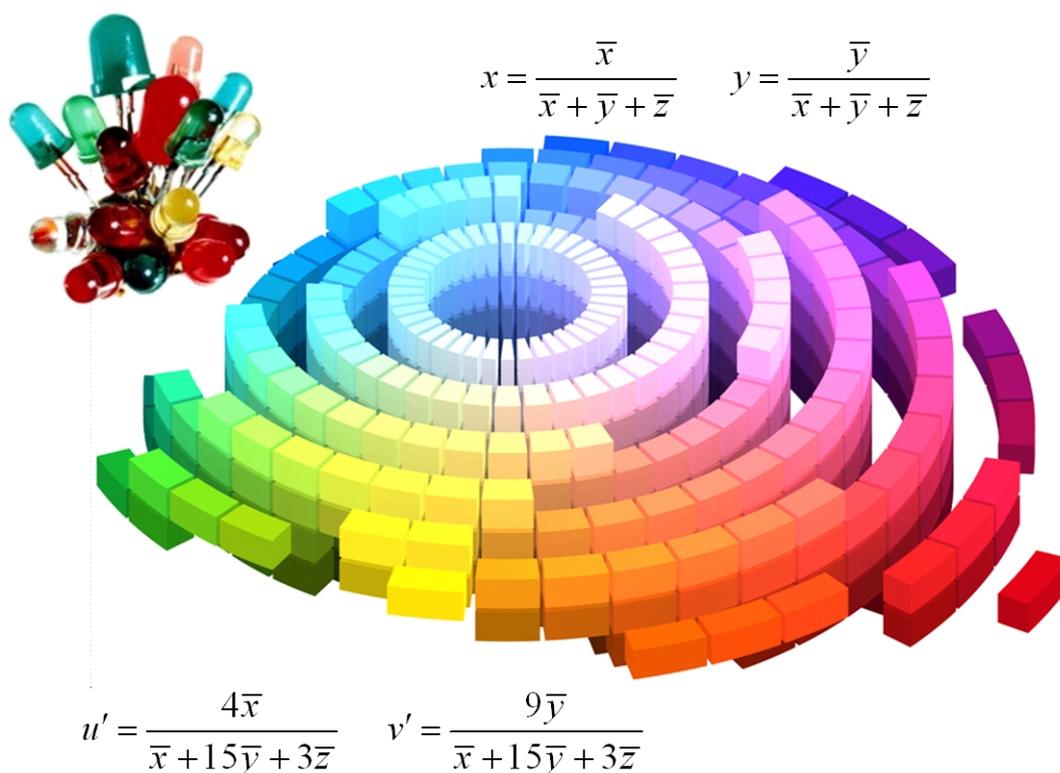


Горбунова Е.В., Чертов А.Н.
КОЛОРИМЕТРИЯ ИСТОЧНИКОВ
ИЗЛУЧЕНИЯ



Санкт-Петербург
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов

**КОЛОРИМЕТРИЯ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург
2015**

Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Колориметрия источников излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.

Приводятся теоретические основы и методики расчета цветowych координат и координат цветности излучения источника. Также в общем виде представлены физиологические основы зрения. Кроме того приведены основные термины и определения колориметрии и принципы построения цветowych пространств. Помимо этого представлены правила проведения расчета цветовой температуры (и коррелированной цветовой температуры) и индекса цветопередачи источника излучения.

Учебное пособие предназначено для студентов по направлению подготовки магистров 12.04.02 – «Опtotехника».

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета Лазерной и световой инженерии, протокол № 11 от 10.11.2015.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2015
©Е.В.Горбунова, А.Н. Чертов., 2015

Содержание

СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	5
1 ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТОВ	8
1.1 Строение визуального аппарата человека.....	8
1.2 Механизм светового и цветового ощущения.....	14
1.3 Движения глаз	19
1.4 Адаптация зрительного восприятия.....	23
2 ЦВЕТ – ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СВОЙСТВА	27
3 СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЦВЕТА (ЦВЕТОВЫЕ ПРОСТРАНСТВА)	35
3.1 Способы смешения цветов.....	35
3.2 Законы Грассмана	37
3.3 Свойства цветовых пространств	39
3.4 Системы цветовых измерений.....	40
4 СВОЙСТВА ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ (ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ)	46
4.1 Основные величины и единицы их измерения	46
4.2 Характеристики излучающих диодов.....	50
5 РАСЧЁТ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ ИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ	56
6 ПОНЯТИЕ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	64
7 ПЕРЕСЧЕТ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ	72
7.1 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 2003 г. CIE $L^*a^*b^*$	72
7.2 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $L^*u^*v^*$	73
7.3 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE LCH	74
7.4 Пересчет из цветового пространства XYZ в цветное пространство RGB	76
8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ.....	81
9 ИНДЕКСЫ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ.....	87
9.1 Индекс цветопередачи для источников излучения, расположенных на кривой Планка.....	90
9.2 Расчёт индекса цветопередачи для источников излучения, расположенных вне кривой планка.....	92
10 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ	96
Литература	102
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	104

СОКРАЩЕНИЯ

ИД – излучающий диод.

ИК – инфракрасный.

КЦТ – коррелированная цветовая температура.

МКО – международная комиссия по освещению.

УФ – ультрафиолетовый.

ЦТ – цветовая температура.

М колбочки – светочувствительные клетки сетчатки, содержащие пигмент Родопсин 7 хлоролаб (чувствительный в зеленой области спектра).

L колбочки – светочувствительные клетки сетчатки, содержащие пигмент Родопсин 5 эритролаб (чувствительный в красной области спектра).

S колбочки – светочувствительные клетки сетчатки, содержащие пигмент Родопсин 9 цианолаб (чувствительный в синей области спектра).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

Источник типа A – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 2856°K (ГОСТ 7721-89).

\vec{A} – цвет.

Источник типа B – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 4874°K . Воспроизводит условия прямого солнечного освещения (ГОСТ 7721-89).

c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Источник типа C – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 6774°K . Воспроизводит условия освещения рассеянным дневным светом (ГОСТ 7721-89).

CRI – полный индекс цветопередачи.

CRI_i – частный индекс цветопередачи.

d – расстояние от точки, характеризующей исследуемый источник излучения, до ближайшей изотермической линии на цветовой диаграмме МКО 1976 г.

Источник типа D_{65} – источник, относительное спектральное распределение энергии которого в видимой области спектра соответствует излучению абсолютно черного тела при температуре 6504°K . Воспроизводит условия освещения усредненным дневным светом (ГОСТ 7721-89)

E – освещенность.

\vec{E} – цвет белой поверхности, освещенной источником типа E .

Источник типа E – источник, спектральная плотность излучения которого в видимой области спектра постоянна.

$f_B(Q)$ – распределение носителей в разрешенных зонах невырожденного полупроводника.

h – постоянная Планка ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с).

$h\nu$ – энергия кванта излучения.

I – сила излучения (сила света).

K – весовой коэффициент.

K_m – максимальная спектральная световая эффективность излучения при $\lambda = 0,555$ мкм ($K_m = 683$ лм/Вт).

k – постоянная Больцмана ($k = 1,38067 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

k_c – множитель.

k_v – квазиволновой вектор.
 L – яркость.
 M – светимость.
 $M(\lambda)$ – спектральное распределение светимости источника излучения.
 m_e^* – эффективная масса электрона.
 m_h^* – эффективная масса дырки.
 m_r^* – приведенная масса.
 \bar{n}_{air} – показатель преломления воздуха.
 \bar{n}_s – показатель преломления полупроводника.
 $P_\lambda(\lambda)$ – распределение спектральной плотности излучения источника по длине волны.
 $P_{\lambda_{max}}$ – максимум распределения спектральной плотности излучения источника.
 Q – энергия.
 Q_C – энергия экстремума зоны проводимости.
 Q_E – энергия электрона в зоне проводимости.
 Q_g – ширина запрещенной зоны.
 Q_H – энергия дырок в валентной зоне.
 Q_V – энергия экстремума валентной зоны.
 $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$ – трехцветная система измерения цвета через три основных цвета \vec{R} , \vec{G} и \vec{B} .
 $R_i(\lambda)$ – спектральное распределение отражательной способности i -той поверхности.
 r – радиус.
 $\bar{r}_0(\lambda)$, $\bar{g}_0(\lambda)$, $\bar{b}_0(\lambda)$ – физиологические кривые сложения цветов.
 (r, f) – координаты цветностей в цветовом пространстве $Lu'v'$, характеризующие адаптивный цветовой сдвиг координат (u', v') при использовании исследуемого источника освещения.
 T – температура в градусах Кельвина.
 t – тангенс наклона изотермической линии.
 T_c – цветовая температура источника излучения.
 T'_c – коррелированная цветовая температура источника излучения.
 t_s – время.
 u', v' – координаты цветностей на цветовой диаграмме МКО 1976 г.
 $V(\lambda)$ – относительная кривая видности глаза (относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения).

x, y – координаты цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г.

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – координаты цвета цветового пространства XYZ.

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения цветов в $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ системе измерения цвета.

$\bar{x}_W, \bar{y}_W, \bar{z}_W$ – координаты цвета источника белого света в цветовом пространстве XYZ.

$\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ – трехцветная система измерения цвета через три основных цвета \vec{X}, \vec{Y} и \vec{Z} .

φ_c – критический угол полного внутреннего отражения.

λ – длина волны.

λ_{begin} – длина волны «начала» спектрального распределения.

λ_{dom} – доминирующая длина волны.

λ_{end} – длина волны «окончания» спектрального распределения.

λ_{max} – длина волны максимума спектрального распределения.

$\rho(Q)$ – комбинированная плотность энергетических состояний в зависимости от энергии.

Φ – поток.

ω – телесный угол.

1 ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТОВ

По определению [1] цвет – аффинная векторная величина трех измерений, выражающая свойство, общее всем спектральным составам излучения, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения. Под словом «излучение» при этом следует понимать также свет, отраженный и пропускаемый несамосветящимися телами.

Таким образом, само понятие «цвет» применимо исключительно к визуальному аппарату человека.

1.1 Строение визуального аппарата человека

Глаз является основным элементом визуального аппарата. По сути, он представляет собой сложную биологическую систему формирования изображения окружающего мира [2, 3, 4]. На рис. 1.1 показано устройство правого глазного яблока человека.

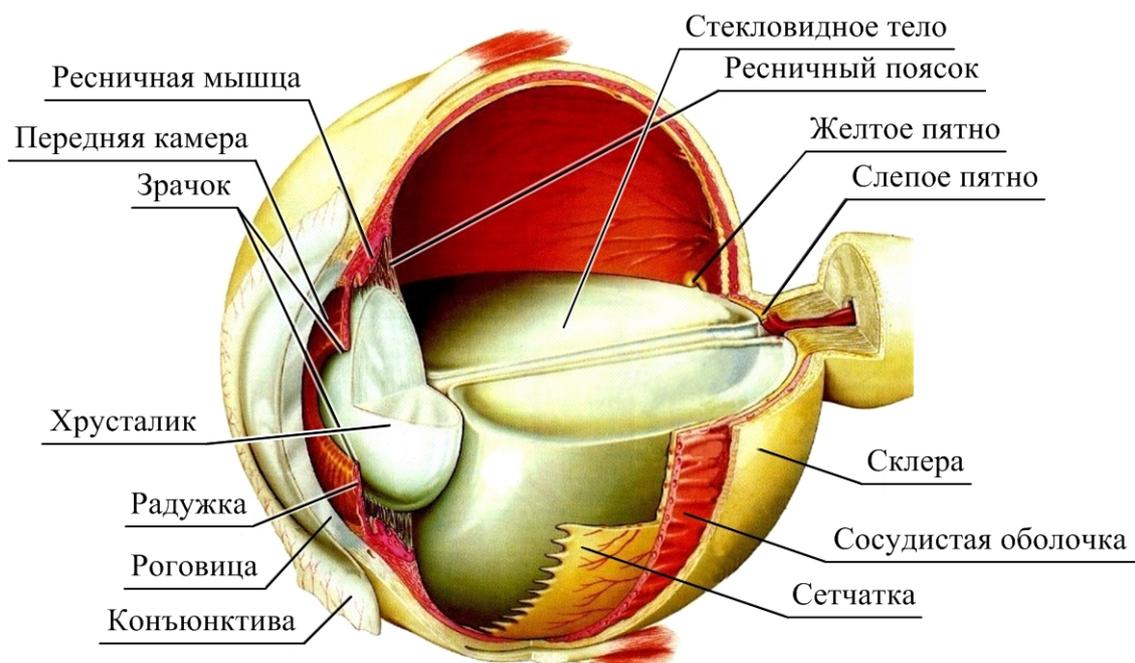


Рисунок 1.1 – Внутреннее строение глаза человека

Глазное яблоко снаружи покрыто непрозрачной оболочкой, называемой **склерой**. Она содержит небольшое количество нервных окончаний и сосудов. К склере крепятся шесть мышц, которые обеспечивают движения глаза. Склера непрозрачна по всей поверхности, кроме небольшой передней немного выпуклой области, называемой **роговицей** (или роговой оболочкой). Роговица отличается высокой прозрачностью и пропускает свет в **переднюю камеру** глаза. Передняя камера заполнена прозрачной жидкостью – водянистой влагой. С другой стороны передняя камера ограничена непрозрачной перегородкой,

называемой **радужкой** (или радужной оболочкой) и определяющей цвет глаз человека. В центре радужки находится круглое отверстие – **зрачок**.

За радужкой располагается задняя камера глаза. В передней части задней камеры располагается **хрусталик** – «естественная» линза глаза. В норме он прозрачен и эластичен, отличается слоистым строением. Хрусталик может видоизменяться посредством сокращения ресничных мышц (может менять свою форму, почти мгновенно «наводя фокус»), за счет чего человек видит хорошо и вблизи, и вдали. Основную часть задней камеры глаза заполняет студенистое прозрачное вещество – **стекловидное тело**. Оно поддерживает форму глазного яблока и участвует во внутриглазном обмене веществ. **Сосудистая оболочка** выстилает задний отдел склеры, к ней прилегает **сетчатка**, с которой она тесно связана. Сосудистая оболочка ответственна за кровоснабжение внутриглазных структур. В ней нет нервных окончаний, поэтому при ее заболевании не возникают боли, обычно сигнализирующие о каких-либо неполадках.

Сетчатка состоит из фоторецепторов, чувствительных к излучению видимого диапазона спектра, и нервных клеток. Клетки-рецепторы (или светочувствительные клетки), расположенные в сетчатке, делятся на два вида: палочки и колбочки. В данных фоточувствительных клетках, происходит преобразование энергии света в электрическую энергию нервной ткани. Палочки обладают высокой светочувствительностью и позволяют видеть при плохом освещении, также они отвечают за периферическое зрение. Колбочки, наоборот, требуют для своей работы большего количества света, но именно они позволяют разглядеть мелкие детали (отвечают за центральное зрение) и дают возможность различать цвета. Наибольшее скопление колбочек находится в **желтом пятне** (или центральной ямке), отвечающей за самую высокую остроту зрения. **Слепое пятно** – место на сетчатке глаза, в котором собираются нервные волокна, идущие от рецепторов, и формируется зрительный нерв. Положение слепого пятна правого глаза не совпадает с положением слепого пятна левого глаза, поэтому человек их не замечает.

Устройство сетчатки глаза Сетчатка (рис. 1.2) представляет собой сложную биологическую ткань, состоящую из нескольких слоёв и обладающую огромным количеством нервных клеток. Свет проникает сквозь сетчатку через слои нейронов, нервных клеток и окончаний и падает на настоящие преобразователи света, прикрепленные к пигментному эпителию – колбочки и палочки.

Необходимо отметить, что сетчатка представляет собой не просто слой светочувствительных клеток (палочки и колбочки), она вмещает в себя также систему предварительной обработки зрительных данных (горизонтальные, биполярные, амакринные и ганглиозные клетки) и систему восстановления светочувствительных клеток после их засветки (пигментный эпителий).

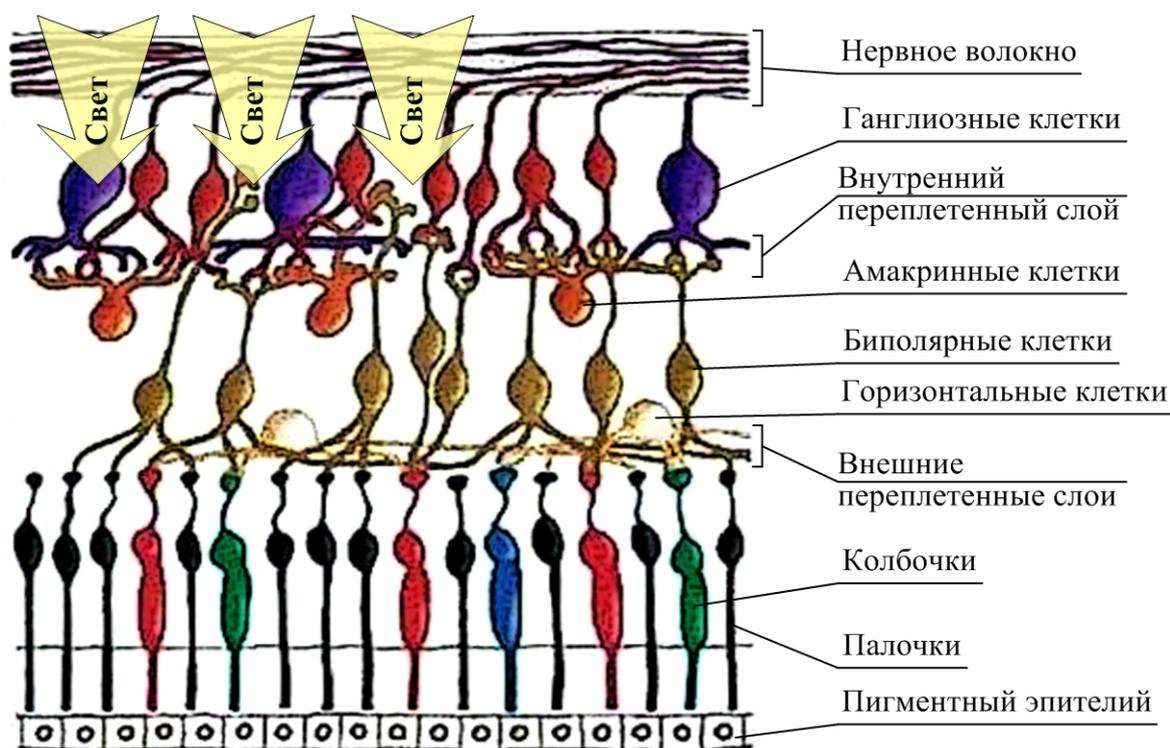


Рисунок 1.2 – Устройство сетчатки

Следует отметить, что количество синаптических связей клеток сетчатки может существенно варьироваться от 20 до 40000. За счет такой вариативности связей клеток происходит своеобразное сжатие изображения, позволяющее передавать в мозг только необходимые данные об элементах изображения видимых объектов.

Светочувствительные клетки сетчатки – палочки и колбочки (рис. 1.3). Данные клетки содержат пигменты, чувствительные к свету. Эти пигменты преобразуют фотоны света, падающие на клетки в элентрические сигналы. Данные сигналы транслируются через синаптические связи клеток, сначала биполярных, затем ганглионарных. Затем они передаются с помощью аксонов к зрительному нерву и коре головного мозга.

Палочки – светочувствительные клетки сетчатки глаза, отвечающие за сумеречное или ночное зрение. Их количество в сетчатке превышает 120 млн. Спектральная характеристика чувствительности палочек имеет максимум при длине волны около 495 нм. Палочки обладают свойством медленной, но эффективной адаптации к переменам яркости. Следует отметить, что чувствительность палочек в темноте такова, что даже один квант света может вызвать сигнал, поддающийся измерению. Однако для того, чтобы визуальный аппарат был способен воспринять свет, необходимо активировать хотя бы 7 палочек.

Колбочки – светочувствительные клетки сетчатки глаза, обуславливающие цветное зрение. Их количество в сетчатке превышает 6 млн. Они также играют большую роль в пространственном разрешении глаза. Колбочки обладают свойством быстрой, но слабой адаптации к

перемене яркости. Чтобы получить измеримый сигнал в колбочке, необходимо примерно сто фотонов. Однако, реакция колбочки (примерно 70 мс) в 4 раза быстрее, чем реакция палочки (примерно 300 мс).

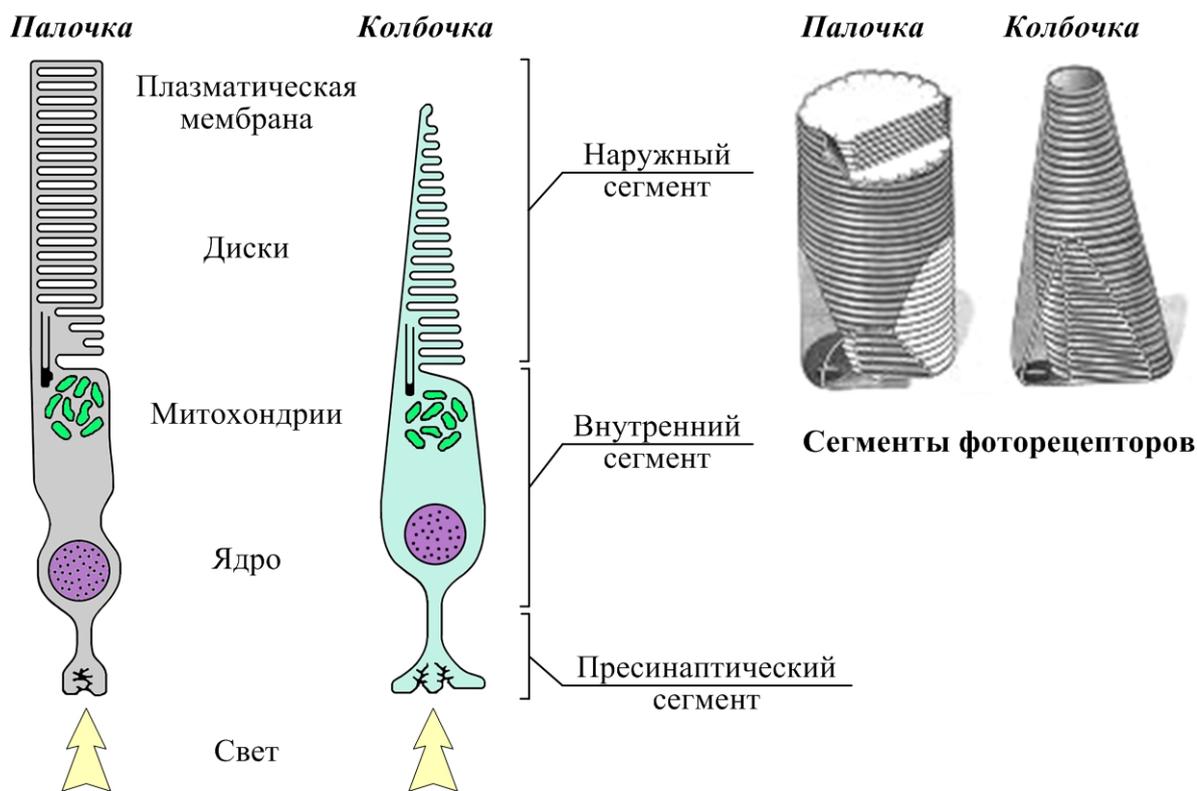


Рисунок 1.3 – Клетки, чувствительные к свету

Сами колбочки подразделяются на три группы, чувствительные в различных областях спектра: красные (L), зелёные (M) и синие (S). У некоторых женщин был обнаружен четвертый вид колбочек.

Светочувствительные клетки располагаются на сетчатке в виде мозаики, подобной мозаике пчелиного улья (рис. 1.13), и структура этой мозаики различна у разных людей. У большинства людей около 65% красных колбочек, 35% зелёных колбочек и лишь от 4% до 2% синих колбочек. К тому же синие колбочки совершенно отсутствуют в центре желтого пятна. С другой стороны, размер колбочек на жёлтом пятне гораздо значительнее размера колбочек на периферии, и поэтому их способность восприятия светового сигнала выше.

Если разрезать сетчатку правого глаза по горизонтали плоскостью, проходящей через жёлтое пятно и зрительный нерв, то можно проследить изменение концентрации светочувствительных клеток (рис. 1.4).

Из рис. 1.4 видно, что колбочки в основном сосредоточены в центральной части сетчатки, а палочки распределяются симметрично относительно центра. Как уже было сказано выше, в центре сетчатки находится желтое пятно (макула), диаметром около 3 мм и характеризующееся небольшим углублением в центре. Следует отметить, что желтое пятно

позволяет видеть зону не более 14 градусов. За пределами этой зоны, глаз практически не воспринимает цвета и имеет низкую чёткость изображения. Когда человек непрерывно смотрит на окружающий мир, именно мозг постоянно воспроизводит изображение этого мира во всем поле зрения.

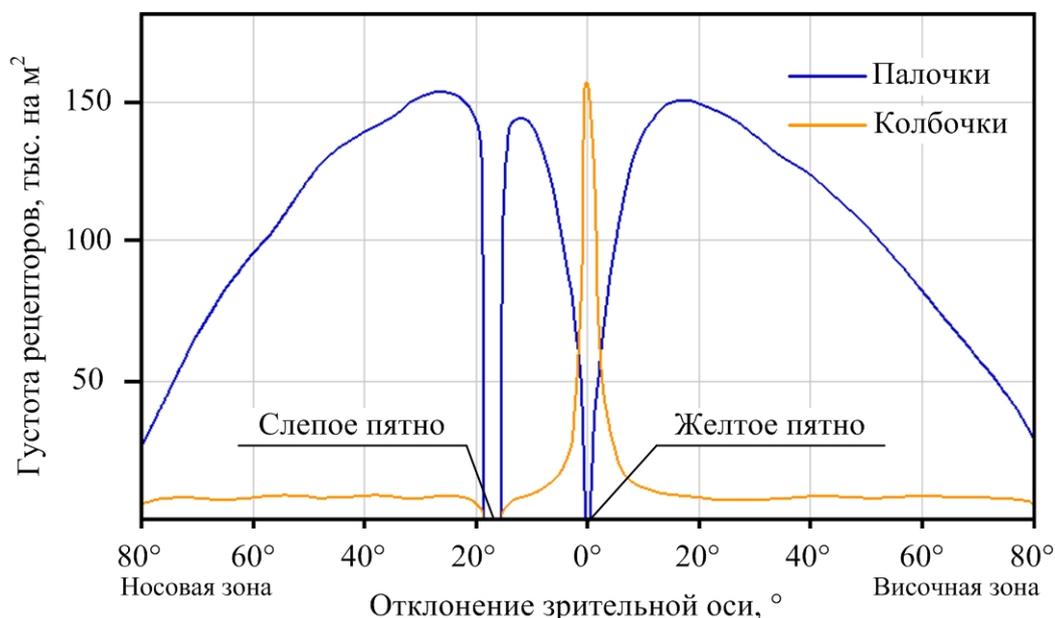


Рисунок 1.4 – Расположение рецепторов

В центральной зоне жёлтого пятна расположено наибольшее количество колбочек. Количество палочек увеличивается от центра до края желтого пятна. В самом центре желтого пятна густота колбочек составляет около 160 тысяч единиц на квадратный миллиметр, и совсем отсутствуют палочки. Здесь расположена центральная часть желтого пятна – **фовеола**. Она образует зону наиболее острого зрения. Угловое поле фовеолы не превышает 2 градусов.

Восприятие визуальной информации основано на противоречии: с одной стороны, в распоряжении имеется очень большое возможное количество информации, с другой стороны, эту информацию необходимо обработать самым эффективным образом. Поэтому на сетчатке гораздо больше светочувствительных клеток, чем передающих нервных волокон в зрительном нерве: более 160 млн. палочек и колбочек на, примерно, 1 млн. аксонов. Светочувствительные клетки, в особенности палочки, могут «группироваться» подобно тому, как это делается при сжатии изображения. При этом в сетчатке обнаружены нервные механизмы, реагирующие на особые «узоры изображения», с различными временными и пространственными характеристиками [4]. Глаз выделяет движение, изменение освещенности и др. свойства объектов изображения и передает их при помощи минимального количества нервных волокон в соответствующие зоны мозга. На рис. 1.5 представлена электрическая

активность одного нервного волокна, возникающая в ответ на изменение зрительного раздражителя.

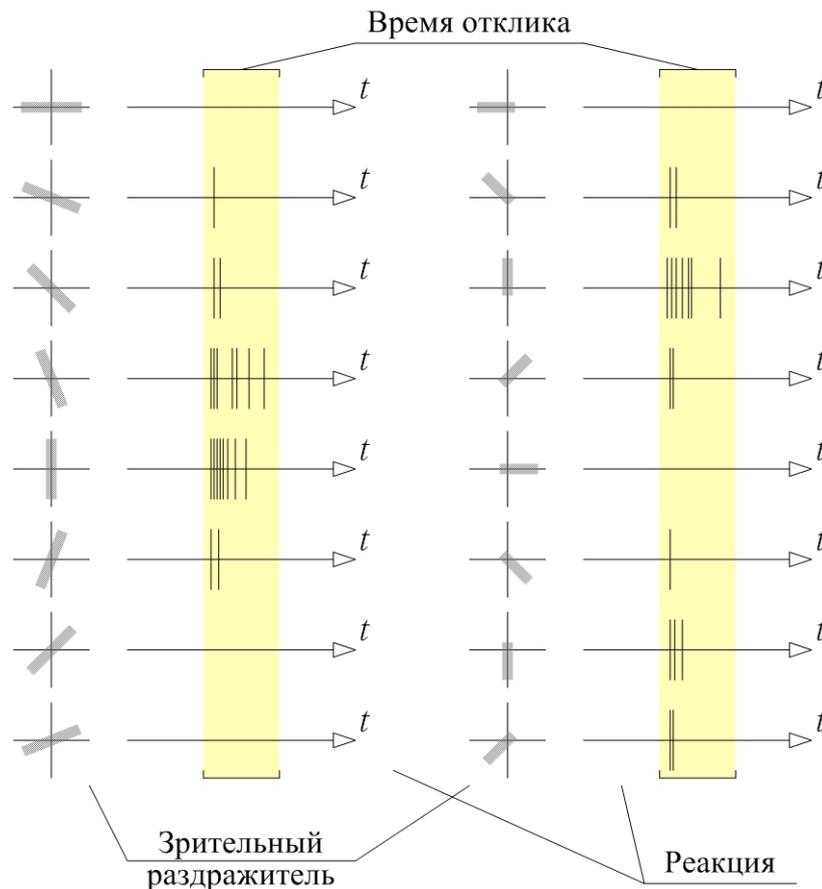


Рисунок 1.5 – Реакция нейрона

Таким образом, сразу несколько светочувствительных клеток могут быть прикреплены к одной и той же биполярной клетке (рис. 1.2). При этом количество «объединенных» светочувствительных клеток может изменяться. Например, на периферии сетчатки можно найти до 70 палочек на одну ганглиозную клетку. Так повышается чувствительность рецептора в ущерб разрешению. При этом боковое зрение также чувствительно к восприятию движения, хотя распознавание форм остается нечетким. Боковое зрение представляет собой зону бдительности и тревоги.

Исходя из всего сказанного выше, устройство зрительного аппарата человека таково, что ещё до поступления зрительного сигнала в мозг, происходит некая его первичная обработка (рис. 1.6). Данная обработка может быть разделена на несколько этапов: колориметрическую коррекцию и сжатие. Колориметрическая коррекция необходима для уменьшения влияния неравномерности распределения чувствительных элементов сетчатки (палочек и колбочек), а сжатие обусловлено тем, что количество волокон в зрительном нерве значительно меньше количества светочувствительных клеток сетчатки.

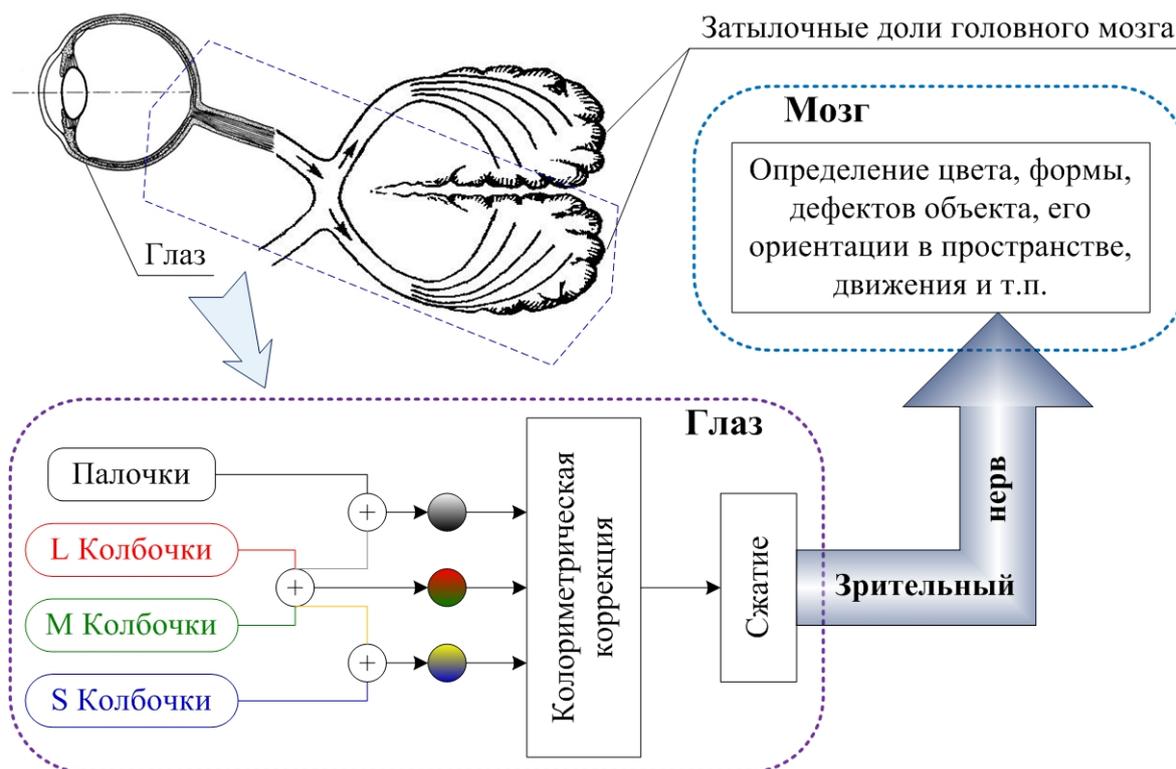


Рисунок 1.6 – Принцип получения изображения визуальным аппаратом человека

Волокна зрительного нерва передают преобразованный зрительный сигнал в мозг, где происходит его интерпретация и человек может видеть цвет объекта, предположить его форму, дефекты, ориентацию в пространстве, как и куда он движется и т.д.

1.2 Механизм светового и цветового ощущения

Биофизическая природа зрения основана на взаимодействии отдельных молекул (ретиноидов) с излучением. Эти молекулы являются производными ретинола (витамин А1), который отвечает за жёлто-оранжевую окраску сетчатки.

В палочках присутствует всего лишь одна разновидность ретиноидов – родопсин, а в колбочках содержатся многие виды. В целом насчитывается более двенадцати [5] разных видов, но из них выделяются четыре, особенно заметные в колбочках. Это родопсины 5, 7 и 9 (табл. 1.1) а также вещество, чувствительное к ультрафиолетовым волнам – родопсин 11 [6]. Однако нужно отметить, что роговица, водянистая влага, хрусталик и стекловидное тело поглощают большую часть ультрафиолетового излучения (УФ). Красные, зелёные и синие колбочки содержат смесь всех этих ретиноидов, но в каждом виде колбочек в большем количестве присутствует один вид ретиноидов, причём в пропорции в 1000 раз больше, чем все остальные.

В клетках колбочек и палочек есть тысячи мембранных дисков (см. рис. 1.3), образованных плазматическими складками и на которых

прикреплены длинными цепочками молекулы ретиноидов. Таким образом, образуется настоящее фрактальное пространство для улавливания света.

Таблица 1.1 – Параметры поглощения некоторых ретиноидов

Пигмент	Спектральное поглощение		
	λ_{begin} , нм	λ_{max} , нм	λ_{end} , нм
Родопсин 5 (эритролаб)	595	625	655
Родопсин 7 (хлоролаб)	500	532	565
Родопсин 9 (цианолаб)	400	437	475
Родопсин 11 (чувствителен к УФ)	300	432	385

С точки зрения физики все рассмотренные молекулы похожи между собой. Они состоят из семи длинных цепочек опсина, окружающих небольшую, но особенную молекулу – 11-цис-ретиналь (рис. 1.7). Когда фотон сталкивается с такой молекулой, есть 50%-ная вероятность, что она [молекула] «развернётся» и превратится в изомер – транс-ретиналь.

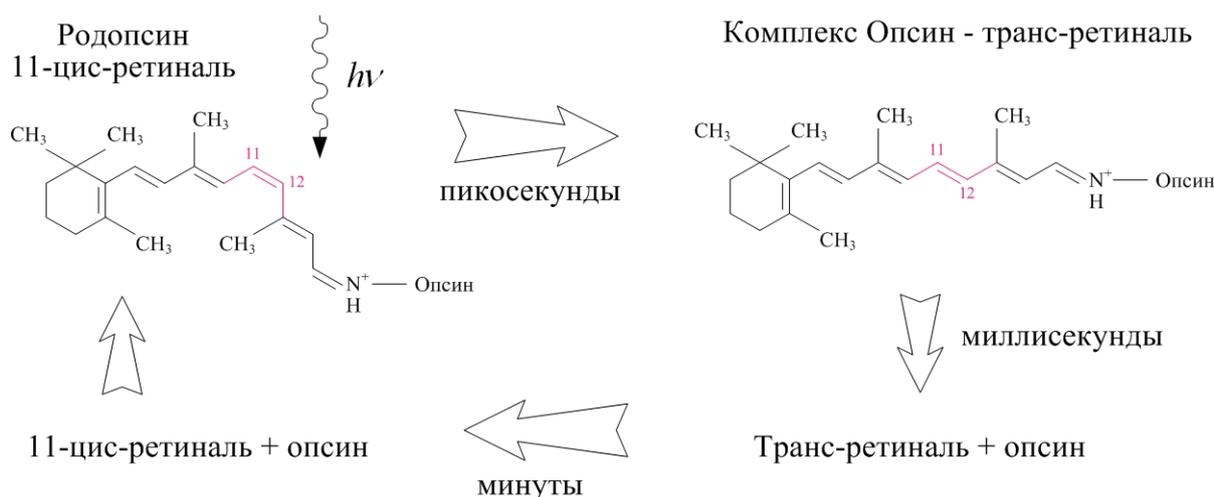


Рисунок 1.7 – К пояснению фотохимической реакции

В темноте 11-цис-ретиналь прочно связан с белком опсином. Захват фотона приводит к изомеризации 11-цис-ретиная в транс-ретиналь. При этом комплекс опсин-транс-ретиналь через несколько химических превращений довольно быстро диссоциирует на опсин и транс-ретиналь [3]. Регенерация родопсина зависит от взаимодействия клеток пигментного эпителия и светочувствительных клеток. В случае ослепления родопсин восстанавливается из зрительного пурпура, то есть из ретиноидов пигментного эпителия.

