

# ЦВЕТОВЫЕ МОДЕЛИ

Компьютерная графика

# Цветовая модель

- Математическая модель описания представления цветов в виде кортежей чисел, обычно из трёх значений, называемых *цветовыми компонентами* или *цветовыми координатами*.

# Цветовое пространство

- Все возможные значения цветов, задаваемые моделью, определяют цветовое пространство.

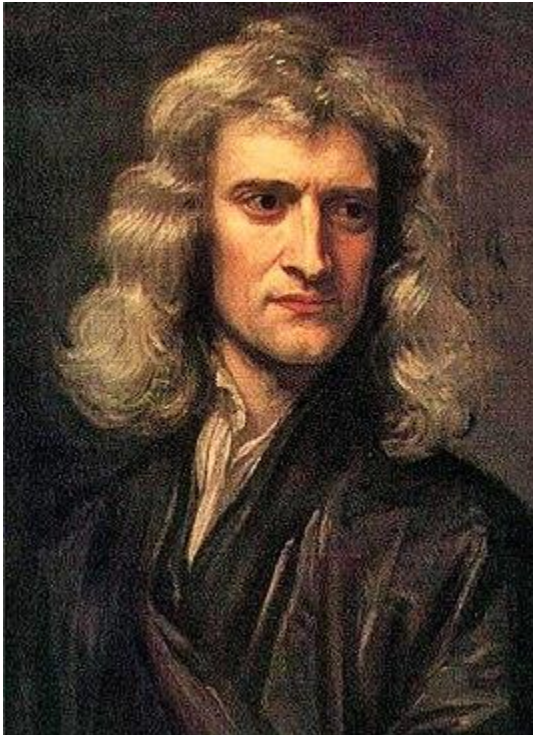
# Джеймс Максвелл (1831-1879)

Пионер количественной теории цветов;  
автор принципа цветной фотографии.



# И остальные ... Исаак Ньютон

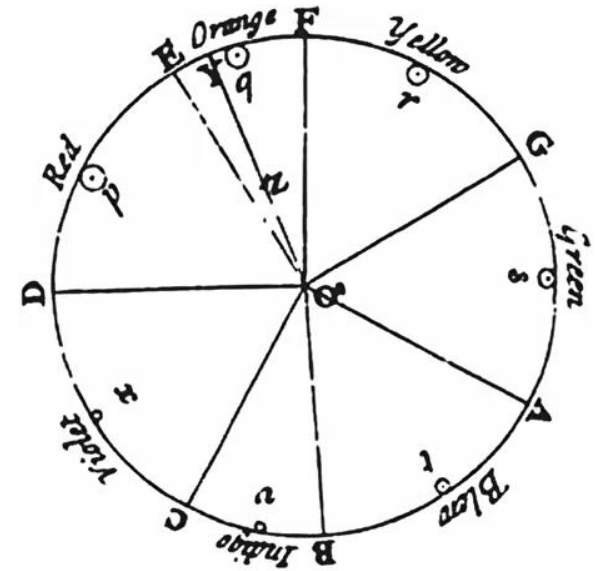
Исаак Ньютон придерживался идеи о **семи** основных цветах



1643-1727

В 1676 году разложил белый солнечный свет на цветовой спектр с помощью трехгранной призмы.

Ньютон выделил семь секторов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий и фиолетовый.



# И остальные ... М.В.Ломоносов

М.В.Ломоносов идея трехцветности 1756



«Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее, июля 1-го дня 1756 года оговоренное»

1711-1765

## И остальные ... Томас Юнг

Томас Юнг (один из создателей волновой теории света) выдвинул идею трёх основных цветов



1773-1829

В 1801—1803 годах Юнг опубликовал две статьи, в которых изложил свои взгляды на проблемы оптической физики: «Теория света и цветов» и «Опыты и исчисления, относящиеся к физической оптике»

## И остальные ... Герман фон Гельмгольц

Герман фон Гельмгольц способствует признанию теории трёхцветового зрения Томаса Юнга



1821—1894



## И остальные ... Максвелл

Максвелл во многом независимо повторял опыты Германа Гельмгольца



1831-1879

основными цветами являются **красный**, **зелёный** и **синий**

## И опять Максвелл ...

17 мая 1861 года на лекции в Королевском институте на тему «О теории трёх основных цветов» представил первую в мире цветную фотографию, идея которой возникла у него ещё в 1855 году



Авторы  
Джеймс Клерк Максвеллом и  
Фотограф Томас Саттон

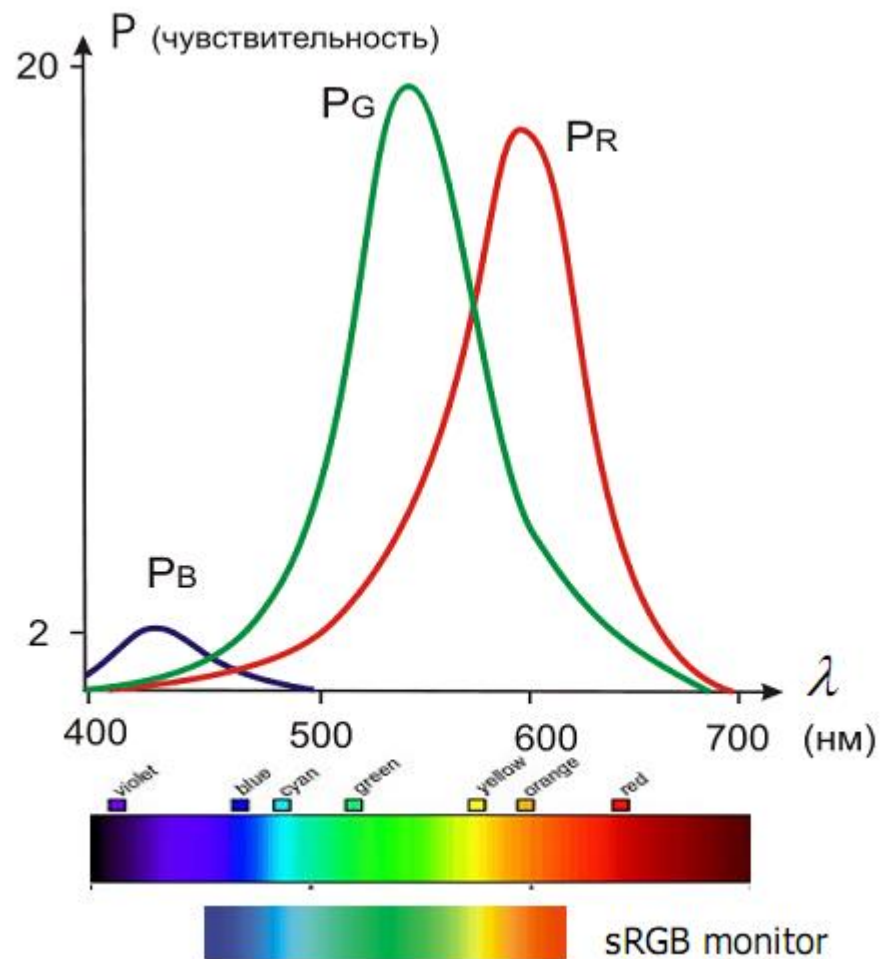
«Тартановая лента» — первая в мире цветная фотография

