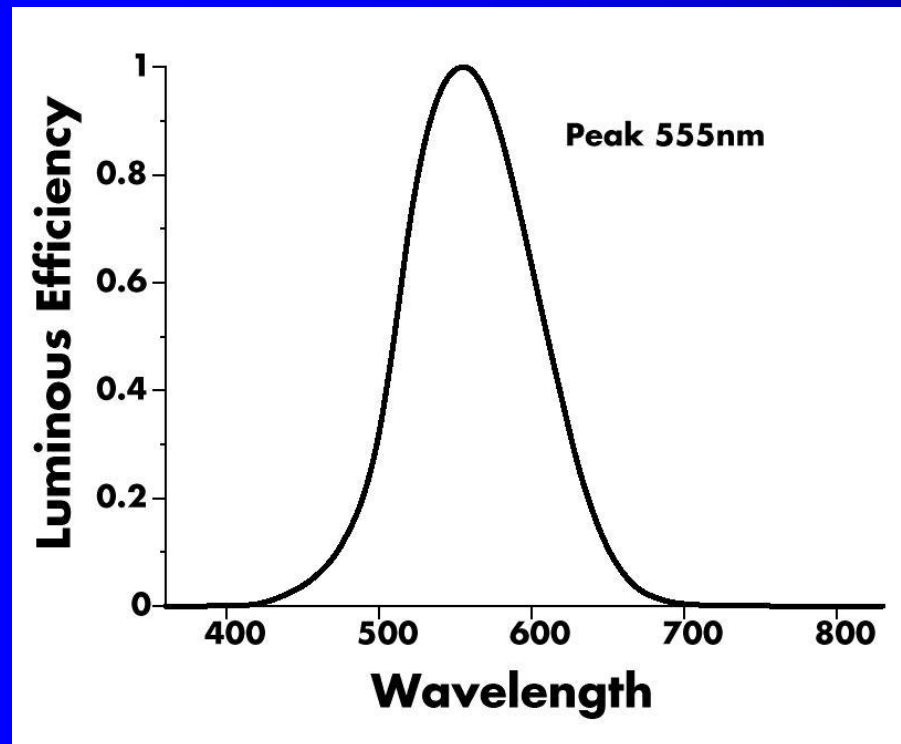
Восприятие цвета человеком



Функции r , g , b уравнения по цвету для монохроматических потоков света с длинами волн 436, 546 и 700 нм.

С помощью источников r , g , b можно уравнивать все длины волн видимого спектра. При всех длинах волн, кроме окрестности 700 нм, одна из функций всегда отрицательна. Это соответствует добавлению инструментального (обратного) света к контрольному. Изучением этих функций занимается колориметрия.

Освещённость (Luminance)



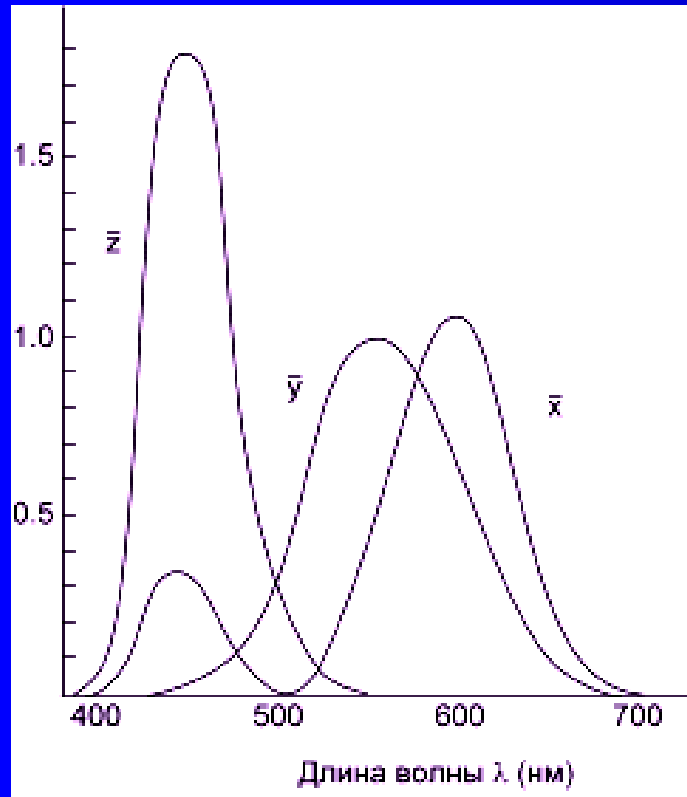
Сравнивая источник хроматического света, с ахроматическим, необходимо вычислить его эффективную освещённость

- Освещённость (Luminance)
 $Y = .30R + .59G + .11B$

Данное выражение используется для перевода цветного сигнала в полутоновый (чёрно-белое TV, например).

- Светлота (Lightness):
 $L^* = Y^{1/3}$

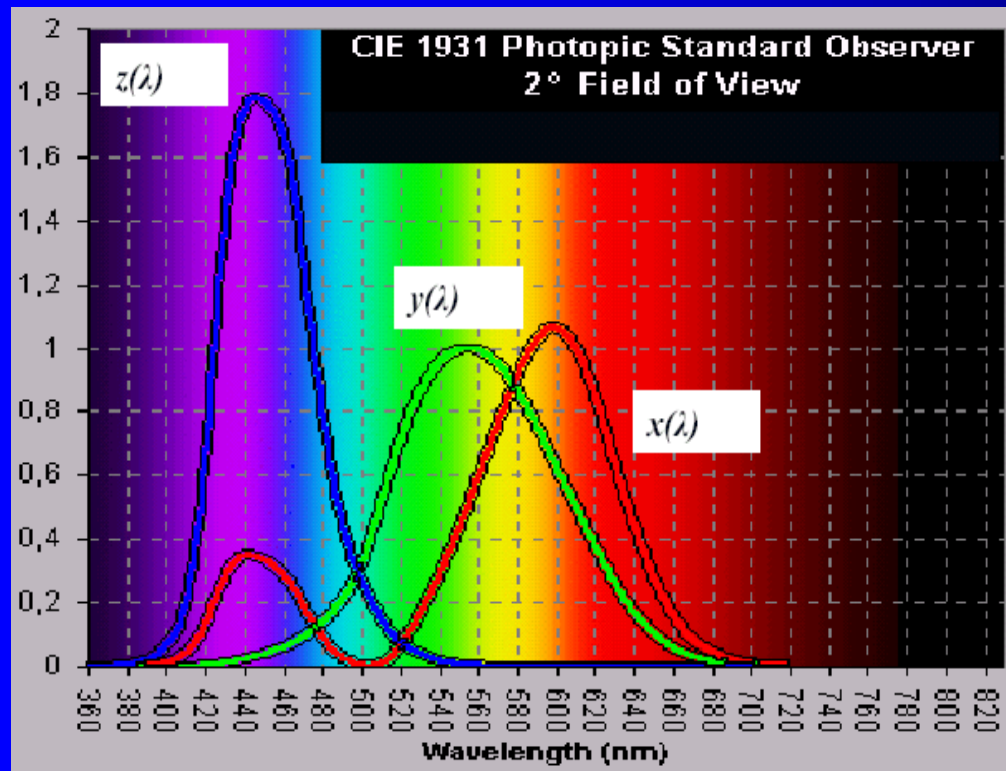
Графики МКО



В 1931 г. в Англии состоялось заседание **Международной комиссии по освещению (МКО)** (Commission International de l'Eclairage), на котором обсуждались международные стандарты определения и измерения цветов. В качестве стандарта был выбран двумерный цветовой график МКО 1931 г. и набор из трех функций реакции глаза, позволяющий исключить отрицательные величины и более удобный для обработки. Основные цвета МКО получены из стандартных функций реакции глаза (т.е. эмпирически).

Цветовое пространство МКО (CIE Colour Space)

С целью использования только положительных коэффициентов основных цветов МКО определило 3 гипотетических источника света x , y и z , для замены ими красного, зелёного и голубого цветов соответственно.



При этом Y специально сделали соответствующей чувствительности глаза к освещённости.

В общем виде функции X, Y, Z формируют 3D цветовое пространство XYZ .

Цветовое пространство XYZ

Цветовые координаты XYZ

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.77 & 1.75 & 1.13 \\ 1.00 & 4.59 & 0.06 \\ 0.00 & 0.57 & 5.59 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_\lambda \\ G_\lambda \\ B_\lambda \end{bmatrix}$$

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

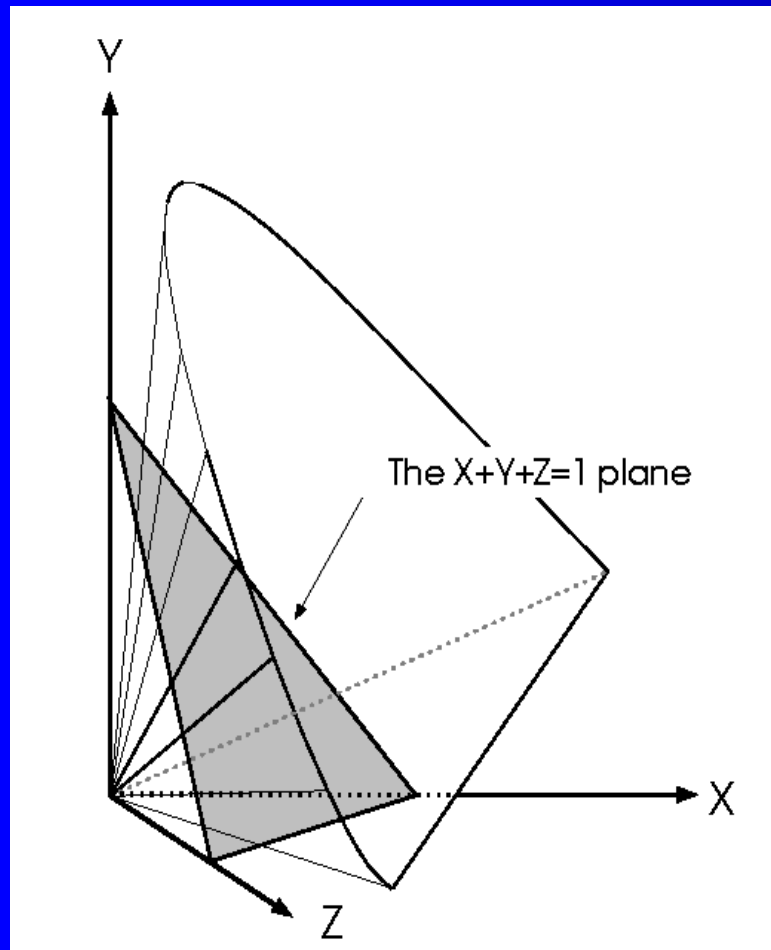
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

Координаты,
нормализованные
по общему уровню
световой энергии.