Это явление создаёт основу нервной информации. В темноте в наружных сегментах светочувствительных клеток (рис. 1.3) протекает постоянный входящий «темновой» ток [7]. В результате постоянный мембранный потенциал светочувствительных клеток составляет примерно –40 мВ. Входящий ток в темноте переносится в основном ионами натрия,

следующими вдоль электрохимического градиента через катионные каналы наружного сегмента светочувствительных клеток. Под действием света катионные каналы закрываются. Таким образом, значение мембранного потенциала смещается к значению равновесного калиевого потенциала, составляющего примерно – 80 мВ. Соответственно, возникают условия для появления и трансляции зрительного сигнала по аксонам нервных клеток.

Особенное спектральное поглощение молекул опсина объясняет спектральную чувствительность колбочек, то есть основу спектральной чувствительности глаза при ночном зрении

Некоторые исследования биофизической природы зрения (главным образом, исследования в сфере сигналов, передающихся от биполярных клеток через ганглиозные к колленчатому телу мозга) наводят на мысль о том, что передача сигналов от сенсорных клеток может происходить тремя следующими способами (рис. 1.8 а).

- Ахроматический канал, построенный на противопоставлении красно-зеленого сигнала и отсутствия сигнала вообще;
- Красно-зеленый канал, построенный на противопоставлении сигналов, полученных от красных и зелёных колбочек;
- Сине-жёлтый канал, построенный на противопоставлении красно-зеленого сигнала от сигнала от синих колбочек.

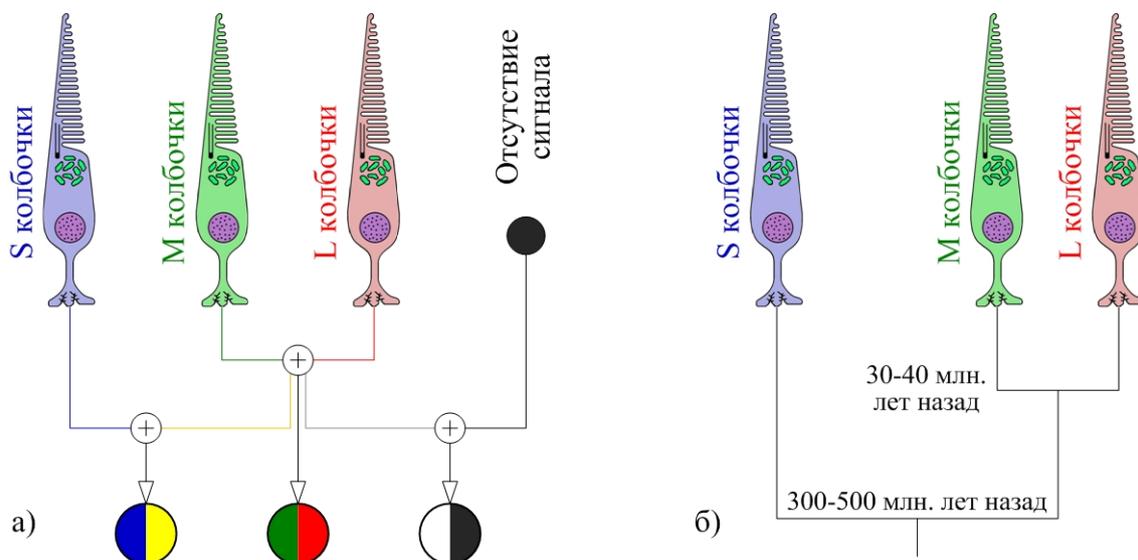


Рисунок 1.8 – Эволюция и структура цветового восприятия

Данная идея была впервые выдвинута Эвальдом Герингом (1834-1918гг.). Геринг оспаривал теорию Германа фон Геймгольца о трёх типах светочувствительных клеток, передающих три определённых вида сигналов. В пользу теории Геринга говорят исследования эволюции строения сетчатки у млекопитающих и высших приматов (рис. 1.8 б). Согласно существующей теории эволюции, расхождение синих и зелёных колбочек произошло около 300-500 млн. лет назад. Разделение красный и

зелёных колбочек произошло гораздо позднее – около 30-40 млн. лет назад. Таким образом, структуру сигналов цветового восприятия можно логически вывести из представленных теоретических данных.

Максимальная спектральная чувствительность колбочек так называемого «стандартного наблюдателя» составляет 565 нм для красных колбочек, 540 для зелёных колбочек и 440 для синих колбочек (рис. 1.9), хотя по этому вопросу имеются расхождения у разных авторов и у наблюдаемых индивидов. Необходимо отметить, что чувствительность палочек достигает максимума при 495 нм – прямо посередине между синими и зелёными колбочками.

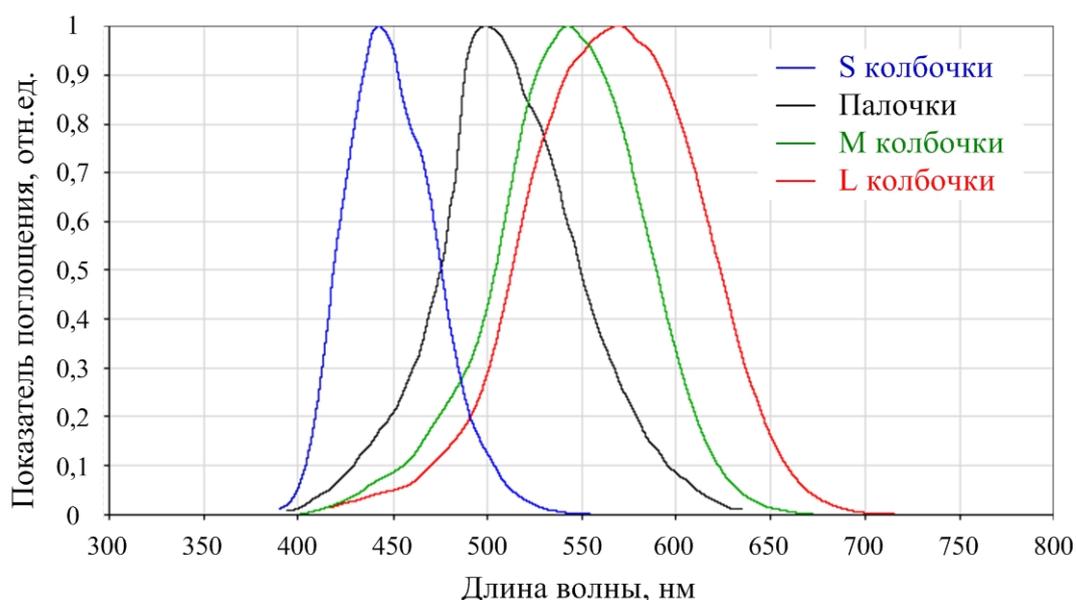


Рисунок 1.9 – Чувствительность светочувствительных клеток глаза

Исходя из анализа спектров поглощения ретиноидов светочувствительных клеток, напрашивается первый вывод: спектральная чувствительность красных и зелёных колбочек довольно близка. Красные колбочки в реальности имеют максимальную чувствительность к жёлтому цвету. Поэтому их следовало бы называть скорее жёлтыми. Но математически и логически очень сложно разработать систему трёхцветного воспроизведения цветного изображения, основываясь на точных значениях чувствительности колбочек, так как в этом случае охватываемое цветовое пространство получается слишком ограниченным. Поэтому международная комиссия по освещению (МКО) приняла за основные цвета спектра красный, синий и зелёный, пики чувствительности глаза к этим цветам приходится соответственно на 605 нм, 545 нм и 445 нм соответственно. Кроме того, спектральная чувствительность колбочек должна быть ограничена поглощением макулой жёлтого цвета.

Следует отметить нелинейность отображения визуальным аппаратом яркости воспринимаемого излучения (рис. 1.10) [2].

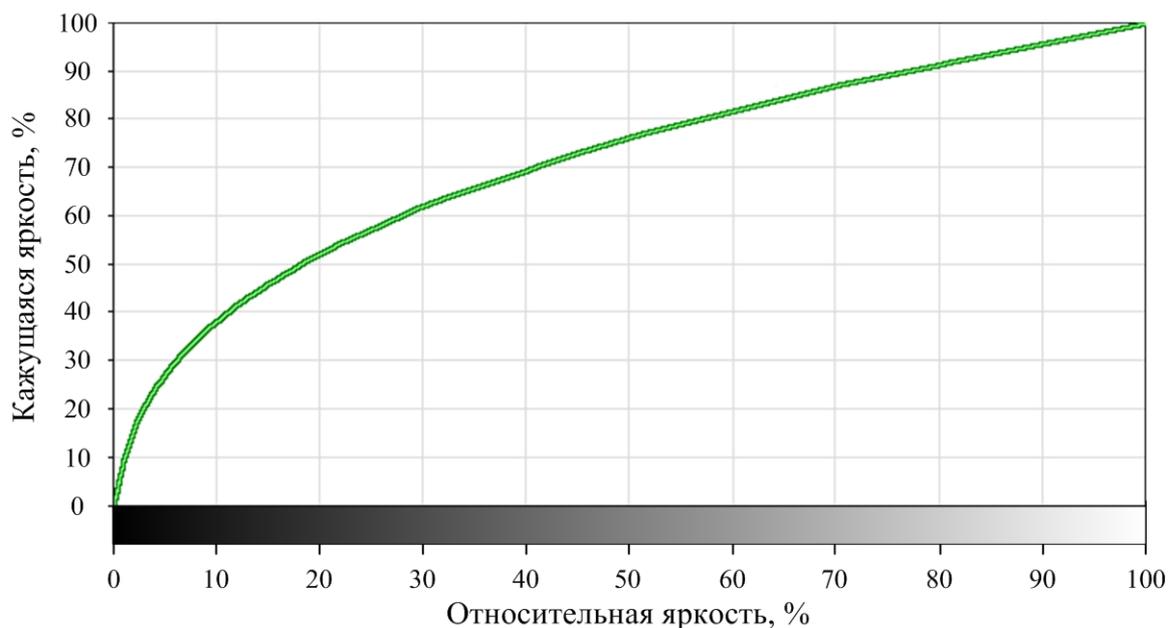


Рисунок 1.10 – Восприятие яркости

Если рассматривать графики спектральной чувствительности красных и зелёных колбочек, можно сделать вывод, что ощущение насыщенного красного цвета может быть получено только в том случае, если красные колбочки передают цветовой сигнал, а зелёные колбочки – нет. Очевидно и обратное утверждение о восприятии насыщенного зелёного цвета. Обе системы работают на противопоставлении, а иначе невозможно было бы точно различать цвета в гамме от зелёного до красного.

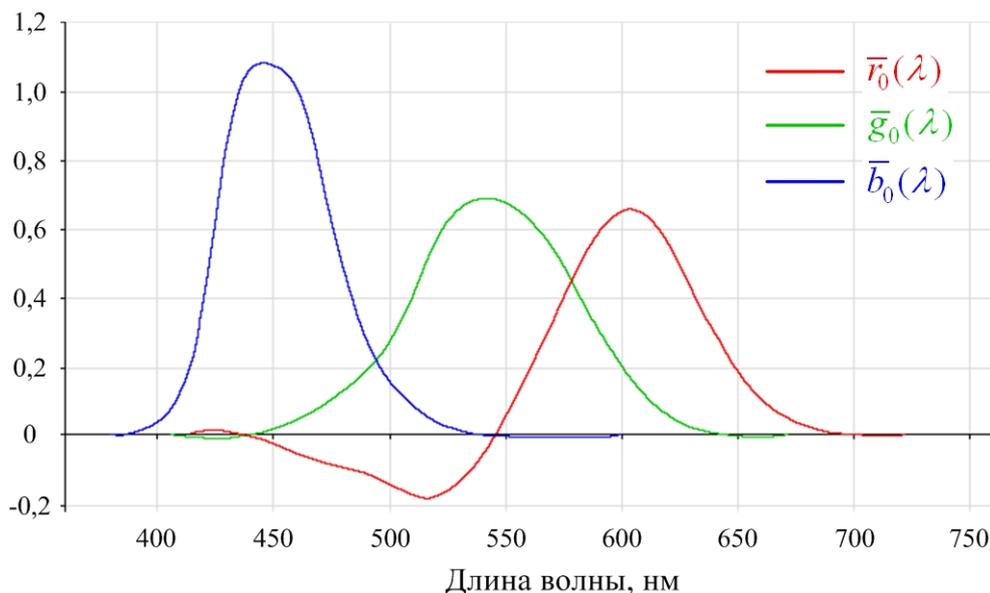


Рисунок 1.11 – Кривые сложения

Путем измерения на колориметре цветов монохроматического излучения с последующей энергетической нормировкой были получены **функции** сложения цветов. Эти функции задаются таблицами и

представляются графически в виде так называемых **кривых** сложения [8]. На рис. 1.11 представлены физиологические кривые сложения $\bar{r}_0(\lambda)$, $\bar{g}_0(\lambda)$, $\bar{b}_0(\lambda)$ для системы основных спектральных цветов 445, 545 и 605 нм. Следует отметить, что нормировка ординат кривых сложения производится с учетом того, что площади под кривыми должны быть равны друг другу.

Свойства восприятия визуального аппарата таковы, что глаз можно считать идеальным нуль-индикатором, т.е. с его помощью можно с максимальной долей достоверности утверждать, что цвета разные (или одинаковые) в данных условиях наблюдения, но невозможно точно определить разницу между цветами, если они отличаются (рис. 1.12 а).

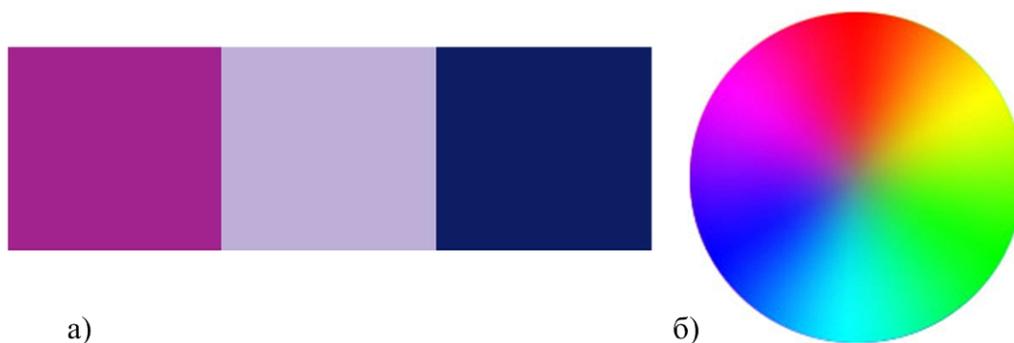


Рисунок 1.12 – Особенности восприятия цвета

Кроме того, человек не в состоянии видеть больше семи цветовых оттенков одновременно, поэтому в радуге одновременно мы видим только семь цветов (рис. 1.12 б). Если взять кусочек радуги и посмотреть на него, то в нем глазом мы различим ещё семь различных оттенков – и так может продолжаться очень долго, до достижения физиологического порога разделения цветовых оттенков.

1.3 Движения глаз

Визуальный аппарат способен получать изображение не только вследствие возможности восприятия квантов излучения чувствительными клетками сетчатки, но и вследствие постоянных движений глаза – саккад (рис. 1.13 а), микросаккад (рис. 1.13 б), дрейфа (рис. 1.13 в) и тремора (рис. 1.13 г). Эти движения вызываются сокращением шести мышц глазного яблока, прикрепленных к его внешней поверхности.

Когда человек читает, его глаза быстро перемещаются слева направо маленькими скачками, так что каждое следующее слово последовательно оказывается в фокусе изображения. Немного понаблюдав за собой, мы сможем уловить частые сокращения глазных мышц. Каждую долю секунды они слегка сдвигают положение вашего глазного яблока, автоматически, без сознательных усилий с вашей стороны.

Саккады (большие произвольные движения глаз) – это очень быстрые движения, подобные рывку, которые происходят несколько раз в

секунду и используются глазами в таких сканирующих движениях, как чтение или рассматривание объекта (рис. 1.13 а). Глаза синхронно перескакивают с одного мелкого элемента объекта на другой. В момент, когда происходят саккады, зрение размыто, так что между прыжками оно прекращается, что дает системе глаз-мозг время расшифровать напечатанные буквы (составить смысловые фразы) или распознать и запомнить элемент рассматриваемого объекта.

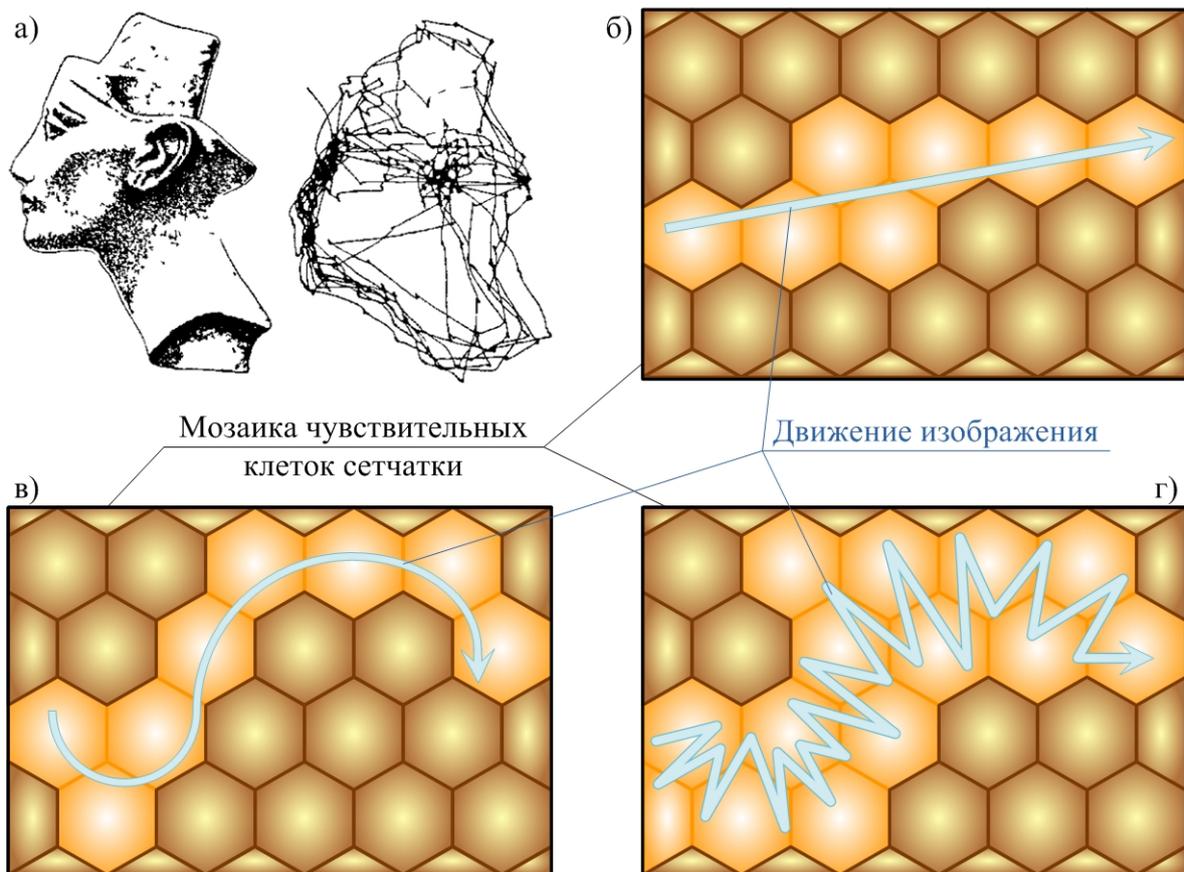


Рисунок 1.13 – Движения глаза

Саккады, составляют лишь незначительную часть физической нагрузки, ложащейся на глазные мышцы. Глаза никогда не останавливаются, даже когда взор зафиксирован. Если бы удалось остановить глаза в момент фиксации взора, то статичная сцена просто перестала бы восприниматься.

Как ни странно, но ученые лишь недавно начали осознавать огромное значение так называемых фиксационных движений глаз. Самые большие из этих произвольных движений — **микросаккады**, смещающие изображение по сетчатке на ширину от десятков до нескольких сотен светочувствительных клеток. Однако без этих миниатюрных движений глаз не воспринимает неподвижные объекты [9].

Важнейшим фактором, определяющим эволюцию нервной системы животных, была необходимость обнаруживать изменения в окружающей

среде, поскольку такая способность обеспечивает выживание. Движение в поле зрения может сигнализировать о том, что приближается хищник или же уходит добыча, заставляя зрительные нейроны реагировать электрохимическими импульсами. Неподвижные объекты обычно не несут в себе никакой угрозы, поэтому мозг животных и их зрительная система изначально не предназначены для того, чтобы их замечать. Например, муха, сидящая неподвижно, невидима для лягушки, как и другие статичные объекты. Но стоит мухе взлететь, как лягушка сразу же заметит и схватит ее.

Лягушки не способны видеть неподвижные объекты, т.к. неизменный стимул ведет к адаптации нейронов, при которой они постепенно перестают реагировать на объект. Адаптация нейронов сберегает энергию, но одновременно и ограничивает сенсорное восприятие. Нейроны человека также адаптируются при неизменности стимула. Однако наша зрительная система намного лучше справляется с восприятием неподвижных объектов, т.к. глаза создают собственное движение. Микросаккады перемещают всю зрительную сцену по сетчатке, заставляя зрительные нейроны постоянно работать, и противодействуют тем самым адаптации (рис. 1.14 а). Таким образом, они позволяют видеть неподвижные объекты.

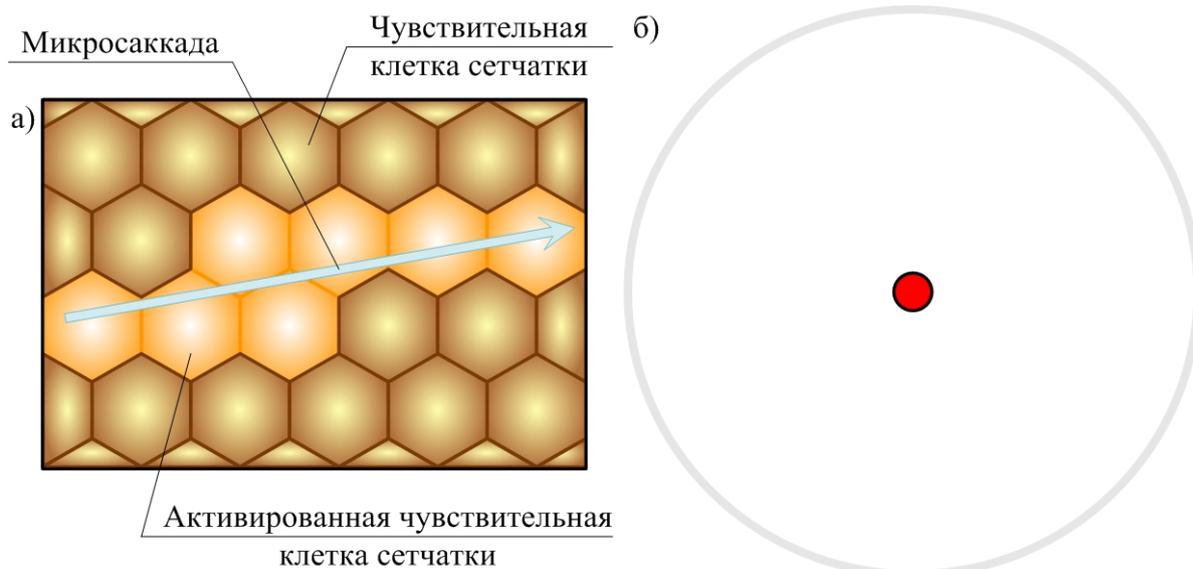


Рисунок 1.14 – Микросаккады и тест Троклера

Проверить действие микросаккад можно при помощи теста Троклера¹ (рис. 1.14 б). Необходимо смотреть на красную точку и внимательно следить за бледным кольцом. Вскоре кольцо исчезнет, и можно будет видеть только точку на белом фоне. Если переместить взгляд, то кольцо снова появится.

¹ В 1804 г. швейцарский философ Игнац Троклер обнаружил, что если сознательно фиксировать на чем-нибудь свой взгляд, то неподвижное окружение точки фиксации исчезает.

Дрейф представляет собой медленное движение глаз, с извилистой траекторией, наблюдающееся между быстрыми линейными микросаккадами. (рис. 1.15 а).

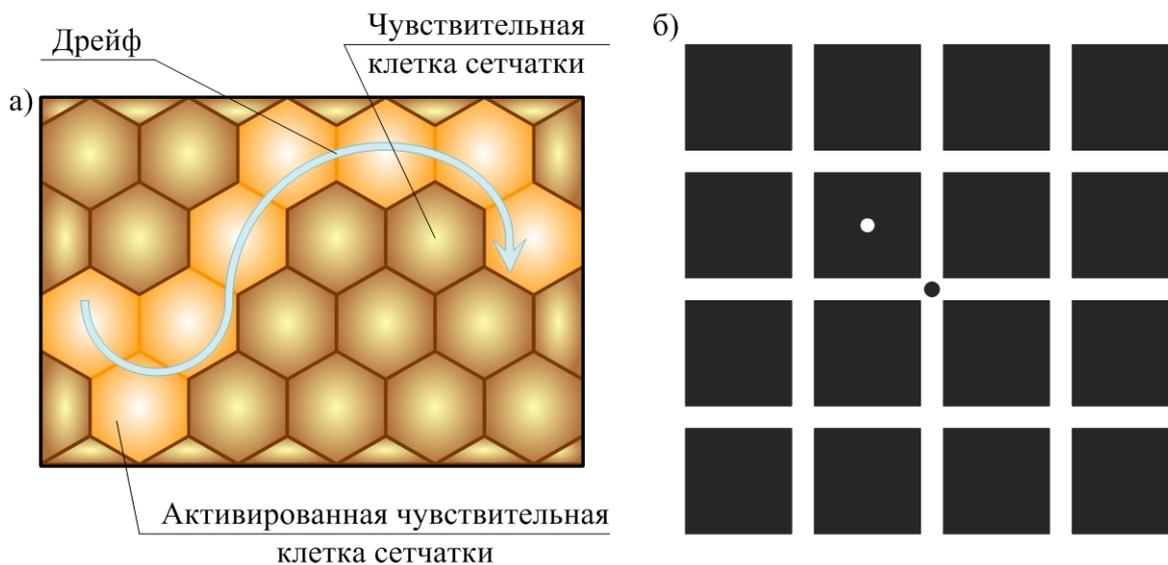


Рисунок 1.15 – Дрейф и черно-белая сетка

Существует способ наблюдения влияния эффекта дрейфа и саккадов на зрительную систему. Для этого необходимо пристально посмотреть на центр рисунка 1.15 б). Смотрите на черную точку в центре изображения в течение минуты, затем посмотрите на белую точку внутри черного квадрата. При этом можно увидеть легкий "мерцательный эффект", который кажется "прыгающим", независимо от того, как сильно наблюдатель пытается удержать глаза неподвижными. Обратите внимание на то, что темный послеобраз белого перекрестия находится в непрерывном движении. Это и есть фиксационные движения глаз.

Треморы — самые маленькие из движений глаз, накладывающиеся на дрейф (рис. 1.16 а). Треморы постоянно и быстро трясут или шатают глазное яблоко у его центра кругообразным способом, а так же заставляют роговицу и сетчатку глаз вращаться круговыми движениями с невероятно маленьким диаметром, приблизительно 0,001 миллиметра. Частота треморов составляет примерно от 30 до 70 раз в секунду.

Хотя треморы недостаточно велики, чтобы можно было «увидеть» их без увеличения, но без них человек не смог бы видеть.

Рассмотрим, к примеру, что бы произошло, если бы эти и все другие движения глаза прекратились, пока наблюдатель смотрит на чье-нибудь лицо. При этом светочувствительные клетки в сетчатке глаз быстро "стабилизируются" и перестают посылать обновленную информацию в мозг наблюдателя, в результате чего наблюдаемый образ исчезает в течение секунд, превращаясь в однообразный серый фон. Если бы человек, на которого смотрит наблюдатель, улыбнулся, то его губы, только губы,

моментаً появились бы из визуальной пустоты (подобно Чеширскому Коту из «Алисы в стране чудес»).

Таким образом, постоянное изменение в свете, который отражается в каждой клетке сетчатки глаз, чрезвычайно важно для того, чтобы постоянно видеть. Отсюда и необходимость в треморах – без треморов человеку пришлось бы рассматривать предмет с разных сторон или постоянно его освещать, чтобы разглядеть весь предмет за один раз.

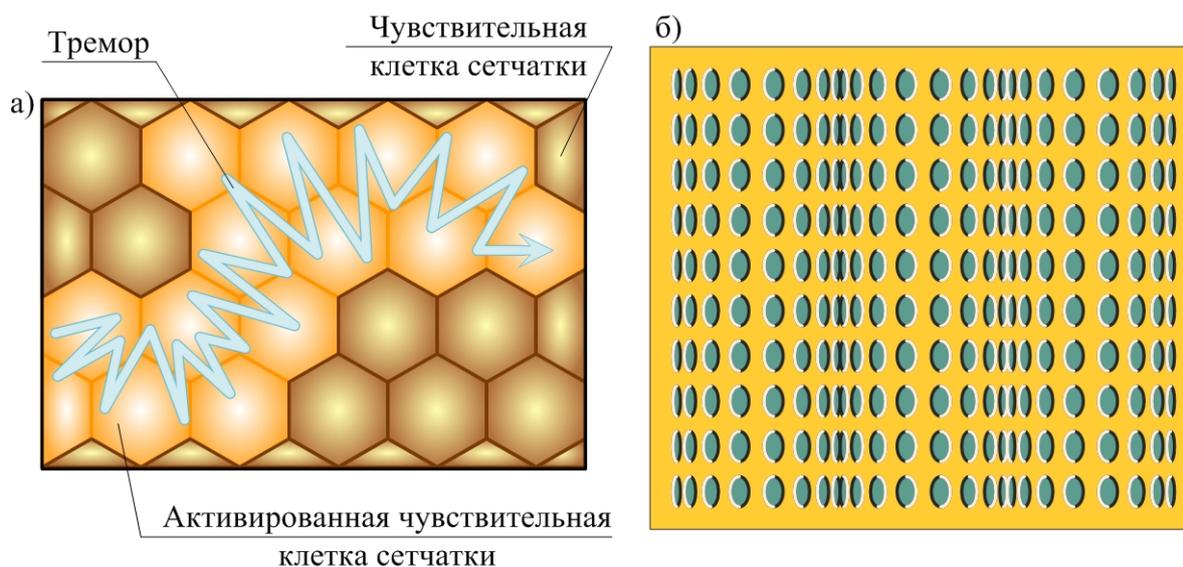


Рисунок 1.16 – Тремор и оптическая иллюзия

Явление треморов позволяют наблюдать различные иллюзии движения. Если позволить своим глазам «блуждать» по изображению (рис. 1.16 б), то вскоре можно увидеть, как по нему катятся три «волны». Но если зафиксировать взгляд на одном из пятен в центре картинке, то иллюзорное движение замедлится или даже прекратится.

1.4 Адаптация зрительного восприятия

Визуальный аппарат человека имеет потрясающую особенность – инвариантность восприятия цвета относительно спектрального состава освещения в повседневных условиях (т.е. восприятие цвета большинства объектов не зависит от спектрального состава освещения). Это явление называется **константностью цвета**. Кроме того, визуальный аппарат человека обладает свойством **константности восприятия светлоты** (оценки светлоты не зависят от абсолютных уровней энергии, а основаны на сравнении коэффициентов отражения). Благодаря этому свойству зрения, человек в состоянии оценить кусок угля как черный, а кусок мела как белый при совершенно разных условиях освещенности. Константность восприятия светлоты сохраняется при непосредственном сравнении угля и мела, даже если при низких уровнях освещенности абсолютное количество света, отраженного от куска мела меньше, чем света, отраженного от угля

при высоких уровнях освещенности. Эти свойства зрения обуславливают возможность человеку видеть мир стабильного цвета и яркости, а не непостоянный физический мир, в котором постоянно меняются длина волны и интенсивность света, отраженного от объектов зрительной сцены.

Константность хорошо сохраняется при наблюдении предмета с текстурированной поверхностью в сложной зрительной сцене, содержащей другие объекты с относительно высокой отражательной способностью. Тогда, при условии, что источник освещения излучает в достаточно широком диапазоне, между клетками коры головного мозга, связанными с различными светочувствительными клетками сетчатки, становятся возможными многие реакции сравнения. Таким образом, константность сохраняется, даже если освещение имеет прерывистый спектр или смесь полос длин волн. Однако, при монохроматическом освещении, отношения реакций, связанных цветовым стимулом, становятся искаженными.

Изменение цветового восприятия вызвано нарушением константности. Подобное происходит, если имеются заметные изменения спектрального состава излучения в зрительной сцене или если имеются локализованные яркие огни (например, лучи солнечного света, проникающие сквозь листву на затененной деревьями площади, или прожекторы для домашнего или театрального освещения). Тогда отношение интенсивностей отраженного света различных длин волн не будет сохраняться постоянным по всей зрительной сцене и будет происходить частичное или полное нарушение константности.

Чем меньше сравнений коэффициентов отражения длин волн происходит в поле зрения, тем меньше возможности для визуального аппарата сохранить константность. Аналогично, константность обычно нарушается, когда изолированные объекты наблюдаются на черном фоне. Константность нарушается в случае наблюдения малых объектов, с минимальными изменениями спектрального коэффициента отражения и текстуры поверхности. Более того, возникает постепенное нарушение константности, при уменьшении зрительного поля до очень малого углового размера, представляющего так называемое «туннельное зрение».

Визуальный аппарат имеет разнообразные механизмы для осуществления «оптимального» режима зрения вне зависимости от изменения условий освещения или свойств наблюдаемого объекта – механизмы адаптации. Адаптация может быть локальная или глобальная, во времени и/или в пространстве, к яркости и/или цвету.

Глобальная адаптация – это перестройка полностью всего зрительного аппарата, например, при входе в темную комнату из светлого помещения, или, наоборот, при выходе из темного подъезда на ярко освещенную солнцем улицу и т.п. **Локальная адаптация** зрительного аппарата представляет собой изменения в восприятии наблюдаемого объекта или какой-то его области (рис. 1.17).

Необходимо иметь в виду, что механизмы адаптации зрительного аппарата всегда активируются при появлении контраста в яркости или цвете. При этом контраст может быть одновременным или последовательным. Явление **одновременного контраста** связано с противопоставлением яркости или цвета близко расположенных областей пространства. **Последовательный контраст** обусловлен противопоставлением цветовых и яркостных параметров объекта при его наблюдении в течение некоторого времени и в момент, когда он исчезает.

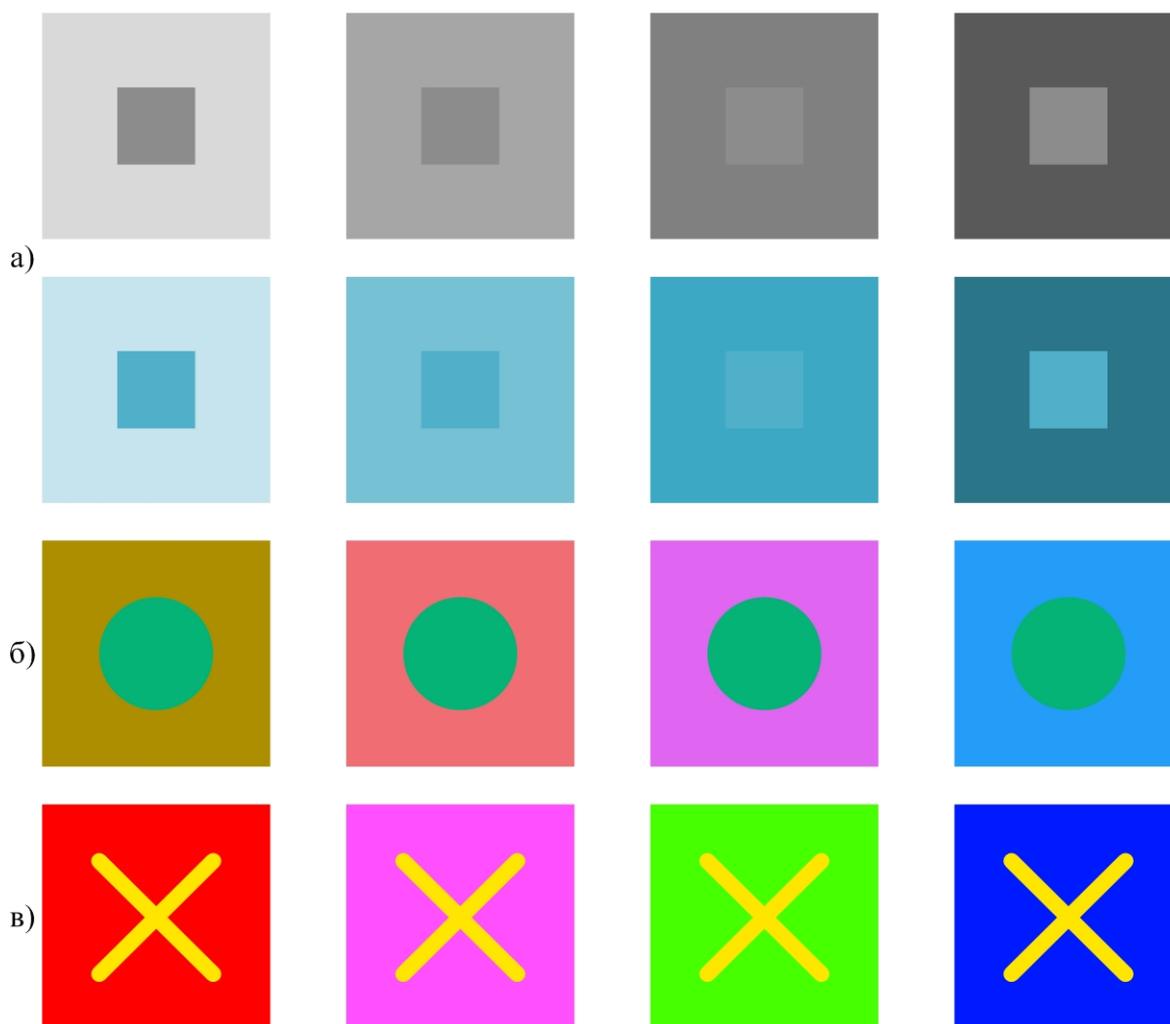


Рисунок 1.17 – Локальная адаптация к яркости, цвету, яркости и цвету

Пространственная адаптация основана на одновременном контрасте цветов. При этом один и тот же цветовой оттенок будет казаться другим при его наблюдении на различающихся фонах. Необходимо отметить, что пространственная адаптация может быть:

– к яркости (рис. 1.17 а) – наблюдаемый оттенок кажется темнее на светлом фоне или светлее на более темном фоне (при этом цветность оттенка не изменяется),

– к цвету (рис. 1.17 б) – наблюдаемый оттенок кажется имеющим дополнительную цветность, противоположную цвету фона (при этом яркость оттенка не изменяется) или

– одновременно к яркости и цвету (рис. 1.17 в) – наблюдаемый оттенок кажется изменившимся и цветность и яркость.