# Трёхкомпонентное цветовое пространство стимулов

- Человек является **трихроматом** — сетчатка глаза имеет 3 вида рецепторов света (**колбочки**), ответственных за цветное зрение.
- Отклик, вызываемый в колбочках светом определённого спектра, называется **цветовым стимулом**.
- **Метамерия**: два излучения с разными спектрами, но одинаковыми цветовыми стимулами, неразличимы для человека.



# Чувствительность трёх типов колбочек к разным участкам спектра



# Интегральная чувствительность глаза к свету



# Герман Гюнтер Грассман



1809 —1877

- Закон Грассмана в оптике и колориметрии — эмпирическое наблюдение, что восприятие хроматической составляющей цвета описывается примерно линейным законом.
- Это правило было открыто Германом Грассманом в 1853 году

# Законы Германа Грассмана (аддитивного синтеза света)

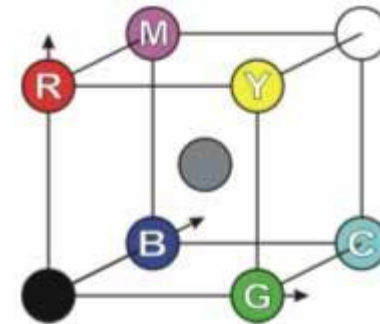
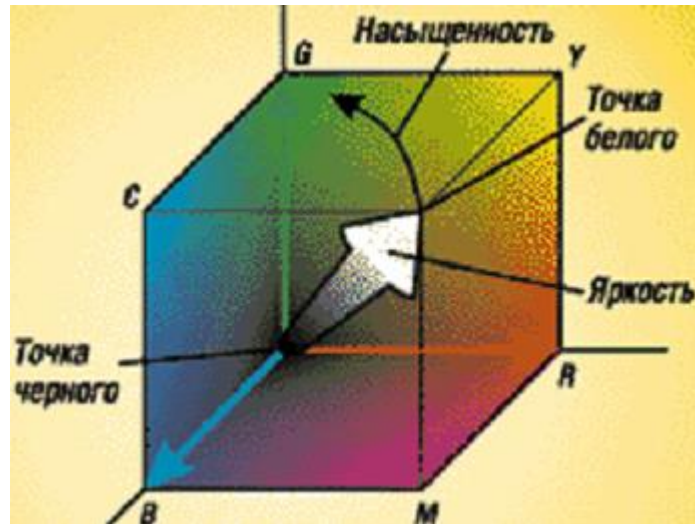
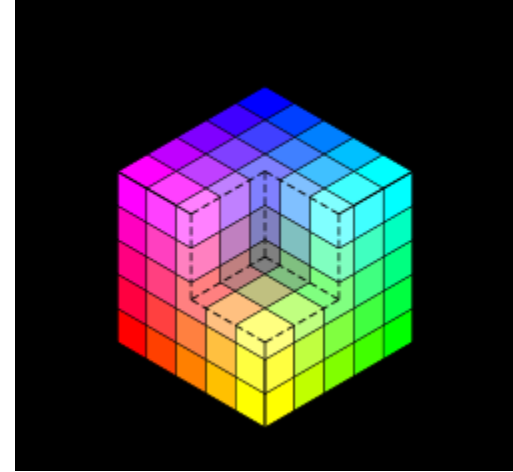
- 1. Закон трёхмерности.** Любой цвет однозначно выражается тремя, если они линейно независимы.
- 2. Закон непрерывности.** При непрерывном изменении излучения цвет смеси также меняется непрерывно. Не существует такого цвета, к которому нельзя было бы подобрать бесконечно близкий.
- 3. Закон аддитивности.** Для смеси двух цветов  $C_1$  и  $C_2$  имеет место равенство:  
$$C=C_1+C_2=(r_1+r_2)R+(g_1+g_2)G+(b_1+b_2)B$$

# Цветовые модели

- RGB
  - CMY(К)
  - HSI (HSL, HSV)
  - CIE XYZ (CIE Lab, CIE LUV)
- и др.



# RGB – аддитивная модель



Изображение, разложенное на составляющие R, G и B



# Глубина цвета



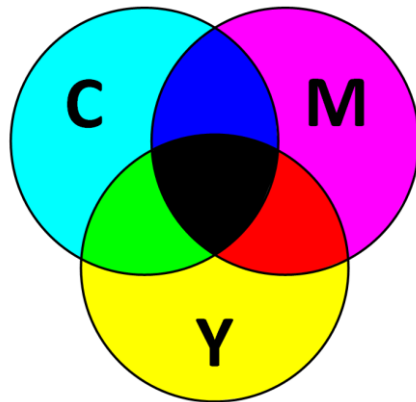
8-битный RGB дает 256 цветов

16-битный 65536 (схема 5-6-5)