Часто удобнее работать с 2D цветовым пространством, поэтому 3D цветовое пространство проецируется на плоскость $X+Y+Z=1$, в которой получают

диаграмму цветности.

Отношения между пространством XYZ и диаграммой цветности



Пространство XYZ и проекции

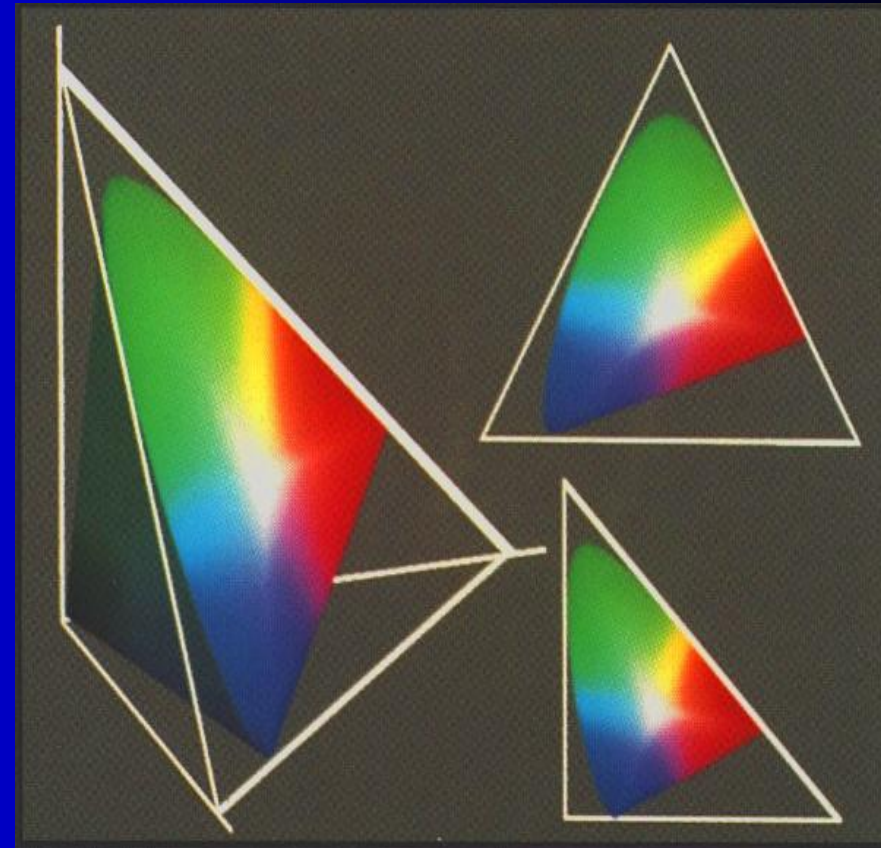
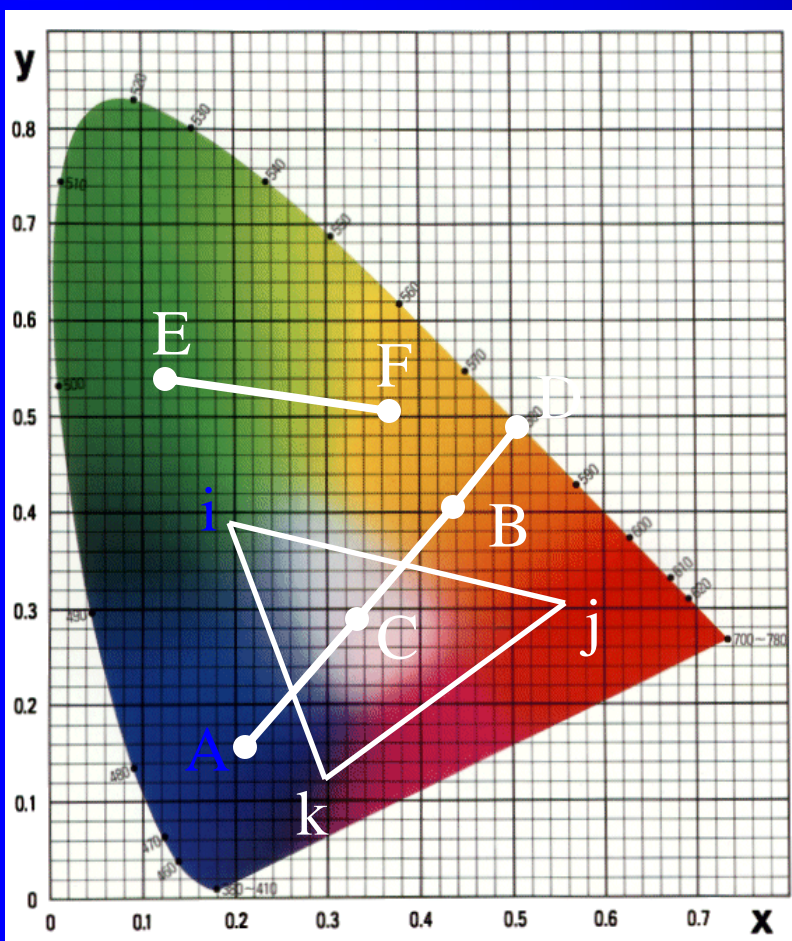


Диаграмма цветности. (Chromaticity Diagram)



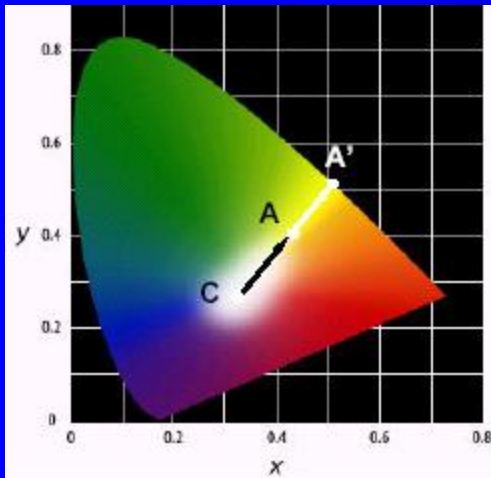
S – проекция «белого» цвета и близка по координатам к $x=y=z=1/3$

Доминирующая длина волны для некоторого цвета может быть получена из диаграммы следующим образом. Проводим прямую из **S** в требуемую точку например **B**, и там где она пересекает край диаграммы – определяем длину волны - 580nm для **B**.

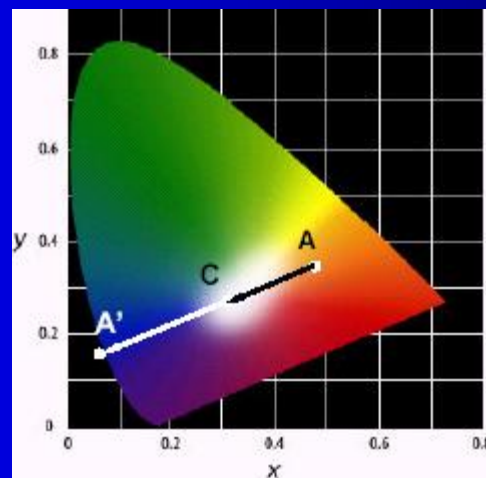
A и **B** могут быть смешаны для получения любого цвета на прямой **AB**, аналогично для **EF**.

Аналогично для трёх точек – **ijk**, позволяют получить любой цвет из Δ .

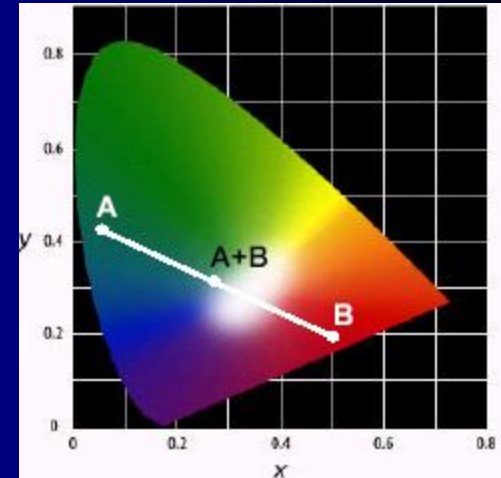
Диаграмма цветности. (Chromaticity Diagram)



Определение
доминирующей
длины волны



Определение
дополняющей
длины волны



Суммирование
цветов с коэф. 0,5

Цветовой охват устройств (device colour gamut)