Адаптация во времени обусловлена скоростью реакции светочувствительных клеток сетчатки на световой стимул. Особенности физиологии восприятия таковы, что колбочки отличаются быстрой, но ограниченной адаптацией, а палочки характеризуются более медленной, но высокой адаптацией [2]. Период адаптации колбочек длится ориентировочно 10 минут (рис. 1.18). Адаптация палочек может продолжаться до полутора часов.

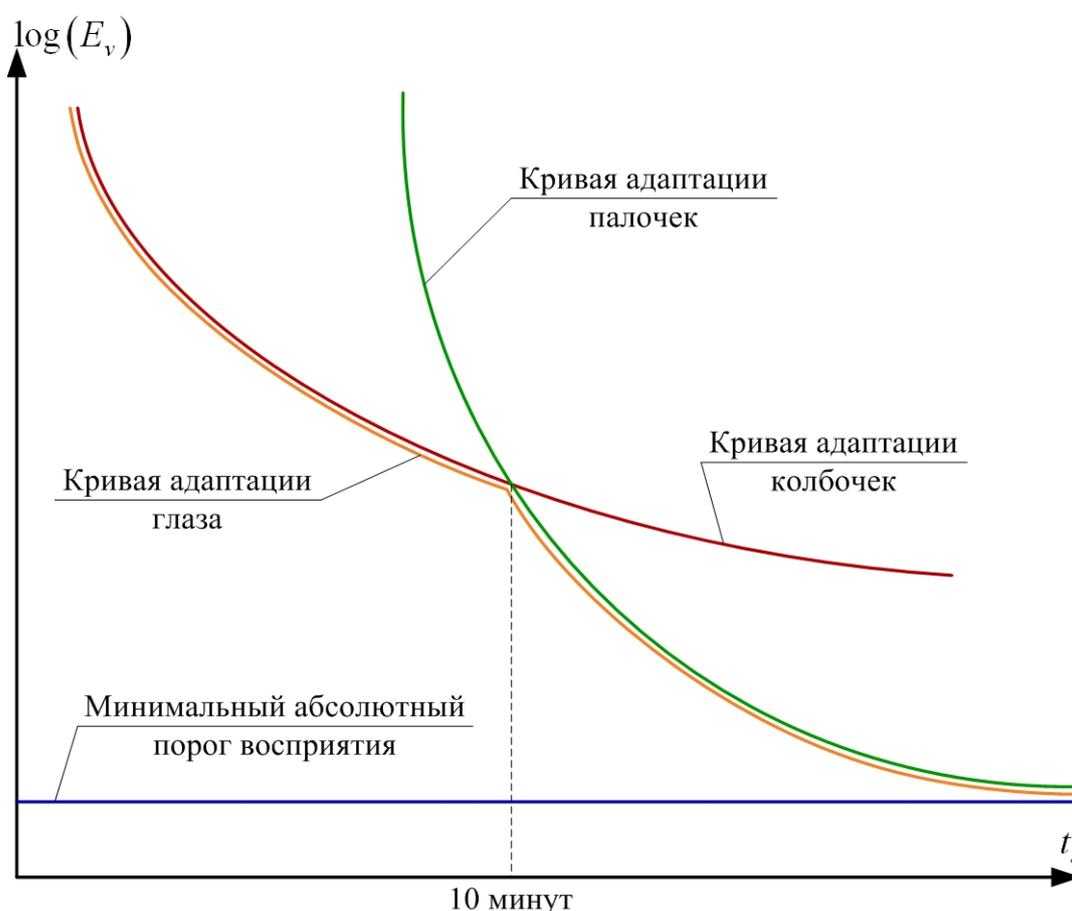


Рисунок 1.18 – Кривые адаптации светочувствительных клеток глаза

Адаптация во времени приводит к тому, что при появлении сильного светового и/или цветового стимула визуальный аппарат воспринимает последовательный цветовой контраст и, соответственно, человек видит дополнительную яркостную и/или цветовую доминанту после исчезновения предыдущей доминанты.

2 ЦВЕТ – ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СВОЙСТВА

Существуют разные трактовки слова «цвет»:

- цвет, как свойство зрительного ощущения – двумерная качественная характеристика количественных фотометрических величин (МКО).

- цвет – аффинная векторная величина трёх измерений, выражающая свойство, общее всем спектральным излучениям, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения (ГОСТ) [1]. Под словом «излучения» следует понимать также свет, отраженный и пропускаемый несамосветящимися телами. С этого места и далее цвета обозначаются символами векторных величин, например цвет \vec{A} .

Все цвета как совокупность трехмерных аффинных векторов можно геометрически представить в пространстве, которое называется аффинным **цветовым пространством**. При этом оно включает в себя как реальные, так и нереальные аффинные цветовые вектора. **Реальные цвета** – цвета любых физически осуществимых излучений. **Нереальные цвета** – цветовые векторы, задаваемые в виде линейных комбинаций векторов реальных цветов, но такие, которым не соответствуют никакие реальные излучения.

Чтобы цвет можно было «измерить», на цветовом пространстве при помощи **основных цветов** задается координатная система. Таким образом, основные цвета – три условно выбранные линейно-независимые цвета, выполняющие роль единичных векторов координатной системы. При этом на цветовом пространстве определяется **трехцветная система измерения цвета**. Эта система представляет собой совокупность трех линейно-независимых основных цветов, через которые любой цвет \vec{A} может быть выражен с помощью некоторого векторного уравнения. Указанное уравнение называется **цветовым уравнением**. Необходимо иметь в виду, что коэффициенты цветового уравнения могут быть как положительными, так и отрицательными, в зависимости от выбора основных цветов. При этом, **цветовое равенство** – это полная визуальная неотличимость цветов друг от друга в колориметрических условиях наблюдения.

Выберем в качестве основных цветов системы измерения любую тройку линейно независимых цветов, например \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} , и изобразим их в пространстве в виде трех некопланарных векторов (т.е. ни один из векторов \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} не лежит в одной плоскости с двумя другими). Таким образом, задается трехцветная система измерения цвета \vec{XYZ} . При этом направление векторов в пространстве может быть выбрано произвольно, как и их длина. Тогда любой цвет \vec{A} , который может быть измерен в этой системе, представляется как диагональ параллелепипеда, построенного по трем его составляющим (рис. 2.1). При этом длины основных векторов \vec{X} ,

\vec{Y} и \vec{Z} играют роль единиц измерения, и, следовательно, сам цвет \vec{A} можно представить в виде цветового уравнения

$$\vec{A} = \bar{x}\vec{X} + \bar{y}\vec{Y} + \bar{z}\vec{Z}, \quad (2.1)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – коэффициенты цветового уравнения – называются **координатами цвета** заданного цветового пространства XYZ.

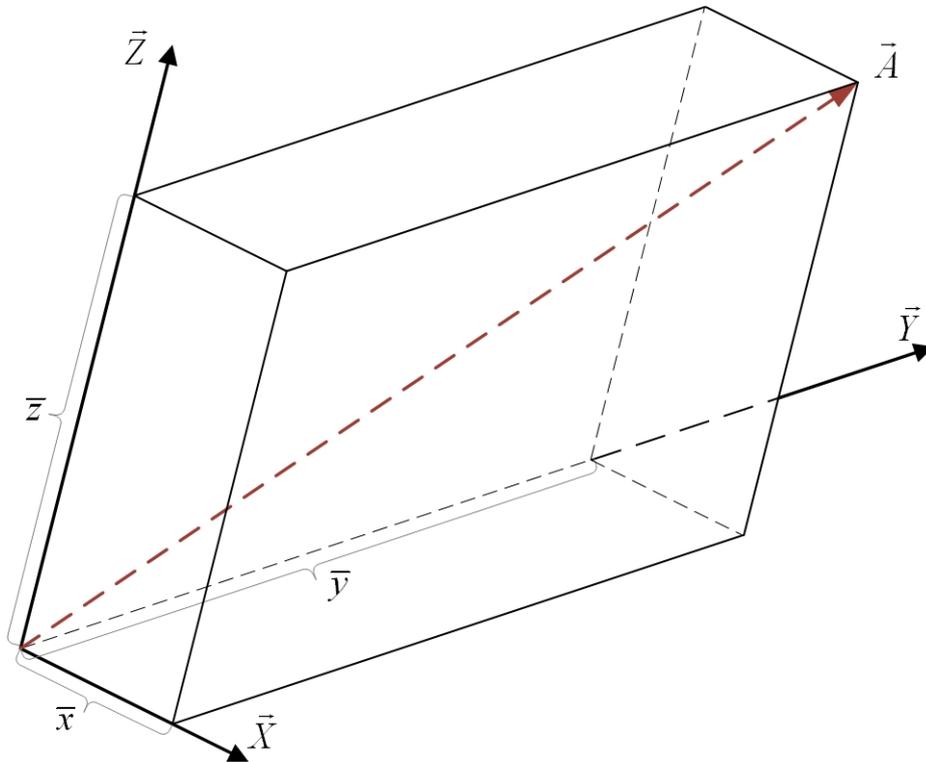


Рисунок 2.1 – Векторное представление цвета

Следует подчеркнуть, что каждому цвету соответствует только один вектор в цветовом пространстве, а цвета, лежащие на одном и том же луче, исходящем из начала координат, и отличающиеся только по интенсивности, с позиции колориметрии расцениваются как **разные** цвета. Эти цвета по Шредингеру [10] называются **цветами одного и того же типа раздражения**.

Если основные цвета \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} выбраны таким образом, что для цвета белой поверхности \vec{W} , освещенной источником заданного спектрального состава, координаты цвета равны единице ($\bar{x}_w = \bar{y}_w = \bar{z}_w = 1$), то все цвета отражающих серых объектов будут лежать на луче \vec{w} (рис. 2.2), соединяющей точку, изображающую белый цвет \vec{W} с началом координат (черный цвет). Цветовое уравнение для нахождения цвета серых отражающих объектов выглядит следующим образом

$$n_1\vec{W} = n_1\bar{x}_w\vec{X} + n_1\bar{y}_w\vec{Y} + n_1\bar{z}_w\vec{Z}, \quad n_1 < 1, \quad (2.2)$$

где n_1 – некая дробь, значение которой меньше 1.

Если некоторый цвет выражается при помощи цветового уравнения

$$n_2 \vec{W} = n_2 \bar{x}_w \vec{X} + n_2 \bar{y}_w \vec{Y} + n_2 \bar{z}_w \vec{Z}, \quad n_2 > 1, \quad (2.3)$$

где дробь n_2 больше единицы, то этот цвет является нейтральным цветом самосветящегося объекта, иначе – источника излучения. Для удобства представления примера на рис. 2.2 ахроматические цвета обозначены в оттенках красного. Кроме того, не только серые цвета являются цветами одного типа раздражения, существует множество таких цветов.

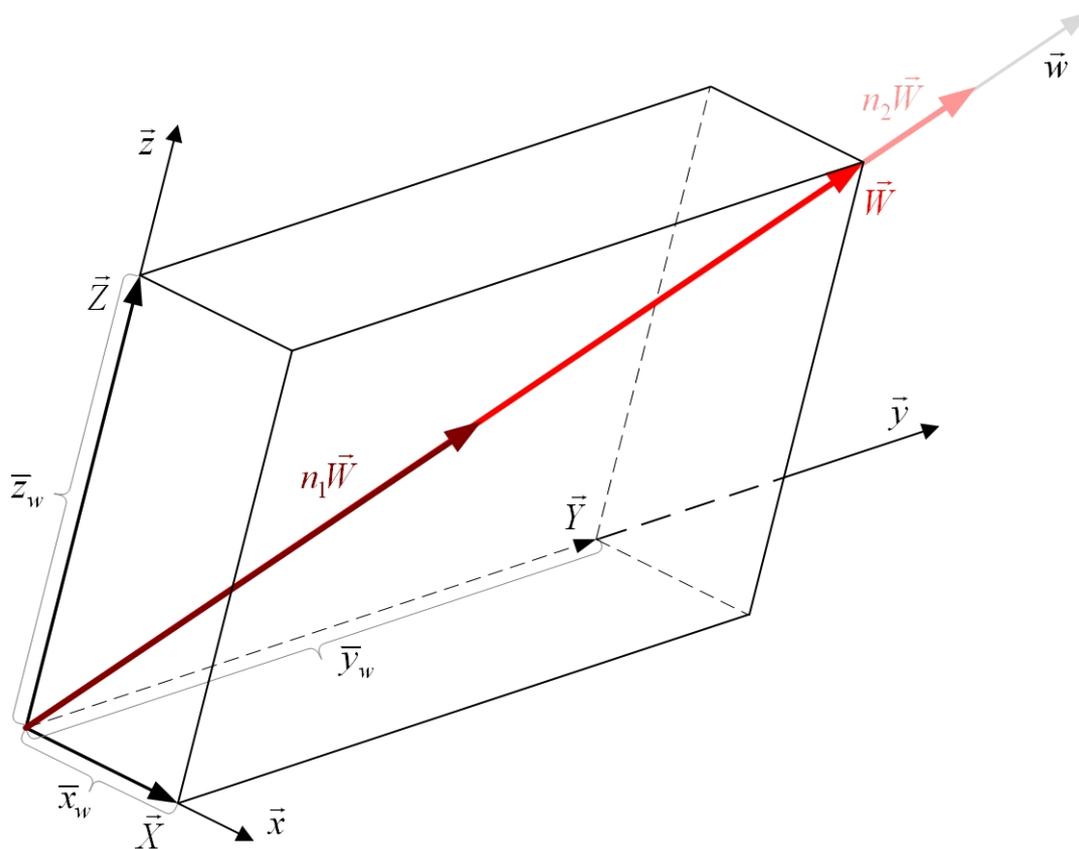


Рисунок 2.2 – Цвета одного типа раздражения

Следует отметить, что в колориметрии существует понятие **идеально белой поверхности** – поверхности, рассеивающей излучение любых длин волн видимого спектра одинаково по всем направлениям и без поглощения. Помимо этого, существует понятие **ахроматических (серых) цветов** – ряд цветов, расположенных в цветовом пространстве на прямой линии, проходящей через начало координат и цвет белой поверхности в условиях данного освещения [1]. Если два цвета при сложении дают ахроматический цвет, то их называют **дополнительными**.

Цвета монохроматических излучений различной интенсивности в любой системе реальных основных цветов, например \vec{R} , \vec{G} и \vec{B} , имеют одну или две отрицательных координат и располагаются вне пирамиды, построенной на основных осях измерения (рис. 2.3). Это происходит даже в системах измерения цвета, основанных на использовании насыщенных спектральных цветов в качестве основных. При этом цвета

монохроматических излучений различной интенсивности образуют коническую поверхность бесконечной протяженности, называемой **цветовым конусом**. По определению, цветовой конус – часть цветового пространства, составляющая всю область реальных цветов, ограниченная конической поверхностью бесконечной протяженности (с вершиной в начале координат), представляющей собой геометрическое место цветов монохроматических излучений.

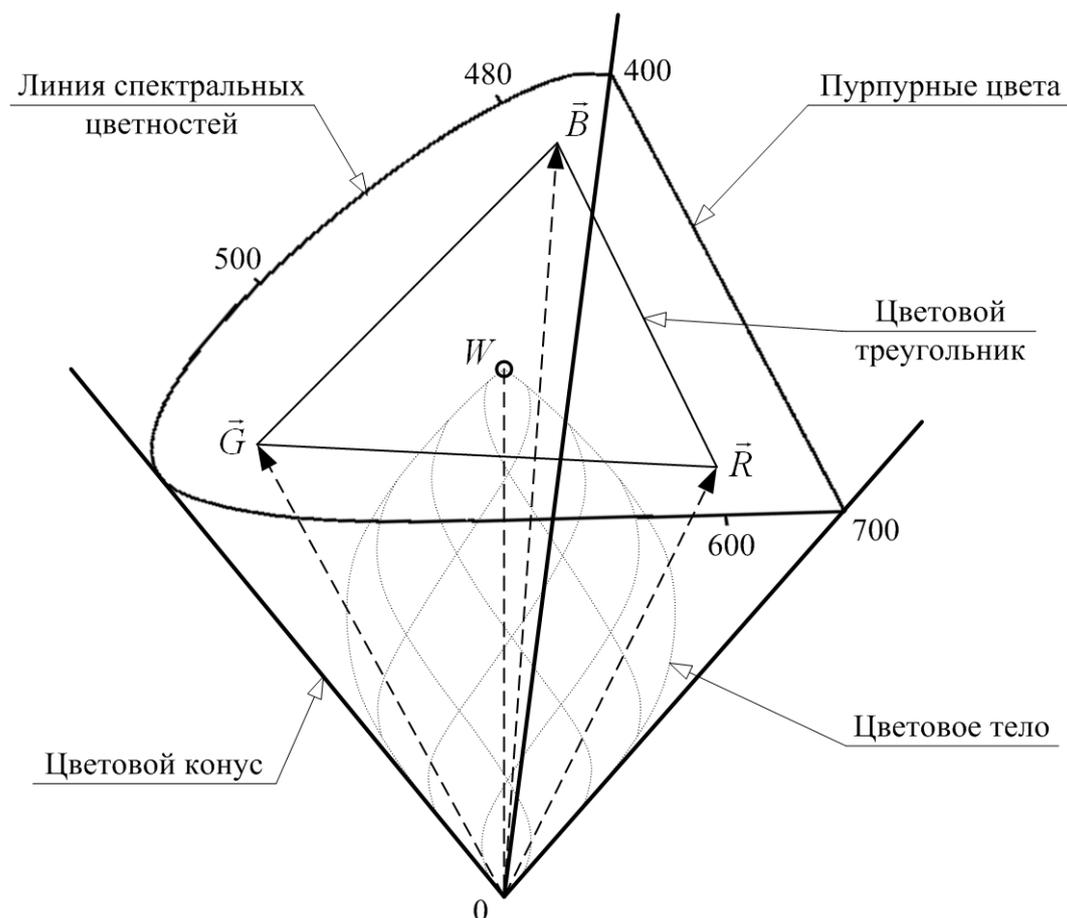


Рисунок 2.3 – Пространственное расположение цветов

Коническая форма реального цветового пространства определяется чисто экспериментально в результате измерения всех реально существующих монохроматических цветов видимой области спектра. Все другие цвета, лежащие за пределами этого конуса глаз не воспринимает – это нереальные цвета. Однако, как будет показано ниже, нереальными цветами пользуются при построении систем измерения цвета, например для физиологической системы приемников глаза и международной системы \vec{XYZ} . Цветовой конус замыкается плоскостью, на которой лежат чистые **пурпурные цвета**, полученные в результате сложения монохроматических красного и синего цветов, лежащих на концах спектра.

Если два или целый ряд цветов складываются между собой, то результирующий цвет представляется вектором, координаты которого по осям измерения суть суммы соответствующих координат слагаемых цветов. Тогда, для цветового пространства RGB справедлива следующая запись

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{A}_1 = \bar{r}_1 \vec{R} + \bar{g}_1 \vec{G} + \bar{b}_1 \vec{B} \\ \vec{A}_2 = \bar{r}_2 \vec{R} + \bar{g}_2 \vec{G} + \bar{b}_2 \vec{B} \\ \vdots \\ \vec{A}_N = \bar{r}_N \vec{R} + \bar{g}_N \vec{G} + \bar{b}_N \vec{B} \end{array} \right. \Rightarrow \vec{A} = \sum_{i=1}^N \vec{A}_i = \vec{R} \sum_{i=1}^N \bar{r}_i + \vec{G} \sum_{i=1}^N \bar{g}_i + \vec{B} \sum_{i=1}^N \bar{b}_i \quad (2.4)$$

где \bar{r} , \bar{g} и \bar{b} – координаты цвета в цветовом пространстве RGB.

Цветовой конус бесконечной протяженности включает в себя цвета самосветящихся объектов (источников излучения: люминофоры, лампы и т.д.), а цвета отражающих и прозрачных объектов в условиях заданного освещения занимают лишь некоторую область внутри цветового конуса, которая называется **цветовым телом**. Геометрическая форма цветового тела была математически строго определена Р. Лютером и Н.Д. Нюрнбергом на основе анализа цветов с оптимальными спектрами отражения (**оптимальных цветов**). Оптимальные цвета – цвета тел, у которых по всей видимой области спектра пропускания (или отражения) коэффициент пропускания (или коэффициент отражения) равен 1, а во всей видимой области спектра поглощения равен 0, причем имеется не более двух точек разрыва (скачка пропускания от 0 до 1). Оптимальные цвета лежат на поверхности цветового тела, они определяют границу, за пределами которой не может лежать ни один цвет с реальными спектрами пропускания и отражения. Следует иметь в виду, что форма цветового тела изменяется с изменением спектрального состава источника освещения.

Отношение каждой из координат цвета к их сумме называют **координатами цветностей**. Для цветового пространства RGB координаты цветностей r , g и b рассчитываются по формулам

$$r = \frac{\bar{r}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad g = \frac{\bar{g}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}, \quad b = \frac{\bar{b}}{\bar{r} + \bar{g} + \bar{b}}. \quad (2.5)$$

Однако третья координата цветности (в данном случае b) обычно опускается как зависящая, поскольку сумма трех координат цветностей всегда равна единице:

$$r + g + b = 1.$$

Через концы единичных векторов выбранной системы измерения цвета можно провести плоскость (рис. 2.3). Часть этой плоскости, находящаяся внутри треугольника, образованного концами единичных векторов, представляет собой геометрическое место точек, характеризующих цвета с положительными координатами цветности, и называется **цветовым треугольником**. При этом прямоугольный

треугольник, катеты которого являются осями изменения координат цветности, называется графиком цветностей.

Пересечение поверхности цветового конуса с плоскостью цветового треугольника образует геометрическое место точек, отвечающих цветности чистых спектральных излучений. Это геометрическое место точек называется **линией цветностей спектральных излучений** или **линией спектральных цветностей**.

Для примера рассмотрим цветовое пространство XYZ (рис. 2.4).

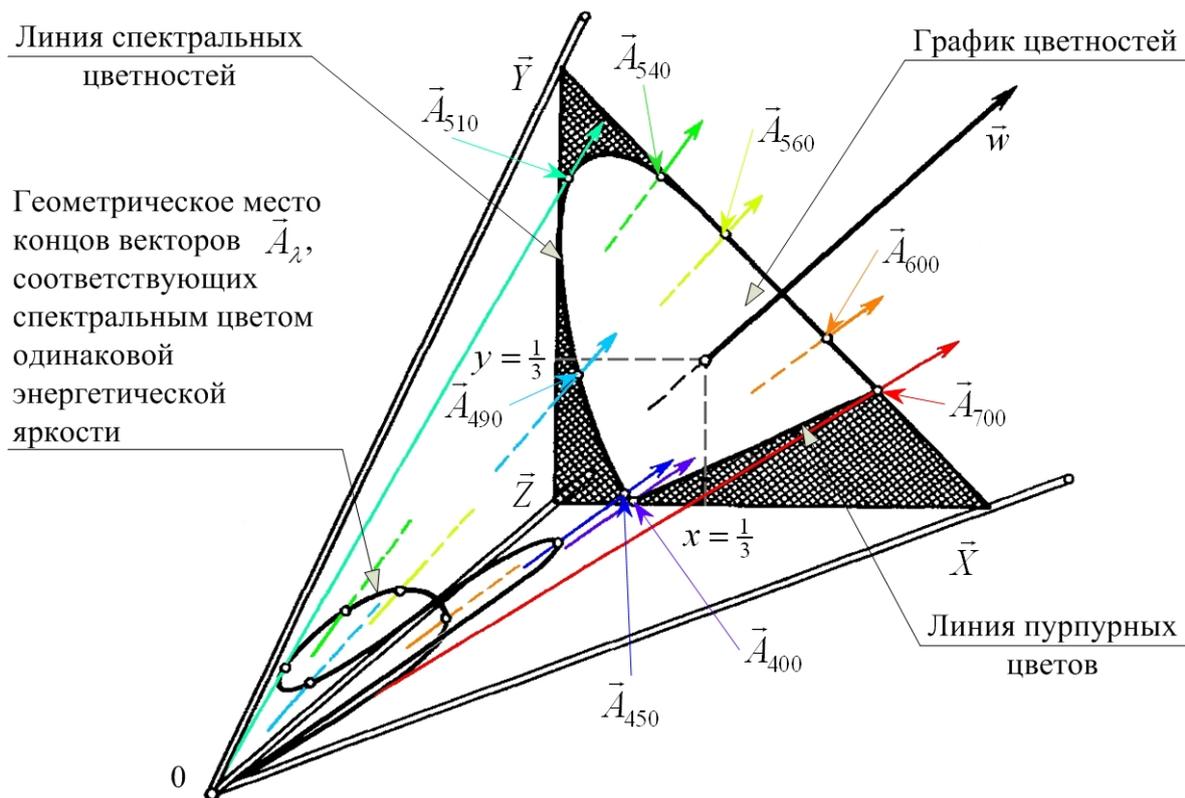


Рисунок 2.4 – Построение цветового пространства XYZ

На рисунке представлено трехкоординатное цветовое пространство, определяемое основными цветами \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} . На нем дополнительно показаны примеры цветов \vec{A}_λ монохроматических стимулов разных длин волн. Причем длина волны, изменяясь, принимает значения от 400 нм до 700 нм что соответствует границам видимой области спектра. Точки пересечения векторов \vec{A}_λ с единичной плоскостью, взятые в совокупности, образуют линию, состоящую из прямой и кривой областей. Эту линию обычно называют линией чистых спектральных цветов на графике цветностей или **локусом**. Линия спектральных цветов начинается при значении длины волны 400 нм и заканчивается при 700 нм. Точки цветностей стимулов \vec{A}_λ , которые мы можем получить, смешивая в различных пропорциях стимулы с длинами волн 400 и 700 нм, расположены

на прямой линии, соединяющей эти точки. Эту линию также называют линией пурпурных цветов, так как пурпурные стимулы получают аддитивным смещением синих и красных стимулов.

Если рассмотреть монохроматические стимулы постоянной энергетической яркости на всех длинах волн, то цвета \vec{A}_λ этих стимулов изображаются непрерывной совокупностью векторов, концы которых образуют в трехкоординатном цветовом пространстве кривую, начинающуюся вблизи начала координат (0) для цвета 400 и заканчивающуюся примерно там же для цвета 700. Составляющие каждого из этих векторов представляют собой, разумеется, удельные координаты, определенные из условия равноэнергетичности спектра.

Совокупность чистых спектральных цветов \vec{A}_λ и различных аддитивных смесей стимулов образует в трехкоординатном цветовом пространстве конус, внутри которого должны располагаться цвета \vec{A} любых аддитивных смесей монохроматических цветов. Поверхность конуса представляет собой границу для всех реальных цветов. О цветах, выходящих за пределы цветового охвата системы, часто говорят, как о нереальных цветах. Основные цвета системы – нереальные цвета.

Для того, чтобы выяснить, относится ли данный цвет \vec{A} к реальным или нереальным цветам, достаточно рассмотреть положение точки его цветности на цветовом графике. Если a находится внутри области, ограниченной линиями спектральных и пурпурных цветов, либо совпадает с какой-либо точкой этих линий, то цвет \vec{A} реален. Если же нет, \vec{A} представляет собой нереальный цвет.

Координаты любого реального цвета никогда не принимают отрицательных значений, так как весь конус реальных цветов целиком расположен в положительном квадранте цветового пространства, определенного основными цветами. **Удельные координаты** являются особым типом цветовых координат только в том смысле, что они относятся к монохроматическим стимулам одинаковой энергетической яркости во всем диапазоне видимого излучения. Соответствующие цвета \vec{A} изображаются векторами, направленными вдоль образующей конуса, и представляют собой реальные цвета.

Цвет равноэнергетического стимула (ахроматические цвета) изображается вектором, пересекающим единичную плоскость в центре цветового треугольника; координаты его цветности одинаковы и равны $1/3$. Это является естественным следствием произвольного, но целесообразно продуманного выбора единичных значений, определяющих масштабы на осях основных цветов. Аналогичная нормировка обычно производится в любом другом трехкоординатном цветовом пространстве. Одно из следствий подобной нормировки заключается в том, что площади под кривыми всех трех функций сложения одинаковы.

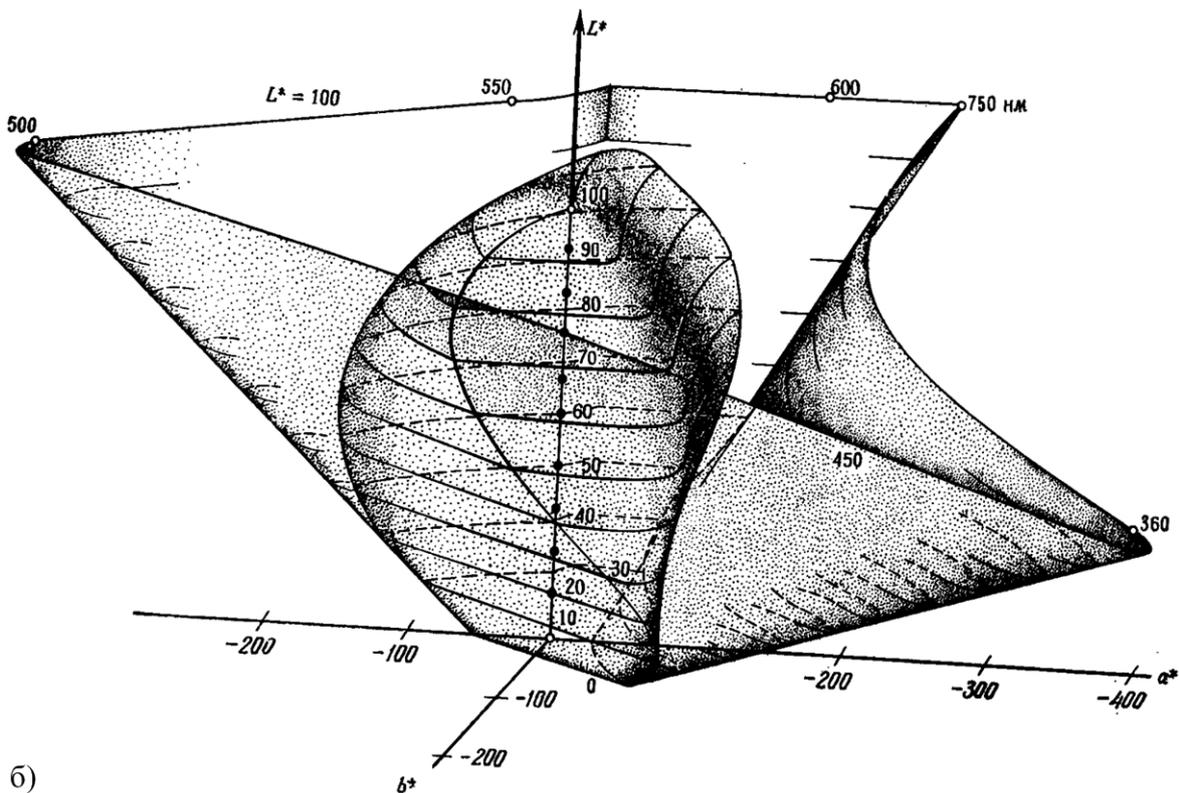
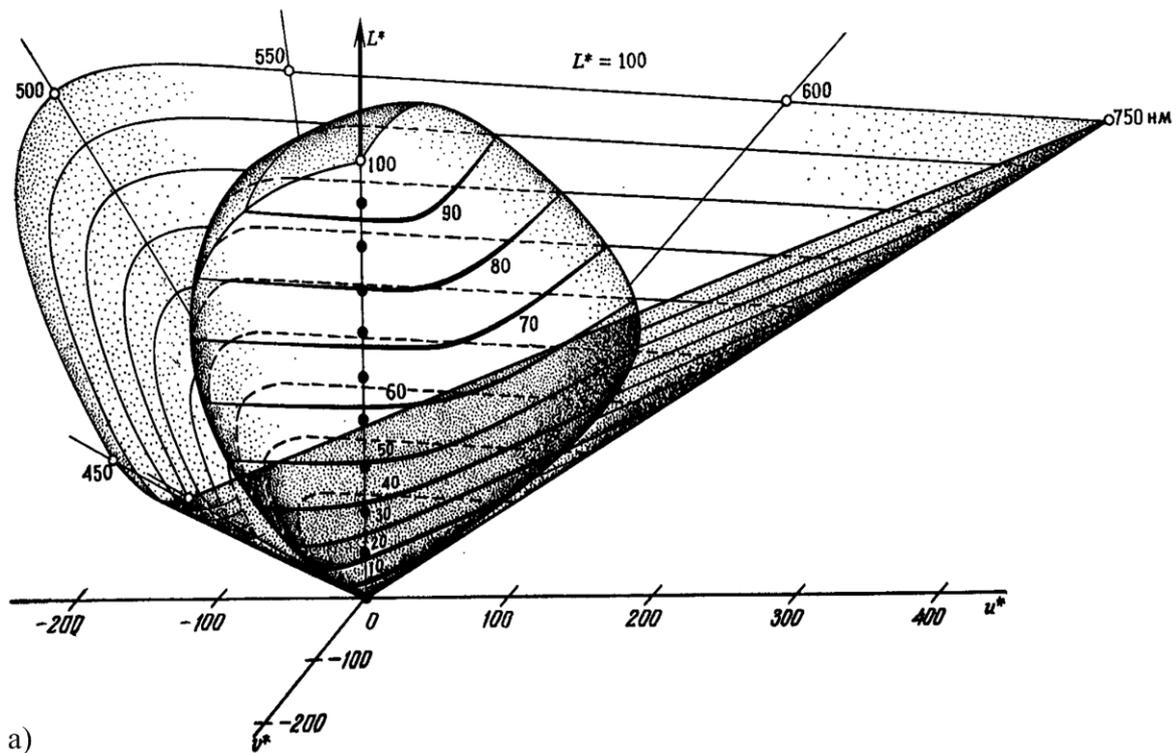


Рисунок 2.5 – Цветовые тела пространств $L^*u^*v^*$ (а) и $L^*a^*b^*$ (б)

На рис. 2.5 представлены цветные тела объектов и излучений, рассчитанные для цветных пространств $L^*u^*v^*$ и $L^*a^*b^*$

3 СИСТЕМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЦВЕТА (ЦВЕТОВЫЕ ПРОСТРАНСТВА)

Все системы представления и воспроизведения цветов основаны на явлении **метамеризма**, когда излучения различного спектрального состава визуально кажутся неразличимыми. Следовательно, существует возможность установления **цветового равенства** какого-либо цвета \vec{A} и комбинации основных цветов. Причем цветовое равенство может быть записано различными способами – способами смещения цветов.

3.1 Способы смещения цветов

Аддитивное смешение цветов (от лат. additio – сложение) основано на смешении (суммировании) различных излучений (рис. 3.1).

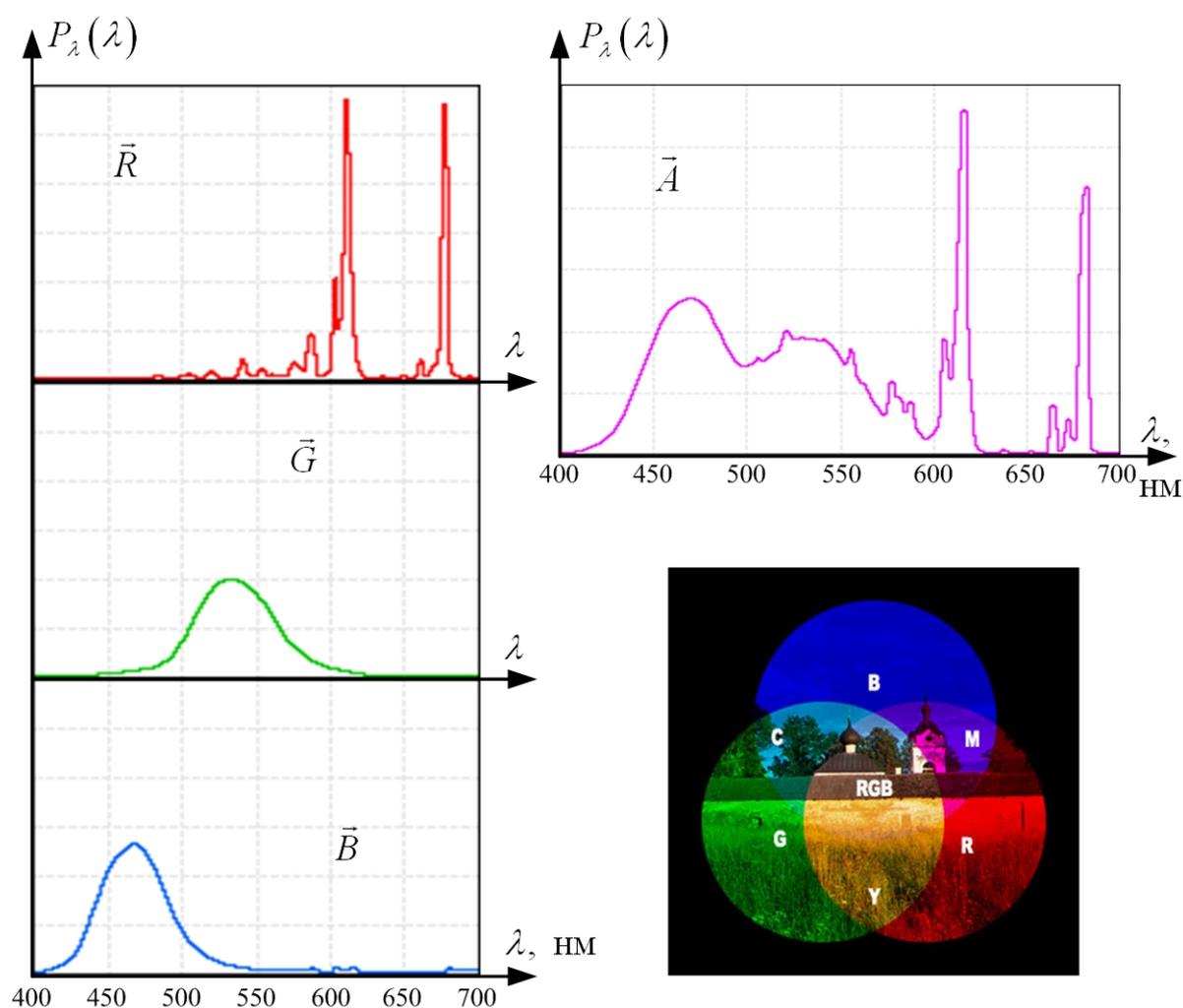


Рисунок 3.1 – Аддитивное сложение цветов

При этом цвет \vec{A} в аддитивном цветовом пространстве, например RGB, выражается при помощи следующего цветового уравнения

$$\vec{A} = \bar{r}\vec{R} + \bar{g}\vec{G} + \bar{b}\vec{B},$$

где \bar{r} , \bar{g} и \bar{b} – координаты цвета в цветовом пространстве, определяющие пропорции складываемых излучений цветов \vec{R} , \vec{G} и \vec{B} .