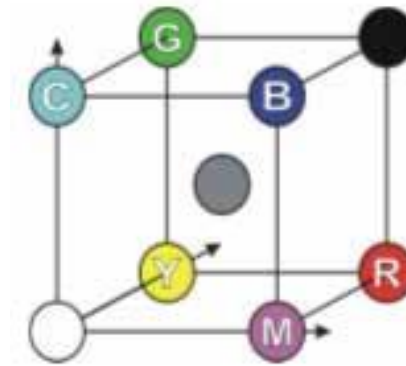
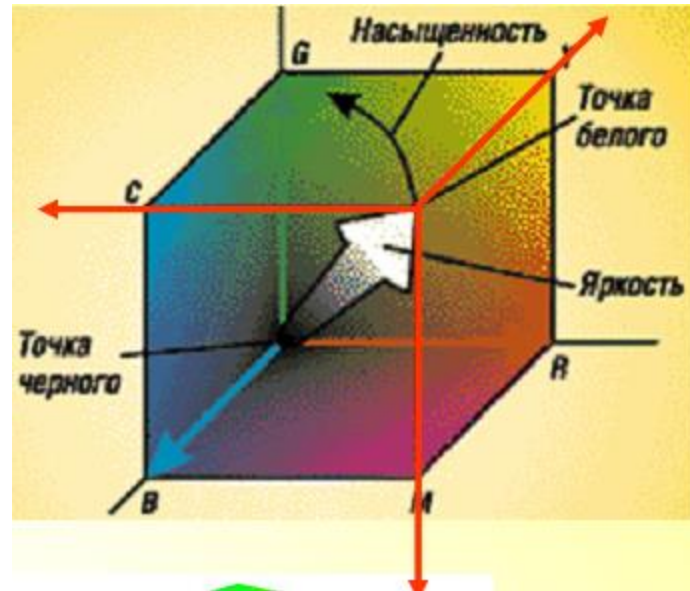
24-битный 16777216 (8-8-8)

# СМУК – субтрактивная модель

Используется прежде всего в полиграфии для стандартной триадной печати.

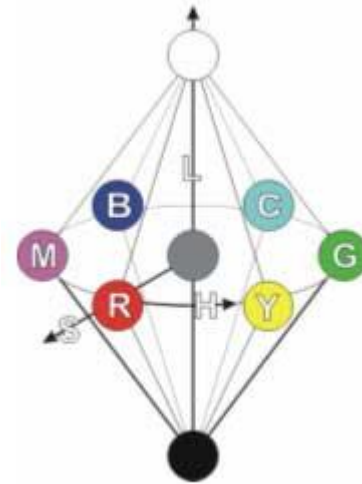


$$\begin{cases} C = 1 - R \\ M = 1 - G \\ Y = 1 - B \end{cases}$$



«Си-Эм-Уай-Кэй» или «си-мак»

# HSL, HLS или HSI



Hue,

тон,

длина волны,

Saturation,

насыщенность

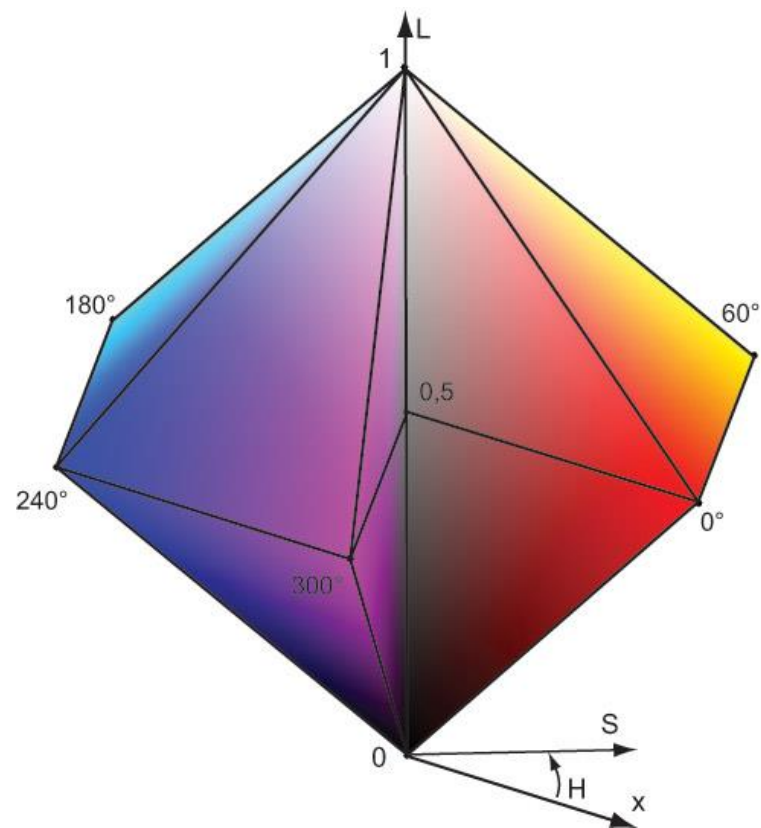
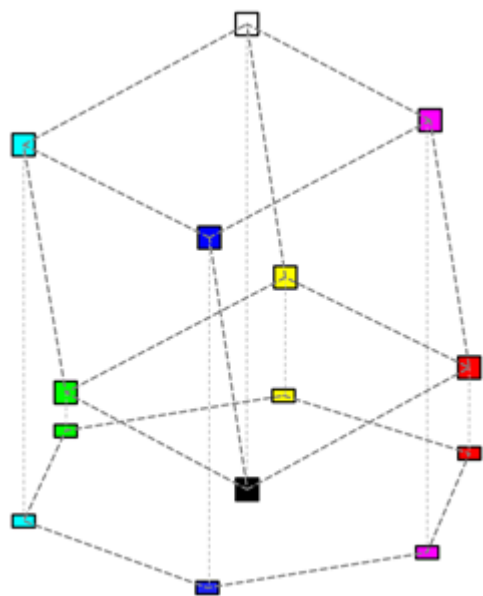
ИНТЕНСИВНОСТЬ,

Lightness

светлота

КОЛИЧЕСТВО СВЕТА

# RGB и HSL



# RGB → HSL

$$H = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } MAX = MIN \\ 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 0^\circ, & \text{if } MAX = R \\ & \text{and } G \geq B \\ 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 360^\circ, & \text{if } MAX = R \\ & \text{and } G < B \\ 60^\circ \times \frac{B-R}{MAX-MIN} + 120^\circ, & \text{if } MAX = G \\ 60^\circ \times \frac{R-G}{MAX-MIN} + 240^\circ, & \text{if } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{if } L = 0 \text{ or } MAX = MIN \\ \frac{MAX-MIN}{MAX+MIN} = \frac{MAX-MIN}{2L}, & \text{if } 0 < L \leq \frac{1}{2} \\ \frac{MAX-MIN}{2-(MAX+MIN)} = \frac{MAX-MIN}{2-2L}, & \text{if } \frac{1}{2} < L < 1 \\ 1 & \text{if } L = 1 \end{cases}$$

$$L = \frac{1}{2}(MAX + MIN)$$

R, G, B — значения цвета в цветовой модели RGB в диапазоне [0; 1]

MAX — максимум из трёх значений (R, G, B)

MIN — минимум из трёх значений (R, G, B)

H — тон [0; 360]

S — насыщенность [0; 1]