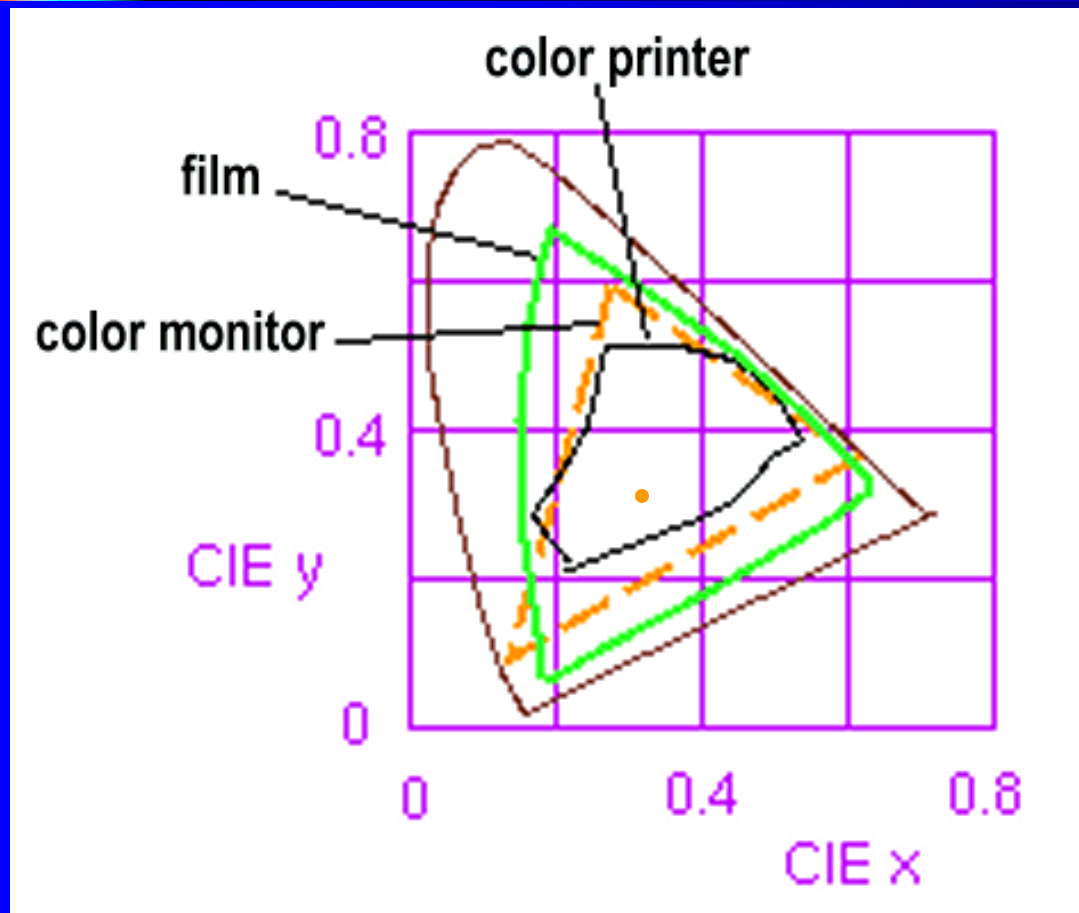
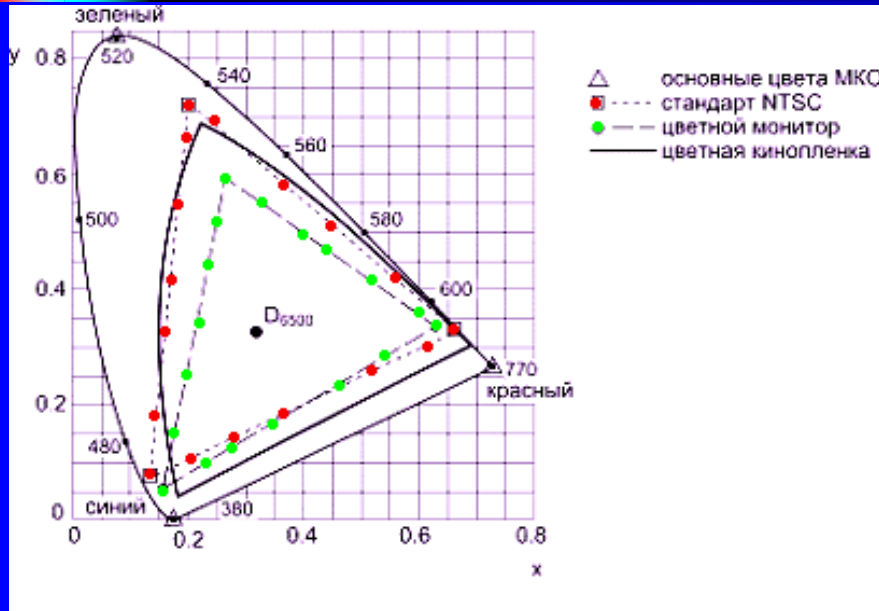


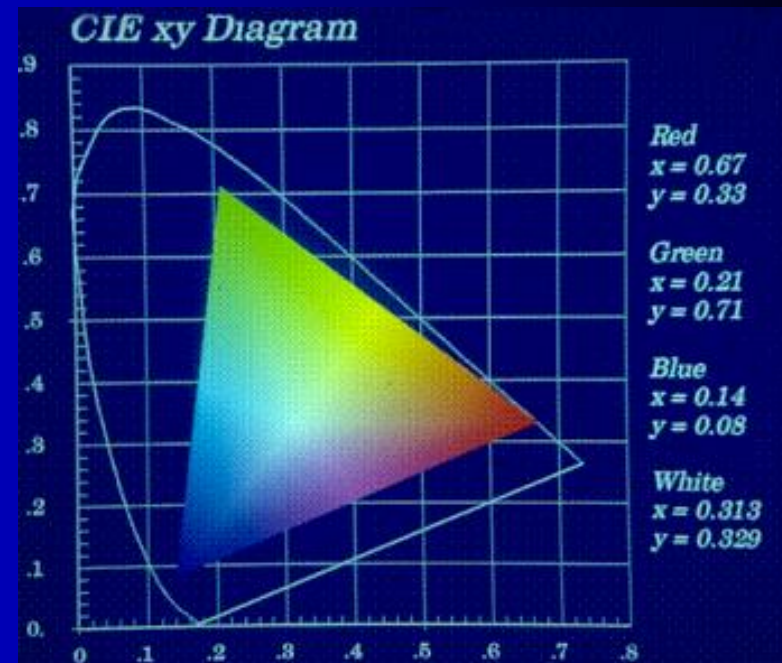
Диаграмма цветности может быть использована для сравнения цветового охвата различных устройств. Например, цветной принтер не может воспроизвести все цвета цветного монитора. Точно так же любая тройка цветов не может передать все видимые цвета.

Цветовой охват устройств (device colour gamut)



Следует заметить, что охват цветной плёнки не имеет треугольной формы и что он шире, чем охват у цветного монитора; то есть некоторые цвета, полученные на киноплёнке, нельзя воспроизвести на телеэкране.

Для сравнения изображены стандарт цветного телевидения NTSC, цветной монитор и система СМУ, приведенная к координатам МКО (применяется в цветном кино).



Цветовые системы координат (Модели цвета)

При качественном описании цвета используется 3 субъективных атрибута: **цветовой тон, насыщенность и светлота**.

Наиболее важный – **цветовой тон/оттенок (преобладающая частота)**, ассоциируется у человека с окраской предмета определённым типом пигмента или красителя.

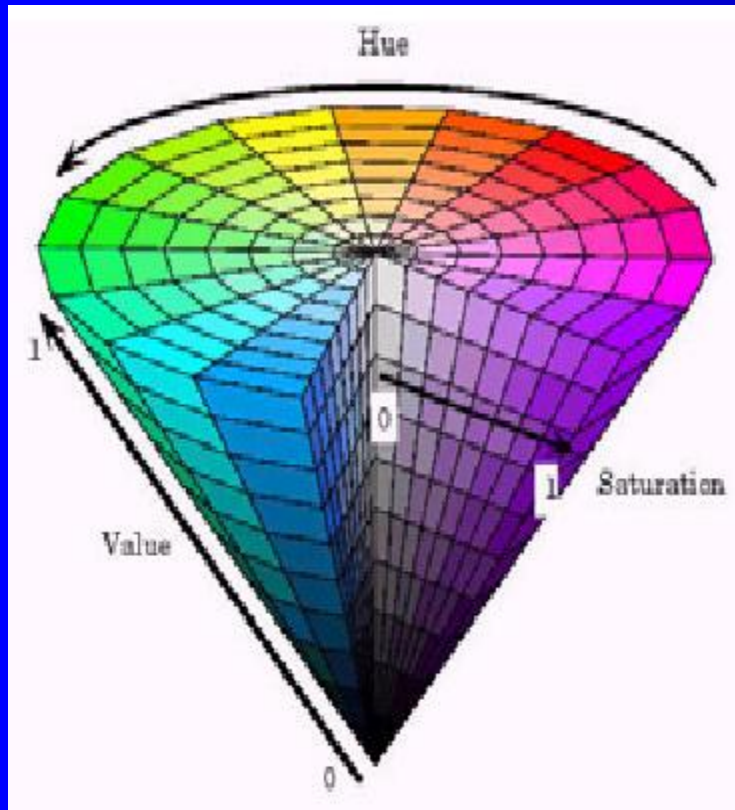
Насыщенность/чистота – характеризует степень (силу) или уровень выраженности цветового тона. Этот параметр ассоциируется с количеством (концентрацией) пигмента(краски) или степенью разбавления краски «белым» цветом.

Светлота/яркость – отражает представление об интенсивности как о факторе не зависящем от цветового тона и насыщенности и соответствует суммарной полученной лучевой энергии.

Интенсивность – мера потока мощности, который излучается или падает на поверхность (выражается в Вт/м²).

Цветность – термин, описывающий комбинированное (суммарное) восприятие двух свойств – чистоту и цветовой тон.

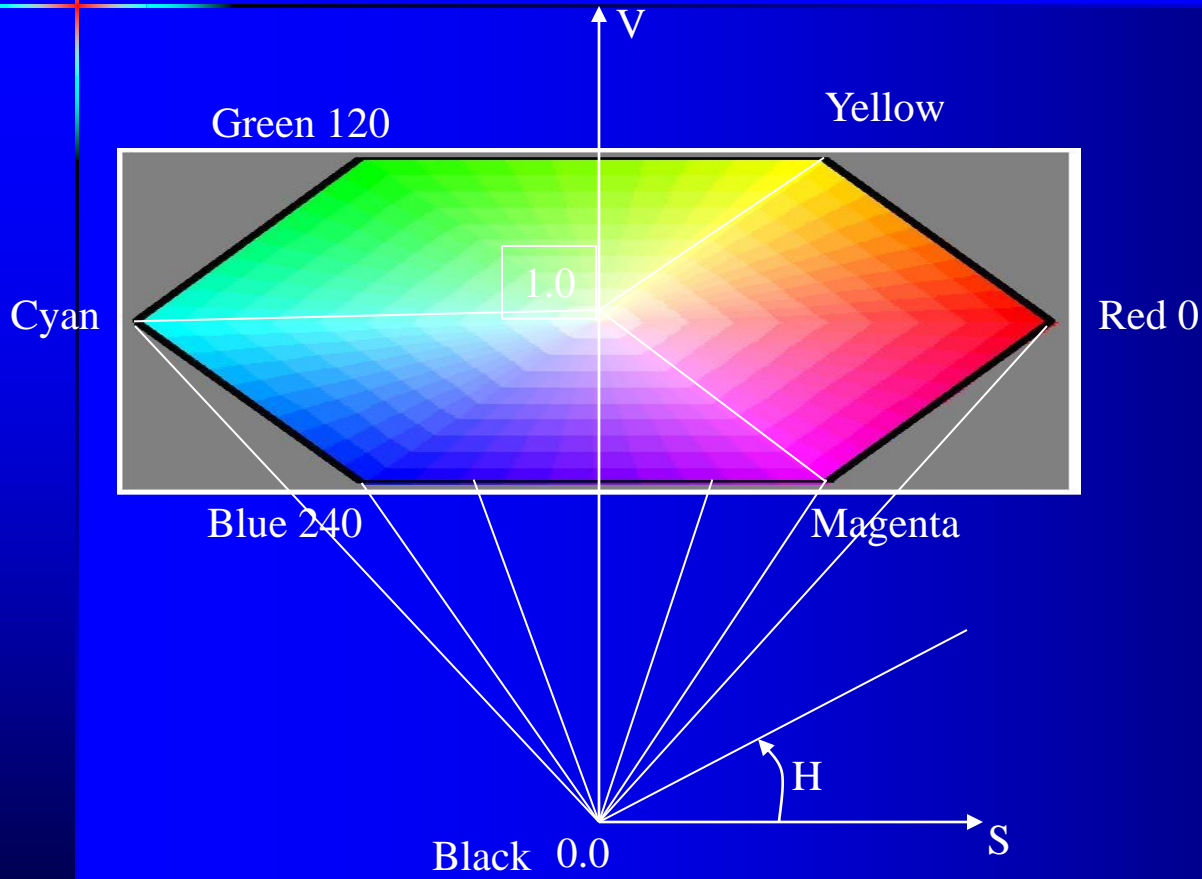
Модель HSV



Модель **HSV** – ближе всего к интуитивному описанию цвета:

Hue – цветовой тон,
Saturation – насыщенность,
Value – интенсивность.