Аддитивное смешение цветов происходит в следующих случаях:

- при наложении световых потоков различных цветов друг на друга путем проекции их на белый экран (оптическое смешение);
- в случае быстрого вращения цветных секторов на волчке или вертушке, как это делал Максвелл в своих опытах (цвета смешиваются, потому что глаз не успевает различать цветовые мелькания);
- при пострасценном смешении, т.е. наблюдении с большого расстояния мелких цветных точек (пуантилизм в живописи, растр на экране цветного телевизора, растровая печать в полиграфии).

Субтрактивное смешение цветов (от лат. subtrahere – вычитать) – основан на «вычитании» из падающего белого света монохроматических излучений, которые поглощаются окрашенными слоями (рис. 3.2).

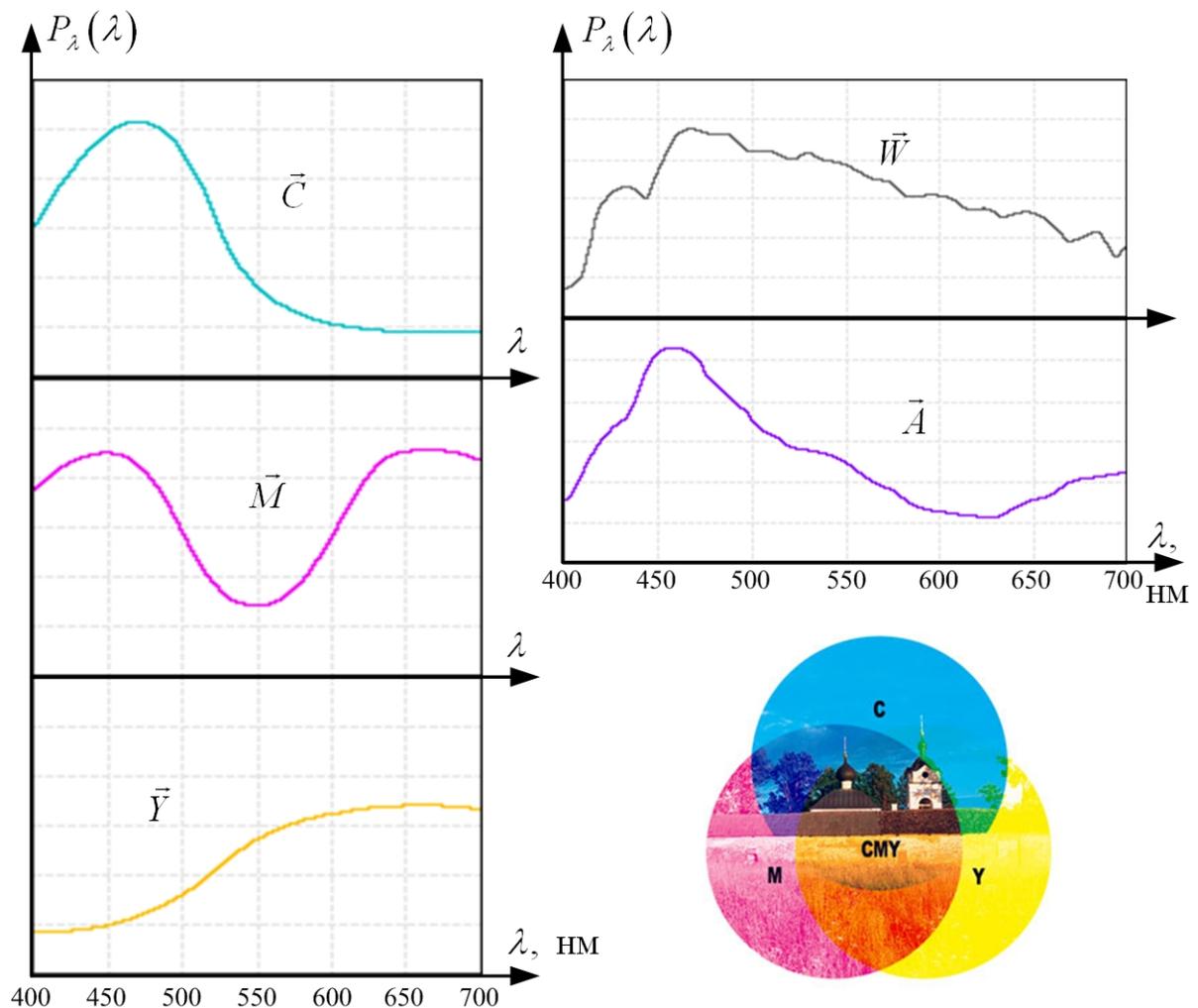


Рисунок 3.2 – Субтрактивное сложение цветов

При этом цвет \vec{A} в субтрактивном цветовом пространстве, например СМУ, выражается при помощи следующего цветового уравнения

$$\vec{A} = \vec{W} - \bar{c}\vec{C} - \bar{m}\vec{M} - \bar{y}\vec{Y},$$

где \bar{c} , \bar{m} и \bar{y} – координаты цвета в цветовом пространстве, определяющие пропорции вычитаемых излучений цветов \vec{C} , \vec{M} и \vec{Y} их белого цвета \vec{W} .

Субтрактивное смешение цветов происходит при последовательном прохождении света через окрашенные среды (стекла, пленки, растворы). В этом случае среды поглощают (вычитают) из проходящего сквозь них светового потока те цвета, которые соответствуют зонам поглощения.

Только в случае зональных спектров пропускания цветных сред субтрактивное смешение можно свести к аддитивному сложению цветов разделенного ими на зоны светового потока.

Необходимо отметить, что в красках, смешиваемых на палитре или в растворах, обычно имеет место сложный случай сочетания аддитивного и субтрактивного смешений цветов.

3.2 Законы Грассмана

Цветовые измерения стали возможными после того, как были экспериментально открыты Дж. Максвеллом и математически точно сформулированы Ж. Грассманом законы сложения цветов. Эти законы применимы только к случаю аддитивного смешения цветов, при котором цвет суммы не зависит от спектрального состава смешиваемых цветов, т.е. выполняется 1-й закон Грассмана. При субтрактивном смешении цветов этот закон не соблюдается, поскольку одни и те же цвета, но различного спектрального состава при субтрактивном смешении с другими цветами могут образовывать совершенно разные цвета смеси.

Дж. Максвелл экспериментально установил законы аддитивного сложения цветов, пользуясь ветрушкой – первым простым колориметрическим прибором. Впоследствии он разработал более совершенный визуальный колориметр (так называемый ящик Максвелла) с оптическим смешением цветов.

1-й закон Грассмана – цвета ведут себя в смесях независимо от их спектрального состава. Следовательно, можно оперировать не излучениями, а цветами. Поскольку эксперименты показывают, что достаточно трёх основных цветов для того, чтобы воспроизвести тестовый цвет, т.е. имеет место выражение

$$\vec{A}^{test} = \bar{a}_1^{test} \vec{A}_1 + \bar{a}_2^{test} \vec{A}_2 + \bar{a}_3^{test} \vec{A}_3, \quad (3.1)$$

где \vec{A}^{test} – тестовый цвет, \vec{A}_1 , \vec{A}_2 и \vec{A}_3 – основные цвета системы измерения, \bar{a}_1^{test} , \bar{a}_2^{test} и \bar{a}_3^{test} – координаты цвета, определяющие пропорции складываемых излучений основных цветов системы измерения.

Таким образом, если два цвета в данных условиях имеют одинаковые координаты цвета, то они равны (независимо от спектрального состава).

$$\begin{cases} \vec{A}^{test\ 1} = \bar{a}_1 \vec{A}_1 + \bar{a}_2 \vec{A}_2 + \bar{a}_3 \vec{A}_3 \\ \vec{A}^{test\ 2} = \bar{a}_1 \vec{A}_1 + \bar{a}_2 \vec{A}_2 + \bar{a}_3 \vec{A}_3 \end{cases} \Rightarrow \vec{A}^{test\ 1} = \vec{A}^{test\ 2}. \quad (3.2)$$

2-й закон Грассмана – цвета можно складывать. Кроме того, если смешать два тестовых цвета $\vec{A}^{test\ 1}$ и $\vec{A}^{test\ 2}$, то результирующий цвет будет характеризоваться суммами пар координат цвета смешиваемых цветов.

$$\begin{cases} \vec{A}^{test\ 1} = \bar{a}_1^{test\ 1} \vec{A}_1 + \bar{a}_2^{test\ 1} \vec{A}_2 + \bar{a}_3^{test\ 1} \vec{A}_3 \\ \vec{A}^{test\ 2} = \bar{a}_1^{test\ 2} \vec{A}_1 + \bar{a}_2^{test\ 2} \vec{A}_2 + \bar{a}_3^{test\ 2} \vec{A}_3 \end{cases} \Rightarrow \vec{A}^{test\ 1} + \vec{A}^{test\ 2} = (\bar{a}_1^{test\ 1} + \bar{a}_1^{test\ 2}) \vec{A}_1 + (\bar{a}_2^{test\ 1} + \bar{a}_2^{test\ 2}) \vec{A}_2 + (\bar{a}_3^{test\ 1} + \bar{a}_3^{test\ 2}) \vec{A}_3. \quad (3.3)$$

То есть, если цвет одного излучения $\vec{A}^{test\ 1}$ равен цвету другого излучения $\vec{A}^{test\ 2}$ и аналогично цвет третьего излучения $\vec{A}^{test\ 3}$ равен цвету четвертого излучения $\vec{A}^{test\ 4}$, то можно утверждать, что цвет суммы первого и третьего излучений будет равен цвету суммы второго и четвертого излучений.

$$\begin{cases} \vec{A}^{test\ 1} = \vec{A}^{test\ 2} \\ \vec{A}^{test\ 3} = \vec{A}^{test\ 4} \end{cases} \Rightarrow \vec{A}^{test\ 1} + \vec{A}^{test\ 3} = \vec{A}^{test\ 2} + \vec{A}^{test\ 4}. \quad (3.4)$$

3-й закон Грассмана – цвет представляет собой аффинный трехмерный вектор, и все цвета преобразуются по законам векторной алгебры. Этот закон является наиболее важным, так как им определяется возможность измерения цветов. Максвелл экспериментально доказал, что необходимо и достаточно трех линейно независимых цветов, каждый из которых нельзя получить сложением двух остальных, чтобы воспроизвести все цветовое многообразие путем сложения этих трех в различных количественных пропорциях. Слово «линейных» означает, что цветовые равенства суть равенства первой степени, т.е. если

$$\vec{A}^{test} = \bar{a}_1 \vec{A}_1 + \bar{a}_2 \vec{A}_2 + \bar{a}_3 \vec{A}_3,$$

тогда

$$\kappa \cdot \vec{A}^{test} = (\kappa \cdot \bar{a}_1) \vec{A}_1 + (\kappa \cdot \bar{a}_2) \vec{A}_2 + (\kappa \cdot \bar{a}_3) \vec{A}_3. \quad (3.5)$$

Выбор линейно независимой тройки цветов может быть произвольным. В строгой математической формулировке этот закон гласит: между любыми четырьмя цветами всегда существует линейная зависимость, хотя существует неограниченное число линейно независимых совокупностей из трех цветов.

Измерить цвет – означает выразить его через три цвета избранной системы измерения. Для этого существуют различные оптические приборы – колориметры.

Поскольку цвета смешиваются линейно, то можно построить простой алгоритм определения пропорций складываемых излучений основных цветов системы измерения, иначе – цветовых координат. Положим, что спектральное излучение источника можно считать взвешенной суммой излучений отдельных узкоспектральных источников (источников, излучающих на одной длине волны). Поскольку операция выражения цвета линейна, комбинацию основных цветов, которая описывает излучение составного источника, можно получить при суммировании координат цвета узкоспектральных источников (см. ф. (3.3)).

Если известны все цветовые координаты цветов, определяющих для каждого узкоспектрального источника излучения в видимом диапазоне, то можно найти координаты цвета для излучения произвольного спектрального состава. Функции подбора цвета $\bar{f}_1(\lambda)$, $\bar{f}_2(\lambda)$ и $\bar{f}_3(\lambda)$ получают экспериментально для данного набора основных цветов \vec{A}_1 , \vec{A}_2 и \vec{A}_3 данной системы измерения цвета. Эти функции называются **функциями сложения цветов** и представляют собой совокупность координат цветов монохроматических излучений фиксированного относительного распределения энергии, представленная в виде функциональной зависимости от длины волны.

Следовательно, цвет монохроматического источника излучения $P_\lambda(\lambda_1)$, излучающего на длине волны λ_1 , можно описать так:

$$P_\lambda(\lambda_1) = \bar{f}_1(\lambda_1) \cdot \vec{A}_1 + \bar{f}_2(\lambda_1) \cdot \vec{A}_2 + \bar{f}_3(\lambda_1) \cdot \vec{A}_3. \quad (3.6)$$

В случае, если источник $P_\lambda(\lambda)$ описывается суммой огромного количества монохроматических источников, излучающих с определенной интенсивностью, то формула (3.6) преобразуется к виду

$$P_\lambda(\lambda) = \bar{a}_1 \cdot \vec{A}_1 + \bar{a}_2 \cdot \vec{A}_2 + \bar{a}_3 \cdot \vec{A}_3 = \\ = \left\{ \int_{\lambda} P_\lambda(\lambda) \bar{f}_1(\lambda) d\lambda \right\} \vec{A}_1 + \left\{ \int_{\lambda} P_\lambda(\lambda) \bar{f}_2(\lambda) d\lambda \right\} \vec{A}_2 + \left\{ \int_{\lambda} P_\lambda(\lambda) \bar{f}_3(\lambda) d\lambda \right\} \vec{A}_3. \quad (3.7)$$

3.3 Свойства цветовых пространств

Необходимо отметить следующие свойства цветовых пространств.

Аффинные свойства

1. Порядок линий и поверхностей остается неизменным. Т.е. прямая всегда остается прямой, плоскость – плоскостью, кривые и поверхности второго порядка – кривыми и поверхностями второго порядка и т.д.

2. Понятие части целого. Например,

– точка, лежащая на какой-либо линии, а также линия, лежащая на поверхности, преобразуются в точки и линии, лежащие на преобразованных линиях и поверхностях;

– угол, составляющий часть другого, всегда будет оставаться меньше этого другого угла после преобразования, а, следовательно, прямая, лежащая между двумя другими, расположенными на той же плоскости, после преобразования всегда будет лежать между соседними прямыми.

3. Бесконечно удаленные точки не могут превратиться в конечные. В частности, сохраняется параллельность, а также эллипсоид и эллипс не могут превратиться в гиперboloид или гиперболу или параболу.

4. Деление отрезка в данном отношении. В силу вышеизложенного, а также в силу сохранения параллельности, отношения параллельных отрезков, т.е. отношения расстояний вдоль одной и той же или вдоль параллельных прямых, сохраняются.

Неаффинные свойства

1. При аффинном преобразовании три любые вектора, не лежащие в одной плоскости, могут преобразоваться в три любых других (по величине и направлению), не лежащие в одной плоскости. Например, любой угол (за исключением крайних π) может замениться любым другим. Кроме того, прямоугольный треугольник может превратиться в любой другой.

2. Отношения расстояний между любыми двумя парами точек (если эти пары не лежат на одной или параллельных прямых) при преобразовании может изменяться. Например, любой эллипс может обратиться в любой другой, в частности, окружность.

3. Отношения между величинами любых двух углов при преобразовании может изменяться. Таким образом, понятия деления угла на равные части, а в частности понятие перпендикуляра – неаффинны.

3.4 Системы цветовых измерений

В соответствии с [1] можно привести следующую классификацию наиболее часто используемых систем цветовых измерений.

– Линейные системы цветовых измерений

1) Система измерения цвета $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$

2) Система измерения цвета $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$

3) Физиологическая система измерения цвета $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$

4) Зональная система измерения цвета $\vec{F}_3\vec{F}_c\vec{F}_k$

– Нелинейные системы цветовых измерений

1) Барцентрическая система измерения цвета abq

2) Полярная система измерения цвета λpV

Система измерения цвета $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$

В данной системе измерения цвета основные цвета задаются как цвета монохроматических излучений длины волны 700нм для \vec{R} , 546,1нм – для \vec{G} и 435,8нм – для \vec{B} , взятых в таких мощностях, чтобы удовлетворялось цветовое уравнение:

$$\vec{E} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{B}, \quad (3.8)$$

где \vec{E} – цвет белой поверхности, освещенной источником типа E (источник, спектральная плотность излучения которого в видимой области спектра постоянна).

Система измерения цвета $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$ характеризуется кривыми сложения, приведенными в ГОСТе 13088-67 [1] и представленными на рис. 3.3.

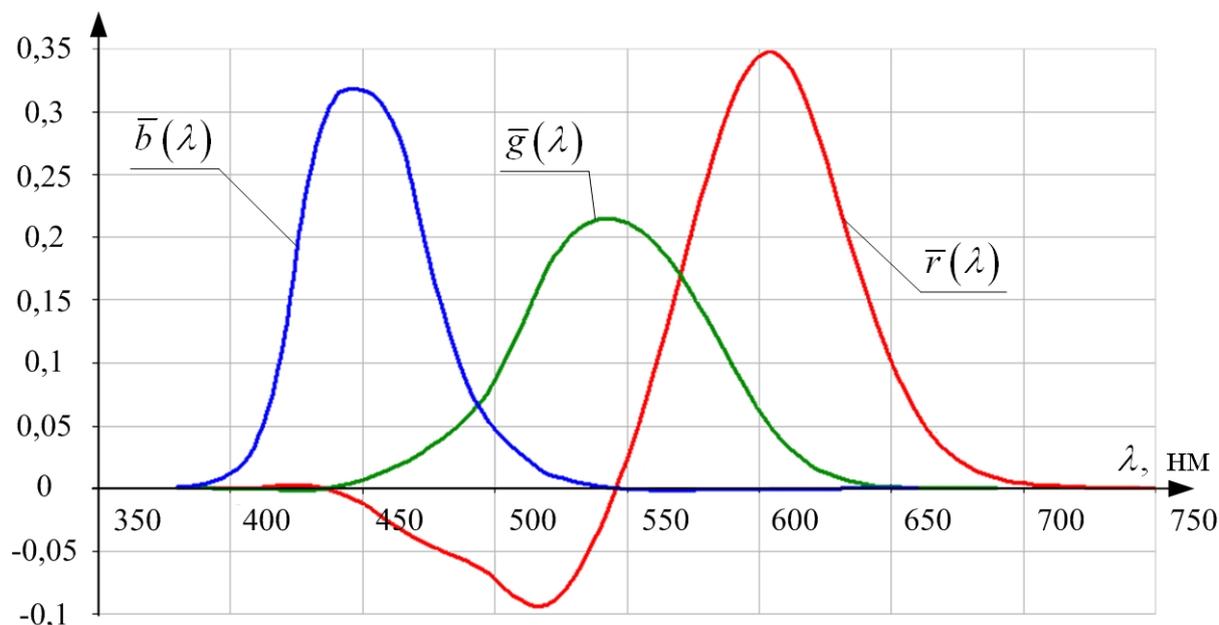


Рисунок 3.3 – Кривые сложения системы измерения цвета $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$

Система измерения цвета $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$

Основные цвета данной системы измерения цвета не могут быть физически реализованы, т.е. являются нереальными цветами. Система $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ задается через систему $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$ следующими формулами преобразования.

Векторные цветовые уравнения, связывающие цвета \vec{X} , \vec{Y} и \vec{Z} с цветами \vec{R} , \vec{G} и \vec{B} имеют вид

$$\begin{aligned} \vec{X} &= 2,36460 \cdot \vec{R} - 0,51515 \cdot \vec{G} + 0,00520 \cdot \vec{B} \\ \vec{Y} &= -0,89654 \cdot \vec{R} + 1,42640 \cdot \vec{G} - 0,01441 \cdot \vec{B} \\ \vec{Z} &= -0,46807 \cdot \vec{R} + 0,08875 \cdot \vec{G} + 1,00921 \cdot \vec{B} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Также существуют скалярные численные уравнения, связывающие цветовые координаты \bar{x}_A , \bar{y}_A и \bar{z}_A произвольного цвета \vec{A} в системе $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ с его [цвета \vec{A}] координатами \bar{r}_A , \bar{g}_A и \bar{b}_A в системе $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$:

$$\begin{aligned} \bar{x}_A &= 0,49000 \cdot \bar{r}_A + 0,31000 \cdot \bar{g}_A + 0,20000 \cdot \bar{b}_A \\ \bar{y}_A &= 0,17697 \cdot \bar{r}_A + 0,81240 \cdot \bar{g}_A + 0,01063 \cdot \bar{b}_A \\ \bar{z}_A &= 0,00000 \cdot \bar{r}_A + 0,01000 \cdot \bar{g}_A + 0,99000 \cdot \bar{b}_A \end{aligned} \quad (3.10)$$

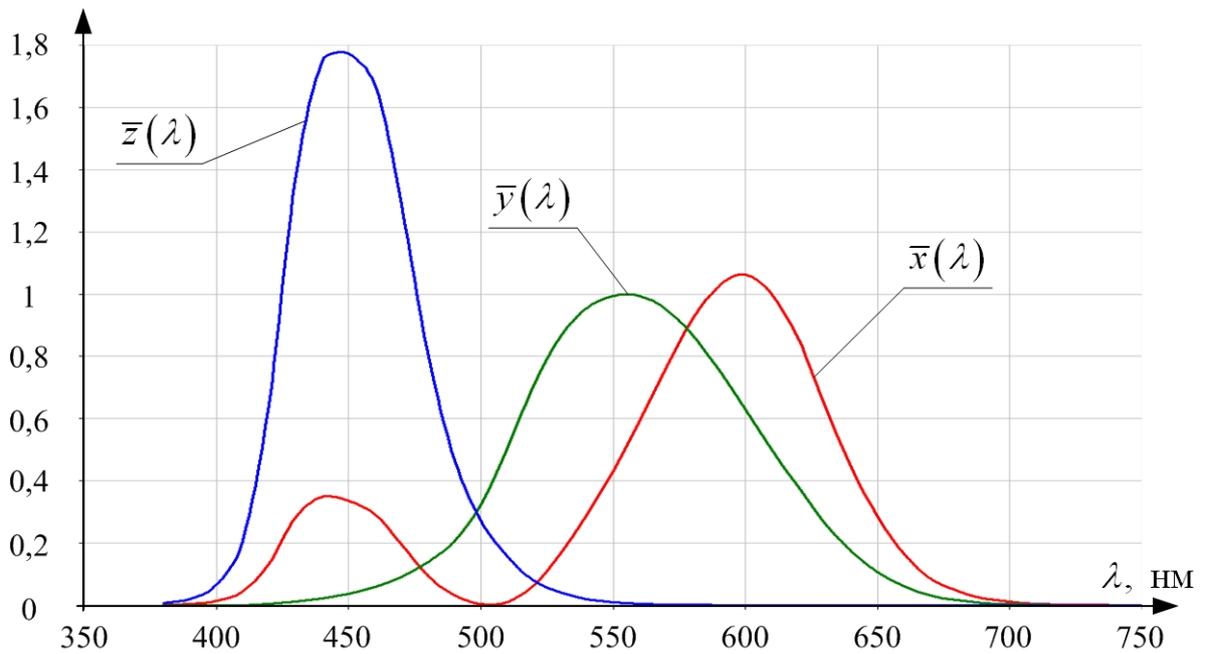


Рисунок 3.4 – Кривые сложения системы измерения цвета $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$

По формулам (3.10) вычисляют кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ для системы $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$, представленные на рис. 3.4. Следует отметить, что для того, чтобы кривая сложения $\bar{y}(\lambda)$ совпала с относительной кривой видности глаза $V(\lambda)$, результаты вычислений по формулам (3.10) умножают на коэффициент, равный 5,6504.

Система измерения цвета $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$

Система измерения цвета $\vec{R}_0\vec{G}_0\vec{B}_0$ – физиологическая система, функциями сложения $\bar{r}_0(\lambda)$, $\bar{g}_0(\lambda)$ и $\bar{b}_0(\lambda)$ являются кривые спектральной чувствительности колбочкового аппарата сетчатки глаза (рис. 1.11).

Система измерения цвета $\vec{F}_3\vec{F}_c\vec{F}_k$

Зональная система измерения цвета $\vec{F}_3\vec{F}_c\vec{F}_k$ была предложена Н.Д. Нюрнбергом [8]. Эта система успешно использовалась также Овечкисом в колориметрических исследованиях фотографических процессов и для цветовой репродукции. В отличие от $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ системы, зональная система $\vec{F}_3\vec{F}_c\vec{F}_k$ наглядна, т.е. по координатам цвета этой системы можно судить о характере спектра отражения (или пропускания) образца.

Данная система отличается тем, что спектр излучения источника освещения $P_\lambda(\lambda)$ разделен на три зоны с разными интервалами длин волн.

Зональная система измерения цвета $\vec{F}_3\vec{F}_c\vec{F}_k$ определяется основными цветами зеленого, синего и красного излучений, координаты которых $(\bar{x}_3, \bar{y}_3, \bar{z}_3)$, $(\bar{x}_c, \bar{y}_c, \bar{z}_c)$ и $(\bar{x}_k, \bar{y}_k, \bar{z}_k)$ в системе $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ находятся по формулам

$$\begin{aligned} \bar{x}_c &= \int_{380}^{480} P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda & \bar{y}_c &= \int_{380}^{480} P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda & \bar{z}_c &= \int_{380}^{480} P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \\ \bar{x}_3 &= \int_{480}^{560} P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda & \bar{y}_3 &= \int_{480}^{560} P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda & \bar{z}_3 &= \int_{480}^{560} P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (3.11) \\ \bar{x}_\kappa &= \int_{560}^{720} P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda & \bar{y}_\kappa &= \int_{560}^{720} P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda & \bar{z}_\kappa &= \int_{560}^{720} P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned}$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения системы $\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$, $P_\lambda(\lambda)$ – спектральное распределение излучения для одного из стандартных источников света.

Зональная система измерения цвета удобна для тех приложений колориметрии, которые имеют дело со смешением красок, обладающих малым рассеянием, например, в технике цветного кино.

Система измерения цвета *abq*

На практике довольно часто применяют способ цветового треугольника в качестве способа представления цветов (рис. 3.5). В нем вектор цвета \vec{A} характеризуется положением точки *A* в треугольнике, основанного основными цветами, а также весом (или грузом), которым определяется длина вектора. Такое название третьих координаты, издавна признанное, обусловлено тем, что преобразование цветов в этой системе подчиняется правилу сложения грузов в механике. При сложении цветов «грузы» складываются, и местоположение цвета в смеси располагается на прямой, соединяющей смешиваемые цвета, обратно пропорционально их «грузам». Координаты этой системы, которую называют также барицентрической, не подчиняются линейным однородным преобразованиям – они следуют проективным преобразованиям.

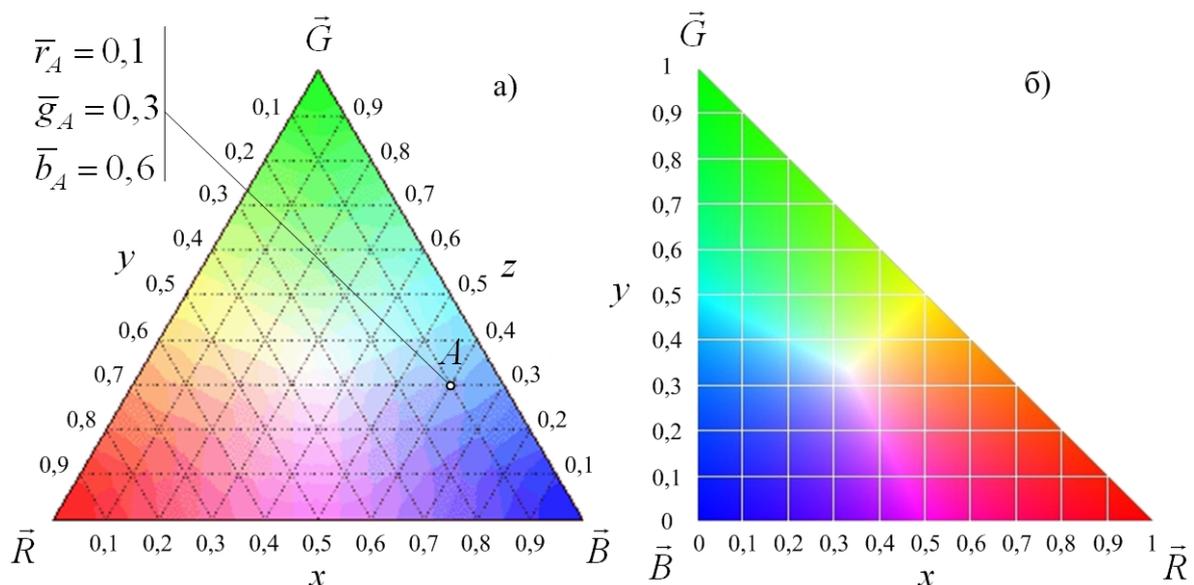


Рисунок 3.5 – Построение барицентрической системы измерения цвета

Барицентрические координаты a , b и q вычисляются по известным цветовым координатам в используемой линейной системе измерения цвета \vec{ABC} (\bar{a} , \bar{b} и \bar{c}) по формулам

$$a = \frac{\bar{a}}{\bar{a} + \bar{b} + \bar{c}}, \quad b = \frac{\bar{b}}{\bar{a} + \bar{b} + \bar{c}}, \quad q = \bar{a} + \bar{b} + \bar{c}. \quad (3.12)$$

При этом полученные координаты a и b называют координатами цветности. Аналогичным образом рассчитываются координаты цветности x и y для барицентрической системы xu , основанной на системе \vec{XYZ} .

Следует отметить, что координата q носит в литературе разные названия, например «количество цвета» у Геймгольца и Максвелла, «цветовой момент» в некоторой немецкой литературе или «модуль цвета» у некоторых американских авторов.

Также следует иметь в виду, что цветовые расчеты в цветовом треугольнике (например, нахождение суммы двух и более цветов по принципу центра тяжести) производят всегда в барицентрической системе.

Система измерения цвета λpV

В начале IX века применялись визуальные аддитивные колориметры, например колориметр Неттинга, в которых измеряемый цвет получался в результате сложения монохроматического цвета с белым. Цвет в такой системе измерения характеризуется тремя такими параметрами как

– доминирующая длина волны λ_{dom} монохроматического излучения (получается при пересечении луча, исходящего из точки \vec{W} , обозначающей белый свет, и проходящего через точку измеряемого цвета \vec{A} , с линией спектральных цветностей – см. рис. 3.6),

– чистота цвета p , характеризующая долю яркости монохроматического цвета в общей результирующей яркости цвета смеси и рассчитываемая по формуле

$$p = \frac{e_1}{e_1 + e_2}, \quad (3.13)$$

где e_1 – расстояние на графике цветностей от точки белого цвета \vec{W} до точки измеряемого цвета \vec{A} , e_2 – расстояние на графике цветностей от точки измеряемого цвета \vec{A} до точки, определяющей λ_{dom} на линии спектральных цветностей.

Кроме того, чистоту цвета p можно рассчитать, исходя из известных значений фотометрической яркости монохроматической составляющей измеряемого излучения B_λ и общей яркости измеряемого излучения B :

$$p = \frac{B_\lambda}{B}. \quad (3.14)$$

– яркость результирующего цвета B , выраженная в относительных или абсолютных фотометрических единицах.

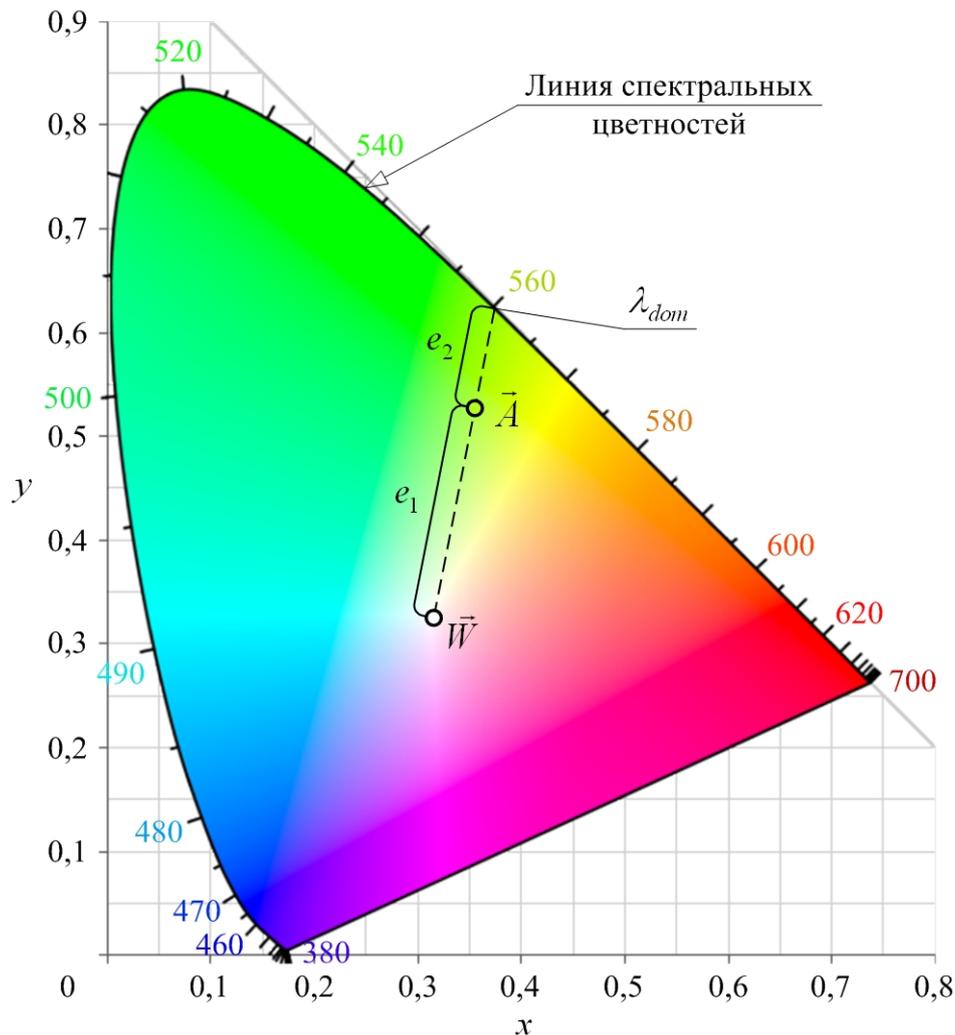


Рисунок 3.6 – Пример построения полярной системы измерения цвета λpB

Эту систему измерения цвета считают неким физическим базисом общепризнанной системы Манселла с аналогичными психофизиологическими координатами: цветовым тоном, насыщенностью и светлотой. Поэтому полярную систему измерения цвета считают наглядной. Однако эта наглядность не окупает ее колориметрическую непригодность в выполнении векторных преобразований и, по существу, она может служить в какой-то мере лишь в качестве средства для обозначения цветов.

4 СВОЙСТВА (ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ)

ИСТОЧНИКОВ СПЕКТРАЛЬНЫЕ

ИЗЛУЧЕНИЯ И

4.1 Основные величины и единицы их измерения

Основными величинами, позволяющими характеризовать свойства источника излучения, являются: поток Φ , светимость M , освещенность (облученность) E , сила излучения (сила света) I и яркость L (рис. 4.1).

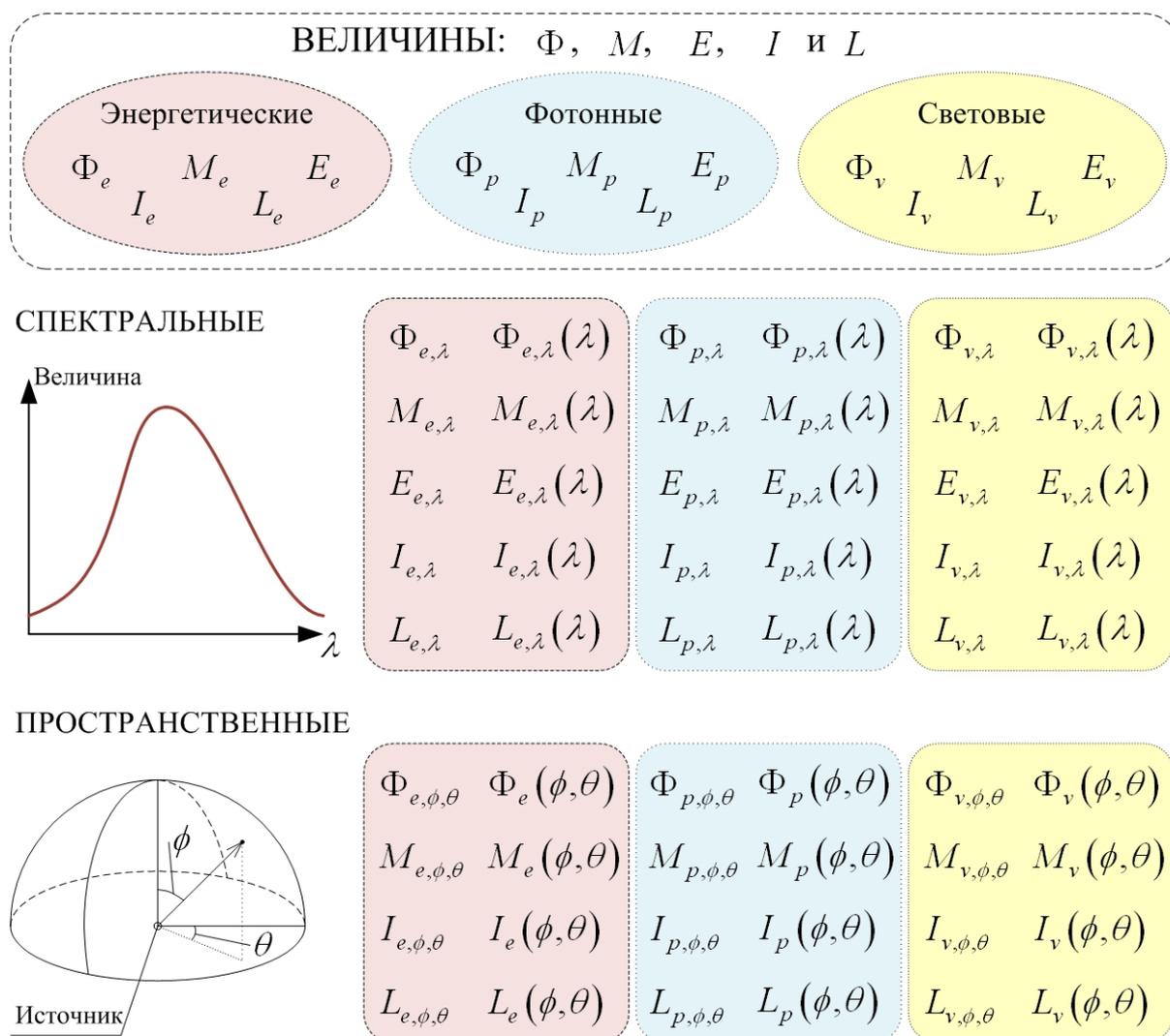


Рисунок 4.1 – Основные величины

При этом указанные величины могут измеряться при помощи различных единиц измерения: энергетических, фотонных и световых (табл. 4.1). Также данные величины могут описывать спектральные и пространственные свойства излучения источника (рис. 4.1).