L — светлота [0; 1]

## HSL → RGB

$$Q = \begin{cases} L \times (1.0 + S), & \text{if } L < 0.5 \\ L + S - (L \times S), & \text{if } L \geq 0.5 \end{cases}$$

$$P = 2.0 \times L - Q$$

$$H_k = \frac{H}{360} \quad \text{приведение к интервалу } [0,1]$$

$$T_R = H_k + \frac{1}{3}$$

$$T_G = H_k$$

$$T_B = H_k - \frac{1}{3}$$

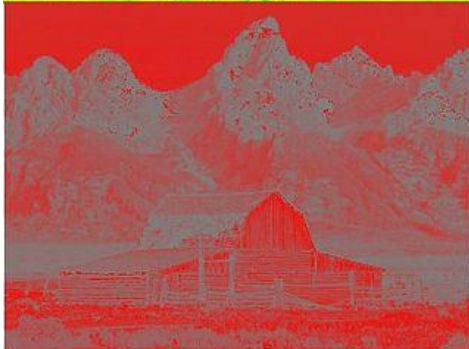
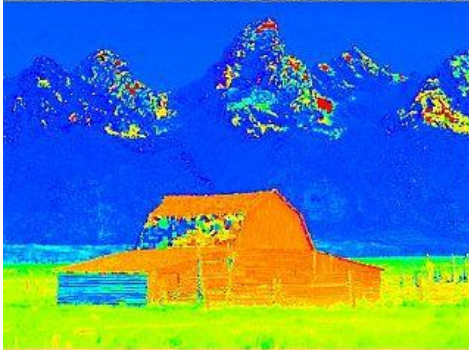
if  $T_c < 0 \rightarrow T_c = T_c + 1.0$  for each  $c = R, G, B$

if  $T_c > 1 \rightarrow T_c = T_c - 1.0$  for each  $c = R, G, B$

Для каждого цвета  $c = R, G, B$ :

$$\text{color}_c = \begin{cases} P + ((Q - P) \times 6.0 \times T_c), & \text{if } T_c < \frac{1}{6} \\ Q, & \text{if } \frac{1}{6} \leq T_c < \frac{1}{2} \\ P + ((Q - P) \times (\frac{2}{3} - T_c) \times 6.0), & \text{if } \frac{1}{2} \leq T_c < \frac{2}{3} \\ P, & \text{otherwise} \end{cases}$$














# Изображение, разложенное на составляющие

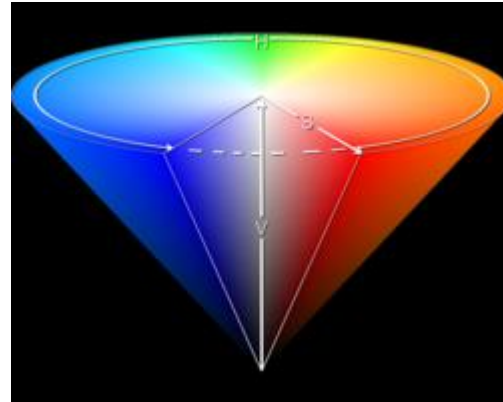
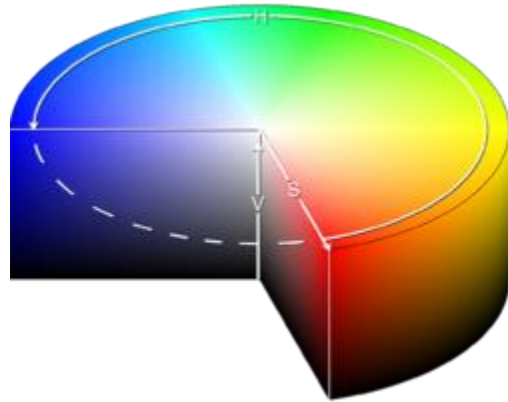
Слева H, S и L

Справа R, G и B



	<i><b>Интенсивность</b></i>	<i><b>Тон</b></i>	<i><b>Насыщенность</b></i>
<i><b>Уменьшенное значение</b></i>			
<i><b>Исходное значение</b></i>			
<i><b>Увеличение значения</b></i>			

# HSV



Шкала оттенков — Hue

Элви Рей Смит 1978

## HSV

Hue, Saturation, Value — тон, насыщенность (чистота цвета ), значение

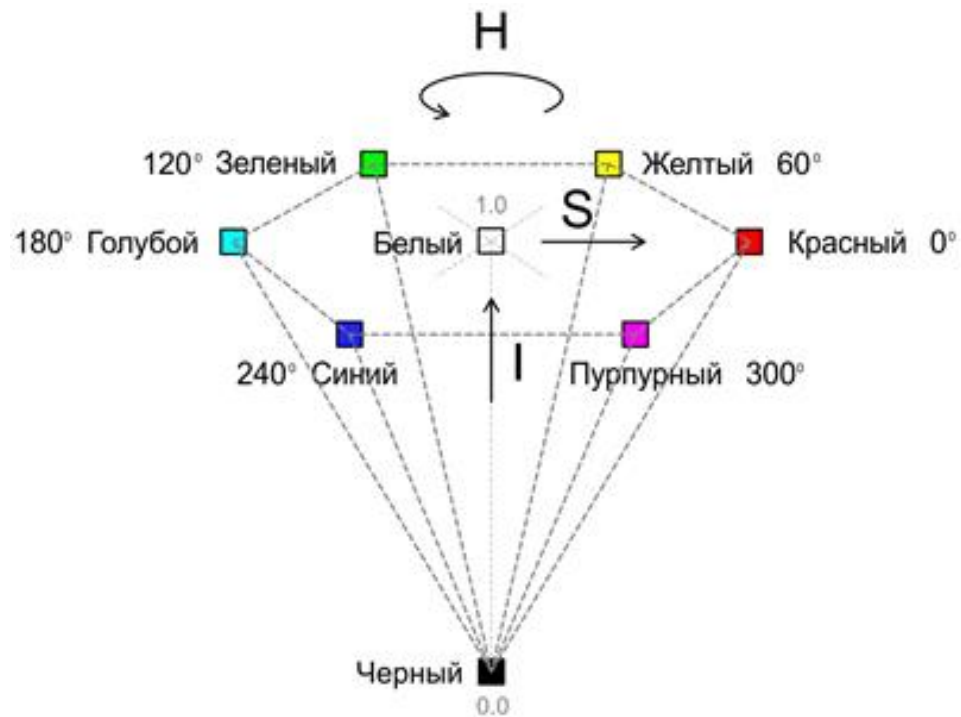
или

## HSB

Hue, Saturation, Brightness — оттенок, насыщенность, яркость

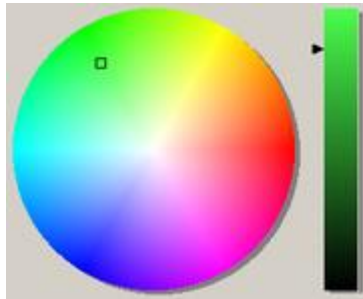
# Диапазоны значений

- **Hue:** 0-360, 0-100, 0-1, 0-240 (Paint)
- **Saturation:** 0-100, 0-1
- **Value :** 0-100, 0-1