Модель HSV (The HSV Colour Space)



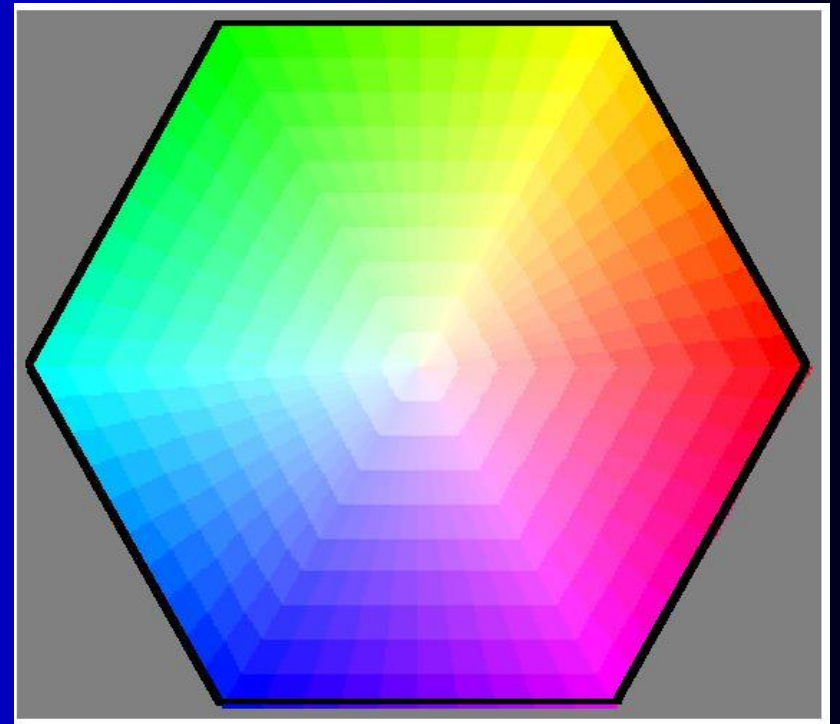
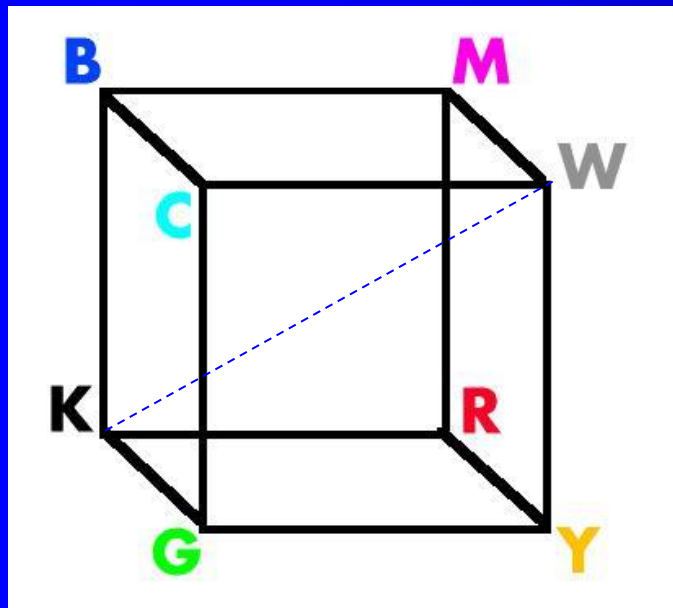
H – **Hue**, or the colour of the pure pigment.

S – **Saturation** of the colour.

V – **Value**, or brightness.

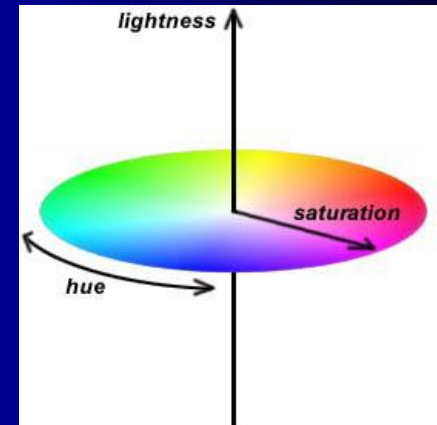
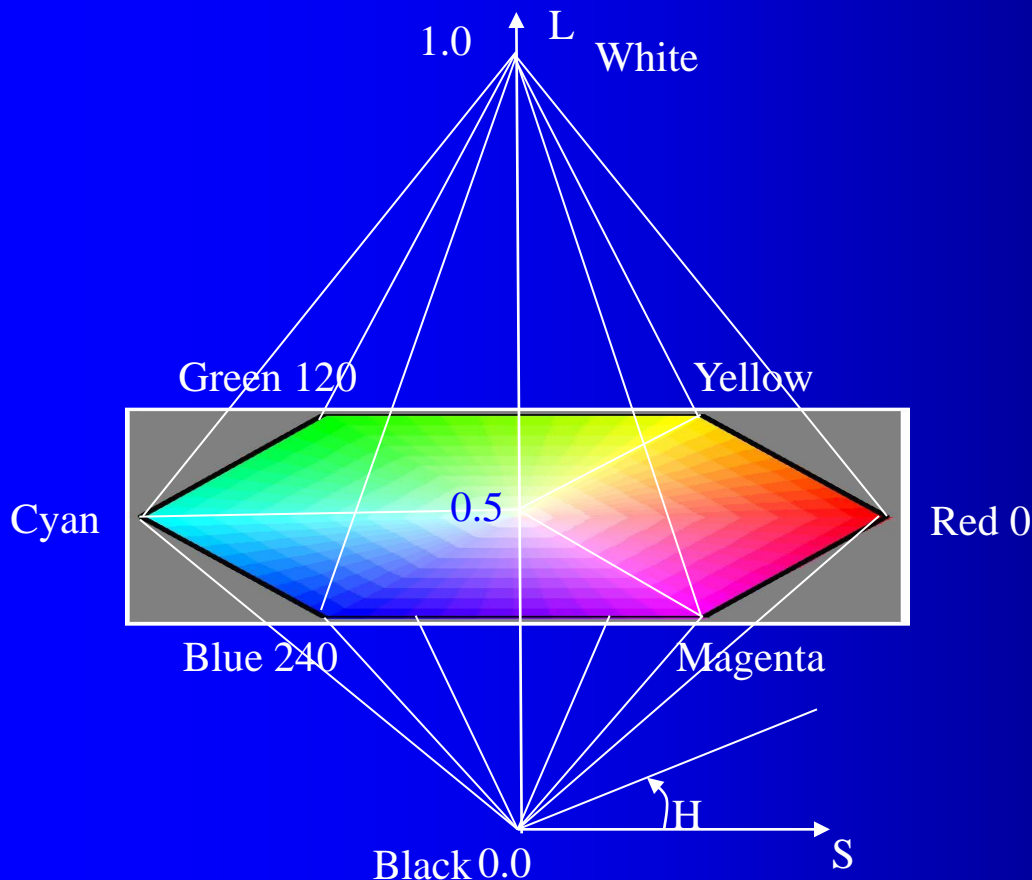
Если $V = 0$, H – не определено.

Модель HSV (The HSV Colour Space)



Шестиугольник – диагональное сечение 3D куба цвета.

Модель HSV (The HSL Colour Space)



H – Hue, or the colour of the pure pigment.

S – Saturation of the colour.

L – Lightness, or brightness.

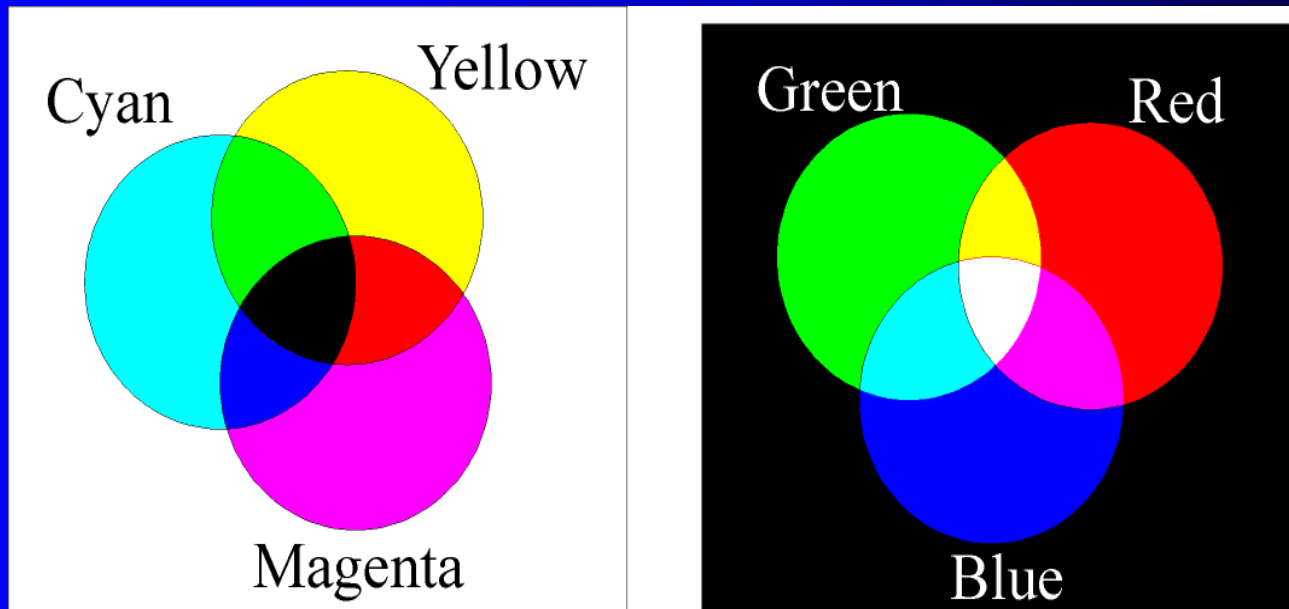
Если $L = 0$ или 1 , то H – не определён.