Пусть есть некая величина P , характеризующая источник. Тогда обозначение P_e говорит о том, что данная величина измеряется в

энергетических единицах, например, Вт. Если указанная величина описывает спектральные свойства излучения источника, то спектральная плотность величины обозначается как $P_{e,\lambda}$ и определяется по формуле

$$P_{e,\lambda} = \frac{dP_e}{d\lambda}, \quad (4.1)$$

при этом единицами измерения $P_{e,\lambda}$ являются Вт/мкм. Распределение спектральной плотности величины по длинам волн обозначается как $P_{e,\lambda}(\lambda)$ и имеет те же единицы измерения, как и $P_{e,\lambda}$. При этом

$$P_e = \int P_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda. \quad (4.2)$$

Если рассматриваемая величина описывает пространственные свойства излучения (свойства излучения источника в направлении, описываемом углами ϕ и θ – рис. 4.1), то пространственная плотность излучения источника обозначается как $P_{e,\phi,\theta}$ и определяется по формуле

$$P_{e,\phi,\theta} = \frac{dP_e}{d\phi d\theta}, \quad (4.3)$$

при этом единицами измерения $P_{e,\phi,\theta}$ являются Вт/(рад·рад). Распределение пространственной плотности величины по углам ϕ и θ обозначается как $P_{e,\phi,\theta}(\phi, \theta)$ и имеет те же единицы измерения, как и $P_{e,\phi,\theta}$. При этом

$$P_e = \int P_{e,\phi,\theta}(\phi, \theta) d\phi d\theta. \quad (4.4)$$

Если свойства излучения в пространстве описываются при помощи одного угла ϕ или θ , то отсутствующий угол исключается из нижнего индекса в обозначении.

В случае, когда из контекста текста или расчета можно понять, в каких именно единицах измеряется указанная величина P , то индекс единиц измерения также можно опустить.

Таблица 4.1 – Единицы измерения величин

	Энергетические единицы	Фотонные единицы	Световые единицы
Поток Φ	Вт	фотон/с	лм
Сила излучения (света) I	Вт/ср	фотон/(ср·с)	кд = лм/ср
Светимость M	Вт/м ²	фотон/(с·м ²)	лм/м ²
Облученность (освещенность) E	Вт/м ²	фотон/(с·м ²)	лк = лм/м ²
Яркость L	Вт/(ср·м ²)	фотон/(с·ср·м ²)	кд/м ² = лм/(ср·м ²)

Поток Φ – отношение энергии Q , переносимой излучением, ко времени t_s переноса, значительно превышающему период собственных колебаний:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt_s}. \quad (4.5)$$

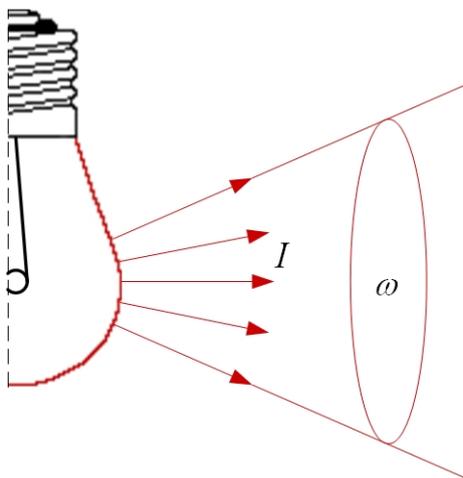


Рисунок 4.2 – Сила излучения (сила света) источника

Сила излучения I – отношение потока излучения Φ , равномерно распределяющегося от источника излучения внутри телесного угла ω , содержащего выбранное направление (рис. 4.2):

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (4.6)$$

Если I измеряется в энергетических или фотонных единицах, то она называется **силой излучения**. Если I измеряется в световых единицах, то она называется **силой света**.

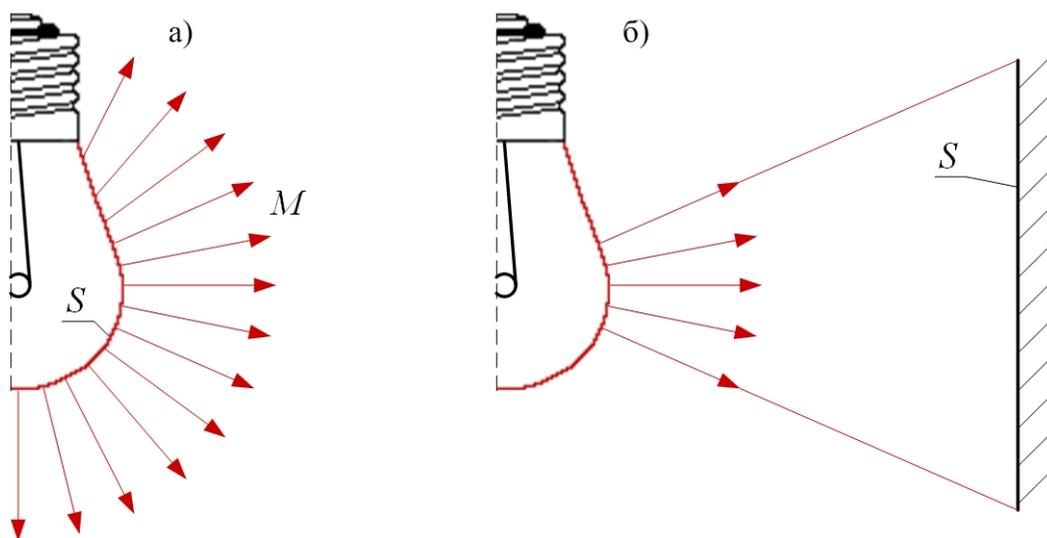


Рисунок 4.3 – Светимость источника (а) и освещенность (облученность) от источника (б)

Светимость M – отношение потока излучения Φ , исходящего от участка поверхности, содержащего рассматриваемую точку, к площади этого участка S , в пределах которого излучение можно принять равномерным по поверхности (рис. 4.3 а):

$$M = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (4.7)$$

Облученность E – отношение потока излучения Φ , падающего на участок поверхности, содержащий рассматриваемую точку, к площади S этого участка (рис. 4.3 б):

$$E = \frac{d\Phi}{dS}. \quad (4.8)$$

Если E измеряется в энергетических или фотонных единицах, то она называется **облученностью**. Если E измеряется в световых единицах, то она называется **освещенностью**.

Следует отметить, что светимость M является прямой характеристикой источника, а освещенность E – косвенной, поскольку описывает освещаемую поверхность.

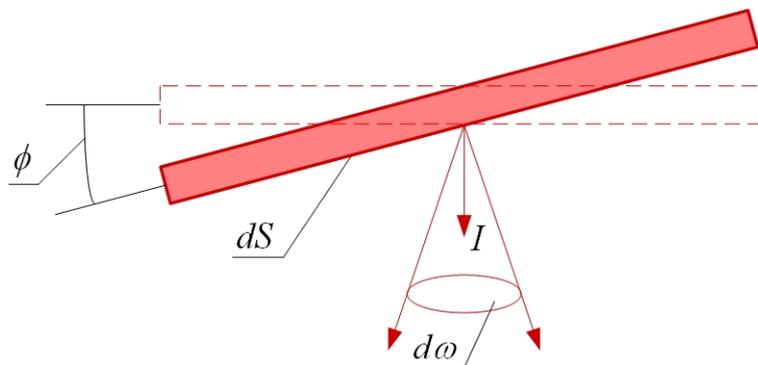


Рисунок 4.4 – Яркость источника

Яркость L – отношение потока излучения Φ , переносимого узким пучком с малой площади S , содержащей рассматриваемую точку, в малом телесном угле ω , содержащем направление I и составляющем угол ϕ с нормалью к S (рис. 4.4):

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dS \cos\phi}. \quad (4.9)$$

Пересчет каждой величины из энергетических единиц измерения в световые производится следующим образом

$$P_v = K_m \cdot \int V(\lambda) \cdot P_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda, \quad (4.10)$$

где $K_m = 683$ – максимальная спектральная световая эффективность излучения при $\lambda = 0,555$ мкм; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения.

4.2 Характеристики излучающих диодов

Параметры излучающих диодов (ИД) непосредственно связаны с процессами спонтанной излучательной рекомбинации электронно-дырочных пар (рис. 4.5). Предполагается, что зависимости энергии электронов в зоне проводимости Q_E и энергии дырок в валентной зоне Q_H от волнового вектора k_v описываются параболическими зависимостями:

$$Q_E = Q_C + \frac{(h/2\pi)^2 k_v^2}{2m_e^*} \text{ для электронов в зоне проводимости,} \quad (4.11)$$

$$Q_H = Q_V - \frac{(h/2\pi)^2 k_v^2}{2m_h^*} \text{ для электронов в валентной зоне,} \quad (4.12)$$

где m_e^* и m_h^* – эффективные массы электрона и дырки, h – постоянная Планка, k_v – квазиволновой вектор, Q_C и Q_V – энергии экстремумов зоны проводимости и валентной зоны.

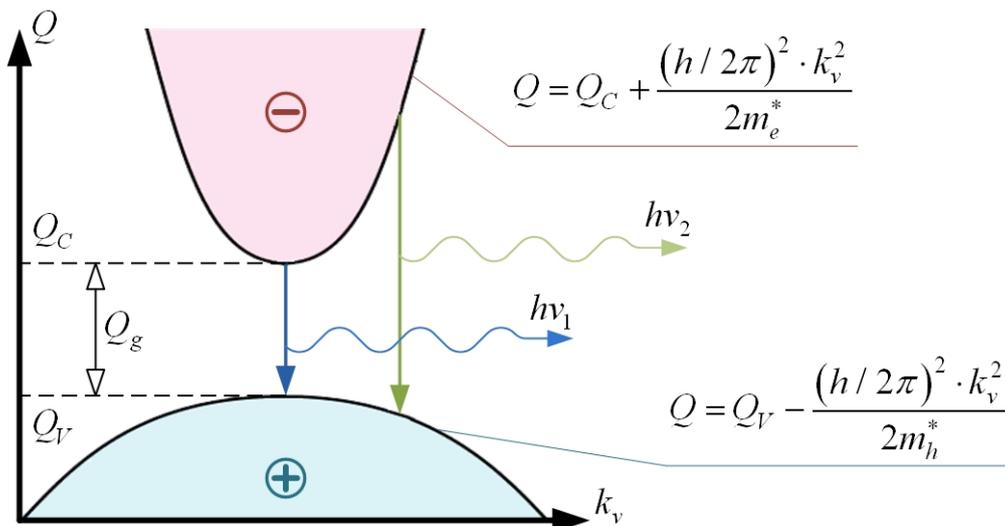


Рисунок 4.5 – Закон дисперсии электронов и дырок

Из закона сохранения энергии следует, что энергия фотона равна разности энергий электрона Q_E и дырки Q_H

$$hv = Q_E - Q_H \approx Q_g. \quad (4.13)$$

Если тепловая энергия мала по сравнению с шириной запрещенной зоны ($kT \ll Q_g$), энергия фотона приблизительно равна Q_g . Следовательно, при выборе полупроводника с соответствующей запрещенной зоной можно создать ИД, излучающий на требуемой длине волны.

В оптическом диапазоне импульс фотона намного меньше импульса носителей заряда, т.е. после акта рекомбинации с выделением фотона электрон переходит из зоны проводимости в валентную зону практически

без изменения квазиимпульса. Такие переходы изображены на рис. 4.5 вертикальными стрелками, показывающими, что электроны рекомбинируют только с теми дырками, у которых такой же, как у них, квазиимпульс или величина квазиволнового вектора k_v .

Исходя из равенства квазиимпульсов электронов и дырок, можно вывести соотношение для расчета энергии фотона:

$$h\nu = Q_g + \frac{(h/2\pi)^2 k_v^2}{2m_r^*}, \quad (4.14)$$

где m_r^* – приведенная масса $\left(\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right)$.

Используя (4.14), можно найти выражения для комбинированной плотности энергетических состояний в зависимости от энергии $\rho(Q)$ [11]:

$$\rho(Q) = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \left(\frac{2m_r^*}{(h/2\pi)^2}\right)^{3/2} \cdot \sqrt{Q - Q_g}. \quad (4.15)$$

Распределение носителей в разрешенных зонах невырожденного полупроводника $f_B(Q)$ определяется распределением Больцмана

$$f_B(Q) = \exp\left\{-\frac{Q}{kT}\right\}. \quad (4.16)$$

Зависимость интенсивности излучения от энергии является функцией, пропорциональной произведению уравнений (4.15) и (4.16) (рис. 4.6).

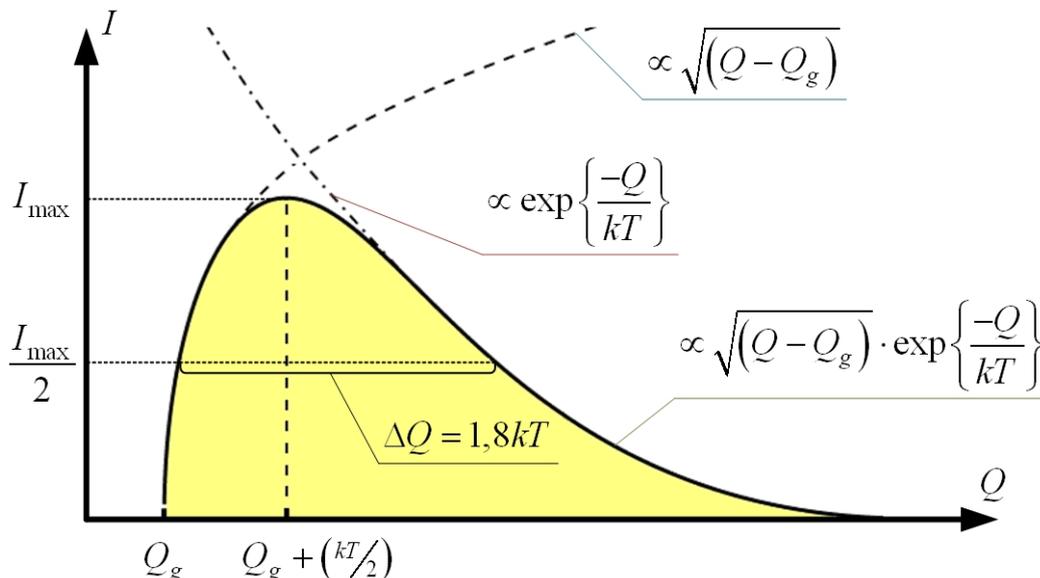


Рисунок 4.6 – Теоретический спектр излучения ИД

При этом максимум спектра излучения соответствует энергии

$$Q = Q_g + \frac{kT}{2}. \quad (4.17)$$

Ширина спектральной линии определяется на уровне, равном половине интенсивности в максимуме излучения

$$\Delta Q = 1,8kT \text{ или } \Delta\lambda = \frac{1,8kT \cdot \lambda^2}{hc}.$$

Если излучение на границе между полупроводником и воздухом испытывает полное внутреннее отражение, оно не выходит из полупроводника (рис. 4.7). Излучение может выйти за пределы полупроводника, если угол падения лучей на границу раздела близок к нормали к поверхности. Полное внутреннее отражение сильно снижает внешний квантовый выход излучения, особенно для ИД из материалов с высокими значениями показателей преломления.

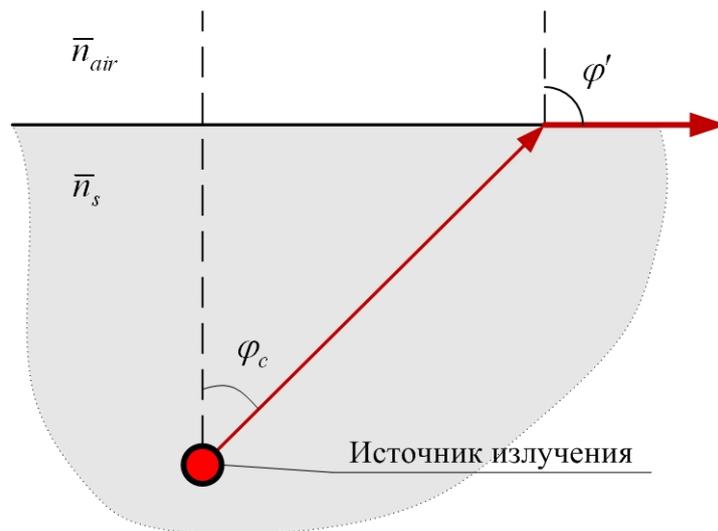


Рисунок 4.7 – Полное внутреннее отражение

Пусть угол φ – угол падения лучей на границу раздела полупроводник-воздух со стороны полупроводника. Тогда угол отражения этого луча от поверхности раздела φ' можно найти из закона Снеллиуса

$$\bar{n}_s \cdot \sin \varphi = \bar{n}_{air} \cdot \sin \varphi', \quad (4.18)$$

где \bar{n}_s и \bar{n}_{air} – показатели преломления полупроводника и воздуха. Исходя из условия $\varphi' = 90^\circ$, можно вычислить критический угол полного внутреннего отражения φ_c

$$\varphi_c = \arcsin\left(\frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_s}\right). \quad (4.19)$$

Полупроводники обычно обладают довольно высокими значениями показателей преломления. Поэтому величина φ_c очень мала и можно использовать приближение $\sin \varphi_c \approx \varphi_c$. Тогда критический угол полного внутреннего отражения φ_c находится из выражения

$$\varphi_c \approx \frac{\bar{n}_{air}}{\bar{n}_s}. \quad (4.20)$$

Угол полного внутреннего отражения определяет угол вывода излучения. Лучи, попадающие внутрь конуса, ограниченного φ_c могут выйти за пределы полупроводника. Остальные – нет.

Для определения доли излучения, попадающей в угол вывода излучения, надо рассчитать площадь поверхности сферического конуса с радиусом r (рис. 4.8 а и 4.8 б). Площадь сегмента поверхности сферы, определяемого радиусом r и углом φ рассчитывается так:

$$S = \int dS = \int_0^\varphi 2\pi r^2 \sin \varphi d\varphi = 2\pi r^2 (1 - \cos \varphi). \quad (4.21)$$

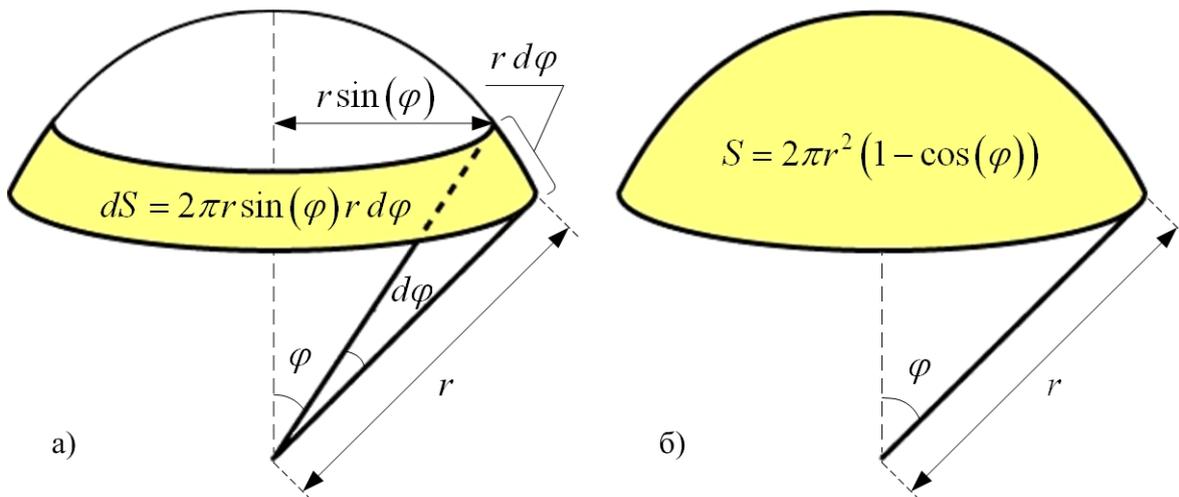


Рисунок 4.8 – Угол вывода излучения

Следовательно, мощность излучения, выходящего из полупроводника определяется отношением площади поверхности сегмента к площади поверхности всей сферы, умноженным на исходную мощность излучения источника в толще полупроводника. Тогда отношение мощности излучения, вышедшего за пределы полупроводника к исходной мощности излучения

определяется дробью $\frac{2\pi r^2 (1 - \cos \varphi_c)}{4\pi r^2} = \frac{1}{2} (1 - \cos \varphi_c)$. Поскольку для

материалов с высокими показателями преломления характерны сравнительно небольшие значения критических углов полного внутреннего отражения, $\cos \varphi_c$ можно представить в виде степенного ряда. Тогда

отношение мощностей будет равно $\frac{1}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{\varphi_c^2}{2} \right) \right] = \frac{1}{4} \varphi_c^2$. Используя

формулу (4.20) отношение мощностей будет равно $\frac{1}{4} \cdot \frac{\bar{n}_{air}^2}{\bar{n}_s^2}$. Соответственно

видно, что только несколько процентов излучения, генерируемого внутри материала, выходят за пределы планарных ИД.

Различия между показателями преломления излучающего материала и окружающей среды ведет к анизотропии пространственного распределения излучения. Для плоских (планарных) ИД на основе материалов с высокими значениями показателей преломления характерно ламбертовское распределение излучения (рис. 4.9). На данном рисунке показан точечный источник излучения, расположенный немного ниже границы раздела полупроводник-воздух. Луч, выходящий из источника под углом φ с нормалью к поверхности раздела, преломляется под углом ψ также по отношению к нормали. При этом результирующее выражение для нахождения интенсивности излучения данного ИД в воздухе от угла ψ будет прямопропорционально $\cos\psi$ [11]. Следовательно, данный источник является источником Ламберта.

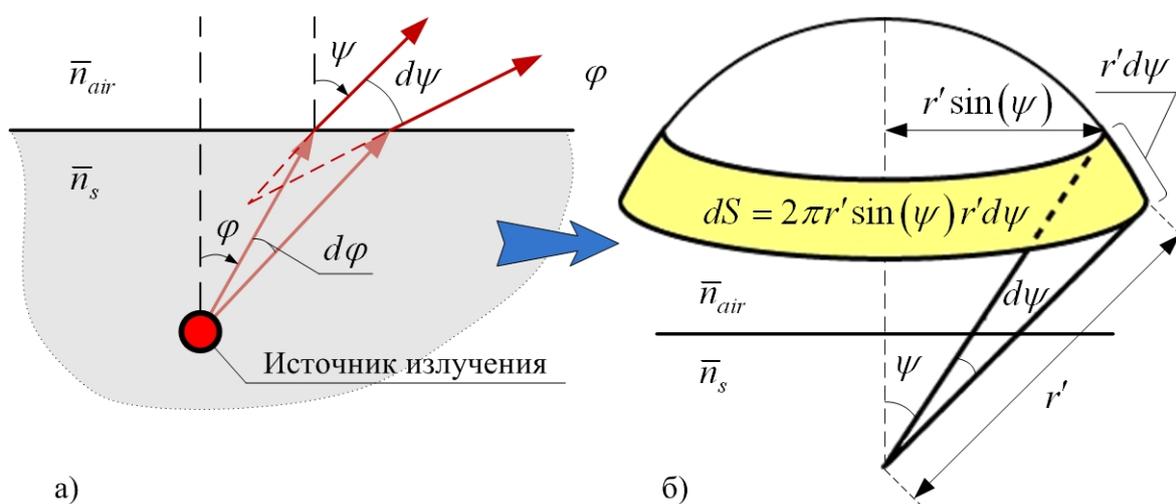


Рисунок 4.9 – Модель получения Ламбертовского источника

На рис. 4.10 а схематично показано ламбертовское пространственное распределение излучения (диаграмма направленности или распределение пространственной плотности силы излучения по углу $\phi - I(\phi)$) планарного ИД. Также на рис. 4.10 а приведены примеры распределений $I(\phi)$ для ИД с поверхностями другой геометрической формы. Для полусферического ИД с излучающей областью в центре сферы характерно изотропное распределение пространственной плотности силы излучения: $I(\phi) = const$. При параболической форме поверхности получается распределение с ярко выраженной направленностью. Однако, ИД с параболической и полусферической поверхностями гораздо сложнее изготовить.

Рис. 4.10 б представляет в объеме теоретические распределения пространственной плотности силы излучения по углам ϕ и $\theta - I(\phi, \theta)$ для ламбертовского источника и источника с провалом излучения в центре. На рис. 4.10 в представлены реальные распределения $I(\phi, \theta)$ от красного ИД марки L-934SRC-J и зеленого ИД марки BL-L324PGC.

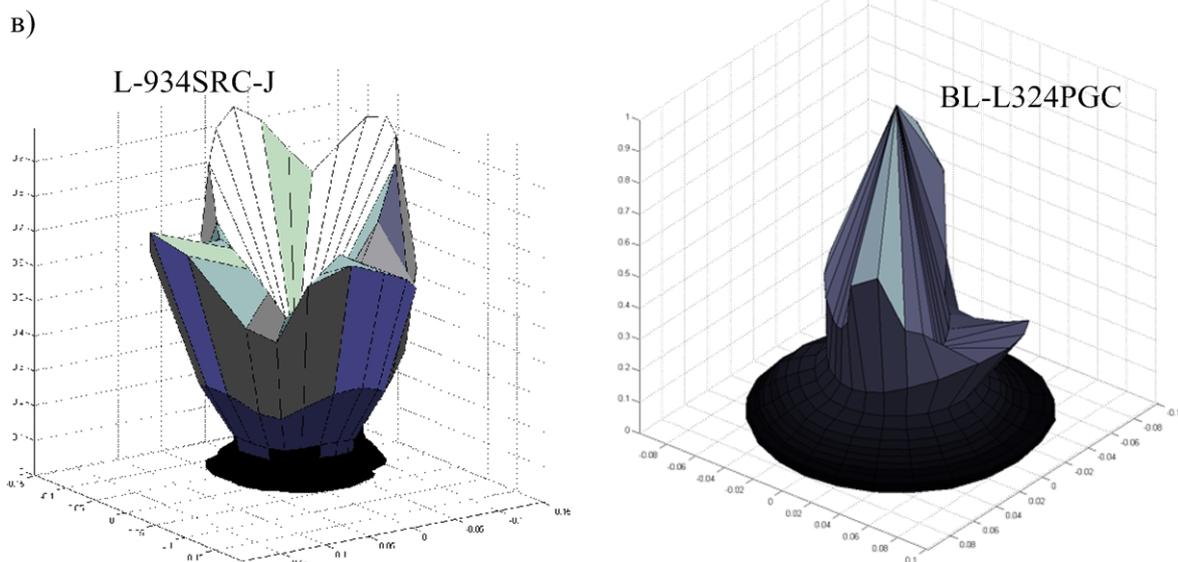
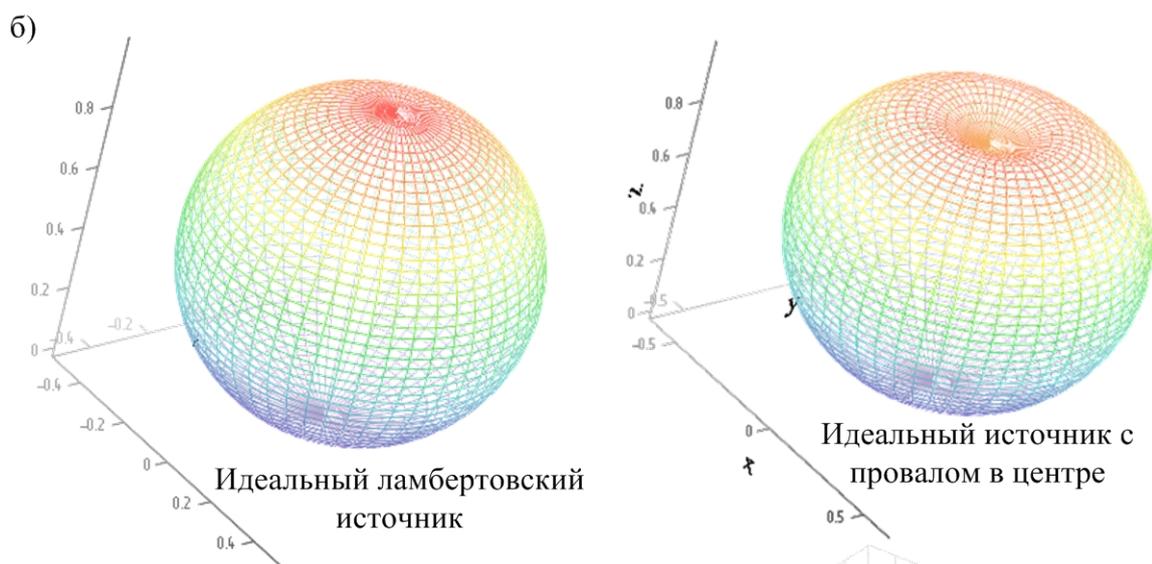
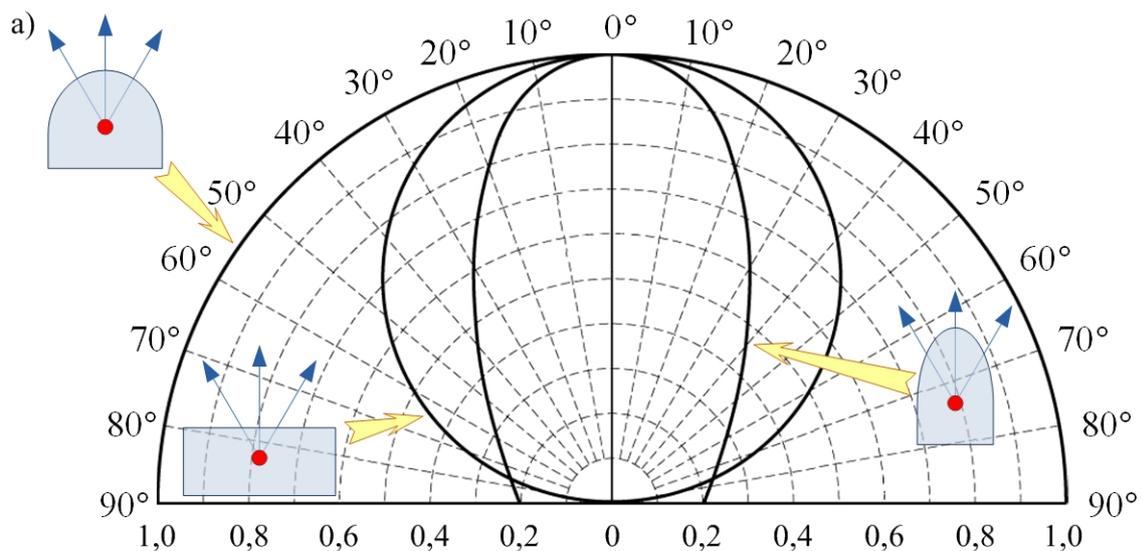


Рисунок 4.10 – Индикатрисы излучения ИД: теоретические плоские (а) и объемные (б), а также объемные реальные (в)

5 РАСЧЁТ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ ИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Цветовые параметры излучения источников характеризуются координатами цвета в **цветовом пространстве МКО 1931 г.** $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, координатами цветностей на **цветовой диаграмме МКО 1931 г.** (x, y) и координатами цветностей на **цветовой диаграмме МКО 1976 г.** (u', v') .

Для заданного распределения спектральной плотности величины измерения излучения источника $P_\lambda(\lambda)$, координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. можно рассчитать по выражениям [12]:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \bar{y} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ \bar{z} &= k_c \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \tag{5.1}$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения цветов в \vec{XYZ} системе измерения цвета, k_c – множитель.

Поскольку кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ обычно задаются относительными значениями ординат, рассчитанные по ним координаты цвета будут иметь относительный характер [13, 14]. Во многих случаях, когда цель расчета заключается в определении координат цветности, этого достаточно. Поэтому общий множитель k_c можно опустить. Когда необходима абсолютная количественная мера цвета, обычно измеряется его яркость. Для расчета абсолютных значений яркости используется соотношение, устанавливающее, что 1 Вт монохроматического потока излучения с длиной волны 555 нм равен 683 лм светового потока. Относительную яркость можно оценить [15, 16], рассчитав

$$k_c = \frac{100}{\int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \tag{5.2}$$

Следовательно, для источника излучения всегда цветовая координата

$$\bar{y} = \frac{100}{\int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^\infty P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \text{ численно равна } 100.$$

При численном определении координат цвета выражение (5.1) непосредственно не используется, так как ни кривые сложения, ни спектральные характеристики излучения, как правило, не являются

простыми функциями, удобными для интегрирования. Кроме того, кривые сложения задаются таблично для дискретных значений длин волн (см. Приложение 1). Поэтому при практических расчетах интегрирование (5.1) заменяют суммированием соответствующих произведений для ряда длин волн, то есть:

$$\begin{aligned}\bar{x} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ \bar{y} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ \bar{z} &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda\end{aligned}\tag{5.3}$$

при этом выражение (5.2) будет выглядеть как

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda}.\tag{5.4}$$

Существуют два способа определения координат цвета по (5.3):

- способ взвешенных ординат и
- способ избранных ординат.

При использовании **способа взвешенных ординат** суммируются произведения $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$ для ряда значений длин волн видимого спектра с одинаковым интервалом $\Delta\lambda$. В большинстве случаев вполне достаточная точность расчета обеспечивается с интервалом 10 нм. При спектральных характеристиках излучения с крутыми склонами прибегают к суммированию с интервалом 5 нм, а при плавных характеристиках иногда оказывается достаточной точность расчетов и с интервалом 20 нм [12]. В общем, при выборе размера спектрального интервала для расчета координат цвета можно придерживаться правила, что этот интервал должен быть таким, чтобы использование меньшего интервала существенно не влияло на результат расчета. Для источников с узким спектром излучения, в частности светодиодов, имеет смысл суммировать с интервалом в 1 нм.

Расчеты координат цвета по (5.3) представляют собой, очевидно, приближенное определение площадей под кривыми $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$. Эти площади разбиваются на участки шириной $\Delta\lambda$, а последние аппроксимируются прямоугольниками, как показано на рис. 5.1, при $\Delta\lambda = 20$ нм. Высоты прямоугольников равны значениям функции $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$ для длин волн, находящихся в середине интервалов $\Delta\lambda$.

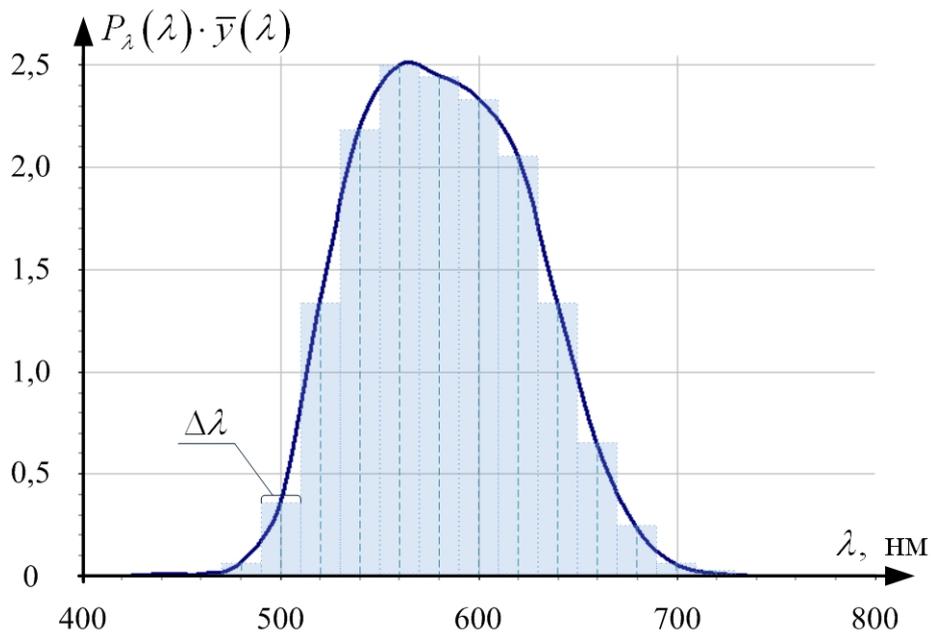


Рисунок 5.1 – Иллюстрация расчёта координат цвета по способу взвешенных ординат [12]

В расчетах по (5.3) и (5.4) ординаты функции спектрального распределения излучения взвешиваются тремя функциями сложения, поэтому данный способ расчета называется способом взвешенных ординат.