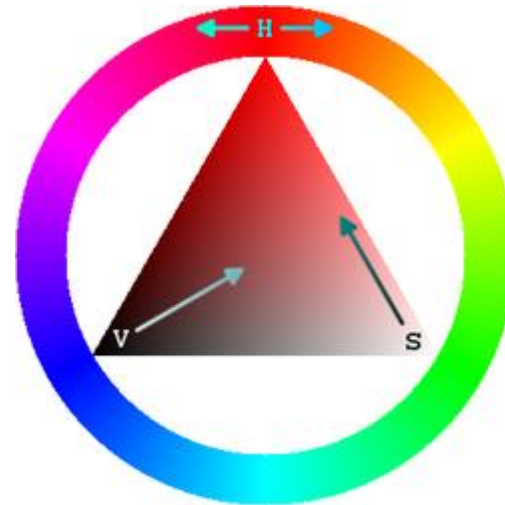




# Визуализация HSV в прикладном ПО



Цветовой круг



Цветовое кольцо

# RGB → HSV

$$H = \begin{cases} 0, & \text{если } MAX = MIN \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 0, & \text{если } MAX = R \text{ и } G \geq B \\ 60 \times \frac{G - B}{MAX - MIN} + 360, & \text{если } MAX = R \text{ и } G < B \\ 60 \times \frac{B - R}{MAX - MIN} + 120, & \text{если } MAX = G \\ 60 \times \frac{R - G}{MAX - MIN} + 240, & \text{если } MAX = B \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{если } MAX = 0, \\ \text{иначе } 1 - \frac{MIN}{MAX} \end{cases}$$

MAX — максимальное значение из R, G и B  
MIN — минимальное из них

$$V = MAX$$

$$H \in [0, 360)$$

$$S, V, R, G, B \in [0, 1]$$

# HSV $\rightarrow$ RGB

$$H_i = \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor \bmod 6$$

$$f = \frac{H}{60} - \left\lfloor \frac{H}{60} \right\rfloor$$

$$p = V(1 - S)$$

$$q = V(1 - fS)$$

$$t = V(1 - (1 - f)S)$$

$$H_i = 0 \rightarrow R = V, \quad G = t, \quad B = p$$

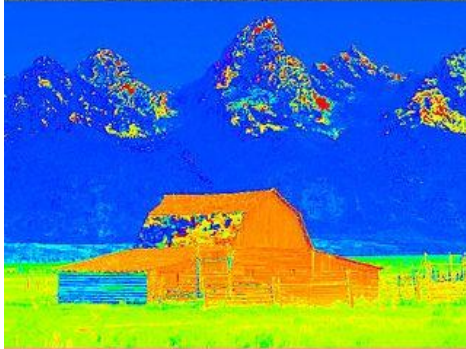
$$H_i = 1 \rightarrow R = q, \quad G = V, \quad B = p$$

$$H_i = 2 \rightarrow R = p, \quad G = V, \quad B = t$$

$$H_i = 3 \rightarrow R = p, \quad G = q, \quad B = V$$

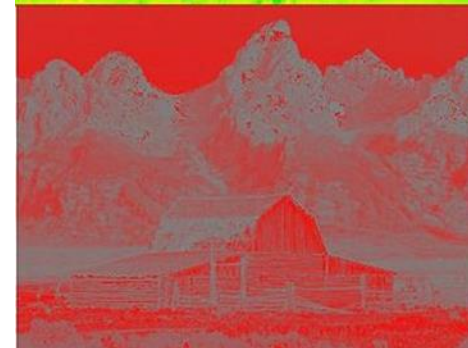
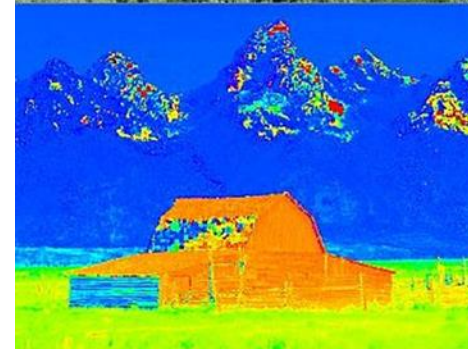
$$H_i = 4 \rightarrow R = t, \quad G = p, \quad B = V$$

$$H_i = 5 \rightarrow R = V, \quad G = p, \quad B = q$$



HSV

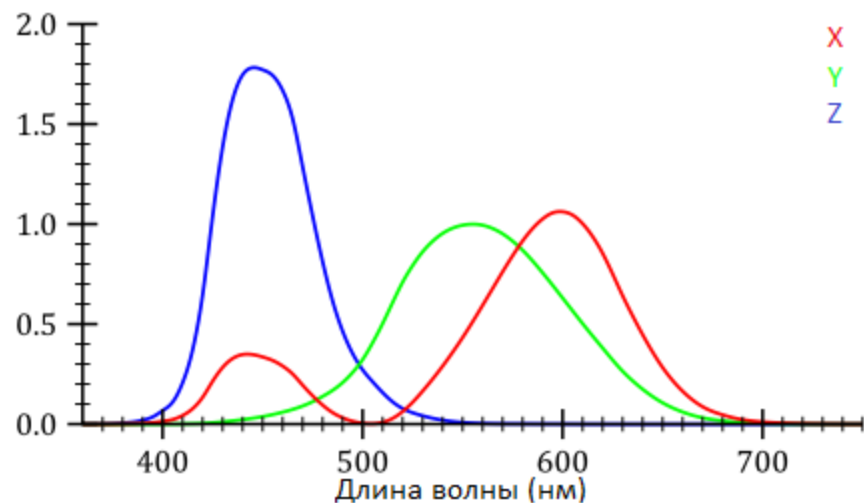
HSL





# Модель CIE XYZ

Линейная 3-компонентная цветовая модель, основанная на результатах измерения характеристик человеческого глаза



В 1931 был принят стандарт CIE (Commission International de l'Éclairage – Международная комиссия по освещению),

в качестве основы которого были выбраны три перенасыщенных цвета XYZ, несоответствующих никаким реальным,

но все реальные могут быть представлены их комбинациями с положительными коэффициентами.