Максимальная насыщенность достигается при уровне

$L = 0.5$

Цветовые системы координат (Модели цвета)

Интуитивные модели плохо применимы в цветных устройствах. Поэтому в машинной графике применяются две системы смешения основных цветов: аддитивная — красный, зеленый, синий (RGB) и субтрактивная — голубой, пурпурный, желтый (CMY). Цвета одной системы являются дополнительными к другой: голубой — к красному, пурпурный — к зеленому, желтый — к синему.



Аддитивные и субтрактивные цвета

Аддитивный цвет (от англ. add - добавлять, складывать) получается при соединении лучей света разных цветов. В этой системе отсутствие всех цветов представляет собой черный цвет, а присутствие всех цветов - белый. Система аддитивных цветов работает с излучаемым светом, например, от монитора компьютера. В этой системе используются три основных цвета: **красный, зеленый и синий (RGB)**. Если их смешать друг с другом в равной пропорции, они образуют белый цвет, а при смешивании в разных пропорциях - любой другой.

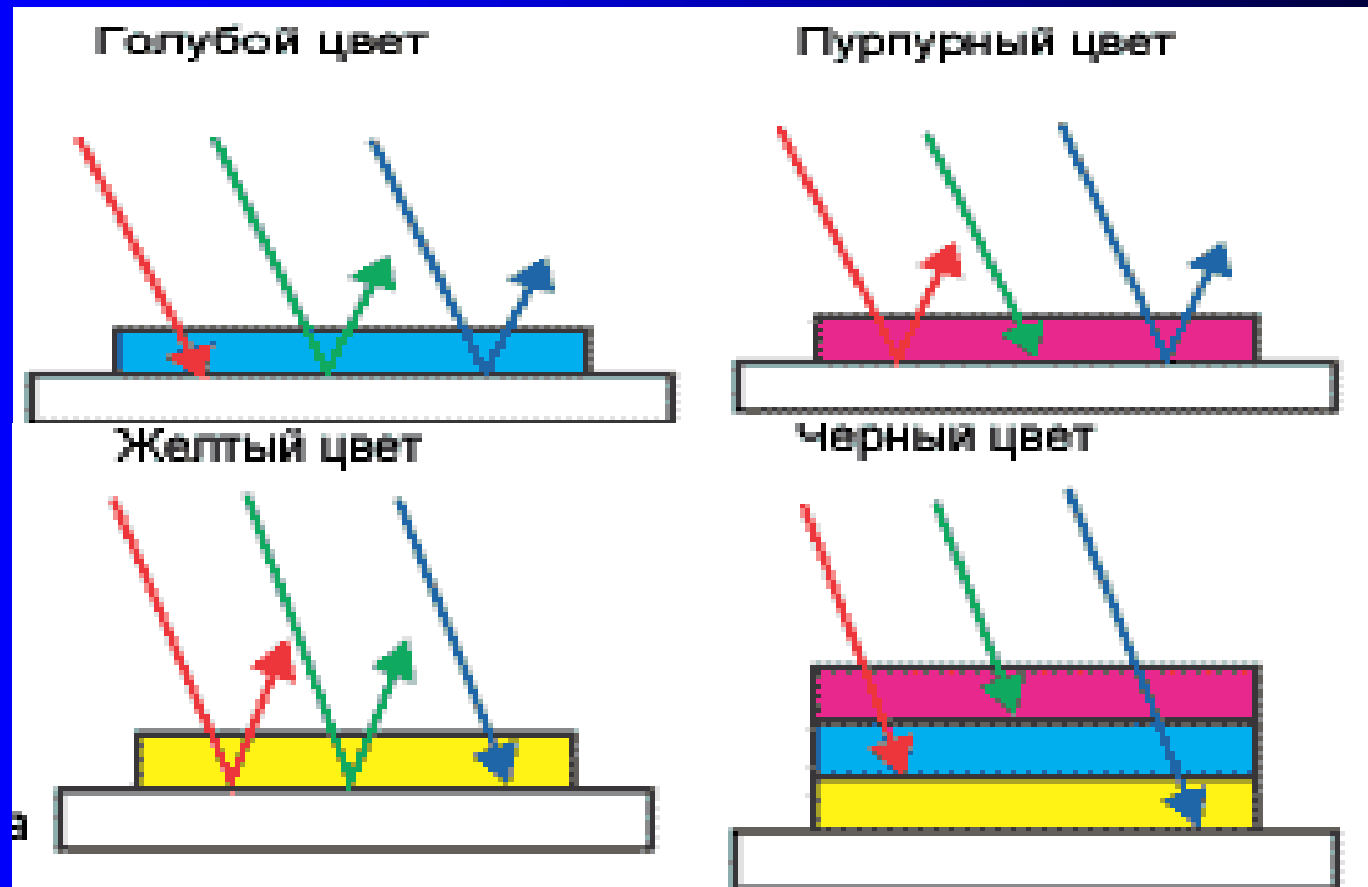
Аддитивные и субтрактивные цвета

- Одна из наиболее важных мыслей, которую необходимо помнить, говоря о цвете, заключается в том, что некоторые предметы **мы видим потому, что они излучают свет**, а другие - **потому, что они его отражают**. Когда предметы излучают свет они приобретают тот цвет, который мы видим. Когда они отражают свет (бумага, например), их цвет определяется **цветом падающего на них света и цветом**, который эти объекты отражают.
- Излучаемый свет может содержать все цвета (белый свет), любую их комбинацию или только один цвет. Излучаемый свет, идущий непосредственно из источника к вашему глазу, сохраняет в себе все цвета, из которых он был создан. Некоторые волны излученного света поглощаются объектом, поэтому доходят до нас и воспринимаются глазом только непоглощенные, отраженные волны.

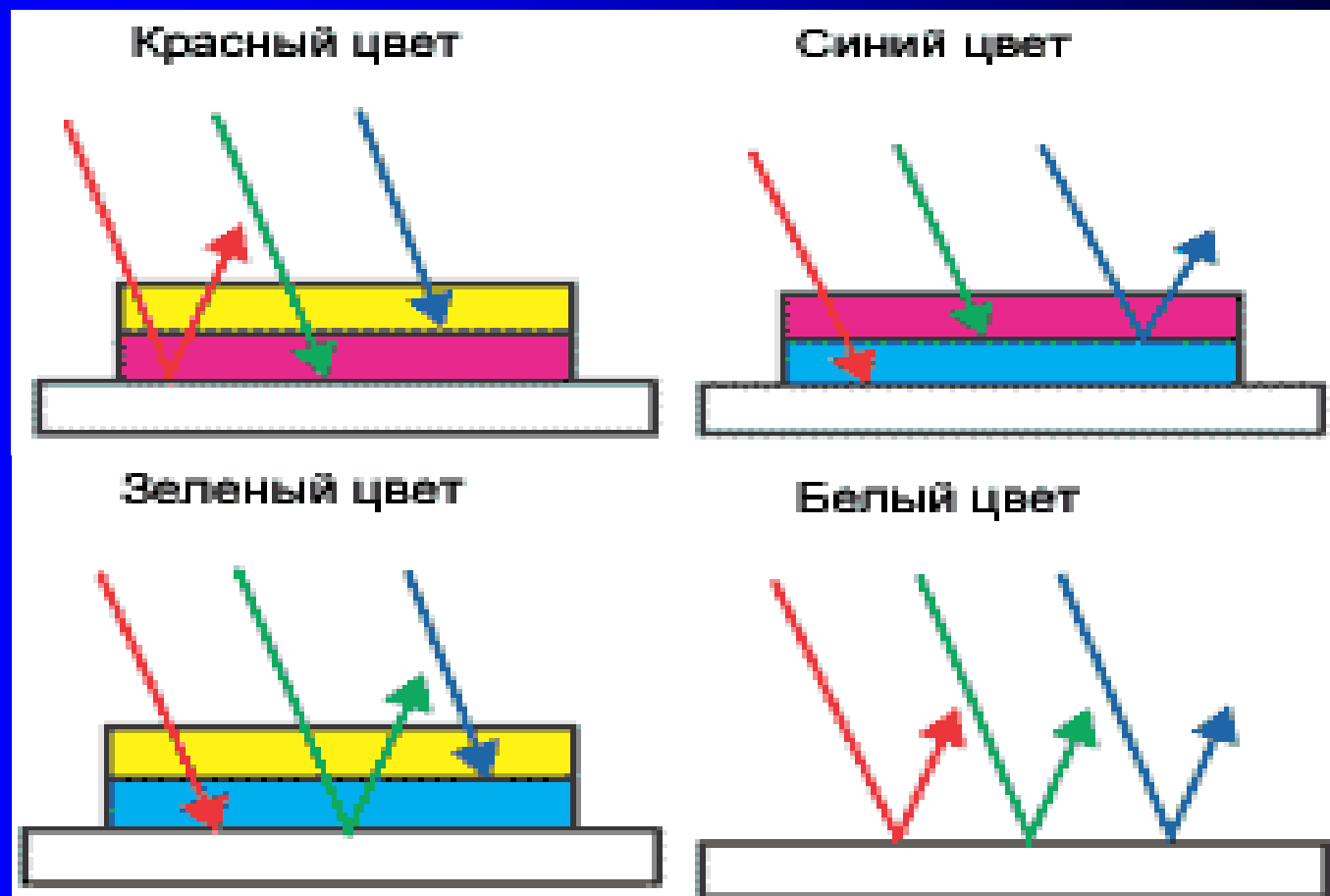
Аддитивные и субтрактивные цвета

- Белый листок бумаги выглядит белым потому, что он отражает все цвета в белом свете и ни один не поглощает. Если вы осветите его **синим светом**, бумага будет выглядеть **синей**. Если вы осветите белым светом листок красной бумаги, **бумага будет выглядеть красной**, так как она поглощает все цвета, кроме красного. Что произойдет, если осветить **красную бумагу синим светом**? Бумага будет выглядеть **черной**, потому что синий цвет, падающий на нее, она не отражает.