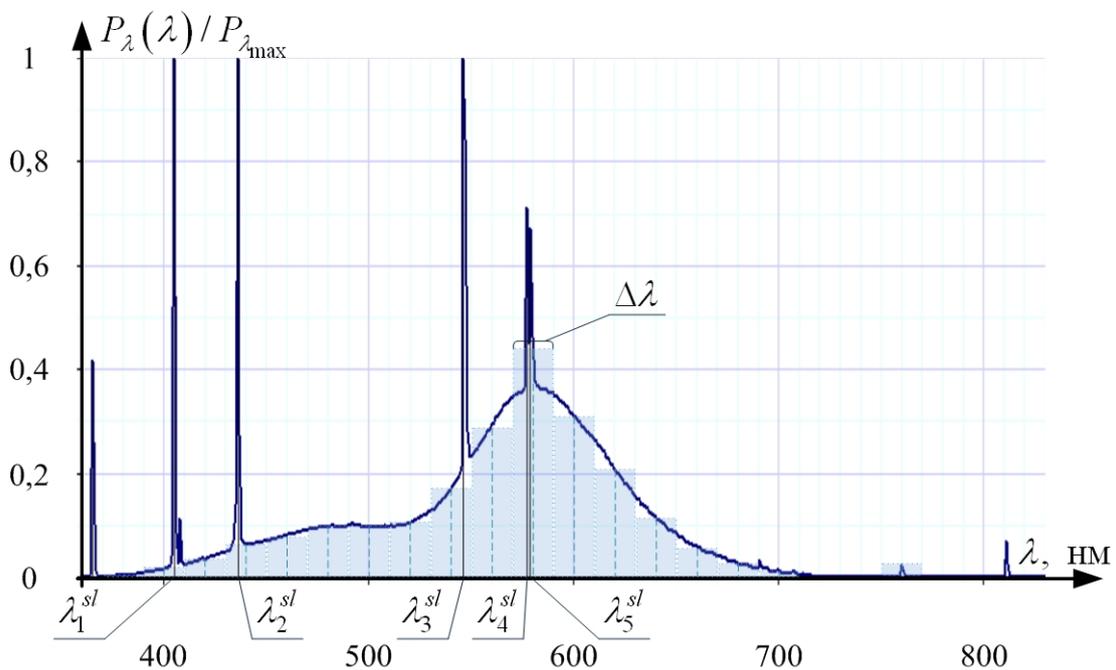


Рисунок 5.2 – Спектр люминесцентной лампы

Когда исследуется источник со смешанным спектром излучения, состоящим из непрерывного фона и отдельных спектральных линий, например люминесцентная лампа, спектр которой показан на рис. 5.2, в

результаты расчета по способу взвешенных ординат иногда (при недостаточно маленьком $\Delta\lambda$) следует вводить поправки.

Спектральную характеристику излучения такого источника изображают, представляя значения величин P_λ на длинах волн спектральных линий λ_i^{sl} площадями полос с серединами в λ_i^{sl} и высотами $P_\lambda(\lambda_i^{sl})$ (см. рис. 5.2).

При этом ширина полос обычно берется равной используемому интервалу длин волн $\Delta\lambda$. Если при измерении $P_\lambda(\lambda)$ могут быть получены значения $P_\lambda(\lambda_i^{sl})$, то эти значения умножают на соответствующие значения $\bar{x}(\lambda_i^{sl})$, $\bar{y}(\lambda_i^{sl})$ и $\bar{z}(\lambda_i^{sl})$. Это дает несколько дополнительных слагаемых в формулы (5.3) и (5.4).

Если значения $P_\lambda(\lambda)$ существуют только для длин волн с интервалом $\Delta\lambda$, а длины волн λ_i^{sl} попадают внутрь этих интервалов, то формулы (5.3) и (5.4) представляют значения цветовых координат непрерывного фона.

Тогда наличие излучения в линиях, мощность которых можно представить полосами с высотами $P_\lambda(\lambda_i^{sl})$ учитывают внесением поправок в значения произведений $PX_{\lambda_i} = P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i)$, $PY_{\lambda_i} = P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i)$, $PZ_{\lambda_i} = P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)$ и произведений $PX_{\lambda_i+\Delta\lambda} = P_\lambda(\lambda_i + \Delta\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda_i + \Delta\lambda)$, $PY_{\lambda_i+\Delta\lambda} = P_\lambda(\lambda_i + \Delta\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda_i + \Delta\lambda)$, $PZ_{\lambda_i+\Delta\lambda} = P_\lambda(\lambda_i + \Delta\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda_i + \Delta\lambda)$ для граничных длин волн λ_i и $\lambda_i + \Delta\lambda$ интервалов, в которых находятся узкие спектральные линии излучения источника λ_i^{sl} .

Коррекция этих значений заключается в прибавлении к ним частей произведений $P_\lambda(\lambda_i^{sl}) \cdot \bar{x}(\lambda_i^{sl})$, $P_\lambda(\lambda_i^{sl}) \cdot \bar{y}(\lambda_i^{sl})$, $P_\lambda(\lambda_i^{sl}) \cdot \bar{z}(\lambda_i^{sl})$, обратно пропорциональных расстояниям по шкале длин волн от λ_i^{sl} до λ_i и $\lambda_i + \Delta\lambda$. Исправленные значения рассчитываются по следующим формулам

$$\begin{aligned} PX'_{\lambda_i} &= PX_{\lambda_i} + \frac{PX_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i - \lambda_i^{sl} + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda} \\ PY'_{\lambda_i} &= PY_{\lambda_i} + \frac{PY_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i - \lambda_i^{sl} + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda} \\ PZ'_{\lambda_i} &= PZ_{\lambda_i} + \frac{PZ_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i - \lambda_i^{sl} + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda} \end{aligned} \quad (5.5)$$

и

$$\begin{aligned}
 PX'_{\lambda_i+\Delta\lambda} &= PX_{\lambda_i+\Delta\lambda} + \frac{PX_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i^{sl} - \lambda_i)}{\Delta\lambda} \\
 PY'_{\lambda_i+\Delta\lambda} &= PY_{\lambda_i+\Delta\lambda} + \frac{PY_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i^{sl} - \lambda_i)}{\Delta\lambda} \\
 PZ'_{\lambda_i+\Delta\lambda} &= PZ_{\lambda_i+\Delta\lambda} + \frac{PZ_{\lambda_i^{sl}}(\lambda_i^{sl} - \lambda_i)}{\Delta\lambda}
 \end{aligned}
 \tag{5.6}$$

Способ **избранных ординат** основан на том, что интервал $\Delta\lambda$ делается переменным, и его значения по спектру можно подобрать таким образом, чтобы произведения $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$, $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$ и $P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda_i$ были одинаковыми для всех i (рис. 5.3). Тогда значение произведения можно вынести за знак суммы, и формула при расделении спектра на n интервалов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i \\
 \bar{y} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i \\
 \bar{z} &= k_c [P_\lambda(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

Значения произведений перед знаком суммы различны для каждой кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ и для каждого источника излучения.

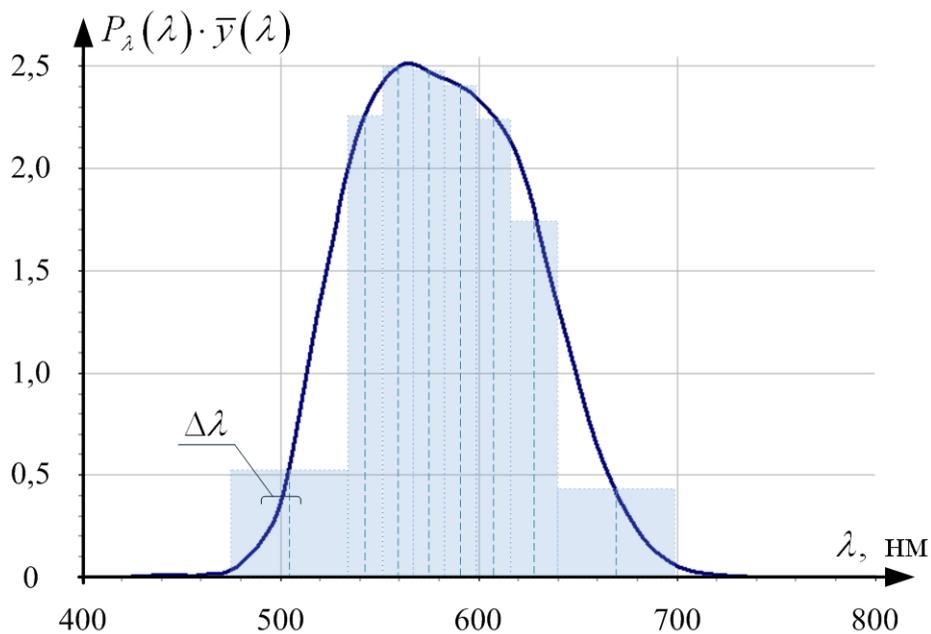


Рисунок 5.3 – Иллюстрация расчёта координат цвета по способу избранных ординат

Таким образом, можно считать, что при определении координат цвета по способу избранных ординат также находятся площади под тремя кривыми, получающимися при взвешивании кривой результирующего спектрального распределения излучения источника тремя функциями сложения, но в отличие от способа взвешенных ординат, участки площадей под кривыми аппроксимируются прямоугольниками неравной ширины. Если изменить шкалу длин волн графика таким образом, чтобы эти прямоугольники имели одинаковую ширину, для нахождения координаты цвета достаточно было бы определить площадь по спектральной характеристике излучения, построенной на таком графике.

Необходимо иметь в виду, что видоизменение шкалы длин волн для **каждой комбинации** кривой сложения и источника излучения **различно**, как различно расположение избранных ординат по шкале длин волн для каждой такой комбинации.

Расчет координат цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г. Чтобы упростить представление определяемых цветов используется цветовая диаграмма МКО 1931 г [8] (рис. 5.4). Точка \vec{E} обозначает цвет белой поверхности, освещенной источником типа E (точка белого цвета).

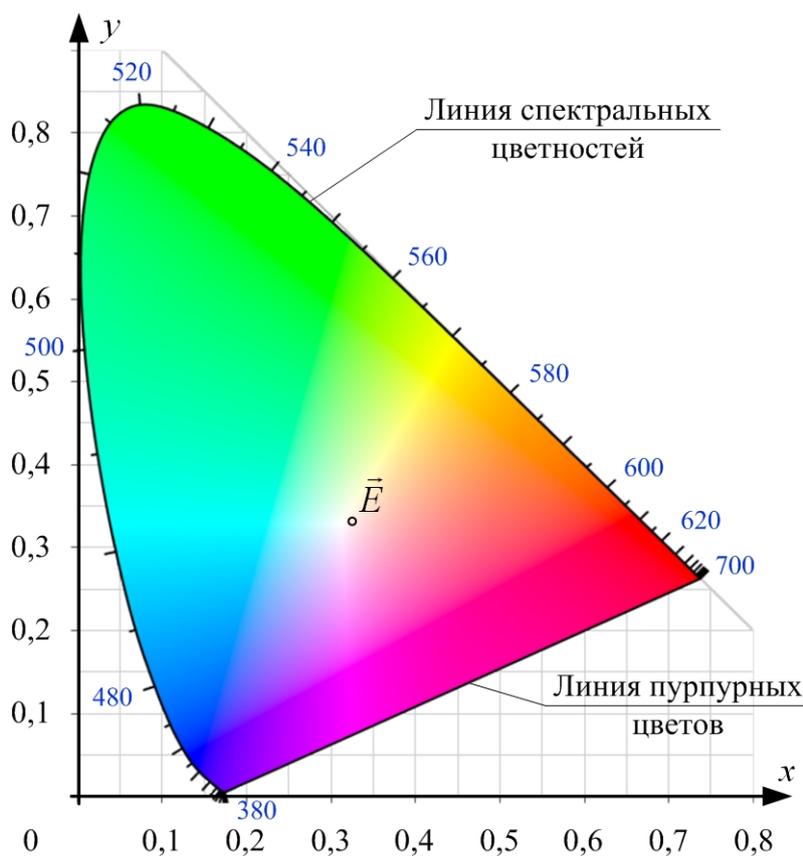


Рисунок 5.4 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г.

Для её построения используются координаты цветностей x , y и z – относительные цветовые координаты

$$\begin{aligned} x &= \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \\ y &= \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \end{aligned} \quad (5.8)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения.

При этом учитывается соотношение координат цветностей

$$x + y + z = 1,$$

поэтому для представления цвета на цветовой диаграмме МКО 1931 г. используют только координаты цветностей (x, y) . Поскольку цвет определяется тремя параметрами, то к координатам цветностей (x, y) часто добавляют цветовую координату \bar{y} в качестве характеристики яркости.

Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. СIE $Lu'v'$ Попытки привести цветовую диаграмму МКО 1931 г к такому виду, чтобы эллипсы Мак-Адама приняли форму окружностей, привели к созданию цветовой диаграммы МКО 1976 г. (рис. 5.5). Данный цветовой график считается равноконтрастным, т.е. в нем расстояние между любыми двумя точками пропорционально числу порогов цветоразличения.

Данное цветовое пространство описывается одной координатой цвета L и двумя координатами цветностей u' и v' . Обычно в качестве точки белого используется стандартный источник типа E .

При этом координата цвета L характеризует яркость источника и приравнивается к цветовой координате \bar{y}

$$L = \bar{y},$$

координаты цветностей (u', v') рассчитываются по следующим соотношениям [17]

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \\ v' &= \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}} \end{aligned} \quad (5.9)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения. Третья координата цветности $w' = 1 - u' - v'$.

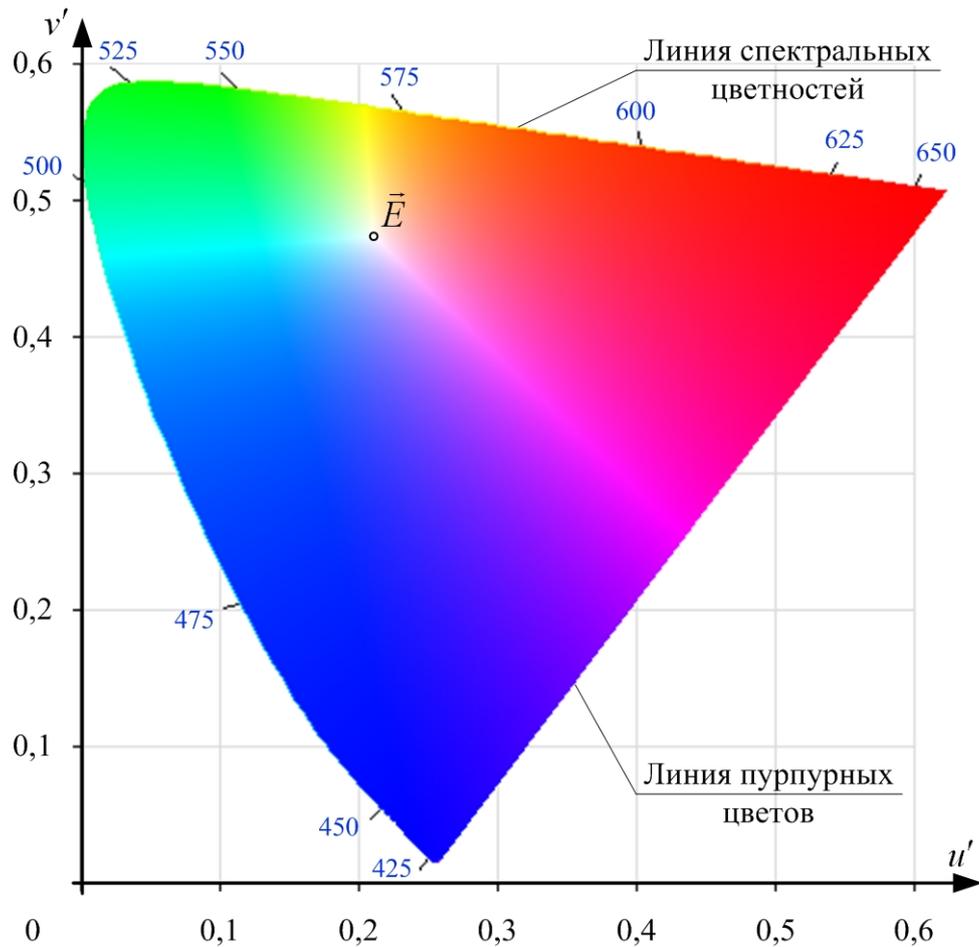


Рисунок 5.5 – Цветовая диаграмма МКО 1976 г.

Координаты цветностей (u', v') можно также рассчитать по известным значениям координат цветностей (x, y) на диаграмме 1931 г. следующим образом [8]:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (5.10)$$

6 ПОНЯТИЕ ЦВЕТОВОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Белый свет имеет особые цветовые характеристики. Существует много оптических спектров излучения, при помощи которых можно создать излучение белого цвета. Среди этих спектров можно выделить спектр излучения абсолютно чёрного тела, часто называемого излучением Планка. Данный спектр лежит в основе однозначного и очень полезного стандарта, позволяющего описывать спектр излучения при помощи одного единственного параметра – цветовой температуры. Более того, спектр излучения естественного дневного света близок к спектру планковского источника излучения.

Спектр излучения Солнца

Белый свет, как правило, характеризуется широким спектром излучения, который обычно распространяется на весь видимый диапазон длин волн.

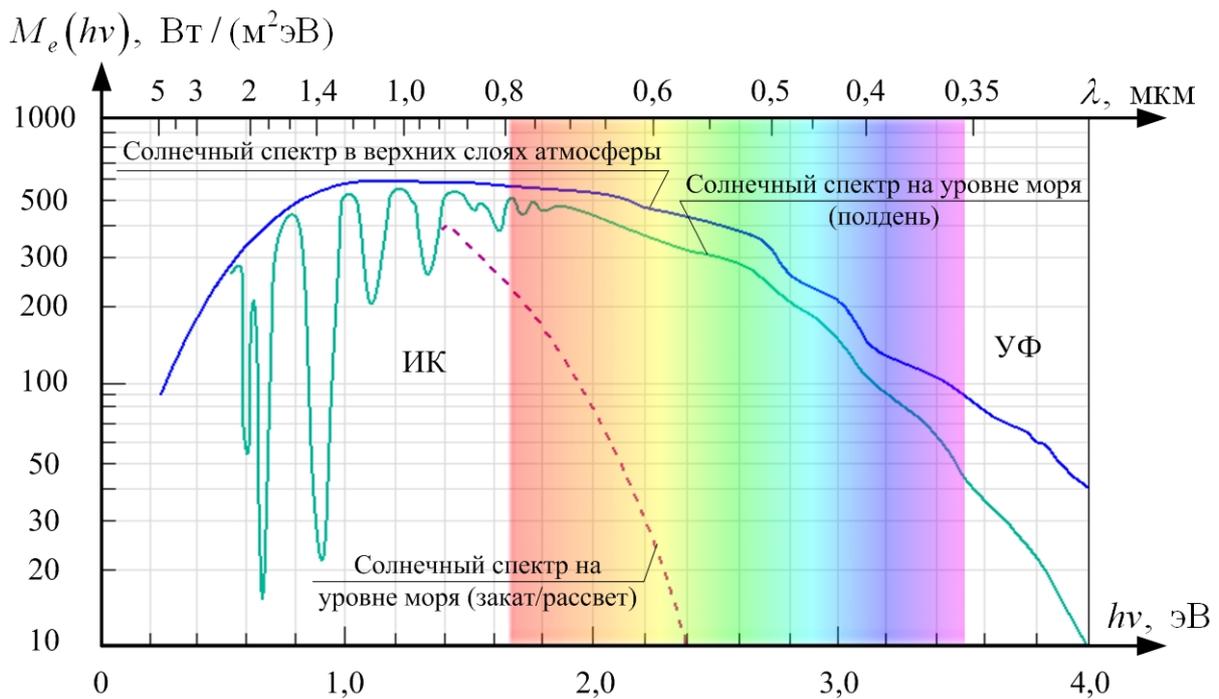


Рисунок 6.1 – Зависимость спектральной плотности мощности солнечного излучения от энергии фотонов и длины волны, измеренные в разных условиях

Типичной моделью белого света является солнечный свет. На рис. 6.1 показаны оптические спектры Солнца в верхних слоях земной атмосферы и на уровне моря в моменты нахождения Солнца в зените, на закате и на рассвете. Спектр солнечного света занимает весь диапазон видимого излучения. Однако интенсивность солнечного излучения зависит от

времени суток, времени года, высоты над уровнем моря, погоды и других факторов [11, 18–20].

Поскольку в солнечном свете велика доля инфракрасной (ИК) и ультрафиолетовой (УФ) составляющих, при точном повторении спектра излучения Солнца не удастся получить эффективный источник белого света. Поэтому Солнце не является хорошим примером эффективного источника белого света. Даже если бы удалось исключить из спектра Солнца ИК- и УФ-составляющие, его все равно нельзя было бы назвать оптимальным из-за высокой интенсивности излучения на границах раздела видимый свет – ИК-излучение и видимый свет – УФ-излучение.

Спектр излучения абсолютно чёрного тела

В качестве независимого стандарта, характеризующего белый свет, часто используют спектр излучения абсолютно чёрного тела, определяемый только одним параметром – температурой излучающего тела.

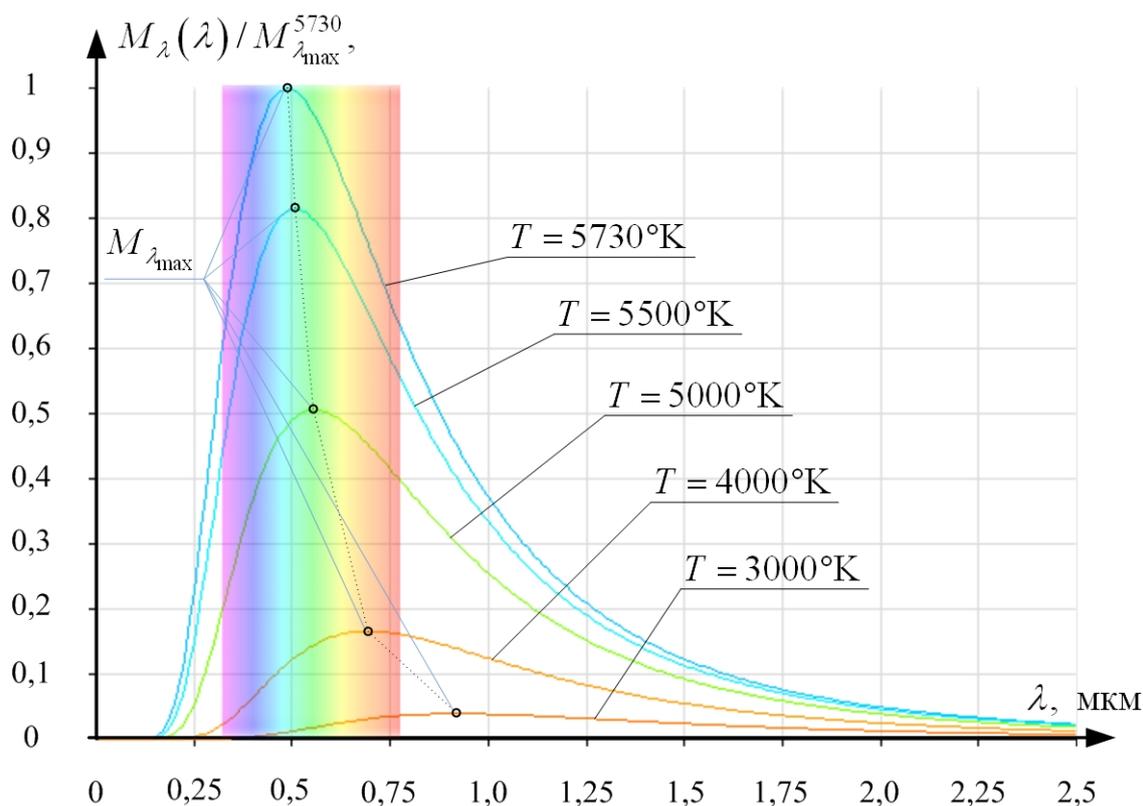


Рисунок 6.2 – Спектральные распределения интенсивности излучения абсолютно чёрного тела по длинам волн, измеренные при разных температурах.

Первым формулу, описывающую распределение спектральной плотности светимости чёрного тела с заданной температурой, вывел Макс Планк в 1900 г.:

$$M(\lambda) = \frac{2h \cdot c^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}, \quad (6.1)$$

где λ – длина волны, c – скорость света ($3 \cdot 10^8$ м/с), h – постоянная Планка ($h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$ Дж·с), k – постоянная Больцмана ($k = 1,38067 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура излучателя в градусах Кельвина. На рис. 6.2 представлены спектры излучения абсолютно чёрного тела при разных температурах.

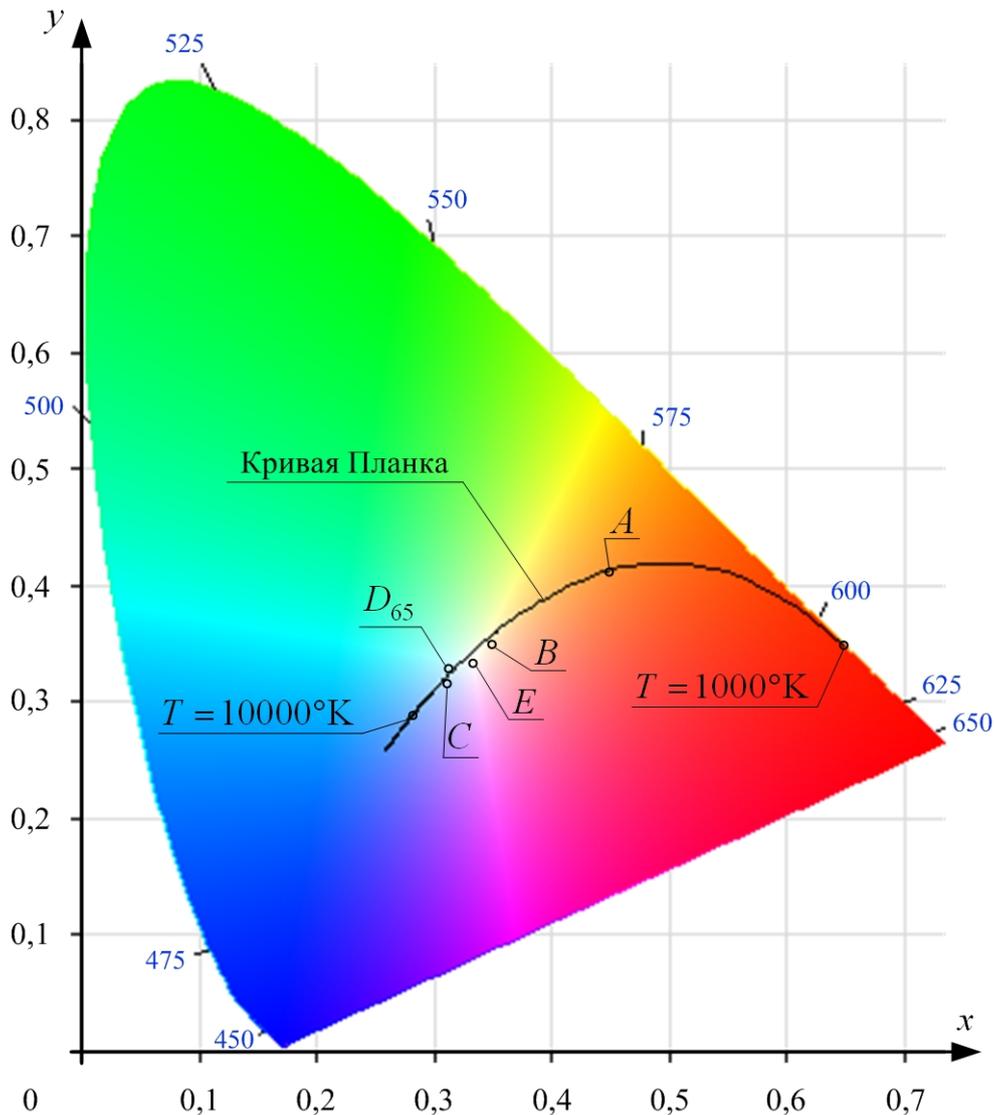


Рисунок 6.3 – Цветовая диаграмма 1931 г, на которой показаны кривая Планка и положение стандартных источников излучения белого света: источники типов A , B , C , D_{65} и E

Длина волны, соответствующая максимальной интенсивности излучения, испускаемого чёрным телом с заданной температурой, может быть рассчитана исходя из закона Вина:

$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T}$. При «низких» температурах чёрного тела (например,

3000 К) излучение происходит в основном в ИК-диапазоне длин волн. По мере увеличения температуры максимум излучения смещается в сторону более коротких волн, т.е. в сторону видимого диапазона спектра.

На рис. 6.3 показано расположение на цветовой диаграмме МКО 1931 г. цветностей спектра излучения чёрного тела, который часто называют линией цветности абсолютно черного тела или кривой Планка. С ростом температуры чёрного тела положение его излучения на диаграмме сдвигается из области красных волн ближе к центру диаграммы.

Температура чёрного тела, излучающего белый свет, обычно лежит в диапазоне 2500–10000 К. На рис. 6.3 также показано расположение на цветовой диаграмме нескольких стандартных источников излучения, определенных МКО: источников типов *A*, *B*, *C*, *D*₆₅ и *E*.

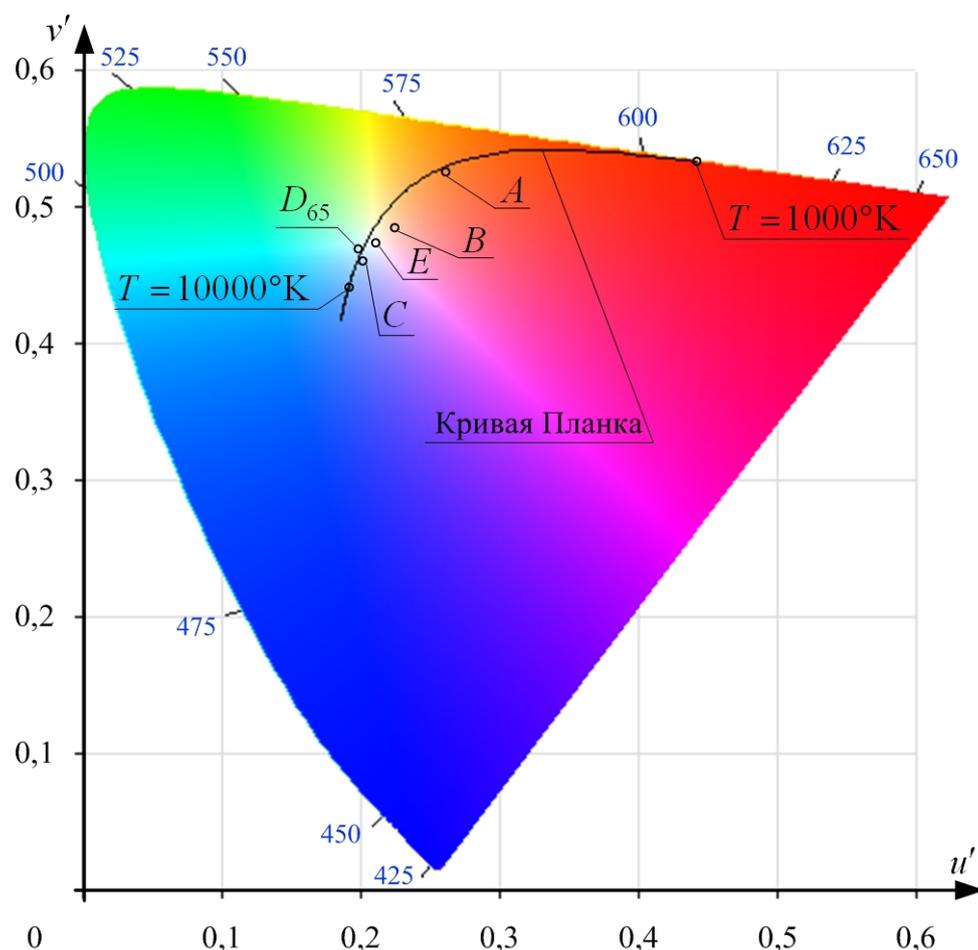


Рисунок 6.4 – Кривая Планка на равноконтрастной цветовой диаграмме МКО 1976 г. и положение стандартных источников излучения белого света: источники типов *A*, *B*, *C*, *D*₆₅ и *E*

На рис. 6.4 представлены кривая Планка и различные значения температуры абсолютно черного тела на равноконтрастной цветовой

диаграмме МКО 1976 г. а также показано расположение на цветовой диаграмме нескольких стандартных источников излучения, определенных МКО: источников типов A , B , C , D_{65} и E .

Коррелированная цветовая температура

С первого взгляда цветовая температура может показаться весьма странной величиной, поскольку параметры цвет и температура не имеют прямого отношения друг к другу [21, 22]. Однако, проанализировав поведение абсолютно чёрного тела, невозможно не увидеть взаимосвязь между этими параметрами. С ростом температуры цвет свечения чёрного тела меняется от красного до голубовато-белого (красный – оранжевый – жёлтовато-белый – белый – голубовато-белый). Цветовая температура (ЦТ) T_c источника белого света, измеряемая в кельвинах, определяется температурой абсолютно чёрного тела, расположенного на цветовой диаграмме там же, где и рассматриваемый источник излучения.

Если анализируемый источник белого света не располагается на кривой Планка, то для его описания используется коррелированная цветовая температура (КЦТ) T'_c . Эта величина также измеряется в Кельвинах и определяется температурой абсолютно чёрного тела, цвет которого максимально приближен к цвету анализируемого источника белого света.

Для нахождения КЦТ источника излучения на цветовой диаграмме МКО 1976 г., построенной в координатах (u', v') , определяется самая близкая к источнику точка на кривой Планка (т.е. самое короткое геометрическое расстояние). Температура чёрного тела, расположенного в этой точке, и будет соответствовать КЦТ рассматриваемого источника.

Из-за неравномерности цветовой диаграммы МКО 1931 г., по ней невозможно определить коррелированную цветовую температуру, используя приведенный выше алгоритм. Для нахождения коррелированной цветовой температуры T'_c по цветовой диаграмме МКО 1931 г. на неё необходимо нанести линии, соответствующие постоянным значениям коррелированной цветовой температуры.

Координаты цветности ламп накаливания на цветовой диаграмме близки к координатам абсолютно чёрного тела, хотя полного совпадения нет. Поэтому для таких источников цветовая температура определяется довольно точно.

Цветовые температуры стандартных ламп накаливания лежат в диапазоне от 2000 до 2900 градусов К, а кварцевых галогенных ламп – в диапазоне от 2800 до 3200 градусов К.

Другие источники излучения, такие как металлогалогенные лампы, на цветовой диаграмме заметно удалены от кривой Планка. Поэтому для них надо определять коррелированную цветовую температуру. Например,

коррелированная цветовая температура для лампы голубовато-белого цвета составляет примерно 8000 градусов К. В таблице 6.1 приведены значения коррелированной цветовой температуры наиболее распространенных источников искусственного и естественного света.

Таблица 6.1 – Коррелированная цветовая температура наиболее распространенных источников искусственного и естественного света

Источник света	Коррелированная цветовая температура T'_c , К
Пламя восковой свечи	1500 – 2000
Пламя стандартной свечи	2000
Лампа накаливания 60 Вт	2800
Лампа накаливания 100 Вт	2850
Галогенная лампа	2800 – 3200
Флуоресцентная лампа «тёплого белого» света	3000
Флуоресцентная лампа «холодного дневного белого» света	4300
Флуоресцентная лампа «реального дневного» света (с выравниванием цвета)	6500
Белое пламя углеродной дуги	5000
Ксеноновая дуга (не фильтрованная)	6000
Летний солнечный свет (от 9:00 или после 15:00)	4900 – 5600
Летний солнечный свет (с 9:00 до 15:00)	5400 – 5700
Прямое солнце	5700 – 6500
Солнце сквозь облака	6500 – 7200
Ясное голубое небо	8000 – 27000

Расчет значения коррелированной цветовой температуры

Значение коррелированной цветовой температуры T'_c источника излучения с цветом \bar{I} (рис. 6.5) можно найти из формулы [23]:

$$T'_c = T_{c1} + d_1 \cdot \frac{T_{c2} - T_{c1}}{d_1 - d_2}, \quad (6.2)$$

где T_{c1} и T_{c2} – значения цветовых температур излучателя Планка ближайших изотермических линий к точке, характеризующей исследуемый источник излучения (см. Приложение 2), а d_1 и d_2 – расстояния до указанных изотермических линий соответственно.

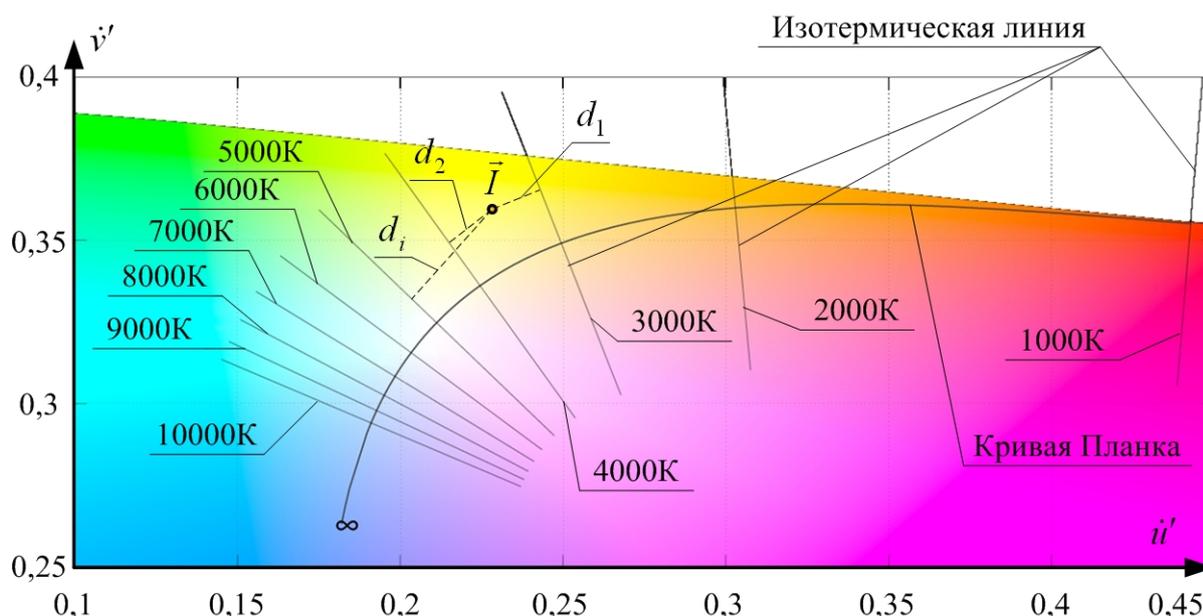


Рисунок 6.5 – Изотермические линии (линии постоянных значений КЦТ T'_c) и процесс расчета значений КЦТ T'_c

Расстояния d необходимо рассчитывать до каждой из известных изотермических линий для того, чтобы была возможность определить две самые близкие к исследуемому источнику.

d_1 и d_2 можно рассчитать по следующим формулам:

$$d_j = \frac{(\dot{v}' - \dot{v}'_{0j}) - t_j \cdot (\dot{u}' - \dot{u}'_{0j})}{\sqrt{1 + t_j^2}}, \quad (6.3)$$

где (\dot{u}', \dot{v}') – координаты цвета исследуемого источника в специализированном цветовом пространстве $Lu'\dot{v}'$, которые рассчитываются по формулам [23–25]:

$$\begin{aligned} \dot{u}' &= \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \\ \dot{v}' &= \frac{6\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \end{aligned} \quad (6.4)$$

значения \dot{u}'_0 , \dot{v}'_0 и t можно найти в Приложении 2.