Введено понятие «стандартного наблюдателя».

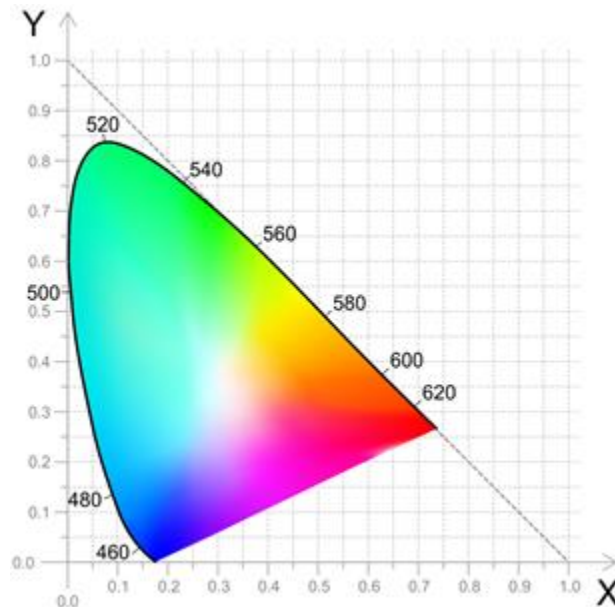
Кривые  $X(\lambda)$ ,  $Y(\lambda)$ ,  $Z(\lambda)$  описывают чувствительность среднестатистического наблюдателя к стандартным возбуждениям

# Цветовое пространство CIE XYZ

Относительные цветные координаты

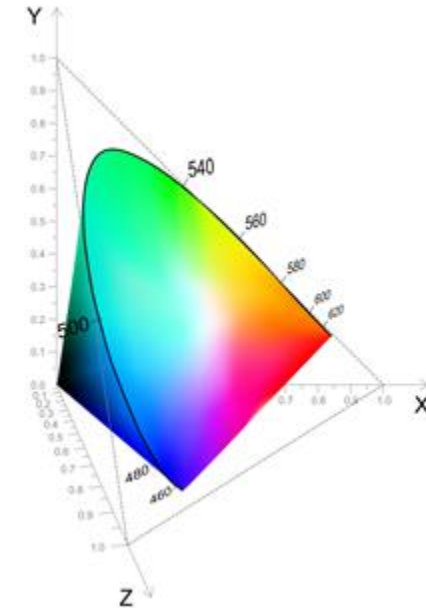
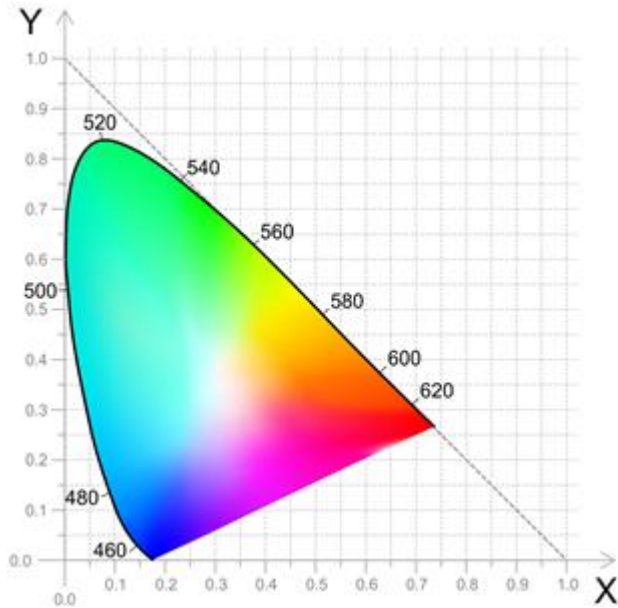
$$\begin{cases} x = \frac{X}{X + Y + Z} \\ y = \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z = \frac{Z}{X + Y + Z} \end{cases}$$

$$x + y + z = 1$$



На основе двух координат  $x$  и  $y$  введена плоская хроматическая CIE-диаграмма.  
Или треугольник CIE

# Все цвета, видимые среднестатистическим наблюдателем



Треугольник CIE описывает только цветовой тон, но никак не описывает яркость.

Для описания яркости вводят дополнительную ось, проходящую через точку с координатами  $(1/3; 1/3)$  (т.н. точку белого).

В результате получают цветное тело CIE

# Обратное преобразование

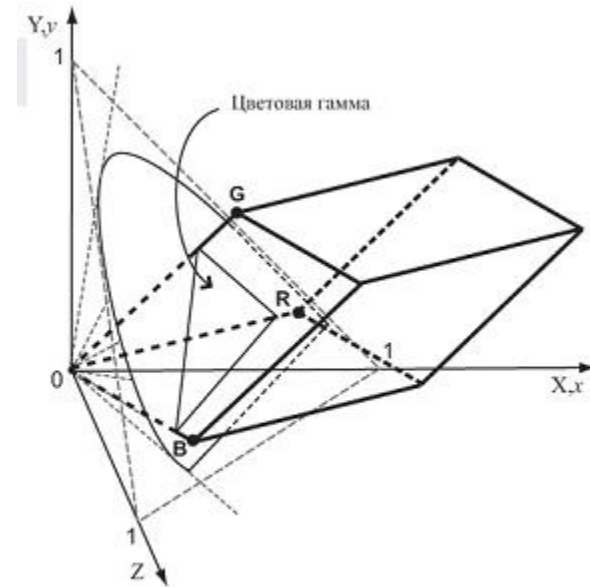
$$X = x \frac{Y}{y}; \quad Y = Y; \quad Z = (1 - x - y) \frac{Y}{y}.$$

Плоская хроматическая CIE-диаграмма вместе с Y (яркостью) позволяет полностью восстановить перенасыщенные цвета XYZ.