Одинарное наложение красок

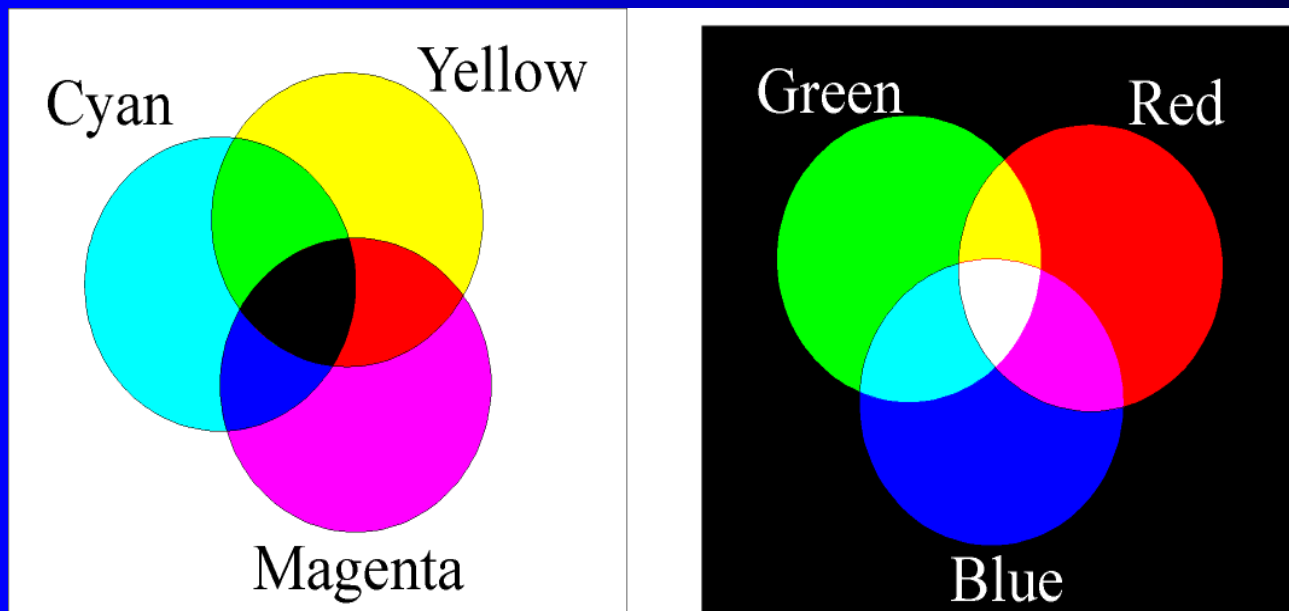


Двойное (бинарное) наложение красок

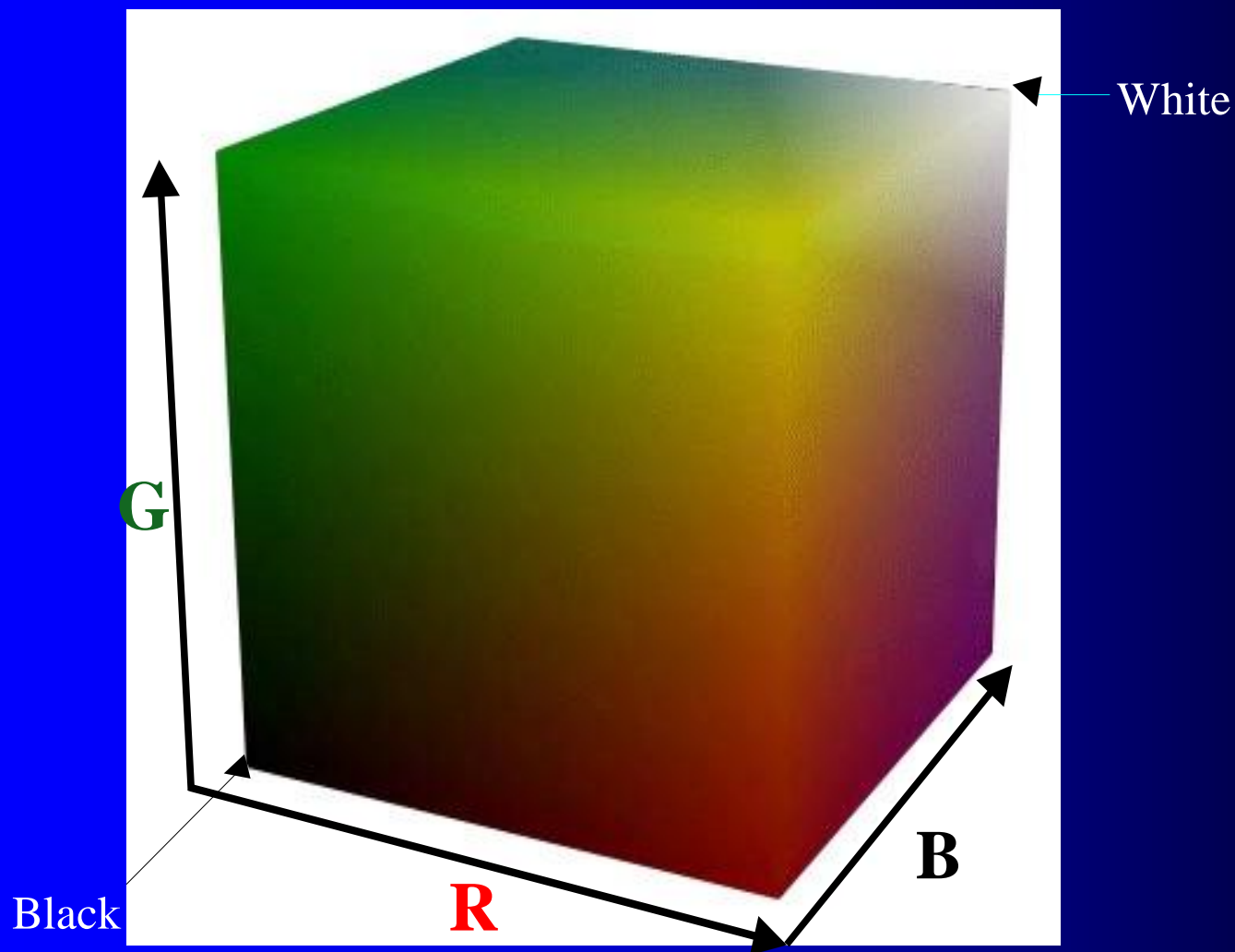


Цветовые системы координат (Модели цвета)

Дополнительный цвет — это разность белого и данного цвета: голубой это белый минус красный, пурпурный — белый минус зеленый, желтый — белый минус синий. Хотя красный можно считать дополнительным к голубому, по традиции **красный, зеленый и синий** считаются основными цветами, а **голубой, пурпурный, желтый** — их дополнениями. Интересно, что в спектре радуги или призмы **пурпурного цвета нет**, то есть он порождается зрительной системой человека.

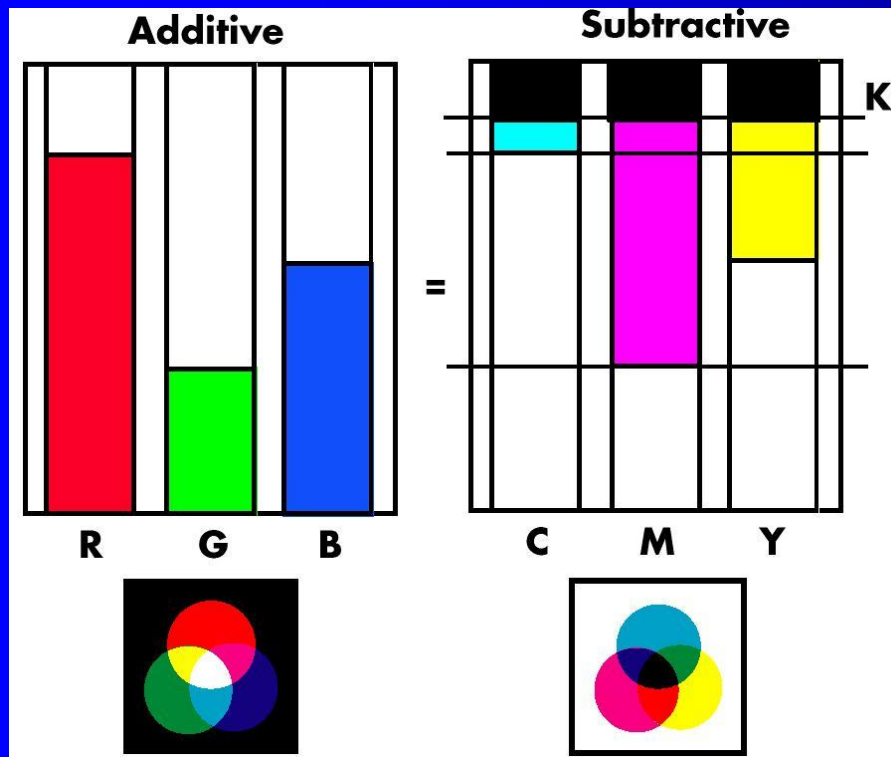


Модели цвета RGB (RGB Colour Space)



Модель CMYK

(CMYK – subtractive colour model)



$$R = (1-C) (1-K) W$$

$$G = (1-M) (1-K) W$$

$$B = (1-Y) (1-K) W$$

$$K = G(1-\max(R,G,B))$$

$$C = 1 - R/(1-K)$$

$$M = 1 - G/(1-K)$$

$$Y = 1 - B/(1-K)$$

Цветовая модель CMYK

Система цветов CMYK была широко известна задолго до того, как компьютеры стали использоваться для создания графических изображений. **Триада основных печатных цветов: голубой, пурпурный и желтый (CMY, без черного)** является, по сути, наследником **трех основных цветов живописи (синего, красного и желтого)**. Изменение оттенка первых двух связано с отличным от художественных химическим составом печатных красок, но принцип смешения тот же самый.

И художественные, и печатные краски, несмотря на провозглашаемую самодостаточность, не могут дать очень многих оттенков. Поэтому художники используют дополнительные краски на основе чистых пигментов, а печатники добавляют, как минимум, черную краску.

ЦВЕТОДЕЛЕНИЕ, ИЛИ КОНВЕРТАЦИЯ RGB - CMYK

Цветоделением называется разложение цветного изображения из режима RGB на четыре составные краски CMYK, которые затем соединяются при печати, образуя многоцветное изображение. Многие оттенки, созданные цветовой системой RGB, не удается передать при печати. Поэтому нередко прекрасные краски рисунка на мониторе после печати оказываются блеклыми. Переход из RGB в CMYK осуществляется через специальные программные фильтры, где учитываются все будущие установки печати: система основных триадных красок, коэффициент растискивания точки, баланс красок, способ генерации черного цвета, а также максимальный уровень краски и другие установки.

Цветоделение - очень сложный процесс, поэтому качество готового изображения во многом зависит от опыта оператора, правильной калибровки всей системы и мастерства печатника.