Цветовое пространство $Lu'\dot{v}'$ было создано специально для расчета коррелированной цветовой температуры. Оно отличается тем, что в нем изотермические линии, характеризующие излучения излучателей Планка, расположены равномерно.

Координаты цветностей (\dot{u}', \dot{v}') абсолютно чёрного тела – излучателя Планка для различных значений цветových температур в мирадах приведены в приложениях (Приложение 2).

Рассчитанное по формуле (6.2) значение цветовой температуры будет иметь размерность в миредах – единицах измерения, обратных градусам Кельвина. Чтобы получить значение коррелированной цветовой температуры в градусах Кельвина, необходимо пересчитать получившееся значение по следующей формуле

$$T'_c [^\circ\text{K}] = \frac{10^6}{T'_c [\mu]}.$$

7 ПЕРЕСЧЕТ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ

7.1 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 2003 г. CIE $L^*a^*b^*$

Данное цветовое пространство характеризуется наличием фиксированной точки белого (источника типа $D50$). Эта точка является основой построения оси L^* (рис. 7.1) и расположена в центре цветового графика для любого значения L^* . Следовательно, остальные источники белого света имеют некоторую цветность. Таким образом, цветовые параметры исследуемого источника рассчитываются при помощи цветовых параметров источника типа $D50$.

Расчет координат цвета в данном цветовом пространстве начинается с расчета значений параметров $f(x)$, $f(y)$ и $f(z)$ по следующим законам [24] (эти параметры позволяют учитывать особенности восприятия цвета визуальным аппаратом человека при различных уровнях освещенности):

$$\begin{aligned} f(x) &= \begin{cases} \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \\ f(y) &= \begin{cases} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \\ f(z) &= \begin{cases} \left(\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{z}}{\bar{z}_{D50}}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \end{aligned} \quad (7.1)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения; \bar{x}_{D50} , \bar{y}_{D50} и \bar{z}_{D50} – координаты цвета источника типа $D50$ в цветовом пространстве МКО 1931 г.

Формулы (7.1) были предложены к рассмотрению МКО в 2002 г. и введены в качестве стандарта расчета в 2003 г.

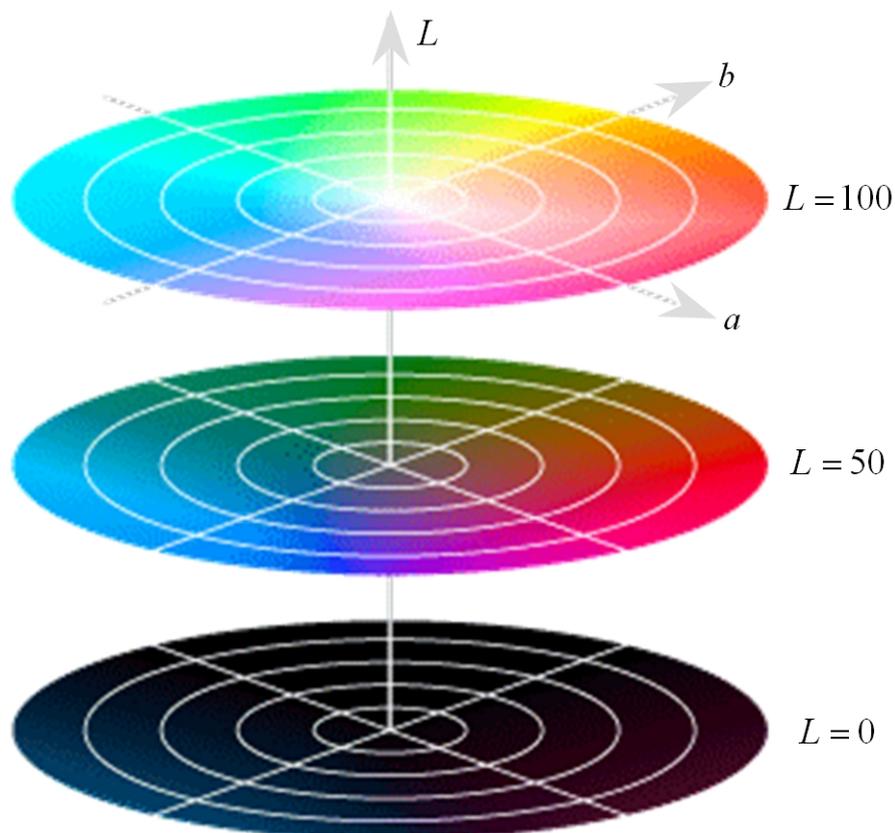


Рисунок 7.1 – Цветовое пространство $L^*a^*b^*$

Далее рассчитываются значения цветовых координат L^* , a^* и b^* по следующим соотношениям [26]:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \cdot f(y) - 16 \\
 a^* &= 500 \cdot [f(x) - f(y)] \\
 b^* &= 200 \cdot [f(y) - f(z)]
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

7.2 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $L^*u^*v^*$

Данное цветовое пространство характеризуется наличием определенной точки белого. Для этого может быть использован любой (стандартный или выбранный для эксперимента) источник излучения. Таким образом, цветовые координаты анализируемого источника рассчитываются при помощи цветовых параметров выбранного в качестве начала отсчета стандартного источника излучения и представляют собой относительные цветовые координаты.

Сначала, аналогично (7.1), рассчитывается значение параметра $f(\bar{y}/\bar{y}_w)$ [24] (характеризующего яркость исследуемого источника излучения относительно выбранного эталона):

$$f(\bar{y}/\bar{y}_W) = \begin{cases} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_W}\right)^{1/3} & \text{если } \frac{\bar{y}}{\bar{y}_W} > 0,00885645 \\ \left[903,3 \cdot \left(\frac{\bar{y}}{\bar{y}_W}\right) + 16\right] / 116 & \text{иначе} \end{cases}, \quad (7.3)$$

где \bar{y} – координата цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1931 г., которая может быть рассчитана по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения; \bar{y}_W – координата цвета выбранной точки белого в цветовом пространстве МКО 1931 г.

Следующим шагом являясь расчет значений цветовых координат L^* , u^* и v^* по формулам [24]:

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot f(\bar{y}/\bar{y}_W) - 16 \\ u^* &= 13 \cdot L^* \cdot [u' - u'_W] \\ v^* &= 13 \cdot L^* \cdot [v' - v'_W] \end{aligned}, \quad (7.4)$$

где u' и v' – значения координат цвета анализируемого источника в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $Lu'v'$; u'_W и v'_W – значения координат цвета выбранной точки белого в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE $Lu'v'$.

7.3 Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. CIE LCH

Цветовое тело пространства МКО 1976 г. CIE LCH , подобно цветовому телу пространства CIE $L^*a^*b^*$ (рис. 7.1), представляет собой цилиндр. Следует иметь в виду, что цветовая координата H в данном цветовом пространстве выражается в угловой мере, в отличие от цветовых координат L и C . То есть, цветовое пространство LCH является пространством с цилиндрической системой координат, в отличие от упомянутого ранее цветового пространства $L^*a^*b^*$ или, например, XYZ . Кроме того, необходимо иметь в виду, что в отличие от пространства $L^*a^*b^*$, координаты в пространстве LCH не могут быть отрицательными!

Координаты цвета LCH могут быть рассчитаны при помощи двух разных цветовых пространств: CIE $L^*a^*b^*$ и CIE $L^*u^*v^*$.

Расчет при помощи цветовых координат CIE $L^*a^*b^*$

Значения цветовых координат в пространстве LCH рассчитываются по заранее рассчитанным значениям цветовых координат L^* , a^* и b^* путем проведения следующих вычислений [27]:

$$\begin{aligned}
L &= L^* \\
C_{ab} &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\
H_{ab} &= \begin{cases} \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) & \text{при } a^* > 0 \text{ и } b^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) + 360^\circ & \text{при } a^* > 0 \text{ и } b^* < 0 \\ \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (7.5)
\end{aligned}$$

где L^* , a^* и b^* могут быть рассчитаны по формулам (7.2).

Необходимо отметить, что рассчитанное значение цветовой координаты H_{ab} должно находиться в пределах $[0^\circ; 360^\circ]$.

Полученные таким образом цветные координаты должны обозначаться нижним индексом ($_{ab}$).

Расчет при помощи цветных координат CIE $L^*u^*v^*$

Значения цветных координат в пространстве LCH рассчитываются по известным значениям цветных координат $L^*u^*v^*$ путем проведения следующих вычислений [27]:

$$\begin{aligned}
L &= L^* \\
C_{uv} &= \sqrt{(u^*)^2 + (v^*)^2} \\
H_{uv} &= \begin{cases} \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) & \text{при } u^* > 0 \text{ и } v^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) + 360^\circ & \text{при } u^* > 0 \text{ и } v^* < 0 \\ \arctan\left(\frac{v^*}{u^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (7.6)
\end{aligned}$$

где L^* , u^* и v^* могут быть рассчитаны по формулам (7.4).

Необходимо отметить, что рассчитанное значение цветовой координаты H_{uv} должно находиться в пределах $[0^\circ; 360^\circ]$.

Полученные таким образом цветные координаты должны обозначаться нижним индексом ($_{uv}$).

7.4 Пересчет из цветового пространства XYZ в цветовое пространство RGB

В данном разделе будет рассмотрен пересчет из цветового пространства МКО 1931 г. CIE XYZ в любое из возможных цветовых пространств RGB². Указанный пересчет проводится в два основных этапа

1. преобразование из цветового пространства XYZ в линейное пространство R'G'B';
2. преобразование из линейного пространства R'G'B' в нелинейное пространство RGB.

Рассмотрим подробнее эти этапы.

Этап 1: Преобразование из XYZ в линейное пространство R'G'B'

Координаты цвета в линейном пространстве RGB ($\bar{r}', \bar{g}', \bar{b}'$) можно рассчитать по следующему соотношению [27]:

$$\begin{bmatrix} \bar{r}' \\ \bar{g}' \\ \bar{b}' \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}, \quad (7.7)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ, а $[M]^{-1}$ – обратная (инверсная) матрица пересчета M .

Расчёт прямой матрицы пересчета

Прямая матрица пересчета определяется по формуле:

$$[M] = \begin{bmatrix} S_r \bar{x}_r & S_g \bar{x}_g & S_b \bar{x}_b \\ S_r \bar{y}_r & S_g \bar{y}_g & S_b \bar{y}_b \\ S_r \bar{z}_r & S_g \bar{z}_g & S_b \bar{z}_b \end{bmatrix}, \quad (7.8)$$

где $(\bar{x}_r, \bar{y}_r, \bar{z}_r)$, $(\bar{x}_g, \bar{y}_g, \bar{z}_g)$ и $(\bar{x}_b, \bar{y}_b, \bar{z}_b)$ – координаты цвета (в цветовом пространстве МКО 1931 г. CIE XYZ) основных цветов в используемом типе цветового пространства RGB, которые могут быть рассчитаны по известным координатам цветностей (x_r, y_r) , (x_g, y_g) и (x_b, y_b) (см. Приложение 4); S_r , S_g и S_b – коэффициенты пересчета для красного, зеленого и синего каналов [27].

Значения координат цвета основных цветов рассчитываются следующим образом

² Различные пространства RGB рассчитывались и создавались для различных применений, например, для визуализации цветных изображений в телевизионной технике при использовании разнообразных источников, реализующих основные цвета, и т.п.

$$\begin{aligned}
\bar{x}_r &= \frac{x_r}{y_r} & \bar{x}_g &= \frac{x_g}{y_g} & \bar{x}_b &= \frac{x_b}{y_b} \\
\bar{y}_r &= 1 & \bar{y}_g &= 1 & \bar{y}_b &= 1 \\
\bar{z}_r &= \frac{(1-x_r-y_r)}{y_r} & \bar{z}_g &= \frac{(1-x_g-y_g)}{y_g} & \bar{z}_b &= \frac{(1-x_b-y_b)}{y_b}
\end{aligned} \quad (7.9)$$

Значения коэффициентов пересчета для красного, зеленого и синего каналов S_r , S_g и S_b можно определить по следующему выражению

$$\begin{bmatrix} S_r \\ S_g \\ S_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{x}_r & \bar{x}_g & \bar{x}_b \\ \bar{y}_r & \bar{y}_g & \bar{y}_b \\ \bar{z}_r & \bar{z}_g & \bar{z}_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x}_W \\ \bar{y}_W \\ \bar{z}_W \end{bmatrix}, \quad (7.10)$$

где $(\bar{x}_r, \bar{y}_r, \bar{z}_r)$, $(\bar{x}_g, \bar{y}_g, \bar{z}_g)$ и $(\bar{x}_b, \bar{y}_b, \bar{z}_b)$ – рассчитанные ранее по формулам (7.9) координаты цвета основных цветов в используемом типе цветового пространства, а $(\bar{x}_W, \bar{y}_W, \bar{z}_W)$ – координаты цвета точки белого в используемом типе цветового пространства (см. Приложение 3 и Приложение 4)

Колориметрическая коррекция

Колориметрическая коррекция применяется для преобразования исходных координат цвета $(\bar{x}_p, \bar{y}_p, \bar{z}_p)$ пространства с координатами цвета точки белого $(\bar{x}_{Wp}, \bar{y}_{Wp}, \bar{z}_{Wp})$ в требуемые координаты $(\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{z}_d)$ с координатами цвета точки белого $(\bar{x}_{Wd}, \bar{y}_{Wd}, \bar{z}_{Wd})$ [27].

То есть данная коррекция должна проводиться тогда и только тогда, когда точка белого в пространстве, из которого производится пересчет, и точка белого в пространстве, в которое производится пересчет, не совпадают.

Основная формула преобразования имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_d \\ \bar{y}_d \\ \bar{z}_d \end{bmatrix} = [M_c] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_p \\ \bar{y}_p \\ \bar{z}_p \end{bmatrix}, \quad (7.11)$$

где $[M_c]$ – коррекционная матрица, рассчитываемая по соотношению

$$[M_c] = [M_A]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mu_d/\mu_p & 0 & 0 \\ 0 & \xi_d/\xi_p & 0 \\ 0 & 0 & \psi_d/\psi_p \end{bmatrix} \cdot [M_A], \quad (7.12)$$

где $[M_A]^{-1}$ – инверсированная матрица коррекции $[M_A]$ (в Приложении 5 представлены матрицы колориметрической коррекции для различных

методов – XYZ Scaling, Bradford и Von Kries – расчет проводится по одному из указанных методов – считается, что методы Bradford и Von Kries являются наиболее точными), а (μ_p, ξ_p, ψ_p) и (μ_d, ξ_d, ψ_d) – вектора коррекции исходного цветового пространства и требуемого цветового пространства соответственно.

Вектора коррекции исходного пространства (μ_p, ξ_p, ψ_p) и требуемого пространства (μ_d, ξ_d, ψ_d) рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{bmatrix} \mu_p \\ \xi_p \\ \psi_p \end{bmatrix} = [M_A] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{Wp} \\ \bar{y}_{Wp} \\ \bar{z}_{Wp} \end{bmatrix}, \quad (7.13)$$

$$\begin{bmatrix} \mu_d \\ \xi_d \\ \psi_d \end{bmatrix} = [M_A] \cdot \begin{bmatrix} \bar{x}_{Wd} \\ \bar{y}_{Wd} \\ \bar{z}_{Wd} \end{bmatrix}. \quad (7.14)$$

Этап 2: Преобразование из линейного пространства R'G'B' в нелинейное RGB

Данное преобразование зависит от вида цветового пространства RGB, в которое необходимо пересчитать цветовые координаты XYZ. Преобразования можно совершать при помощи [27]

- гамма преобразования,
- sRGB преобразования и
- яркостного преобразования.

Рассмотрим данные преобразования подробнее.

Гамма преобразование

Гамма преобразование производится для тех цветовых пространств RGB, для которых задано значение параметра γ (см. Приложение 4). При этом цветовые координаты RGB рассчитываются по соотношениям

$$\begin{aligned} \bar{r} &= (\bar{r}')^{1/\gamma} \\ \bar{g} &= (\bar{g}')^{1/\gamma}, \\ \bar{b} &= (\bar{b}')^{1/\gamma} \end{aligned} \quad (7.15)$$

где γ – множитель, определённый для большинства типов цветовых пространств RGB. Необходимо помнить, что полученные цветовые координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения цветовых координат $[0, 255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

sRGB преобразование

Данное преобразование производится только для цветового пространства **sRGB**. При этом цветовые координаты в данном цветовом пространстве рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{aligned}\bar{r} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{r}' & \text{при } \bar{r}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{r}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{r}' > 0,0031308 \end{cases} \\ \bar{g} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{g}' & \text{при } \bar{g}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{g}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{g}' > 0,0031308 \end{cases} \\ \bar{b} &= \begin{cases} 12,92 \cdot \bar{b}' & \text{при } \bar{b}' \leq 0,0031308 \\ 1,055 \cdot (\bar{b}')^{1/2,4} - 0,055 & \text{при } \bar{b}' > 0,0031308 \end{cases}\end{aligned}\quad (7.16)$$

Необходимо помнить, что полученные цветовые координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения цветовых координат $[0,255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

Яркостное преобразование

Данное преобразование производится только для цветового пространства **ECI RGB v2**. При этом цветовые координаты в данном цветовом пространстве рассчитываются по следующим выражениям

$$\begin{aligned}\bar{r} &= \begin{cases} \frac{\bar{r}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{r}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{r}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{r}' > \varepsilon \end{cases} \\ \bar{g} &= \begin{cases} \frac{\bar{g}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{g}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{g}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{g}' > \varepsilon \end{cases}, \\ \bar{b} &= \begin{cases} \frac{\bar{b}' \cdot \kappa}{100} & \text{при } \bar{b}' \leq \varepsilon \\ 1,16 \cdot (\bar{b}')^{1/3} - 0,16 & \text{при } \bar{b}' > \varepsilon \end{cases}\end{aligned}\quad (7.17)$$

где ε и κ – параметры, имеющие следующие значения

$$\varepsilon = \frac{216}{24389} = (0,008856),$$

$$\kappa = \frac{24389}{27} = 903,3.$$

Необходимо помнить, что полученные цветовые координаты $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ будут нормированы к единице. Чтобы получить привычные значения

цветовых координат $[0,255]$, полученные значения $(\bar{r}, \bar{g}, \bar{b})$ следует умножить на 255.

Алгоритм проведения пересчета XYZ – RGB

Последовательность проведения пересчета из цветового пространства XYZ в цветовое пространство RGB представлена на рис. 7.2.

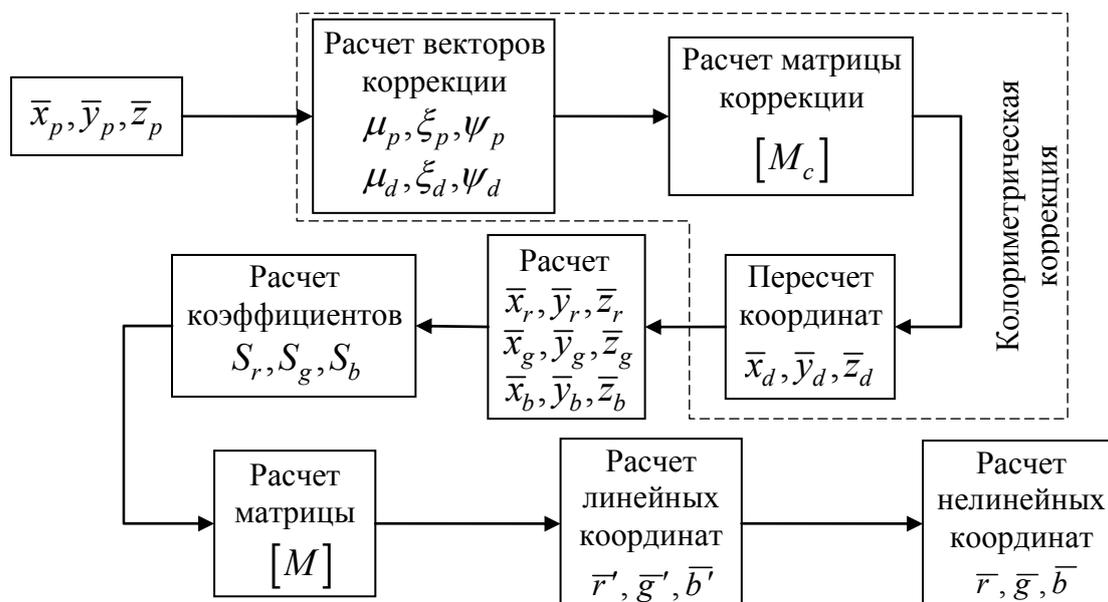


Рисунок 7.2 – Алгоритм пересчета XYZ – RGB

Таким образом, в самую первую очередь производится колориметрическая коррекция (при необходимости). При этом сначала рассчитываются вектора коррекции по формулам (7.13) и (7.14). Затем выбирается метод коррекции XYZ scaling, Bradford или Von Kries и проводится расчет матрицы коррекции $[M_c]$ по соотношению (7.12) и рассчитываются скорректированные значения цветовых координат $(\bar{x}_d, \bar{y}_d, \bar{z}_d)$ по выражению (7.11).

Затем поэтапно проводится расчет координат цвета основных цветов в рассматриваемом типе цветового пространства RGB по соотношениям (7.9), расчет коэффициентов пересчета S_r , S_g и S_b по выражению (7.10), расчет матрицы пересчета $[M]$ по формуле (7.8) и расчет координат в линейной системе RGB по соотношению (7.7).

Финальным является нелинейное преобразование по одному из представленных ранее выражений (7.15), (7.16) или (7.17) в зависимости от типа цветового пространства RGB, в которую необходимо произвести расчет.

8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАЛЫХ ЦВЕТОВЫХ РАЗЛИЧИЙ

Методов расчета малых цветовых различий – более 100 различных вариантов (созданных для различных производств, красителей, контрольных источников излучения, условий и анализируемых областей цветности).

Рассмотрим пять возможных вариантов, которые МКО рекомендовала в различные года для экспериментальной проверки и практического применения.

Малые цветовые различия могут рассчитываться по следующим методикам:

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000г.

– Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям

Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1950 г.

Посредством криволинейного преобразования цветового пространства МКО 1931 г. CIE XYZ было разработано цветовое пространство $L^*a^*b^*$, для которого в 1950г. было рекомендовано определять малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами по формуле [8, 28, 29]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}, \quad (8.1)$$

где (L_1^*, a_1^*, b_1^*) и (L_2^*, a_2^*, b_2^*) – цветовые координаты первого и второго из сравниваемых цветов соответственно в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$, которые могут быть рассчитаны по формулам (7.1) и (7.2).

Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1976 г.

Посредством проективного преобразования цветового пространства МКО 1931 г. CIE XYZ было разработано цветовое пространство $L^*u^*v^*$, для которого в 1976г. было рекомендовано определять малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами по формуле [2, 24, 27]:

$$\Delta E = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (u_2^* - u_1^*)^2 + (v_2^* - v_1^*)^2}, \quad (8.2)$$

где (L_1^*, u_1^*, v_1^*) и (L_2^*, u_2^*, v_2^*) – цветовые координаты первого и второго из сравниваемых цветов соответственно в цветовом пространстве CIE $L^*u^*v^*$, которые могут быть рассчитаны по выражениям (7.3) и (7.4).

Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 1994 г.

По данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [27]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2}, \quad (8.3)$$

где

$$\Delta L = L_1^* - L_2^*$$

$$\Delta C = C_1 - C_2 \quad , \text{при этом}$$

$$\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2}$$

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

$$\Delta a = a_1^* + a_2^*,$$

$$\Delta b = b_1^* + b_2^*,$$

кроме того

$$\begin{cases} S_L = 1 \\ S_C = 1 + K_1 \cdot C_1, \\ S_H = 1 + K_2 \cdot C_1 \end{cases}$$

где

$$K_L = \begin{cases} 2 & \text{при анализе тканей} \\ 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$K_C = 1,$$

$$K_H = 1$$

а

$$K_1 = \begin{cases} 0,048 & \text{при анализе тканей} \\ 0,045 & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

$$K_2 = \begin{cases} 0,014 & \text{при анализе тканей} \\ 0,015 & \text{в остальных случаях} \end{cases}.$$

Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям МКО за 2000 г.

Подобно предыдущей, в данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [27]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \cdot \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \cdot \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)}, \quad (8.4)$$

где

$$K_L = 1,$$

$$S_L = 1 + \frac{0,015(\bar{L}' - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L}' - 50)^2}},$$

при этом

$$\bar{L}' = \frac{L_1^* + L_2^*}{2}$$

и

$$\Delta L' = L_2^* - L_1^*.$$

Кроме того

$$K_C = 1,$$

$$S_C = 1 + 0,045\bar{C}',$$

где

$$\bar{C}' = \frac{C_1' + C_2'}{2},$$

при этом

$$C_1' = \sqrt{(a_1')^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2' = \sqrt{(a_2')^2 + (b_2^*)^2},$$

где

$$a_1' = a_1^* \cdot (1 + G),$$

$$a_2' = a_2^* \cdot (1 + G).$$

При этом

$$G = \frac{\left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}}\right)}{2},$$

где

$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2},$$

при

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2}, \quad C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

а

$$\Delta C' = C_2' - C_1'.$$

Также

$$K_H = 1, \quad S_H = 1 + 0,015\bar{C}'T,$$

где

$$T = 1 - 0,17 \cos(\bar{H}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{H}') + 0,32 \cos(3\bar{H}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{H}' - 63^\circ),$$

при

$$\bar{H}' = \begin{cases} \frac{h_1' + h_2' + 360^\circ}{2}, & |h_1' - h_2'| > 180^\circ \\ \frac{h_1' + h_2'}{2}, & |h_1' - h_2'| \leq 180^\circ \end{cases}.$$

здесь h_1' и h_2' измеряются в угловой мере и рассчитываются по формулам:

$$h_1' = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) & \text{при } a_1' > 0 \text{ и } b_1^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) + 360^\circ & \text{при } a_1' > 0 \text{ и } b_1^* < 0, \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1'}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

$$h_2' = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) & \text{при } a_2' > 0 \text{ и } b_2^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) + 360^\circ & \text{при } a_2' > 0 \text{ и } b_2^* < 0. \\ \arctan\left(\frac{b_2^*}{a_2'}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

Кроме того

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right),$$

где

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & |h'_2 - h'_1| > 180^\circ; h'_2 > h'_1 \end{cases}$$

При этом

$$R_T = -R_C \sin(2\Delta\theta),$$

где

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25} \right)^2 \right\}$$

а

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}.$$

Методика расчета малых цветовых различий по рекомендациям комитета по цветовым измерениям

Подобно двум предыдущим, в данной методике рассчитываются малые цветовые различия между двумя сравниваемыми цветами на базе анализа координат цвета в цветовом пространстве CIE $L^*a^*b^*$.

При этом цветовая разность определяется выражением [27]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{lS_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{cS_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{S_H} \right)^2}, \quad (8.5)$$

где (l, c) – координаты цветности в цветовом пространстве Lch , рассчитывающиеся по значениям координат в цветовом пространстве МКО 1976 г. $LC_{ab}H_{ab}$ или $LC_{uv}H_{uv}$ по соотношениям (7.5) или (7.6), при этом

$$l = L / 100,$$

а

$$c = C.$$

Однако в данном случае эти величины не рассчитываются, а используется один из двух вариантов сочетания $(l; c)$: при анализе воспроизведения цветовых оттенков (2;1) и при анализе восприятия цветовых оттенков (1;1).

Рассчитываются только такие параметры, как

$$\Delta L = L_1^* - L_2^*,$$

$$S_L = \begin{cases} 0,511 & L_1^* < 16 \\ \frac{0,040975L_1^*}{1 + 0,01765L_1^*} & L_1^* \geq 16 \end{cases},$$

и

$$\Delta C = C_1 - C_2,$$

где

$$C_1 = \sqrt{(a_1^*)^2 + (b_1^*)^2},$$

$$C_2 = \sqrt{(a_2^*)^2 + (b_2^*)^2},$$

а также

$$S_C = \frac{0,0638C_1}{1+0,0131C_1} + 0,638.$$

Кроме того

$$\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2},$$

где

$$\Delta a = a_1^* - a_2^*,$$

$$\Delta b = b_1^* - b_2^*$$

и

$$S_H = S_C (FT + 1 - F),$$

где

$$T = \begin{cases} 0,56 + |0,2 \cos(H_1 + 168)|, & \text{если } 164 \leq H_1 \leq 345 \\ 0,36 + |0,4 \cos(H_1 + 35)| \end{cases},$$

$$F = \sqrt{\frac{C_1^4}{C_1^4 + 1900}}$$

и

$$H_1 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) & \text{при } a_1^* > 0 \text{ и } b_1^* > 0 \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) + 360^\circ & \text{при } a_1^* > 0 \text{ и } b_1^* < 0. \\ \arctan\left(\frac{b_1^*}{a_1^*}\right) + 180^\circ & \text{в остальных случаях} \end{cases}$$

9 ИНДЕКСЫ ЦВЕТОПЕРЕДАЧИ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Оценка способности тестируемого источника излучения к передаче цветов производится его сравнением с эталонным источником света.

При экспериментальном определении индекса цветопередачи тестируемого источника помимо исследуемого и эталонного излучателей используют эталонные отражающие поверхности.

Однако с целью обеспечения международной стандартизации при определении коэффициентов цветопередачи реальных излучателей применяется специальный набор из 14 цветных поверхностей. Этот набор был выбран из набора цветов, первоначально предложенного Манселлом.

Ограничения для проведения расчёта. По рекомендации МКО для проведения расчетов эталонный источник выбирается из соображений:

– если координаты цветности исследуемого источника лежат на кривой Планка, то в качестве эталонного источника должен быть выбран абсолютно черное тело, имеющее ту же цветовую температуру, что и тестируемый излучатель.

– в качестве эталонного, можно использовать один из стандартных источников МКО (например, D_{65}).

Идеальный случай – тестируемый и эталонный источники света имеют одинаковые координаты цветности и равные световые потоки.

Экспериментально было доказано, что качество источников белого света резко снижается при удалении их координат цветностей на цветовой диаграмме, x и y , от кривой Планка более чем на 0,01. Эта величина соответствует размерам приблизительно четырех эллипсов МакАдама – стандарту, принятому для осветительных приборов. Однако следует отметить, что **критерий «отклонения на 0,01»** является необходимым, но недостаточным для получения высококачественных источников освещения.

Условились считать, что эталонный источник света обладает идеальными параметрами цветопередачи, т.е. его индекс цветопередачи $CRI = 100$. При этом исходили из того, что естественный дневной свет близок по параметрам к излучению абсолютно черного тела и поэтому по праву может быть отнесен к стандартным эталонным источникам света.

Эталонные отражающие поверхности, о которых упоминалось выше, определяются через их спектральную отражательную способность (отношение спектрального распределения отражения поверхности к спектральному распределению отражения эталона белой поверхности). На рис. 9.1 показаны спектры отражения восьми международных эталонов цвета, перечисленных в Приложении 6. Суммарный индекс цветопередачи вычисляется на основе измерений при использовании всех восьми эталонных поверхностей ($i = 1 - 8$).

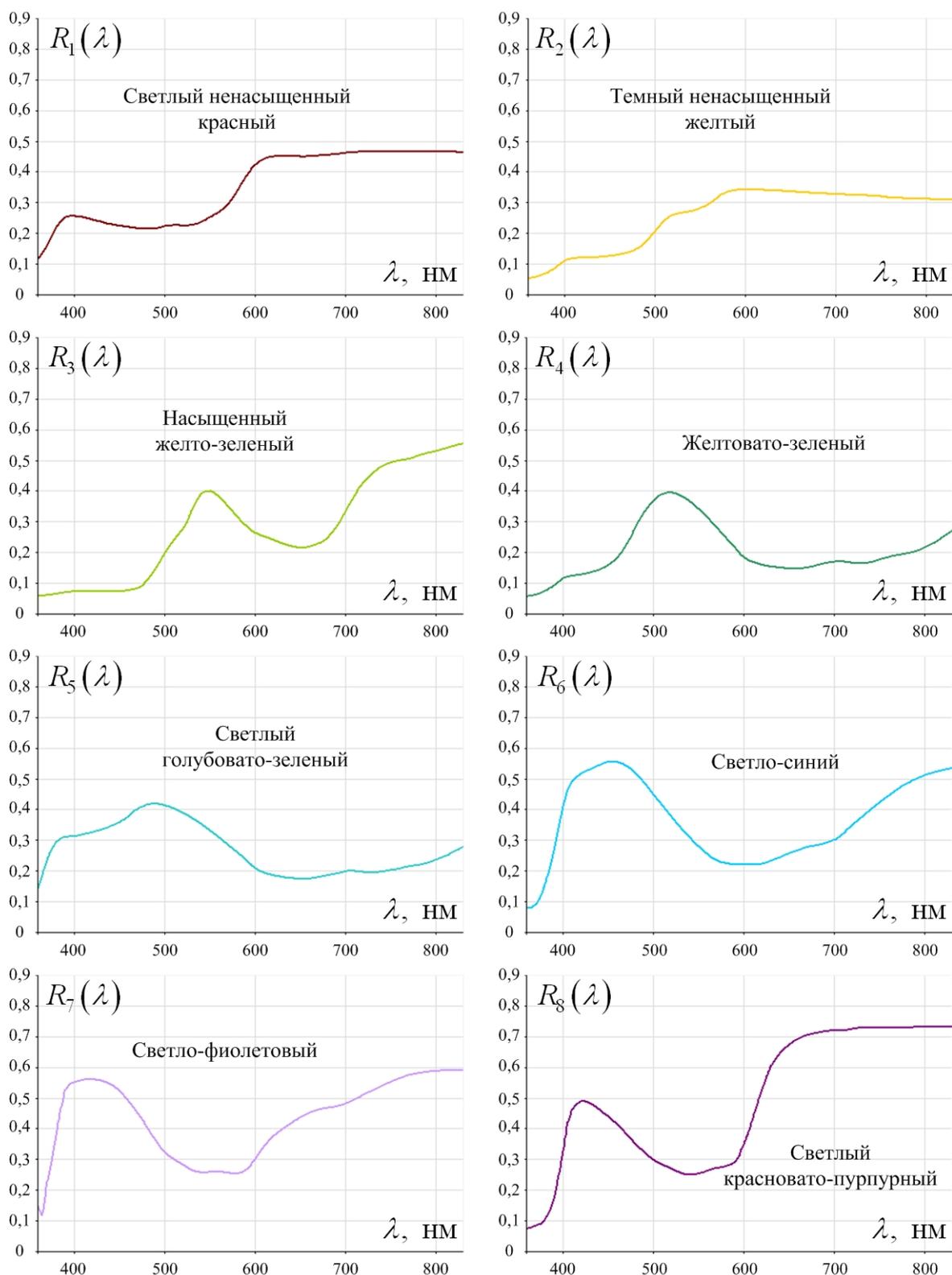


Рисунок 9.1 – Отражательная способность восьми эталонных цветowych поверхностей МКО

Иногда для более детального изучения способности излучателей воспроизводить цвета применяют шесть дополнительных эталонных отражающих поверхностей (Приложение 7). Эти дополнительные

поверхности характеризуются цветами: 9 – интенсивный красный, 10 – интенсивный желтый, 11 – интенсивный зеленый, 12 – фиолетово-синий, 13 – телесный цвет, 14 – цвет листьев на деревьях [11, 30].

Спектры отражения шести дополнительных поверхностей с номерами 9-14 обладают более интенсивными цветами и сравнительно узкими пиками. Коэффициенты $CRI_9 - CRI_{14}$ называются частными индексами цветопередачи.

В качестве эталонного источника использовано абсолютно черное тело, ближе всего расположенное к точке с координатами цветности тестируемого источника. Следовательно, цветовая температура эталонного источника света равна коррелированной цветовой температуре испытуемого излучателя. В вычислениях индекса цветопередачи используются все четыре точки.

Однако следует отметить, что термин «цвет», используемый МКО, не совсем соответствует понятию «цветность». Более полное определение цвета МКО включает в себя такие характеристики, как тональность, насыщенность и яркость. Тональность и насыщенность определяются расположением точек на цветовой диаграмме, а для графического представления яркости объекта или излучателя необходимо вводить третью ось, что и показано на рис. 9.2 в качестве иллюстрации. Цветовая разность физического объекта при его поочередном освещении эталонным и тестируемым источниками света, определяется разностями цветности и яркости, соответствующими геометрическим расстояниям между двумя точками на рис. 9.2. Такое представление цветности не является стандартом МКО и приведено здесь лишь с познавательной целью.

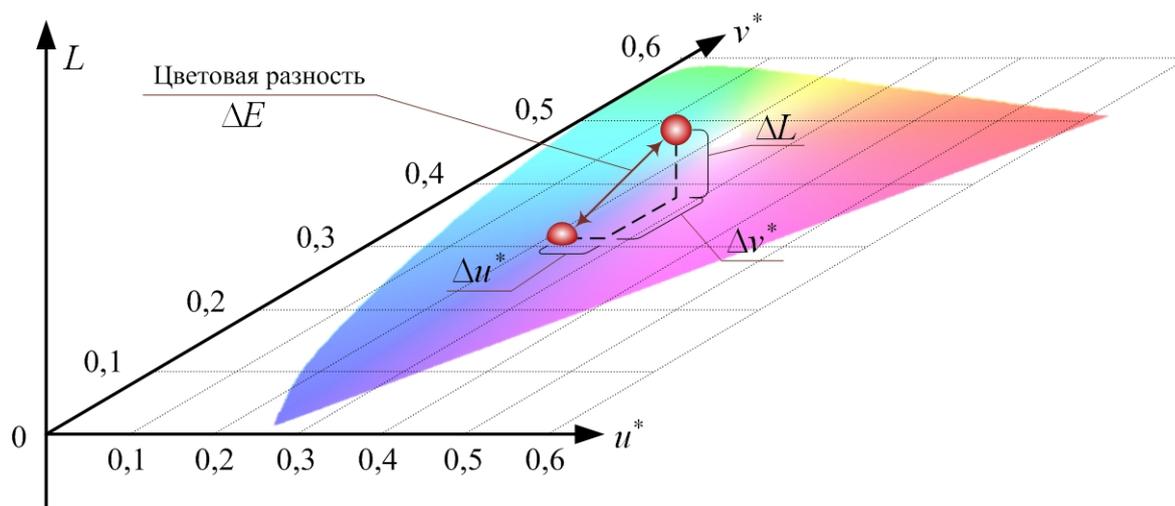


Рисунок 9.2 – Цветовая разность в трёхмерном цветовом пространстве Lu^*v^* .