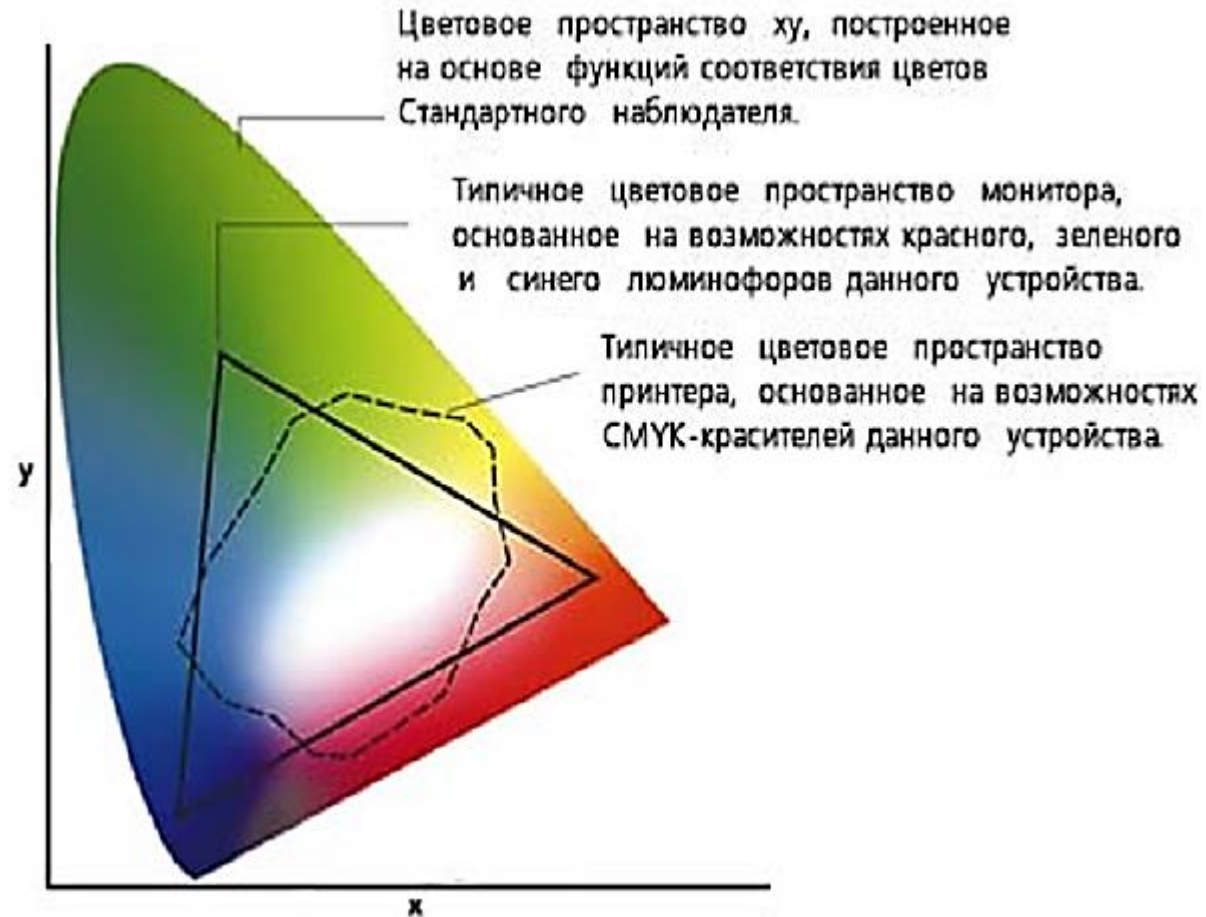
# Матрицы для перевода цветов между системами RGB и XYZ

величину Y часто ставят в соответствие яркости при преобразовании изображения в полутоновое

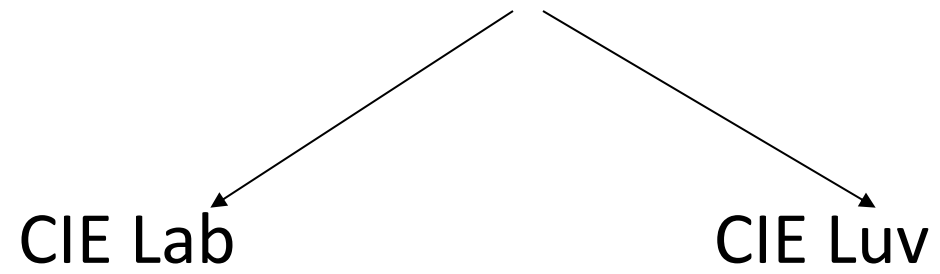
- $X = 0.431 * R + 0.342 * G + 0.178 * B$
- $Y = 0.222 * R + 0.707 * G + 0.071 * B$
- $Z = 0.020 * R + 0.130 * G + 0.939 * B$
  
- $R = 3.063 * X - 1.393 * Y - 0.476 * Z$
- $G = -0.969 * X + 1.876 * Y + 0.042 * Z$
- $B = 0.068 * X - 0.229 * Y + 1.069 * Z$



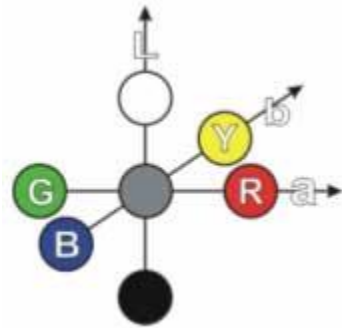
# Хроматическая CIE-диаграмма и цветовой охват



CIE XYZ



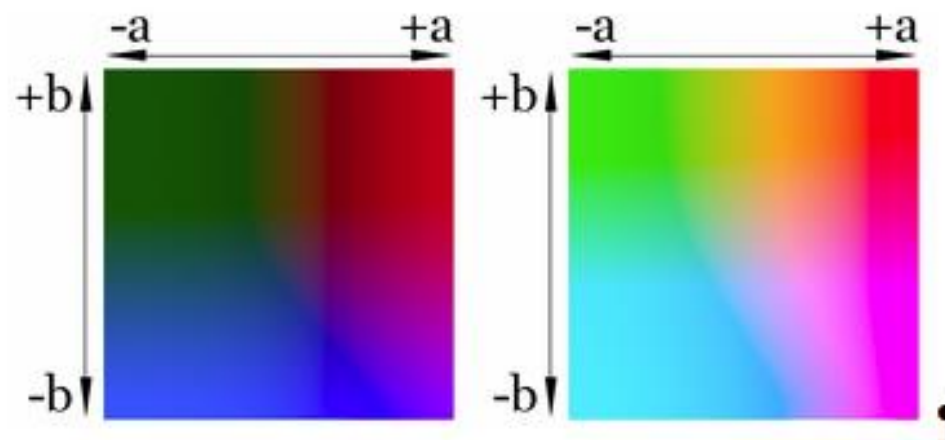
# CIE Lab



L - яркость (luminosity), 0..100  
a - величина красно-зеленой составляющей,  
b - величина желто-синей составляющей