Полосы Маха

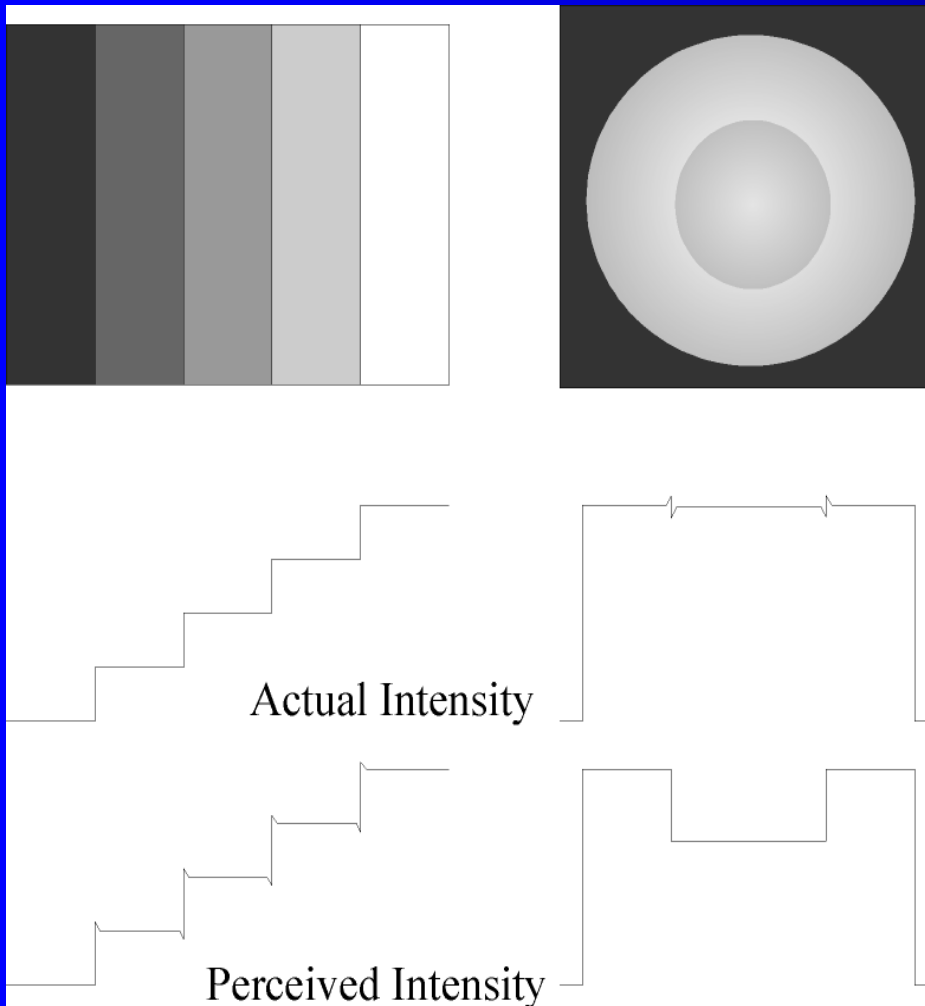
(Mach-band effect)

Полосы Маха — эффект зрительной системы человека, описанный Э.Махом в 60–е гг. XIX в. Он может быть описан как «сглаживание» слишком резких, а так же как «разделение» слишком плавных переходов яркости либо цвета. Проявляется именно на контрастных переходах, а так же в динамике – при слишком быстром изменении сцены либо перемещении взгляда.

Он базируется на нескольких свойствах нашего зрения:

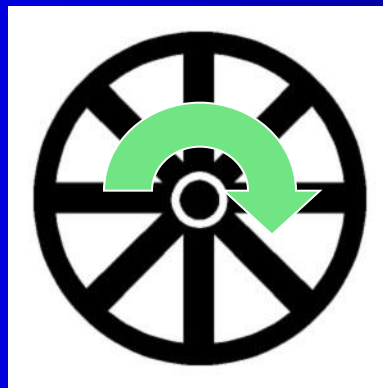
- **Постоянство цвета** – глаз «пытается» смягчить насыщенность цветов, которые слишком сильно выделяются из общей картины.
- **Обработка дополняющих цветов:**
 - Многостадийная обработка (пред- и пост- обработка информации)
 - Пары дополняющих цветов = (white/black), (red/green), (yellow/blue)

Полосы Маха (*Mach-band effect*)



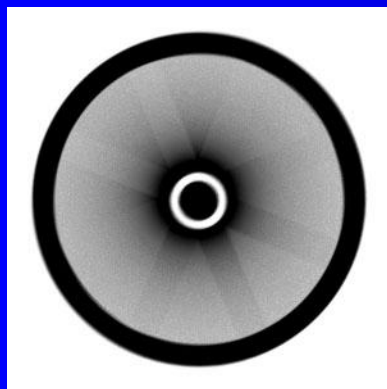
- S/M/L сигналы кодируются как пары дополняющих цветов, перед тем как передаваться на дальнейшую обработку в мозг.
- Латеральное (боковое) торможение:
- Возбуждение одной клетки сетчатки тормозит возбуждение соседних клеток (данное свойство особенно полезно для обнаружения краёв).

Полосы Маха (*Mach-band effect*)

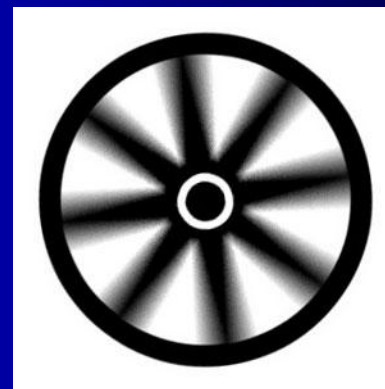


Эффект колеса кареты

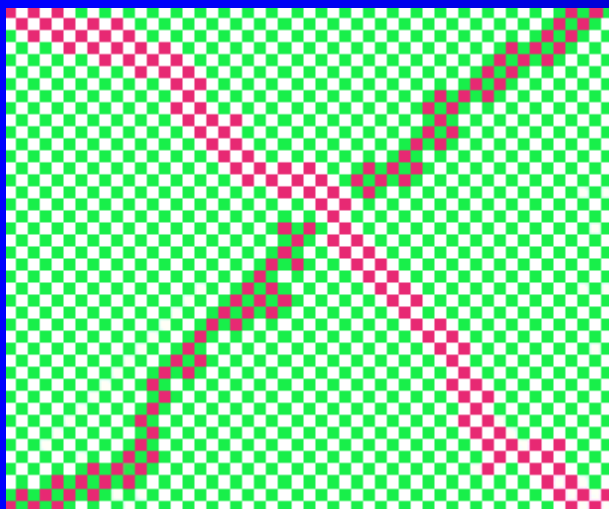
Мы должны видеть это:



В реальности мы видим это:

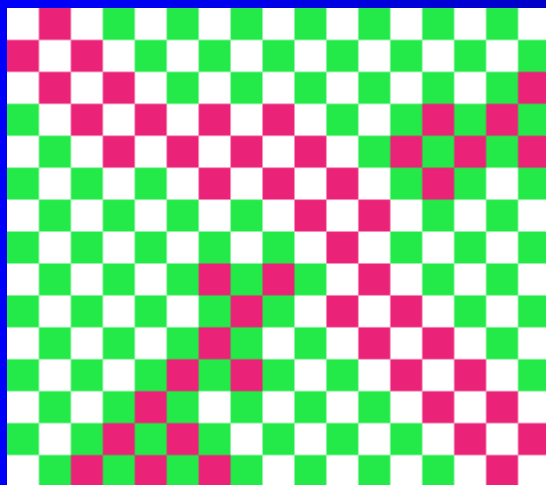


Полосы Маха (*Mach-band effect*)



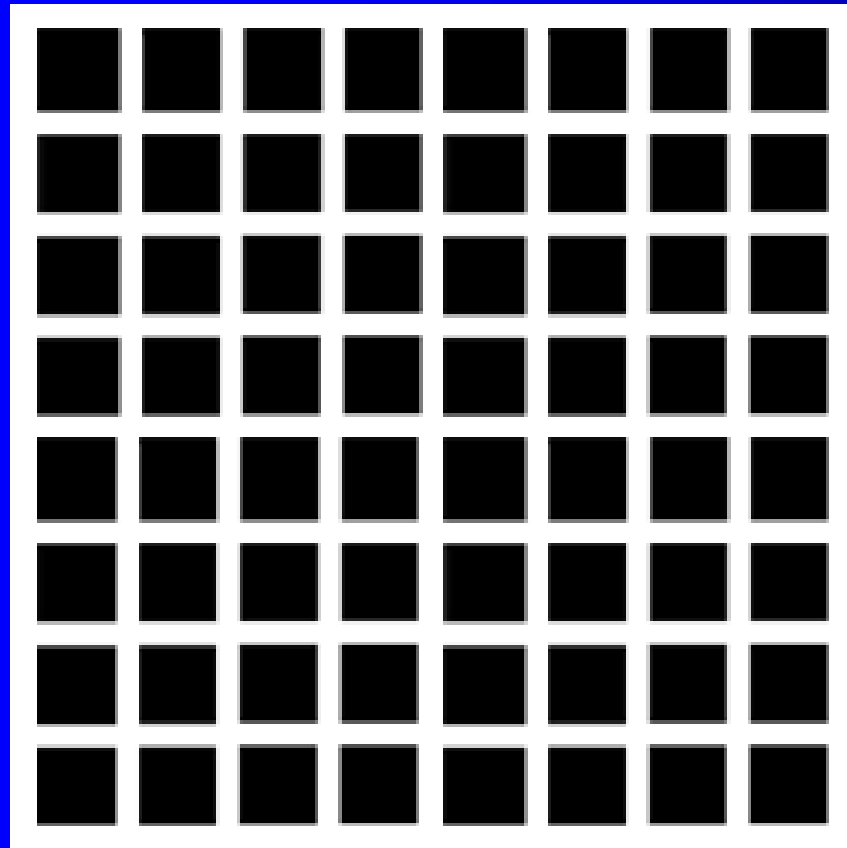
Сколько здесь цветовых
оттенков, не считая белого?

Четыре? На самом деле, всего
два - розовый и зеленый.
Несколько оттенков зеленого и
красного только кажется.



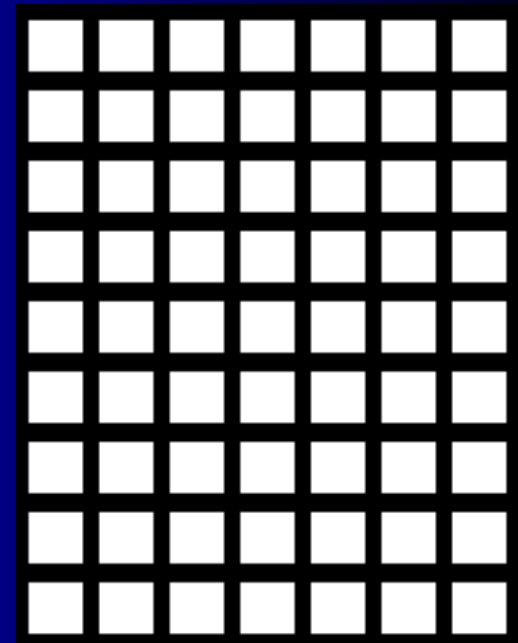
Не верите?
Эта же картинка крупным
планом:

Полосы Маха (*Mach-band effect*)

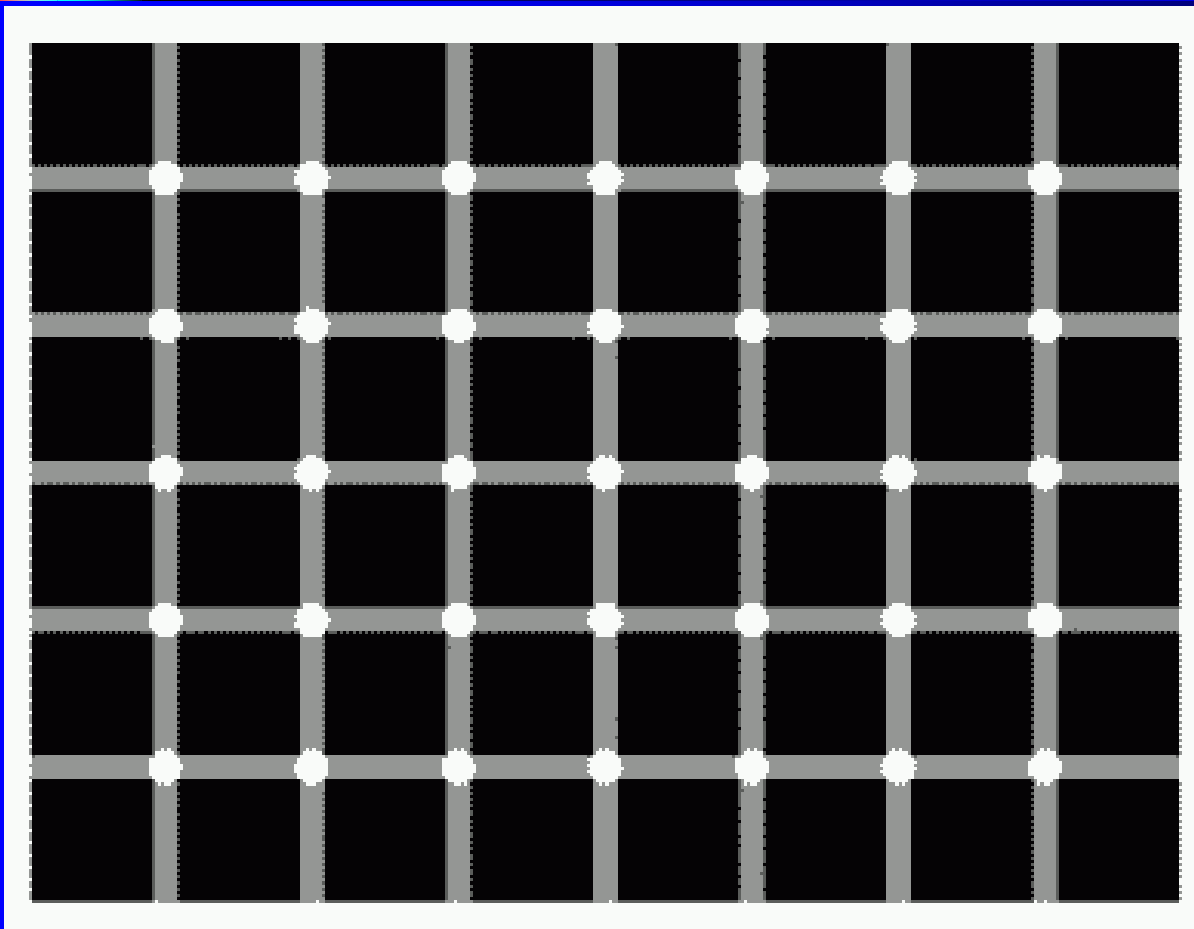


Решетка Геринга.

На пересечениях всех белых полос, за исключением того пересечения, на котором вы фиксируете взгляд в данный момент, видны маленькие серые пятна.



Полосы Маха (*Mach-band effect*)



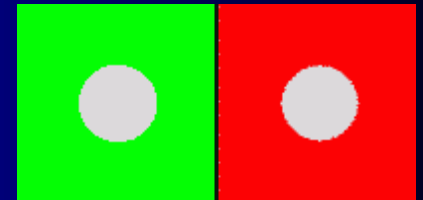
Иллюзия
мерцающей
решётки –
белые кружки
кажутся
мерцающими.

Полосы Маха (*Mach-band effect*)

Ахроматический контраст - круги имеют один и тот же оттенок серого.



Хроматический контраст - в окружении зеленого цвета серый цвет кажется сиренево-розовым, а в окружении красного - сине-зеленоватым.

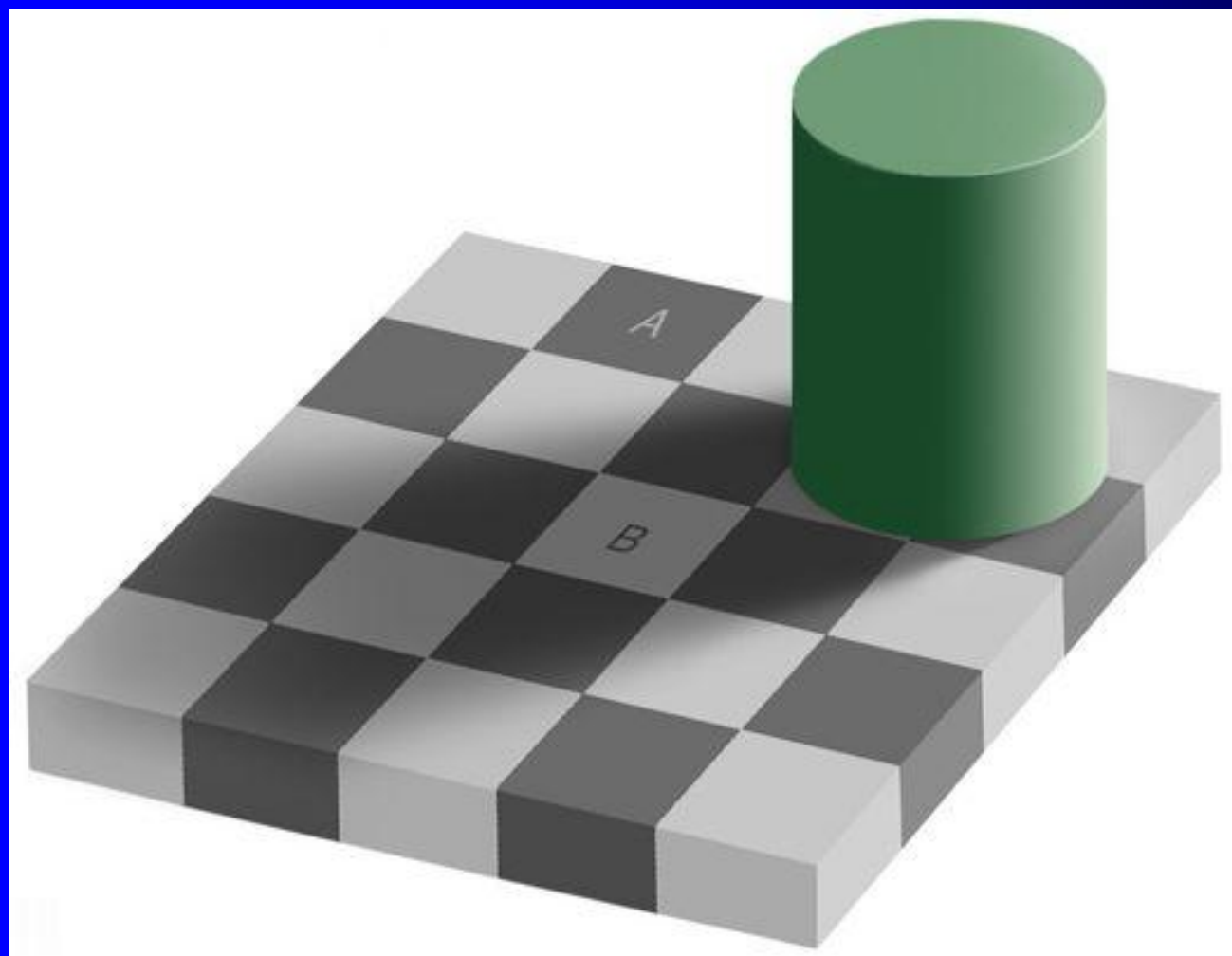


Полосы Маха (краевой контраст) - плавный переход цвета воспринимается как полосы. На границе белого видна еще более белая полоса, а на границе черного - еще более черная.



Причиной возникновения данной иллюзии является латеральное торможение в сетчатке.

Полосы Маха (*Mach-band effect*)

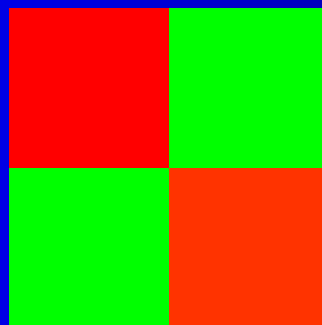


Константность
цвета –
**Белые клетки
в тени и
черные на
свету -
одного цвета!**

Однако глаза
этого не
замечают. **Мозг
видит черные и
белые клетки
независимо от
освещенности!**

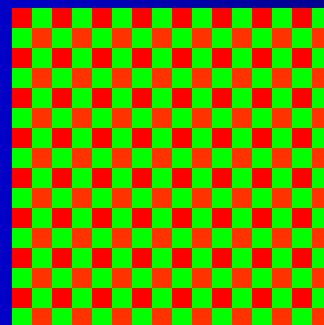
Применение эффекта Маха

4 квадрата



Зелёный и красный

256 квадратов



256 квадратов



Жёлтый?

Генерация цвета в мониторе на ЭЛТ