# CIE Lab



Светлота 25%

Светлота 75%

## CIE XYZ в CIE L\*a\*b\*

$$\begin{cases} L^* = 116 * f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500 * \left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) \\ b^* = 200 * \left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) \end{cases}$$

$$f(x) = \begin{cases} \sqrt[3]{x} \\ \frac{1}{3} * \left(\frac{29}{6}\right)^2 x + \frac{4}{29} \end{cases}$$

где  $(X_n, Y_n, Z_n)$  – координаты точки белого в пространстве CIE XYZ

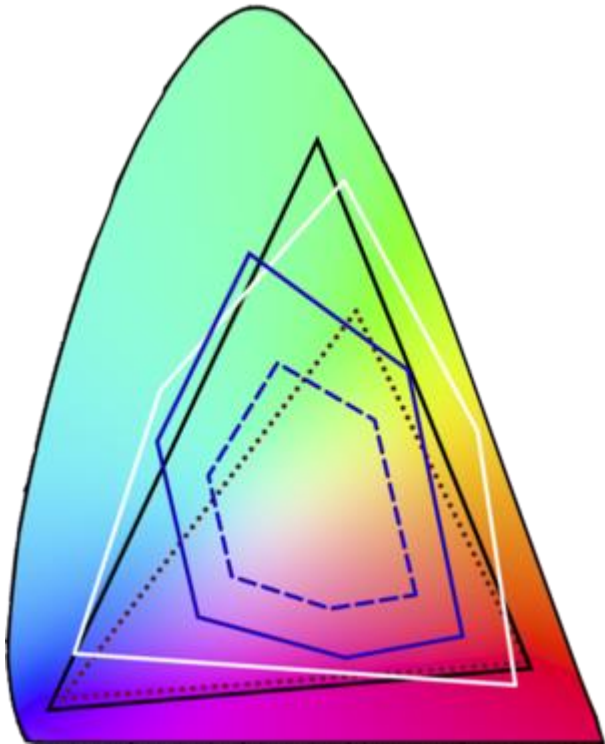
# CIE Lab

- конвертирование данных между другими цветовыми пространствами (например, из RGB сканера в CMYK печатного процесса)
- мощный инструмент цветокоррекции

# Недостатки и критика LAB

- Ввиду того что в преобразовании из XYZ в LAB используются формулы, содержащие кубические корни, LAB представляет собой сильно-нелинейную систему
- LAB при разработке оптимизировался для применения в условиях известного (как правило, студийного) освещения
- LAB также неприменим для редактирования фотографий с высоким динамическим диапазоном яркости

# Области цветового охвата



белый контур отражает диапазон фотографической эмульсии различного назначения;

чёрный пунктирный контур — пространство sRGB, приблизительно соответствующее гамме большинства распространённых мониторов, являющиеся, по сути, стандартом представления графики в сети Интернет;

чёрный сплошной контур — пространство Adobe RGB, включающее цвета, воспроизводимые на печатных машинах, но с использованием первичных цветов;

синий сплошной контур соответствует высококачественной офсетной печати;

синий пунктирный контур отражает охват обычного бытового принтера.

# Классификация цветовых моделей

- Перцепционные (Восприятие человеком): XYZ — описание восприятия; Lab — то же пространство в других координатах.
- Аддитивные модели — получение цвета на мониторе (например, RGB).
- Субтрактивные (Полиграфические модели) — получение цвета при использовании разных систем красок и полиграфического оборудования (например, CMYK).
- Более интуитивная для человека модель, основанная на восприятии, например HSV.
- Модели, не связанные с физикой оборудования, являющиеся стандартом передачи информации.
- Телевизионные/Видеомодели. Созданы для эффективного хранения и передачи видео, учитывая особенности человеческого зрения (глаз более чувствителен к яркости, чем к цвету).

# Поиск по цвету

- Критерии близости цветов
- Цветовые метрики

# Расстояние между цветами

По сравнению с системой CIE XYZ Евклидово расстояние

$$\sqrt{((L1 - L2)^2 + (a1 - a2)^2 + (b1 - b2)^2)}$$

в системе CIE L\*a\*b\* значительно лучше соответствует цветовому различию, воспринимаемому человеком

Стандартная формула цветового различия является чрезвычайно сложной CIEDE2000

[https://en.wikipedia.org/wiki/Color\\_difference](https://en.wikipedia.org/wiki/Color_difference)



# Примеры: поиск по цвету



Автор: Галайчук Виталий

# Примеры: поиск по цвету



Автор: Галайчук Виталий

# Поиск новых цветовых моделей и метрик

- ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ МЕТРИК ДЛЯ РАЗНИЦЫ ЦВЕТОВ
- (автор Фёдор Золотарёв)

Цветное → полутоновое → бинарное



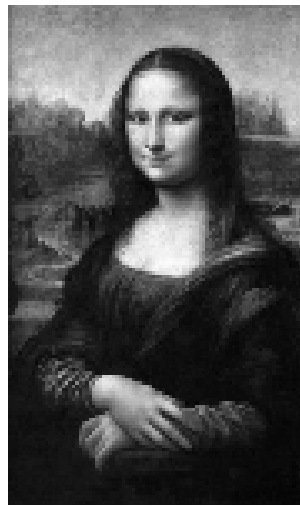
# Преобразование цветного изображения в оттенки серого

- В цветовых пространствах используемые в PAL и NTSC яркость  $Y'$  вычисляется следующим образом:

- $$Y' = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

- Для учёта особенностей восприятия изображения человеческим глазом (чувствительность к зелёному и синему цвету) в модели HDTV используют другие коэффициенты:

- $$Y' = 0.2126R + 0.7152G + 0.0722B$$



$$Y = 0.3R + 0.59G + 0.11B$$

$$Y = 0.21R + 0.72G + 0.07B$$

NTSC RGB

sRGB

# Наложение двух изображений



# Наложение двух изображений

- Суммирование альфа-каналов

$$A_C + (1-A_C) \times A_K$$

Общая непрозрачность обоих стекол равна сумме непрозрачности ближнего к нам стекла и прозрачность ближнего, помноженная на непрозрачность дальнего.

- Доля цвета ближнего стекла равна непрозрачности ближнего стекла, деленной на общую непрозрачность