Введение МКО понятия универсального цветового пространства было продиктовано необходимостью количественной оценки цвета с

учетом характеристик цветности и яркости. Универсальное цветовое пространство должно обеспечивать прямую пропорциональность между цветовой разностью двух точек и геометрическим расстоянием между ними. Это значит, что цветовая разность в таком универсальном цветовом пространстве однозначно определяется расстоянием между двумя точками в нем. Универсальное цветовое пространство особенно подходит для количественной оценки цветовой разности.

9.1 Индекс цветопередачи для источников излучения, расположенных на кривой Планка

Данный расчет справедлив для излучателей, расположенных либо непосредственно на кривой Планка, либо на очень небольшом расстоянии от нее (цветовая разность $\Delta E < 0,01$).

Расчёт цветовых координат $L^*u^*v^*$

Значения координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя, находятся из следующих соотношений [11]:

$$\begin{aligned} L_i^{*ref} &= 116 \left(\frac{\bar{y}_i^{ref}}{\bar{y}^{ref}} \right)^{1/3} - 16 \\ u_i^{*ref} &= 13 \cdot L_i^{*ref} \cdot (u_i'^{ref} - u'^{ref}), \\ v_i^{*ref} &= 13 \cdot L_i^{*ref} (v_i'^{ref} - v'^{ref}) \end{aligned} \quad (9.1)$$

где значения координат \bar{y}_i^{ref} , $u_i'^{ref}$ и $v_i'^{ref}$ описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении эталонным источником, а значения координат \bar{y}^{ref} , u'^{ref} и v'^{ref} – цвет излучения самого эталонного источника белого света.

Значения координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника, находятся из формул:

$$\begin{aligned} L_i^{*test} &= 116 \left(\frac{\bar{y}_i^{test}}{\bar{y}^{test}} \right)^{1/3} - 16 \\ u_i^{*test} &= 13 \cdot L_i^{*test} \cdot (u_i'^{test} - u'^{test}), \\ v_i^{*test} &= 13 \cdot L_i^{*test} (v_i'^{test} - v'^{test}) \end{aligned} \quad (9.2)$$

где \bar{y}_i^{test} , $u_i'^{test}$ и $v_i'^{test}$ описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении исследуемым источником, а \bar{y}^{test} , u'^{test} и v'^{test} – цвет излучения исследуемого источника белого света. Необходимо заметить, что при

расчете индекса цветопередачи эталонный источник (излучатель Планка) подбирается так, чтобы $\bar{y}^{test} = \bar{y}^{ref}$, $u^{test} = u^{ref}$ и $v^{test} = v^{ref}$. При этом

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \text{ где } u' \text{ и } v' \text{ вычисляются по}$$

параметрам спектра эталонного источника (верхний индекс *ref*) по параметрам спектра тестируемого источника (верхний индекс *test*), по спектру излучения эталонного источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс *ref* и нижний индекс *i*) и по спектру излучения тестируемого источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс *test* и нижний индекс *i*).

Расчёт цветовых разностей

Величина ΔE_i^* , являющаяся цветовой разностью эталонной поверхности при ее освещении эталонным и тестируемым источниками находится по формуле

$$\Delta E_i^* = \sqrt{(\Delta L_i^*)^2 + (\Delta u_i^*)^2 + (\Delta v_i^*)^2}, \quad (9.3)$$

где ΔL_i^* , Δu_i^* и Δv_i^* – разности между значениями координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя и значениями координат цветового пространства $L^*u^*v^*$, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника, рассчитываемые по следующим формулам:

$$\Delta L_i^* = L_i^{*ref} - L_i^{*test},$$

$$\Delta u_i^* = u_i^{*ref} - u_i^{*test},$$

$$\Delta v_i^* = v_i^{*ref} - v_i^{*test}.$$

Отметим, что данный расчет не дает однозначных результатов, поскольку числовые коэффициенты в формулах определялись на основе экспериментов, и их нельзя считать оптимальными.

Расчёт индекса цветопередачи

Частные индексы цветопередачи (индексы цветопередачи для одной из эталонных поверхностей) определяются по формуле [11]:

$$CRI_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i^*, \quad (9.4)$$

соответственно, полный индекс цветопередачи рассчитывается по соотношению

$$CRI_g = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N CRI_i. \quad (9.5)$$

9.2 Расчёт индекса цветопередачи для источников излучения, расположенных вне кривой планка

Если координаты цветности тестового источника не принадлежат кривой Планка (цветовая разность $\Delta E \geq 0,01$), то эталонный источник должен быть абсолютно черным телом, имеющим ту же коррелированную цветовую температуру, что и тестируемый излучатель.

Следующие расчеты справедливы для исследуемых источников излучения, расположенных вне кривой Планка. В указанных расчетах учитывается адаптивный сдвиг цвета, возникающий из-за способности человека к цветовой адаптации.

Определение цветовых координат

Расчет начинается с определения координат цветности эталонного и тестируемого источников излучения на равноконтрастной цветовой диаграмме $Lu'v'$, а также координат цветности эталонных отражающих поверхностей при их освещении эталонным и тестируемым источниками, т.е. (u^{ref}, v^{ref}) , (u^{test}, v^{test}) , (u_i^{ref}, v_i^{ref}) и (u_i^{test}, v_i^{test}) .

При этом

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad u' \text{ и } v' \text{ вычисляются по}$$

параметрам спектра эталонного источника (верхний индекс ref), по спектру излучения эталонного источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс ref и нижний индекс i), по спектру излучения тестируемого источника (верхний индекс $test$), и по спектру излучения тестируемого источника, отраженного от эталонной поверхности (верхний индекс $test$ и нижний индекс i).

Необходимо заметить, что эталонный источник излучения в виде излучателя Планка подбирается таким образом, что коррелированная цветовая температура тестируемого источника равна цветовой температуре эталонного источника ($T_c^{ref} = T_c^{test}$).

Расчёт адаптивного цветового сдвига

Для нахождения адаптивного цветового сдвига координат (u', v') в парах значений (u^{ref}, v^{ref}) , (u^{test}, v^{test}) и (u_i^{ref}, v_i^{ref}) , (u_i^{test}, v_i^{test}) преобразуются в координаты (r, f) при помощи следующих выражений [11]:

$$r = \frac{4 - u' - 10v'}{v'} \quad (9.6)$$
$$f = \frac{(1,708 \cdot v' + 0,404 - 1,481 \cdot u')}{v'}$$

Отметим, что за этими двумя уравнениями скрываются шесть выражений, преобразующих (u^{ref}, v^{ref}) , (u^{test}, v^{test}) и (u_i^{ref}, v_i^{ref}) в

(r^{ref}, f^{ref}) , (r^{test}, f^{test}) и (r_i^{test}, f_i^{test}) соответственно, по которым и находят координаты цветности эталонных поверхностей после адаптивного цветового сдвига ($u_i^{**test}, v_i^{**test}$):

$$u_i^{**test} = \frac{10,872 + 0,404 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - 4 \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}} \quad (9.7)$$

$$v_i^{**test} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \left(\frac{r^{ref}}{r^{test}} \right) \cdot r_i^{test} - \left(\frac{f^{ref}}{f^{test}} \right) \cdot f_i^{test}}$$

Соответственно, координаты цветности тестируемого излучателя после адаптивного цветового сдвига (u^{**test}, v^{**test}) находятся по формулам

$$u^{**test} = \frac{10,872 + 0,404 \cdot r^{ref} - 4 f^{ref}}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = u^{ref} \quad (9.8)$$

$$v^{**test} = \frac{5,520}{16,518 + 1,481 \cdot r^{ref} - f^{ref}} = v^{ref}$$

Значения u^{**test} и v^{**test} – координаты цветности источника света, учитывающие адаптивный цветовой сдвиг (отметим еще раз, что $u^{**test} = u^{ref}$, $v^{**test} = v^{ref}$).

Расчёт индекса цветопередачи

Теперь с помощью координат в универсальном цветовом пространстве можно найти искомую величину цветовой разности:

$$\Delta E_i^* = \sqrt{(\Delta L_i^{**})^2 + (\Delta u_i^{**})^2 + (\Delta v_i^{**})^2}, \quad (9.9)$$

где ΔL_i^{**} , Δu_i^{**} и Δv_i^{**} – разности между значениями координат, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и эталонного излучателя, и значениями координат, определяющими цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого излучателя, рассчитываемые по следующим формулам:

$$\Delta L_i^{**} = L_i^{**ref} - L_i^{**test},$$

$$\Delta u_i^{**} = u_i^{***ref} - u_i^{***test},$$

$$\Delta v_i^{**} = v_i^{***ref} - v_i^{***test}.$$

При этом координаты $(L_i^{**ref}, u_i^{***ref}, v_i^{***ref})$, определяющие цветовую разность объекта и эталонного излучателя, находятся из соотношений:

$$L_i^{**ref} = \left[116 \left(\frac{\bar{y}_i^{ref}}{\bar{y}^{ref}} \right)^{1/3} - 16 \right]$$

$$u_i^{***ref} = 13 \cdot L_i^{**ref} \cdot (u_i^{'ref} - u'^{ref}),$$

$$v_i^{***ref} = 13 \cdot L_i^{**ref} \cdot (v_i^{'ref} - v'^{ref})$$
(9.10)

где \bar{y}_i^{ref} , $u_i^{'ref}$ и $v_i^{'ref}$ описывают цвет i -той эталонной поверхности при её освещении эталонным источником, а \bar{y}^{ref} , u'^{ref} и v'^{ref} описывают цвет излучения эталонного источника белого света.

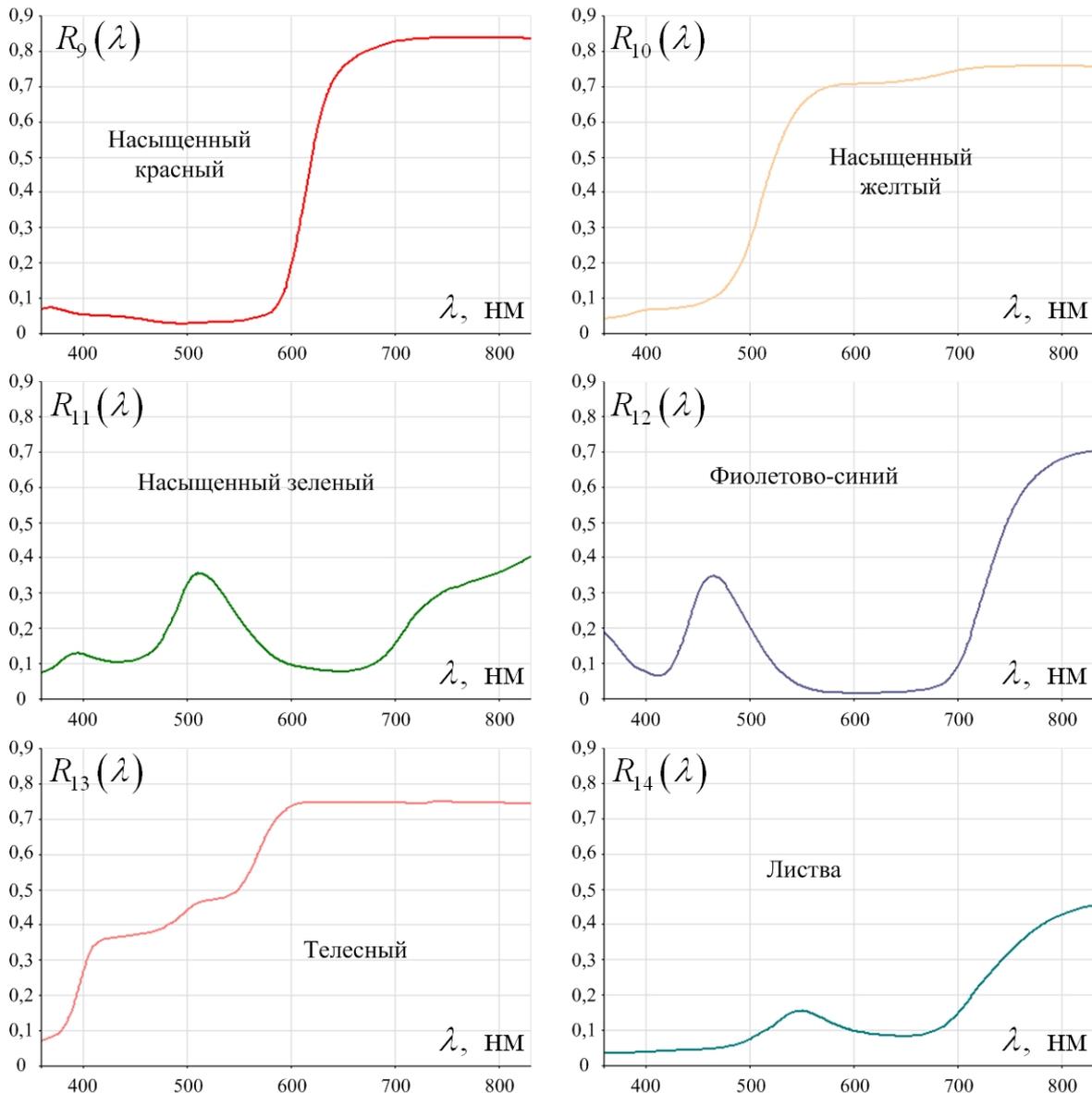


Рисунок 9.3 – Графика отражательной способности для шести дополнительных эталонных отражающих поверхностей

Координаты $(L_i^{**test}, u_i^{***test}, v_i^{***test})$, определяющие цветовую разность эталонной поверхности и тестируемого источника с учётом адаптивного цветового сдвига, находятся из формул:

$$L_i^{**test} = \left[116 \left(\frac{\bar{y}_i^{test}}{\bar{y}^{test}} \right)^{1/3} - 16 \right]$$

$$u_i^{***test} = 13 \cdot L_i^{**test} \cdot (u_i^{**test} - u^{**test}),$$

$$v_i^{***test} = 13 \cdot L_i^{**test} \cdot (v_i^{**test} - v^{**test})$$
(9.11)

где \bar{y}_i^{test} описывает цвет i -той эталонной поверхности при её освещении исследуемым источником, \bar{y}^{test} – цвет излучения исследуемого источника белого света, а u_i^{**test} , u^{**test} , v_i^{**test} и v^{**test} были рассчитаны в ходе определения адаптивного цветового сдвига.

Используя полученные значения цветовой разности ΔE_i^* для i -той эталонной поверхности, по формулам (9.12) и (9.13) находят частные и полный индексы цветопередачи. Для получения полного представления о цветопередаче источников освещения прибегают к нахождению частных индексов цветопередачи CRI_i для шести дополнительных эталонных отражающих поверхностей ($i = 9-14$) (рис. 9.3).

Частные индексы цветопередачи определяются по формуле:

$$CRI_i = 100 - 4,6 \cdot \Delta E_i^*,$$
(9.12)

соответственно, полный индекс цветопередачи тестируемого источника рассчитывается по соотношению:

$$CRI_g = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N CRI_i.$$
(9.13)

10 МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ

На практике часто применяется соединение или аддитивное смешение излучения от двух или более источников света. Например, в светодиодных экранах используют три типа светодиодов: красного, зеленого и синего свечения, излучение которых смешивается, и человек, смотрящий на экран, фактически воспринимает широкий диапазон цветов как комбинацию этих трех излучений. Другим примером смешения цветов являются источники белого света, построенные на основе двух- или трехцветных источников излучения. На рис. 10.1 показан принцип аддитивного смешения цветов и приведен пример аддитивного смешения излучения светодиодов.

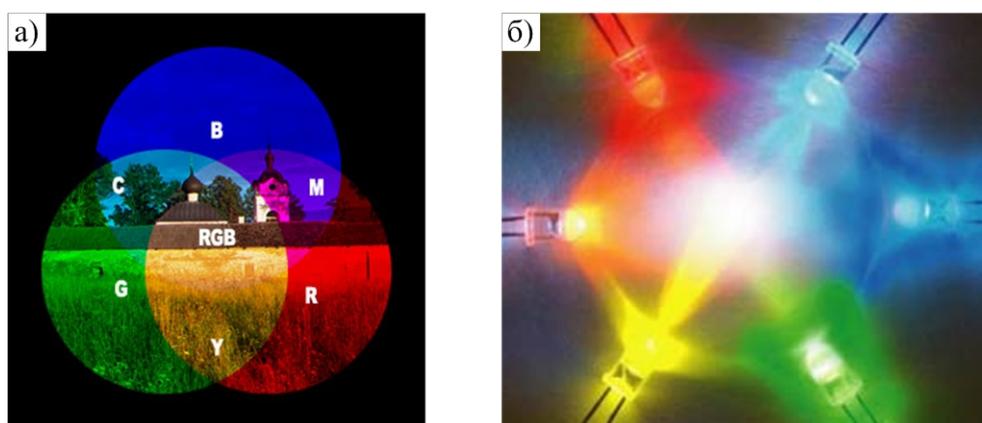


Рисунок 10.1 – Принцип аддитивного смешения трех основных цветов (а).
Аддитивное смешение излучения светодиодов (б)

Знание того, как происходит смешение цветов, помогает понять расположение различных светодиодов на цветовой диаграмме. Следует иметь в виду, что граница цветовой диаграммы в области красных цветов является практически прямой линией, поэтому светодиоды красного свечения, несмотря на тепловое уширение спектра, располагаются на этой границе. Поскольку в области зеленых цветов диаграмма обладает сильно выраженной кривизной, светодиоды зеленого свечения из-за спектрального расширения смещаются от границы к центру диаграммы.

Область воспроизводимых цветов (цветовая гамма) представляет собой полную совокупность цветов, которую можно получить из набора исходных (основных) цветов, на цветовой диаграмме она отображается в виде многоугольника, в вершинах которого расположены основные цвета. Количество используемых основных цветов определяют форму многоугольника. Например, в случае двух исходных основных цветов цветовая гамма представляет собой линию (рис. 10.2), а три исходных основных цвета формируют цветовую гамму в виде треугольника, что

показано на рис. 10.3. Все цвета, получаемые при аддитивном смешивании основных цветов гаммы, соответствующих вершинам многоугольника, всегда располагаются внутри нее. Цвета вне цветовой гаммы нельзя воспроизвести при помощи используемых основных цветов.

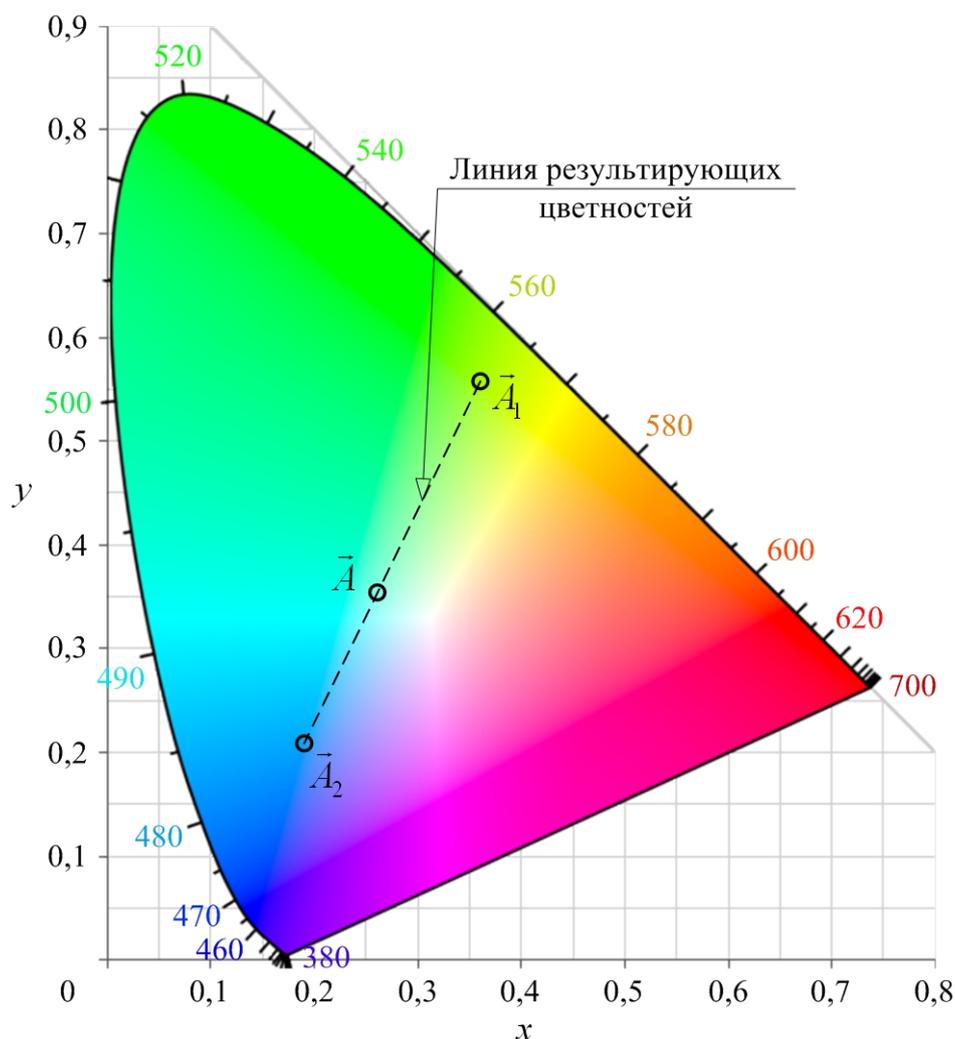


Рисунок 10.2 – Принцип смешения цветов. Рассматриваются два основных цвета \vec{A}_1 и \vec{A}_2 , а также результирующий цвет \vec{A} .

Принцип смешения двух цветов показан на рис. 10.2. Смешиваются два цвета \vec{A}_1 и \vec{A}_2 с соответствующими координатами цветности (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . На цветовой диаграмме результирующий цвет \vec{A} расположен на прямой линии, соединяющей точки, обозначающие два основных цвета – цвета используемых источников света \vec{A}_1 и \vec{A}_2 . Следовательно, любой цвет (включая белый), расположенный между двумя точками на цветовой диаграмме, может быть получен смешением этих двух цветов.

На рис. 10.3 показано смешение трех основных цветов, расположенных в красной (\vec{A}_1), зеленой (\vec{A}_2) и синей (\vec{A}_3) областях

цветовой диаграммы. Три выбранные точки на диаграмме могут, например, соответствовать излучению светодиодов красного, зеленого и синего свечения. Область внутри треугольника из штриховых линий, соединяющих эти три цвета между собой, является областью результирующих цветностей, поскольку все цвета внутри этой области могут быть получены смешением трех основных цветов: красного \vec{A}_1 , зеленого \vec{A}_2 и синего \vec{A}_3 . Способность воспроизведения как можно большего числа цветов является одной из самых важных характеристик, например, мониторов. Чем больше область цветовой гаммы, тем выше качество экрана.

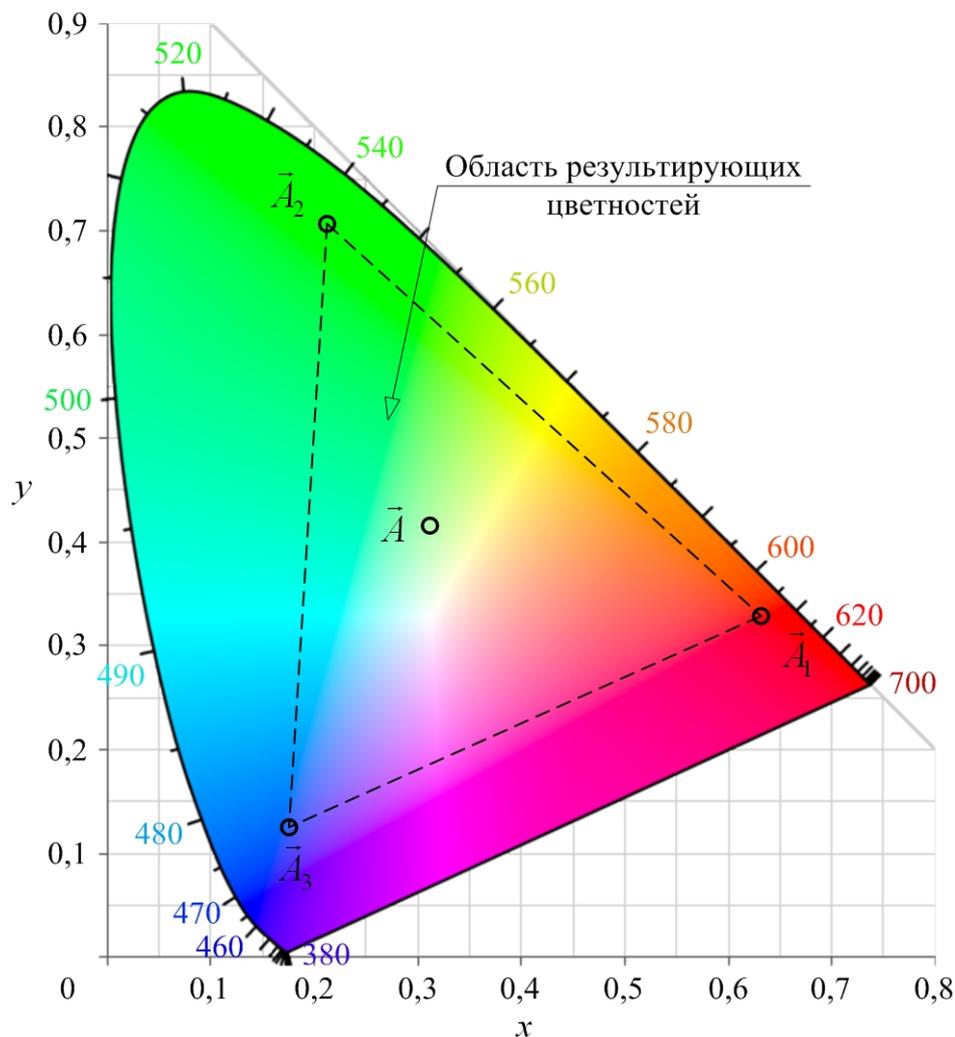


Рисунок 10.3 – Принцип смешения цветов. Рассматриваются три основных цвета \vec{A}_1 , \vec{A}_2 и \vec{A}_3 , а также результирующий цвет \vec{A} .

Рассмотрим задачу определения координат цветности излучения, образованного тремя источниками, излучающими свет в трех дискретных диапазонах длин волн.

Возьмем за основу утверждение, что ширина спектра излучения каждого из источников цветов, используемых в качестве основных цветов \vec{A}_1 , \vec{A}_2 и \vec{A}_3 цветовой гаммы, намного уже любой из трех кривых сложения цветов: $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$.

Пусть указанные три источника имеют соответственно распределения спектральной плотности величины измерения излучения $P_\lambda^1(\lambda)$, $P_\lambda^2(\lambda)$ и $P_\lambda^3(\lambda)$ с максимумами интенсивности на длинах волн $\lambda_{\max 1}$, $\lambda_{\max 2}$ и $\lambda_{\max 3}$ соответственно. Предположим, что эти три источника излучения имеют координаты цветности (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) соответственно.

Тогда результирующий цвет \vec{A} можно представить в цветовом пространстве XYZ при помощи следующих трех координат цвета:

$$\begin{aligned}\bar{x}_A &= \int_0^\infty P_\lambda^1(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^2(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^3(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \approx \\ &\approx \bar{x}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{x}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \bar{x}(\lambda_{\max 3}) \cdot P_3 \\ \bar{y}_A &= \int_0^\infty P_\lambda^1(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^2(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^3(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \approx \\ &\approx \bar{y}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{y}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \bar{y}(\lambda_{\max 3}) \cdot P_3 \\ \bar{z}_A &= \int_0^\infty P_\lambda^1(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^2(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda + \int_0^\infty P_\lambda^3(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \approx \\ &\approx \bar{z}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{z}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \bar{z}(\lambda_{\max 3}) \cdot P_3\end{aligned}\tag{10.1}$$

где P_1 , P_2 и P_3 – оптические мощности трех источников излучения, используемых в качестве основных цветов.

Следовательно, координаты цвета излучения, получаемого при аддитивном суммировании N -го количество основных цветов, образованных узкоспектральными источниками излучения, рассчитываются по следующим соотношениям

$$\begin{aligned}\bar{x} &\approx \bar{x}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{x}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \dots + \bar{x}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i + \dots + \bar{x}(\lambda_{\max N}) \cdot P_N = \\ &= \sum_{i=1}^N \bar{x}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i \\ \bar{y} &\approx \bar{y}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{y}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \dots + \bar{y}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i + \dots + \bar{y}(\lambda_{\max N}) \cdot P_N = \\ &= \sum_{i=1}^N \bar{y}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i \\ \bar{z} &\approx \bar{z}(\lambda_{\max 1}) \cdot P_1 + \bar{z}(\lambda_{\max 2}) \cdot P_2 + \dots + \bar{z}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i + \dots + \bar{z}(\lambda_{\max N}) \cdot P_N = \\ &= \sum_{i=1}^N \bar{z}(\lambda_{\max i}) \cdot P_i\end{aligned}\tag{10.2}$$

Продолжим расчет координат цветности излучения, образованного тремя источниками. Пусть каждый из трех используемых источников излучения вносит свой вклад в создание результирующего излучения пропорционально следующим весовым коэффициентам

$$\begin{aligned} K_1 &= \bar{x}(\lambda_{\max 1})P_1 + \bar{y}(\lambda_{\max 1})P_1 + \bar{z}(\lambda_{\max 1})P_1 \\ K_2 &= \bar{x}(\lambda_{\max 2})P_2 + \bar{y}(\lambda_{\max 2})P_2 + \bar{z}(\lambda_{\max 2})P_2 . \\ K_3 &= \bar{x}(\lambda_{\max 3})P_3 + \bar{y}(\lambda_{\max 3})P_3 + \bar{z}(\lambda_{\max 3})P_3 \end{aligned} \quad (10.3)$$

из уравнений (10.2) – (10.3) можно найти координаты цветности результирующего цвета:

$$\begin{aligned} x &= \frac{x_1 K_1 + x_2 K_2 + x_3 K_3}{K_1 + K_2 + K_3} \\ y &= \frac{y_1 K_1 + y_2 K_2 + y_3 K_3}{K_1 + K_2 + K_3} \end{aligned} \quad (10.4)$$

Таким образом, задача решена. Соответственно координаты цветности излучения, получаемого при аддитивном суммировании N -го количество основных цветов, образованных узкоспектральными источниками излучения, рассчитываются по следующим соотношениям

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_{i=1}^N x_i K_i}{\sum_{i=1}^N K_i} \\ y &= \frac{\sum_{i=1}^N y_i K_i}{\sum_{i=1}^N K_i} \end{aligned} \quad (10.5)$$

Из этих выражений видно, что координаты цветности многокомпонентного света являются линейными комбинациями координат цветности каждого источника с весовыми коэффициентами K_i .

Положим, что необходимо решить обратную задачу – определить оптические мощности источников излучения, используемых для создания излучения с заданными координатами цветности (x, y) . Рассмотрим решение данной задачи для цветовой гаммы, образованной тремя цветами \vec{A}_1 , \vec{A}_2 и \vec{A}_3 источников излучения. Пусть известны координаты цветности указанных трех источников излучения (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) , а также для этих источников излучения известны распределения спектральной плотности величины измерения излучения $P_\lambda^1(\lambda)$, $P_\lambda^2(\lambda)$ и $P_\lambda^3(\lambda)$ с максимумами интенсивности на длинах волн $\lambda_{\max 1}$, $\lambda_{\max 2}$ и $\lambda_{\max 3}$ соответственно.

Следовательно, задача сводится к необходимости расчета весовых коэффициентов K_i из системы уравнений (10.4). Но уравнений всего два, а весовых коэффициента – три. Тогда пусть, например, весовой коэффициент для второго источника $K_2 = 1$. Следовательно, легко убедиться, что оставшиеся коэффициенты можно рассчитать по следующим соотношениям

$$\begin{aligned}
 K_2 &= 1 \\
 K_3 &= K_2 \cdot \frac{(y_2 - y) \cdot (x - x_1) + (y_1 - y) \cdot (x_2 - x)}{(y - y_3) \cdot (x - x_1) + (y - y_1) \cdot (x_3 - x)} \\
 K_1 &= \frac{K_2 \cdot (x_2 - x) + K_3 \cdot (x_3 - x)}{(x - x_1)}
 \end{aligned} \tag{10.6}$$

Тогда, исходя из (10.3) можно рассчитать оптические мощности трех источников излучения, используемых в качестве основных цветов, P_1 , P_2 и P_3 соответственно

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{K_1}{\bar{x}(\lambda_{\max 1}) + \bar{y}(\lambda_{\max 1}) + \bar{z}(\lambda_{\max 1})} \\
 P_2 &= \frac{K_2}{\bar{x}(\lambda_{\max 2}) + \bar{y}(\lambda_{\max 2}) + \bar{z}(\lambda_{\max 2})} \\
 P_3 &= \frac{K_3}{\bar{x}(\lambda_{\max 3}) + \bar{y}(\lambda_{\max 3}) + \bar{z}(\lambda_{\max 3})}
 \end{aligned} \tag{10.7}$$

Следует отметить, что данные расчеты действительны только для узкоспектральных источников излучения, используемых в качестве основных цветов. Для источников с широкими спектрами излучения допущение (10.1) не имеет силы.

Литература

- 1 ГОСТ 13088-67 Колориметрия. Термины, буквенные обозначения.
- 2 Ж. Годен «Колориметрия при видео-обработке», М.: Техносфера, 2008г.
- 3 Николс Джон, Мартин Роберт, Валлас Брюс, Фукс Пол, От нейрона к мозгу: Пер. с англ. Изд. 2-е – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 672 с., цв. вкл. ISBN 978-5-382-00808-0.
- 4 Грегори Ричард Лэнгтон, Разумный глаз: Как мы узнаем то, что нам не дано в ощущениях. Пер с англ. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с., цв. вкл. ISBN 978-5-397-00597-4.
- 5 Godwin T. (1984) The Biochemistry of the carotenoids, Volume 2, Animals, 2nd ed. NY:Chapman&Hall, p.181.
- 6 James, T. Fulton, (2002) Processes In Biological Vision.
- 7 Baylor D.A., Lamb T.D., and Yau K.W. 1979. The membrane current of single rod outer segments. J. Physiol. 288: 589-611.
- 8 Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2000. – 397 с. ISBN 5-288-02648-3.
- 9 Susana Martinez-Conde, Stephen L. Macknik (2007) Windows on the mind. J. Scientific American. August 2007: 56-63.
- 10 E. Schrödinger, Gesichtsempfindungen 1 Hand. der Physik Müller Pacillet, 1929 г.
- 11 Шуберт Ф. Светодиоды / Пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с. – ISBN 978-5-9221-0851-5.
- 12 Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.: ил. ISBN 5-283-00545-3.
- 13 М.Д. Фершильд Модели цветового восприятия, второе издание: пер. с англ. – СПб., 2006.
- 14 Кравков С.В. Цветовое зрение – изд-во академии наук СССР, Москва, 1951 г., 175 стр.
- 15 Н.Д. Ньюберг «Измерение цвета и цветовые стандарты» – Государственное издательство СТАНДАРТИЗАЦИЯ И РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ Москва, 1933, 104 стр.
- 16 Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Чериоризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 с. ISBN 5-211-00228-8.
- 17 Агостон Ж. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 184 с., ил.
- 18 Гуревич М.М. Цвет и его измерение. Изд-во Академии наук СССР М-Л, 1950 г.
- 19 Миннарт М. «Свет и цвет в природе» М., 1969 г., 360 стр. с илл.

- 20 Кириллов Е.А. Цветоведение: Учеб. пособин для вузов. – М.: Легпромбытиздат, 1987 г. – 128 с.
- 21 Goethe's Theory of Colours; Translated from the german: with notes by Charles Lock Eastlake, r.a., f.r.s. London: John Murray, Albemarle street. 1840.
- 22 Луизов А.В. Глаз и свет. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1983. – 144 с., ил.
- 23 Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. – СПб.: Питер, 2009. – 224 с.: ил. – (Серия «Учебный курс»). ISBN 978-5-388-00341-6.
- 24 Colorimetry: understanding the CIE system / edited by Janos Schanda. Published by John Willey & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Canada, 2007. ISBN 978-0-470-04904-4.
- 25 Пешкова В.М., Громова М.И. Практическое руководство по спектрофотометрии и колориметрии. Изд-е второе, пер. и дополненное. М.: Изд-во МГУ, 1965 г., 132 стр., ил.
- 26 Джадд Д., Вышецки Г., Цвет в науке и технике: Пер. с англ. – под ред. д.т.н., проф. Л.Ф. Артюшина. – М.: Мир, 1978 г. – 592 с., ил.
- 27 Сайт www.brucelindbloom.com.
- 28 Форсайт Д.А., Понс Ж., Компьютерное зрение. Современный подход. : Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 928 с.: ил. – Парал. тит. англ. ISBN 5-8459-0542-7.
- 29 Р.В.Г. Хант Цветовоспроизведение, шестое издание: пер. с англ. – СПб., 2009 г.
- 30 А. Берг, П. Дин «Светодиоды»: пер. с англ. – М.: Мир – 1979 г.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1 – Кривые сложения для цветового пространства МКО 1931 г.

λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
360	0,000130	0,000004	0,000606	596	1,059794	0,682219	0,000969
361	0,000146	0,000004	0,000681	597	1,061799	0,669472	0,000930
362	0,000164	0,000005	0,000765	598	1,062807	0,656674	0,000887
363	0,000184	0,000006	0,000860	599	1,062910	0,643845	0,000843
364	0,000207	0,000006	0,000967	600	1,062200	0,631000	0,000800
365	0,000232	0,000007	0,001086	601	1,060735	0,618156	0,000761
366	0,000261	0,000008	0,001221	602	1,058444	0,605314	0,000724
367	0,000293	0,000009	0,001373	603	1,055224	0,592476	0,000686
368	0,000329	0,000010	0,001544	604	1,050977	0,579638	0,000645
369	0,000370	0,000011	0,001734	605	1,045600	0,566800	0,000600
370	0,000415	0,000012	0,001946	606	1,039037	0,553961	0,000548
371	0,000464	0,000014	0,002177	607	1,031361	0,541137	0,000492
372	0,000519	0,000016	0,002436	608	1,022666	0,528353	0,000435
373	0,000582	0,000017	0,002732	609	1,013048	0,515632	0,000383
374	0,000655	0,000020	0,003078	610	1,002600	0,503000	0,000340
375	0,000742	0,000022	0,003486	611	0,991368	0,490469	0,000307
376	0,000845	0,000025	0,003975	612	0,979331	0,478030	0,000283
377	0,000965	0,000028	0,004541	613	0,966492	0,465678	0,000265
378	0,001095	0,000032	0,005158	614	0,952848	0,453403	0,000252
379	0,001231	0,000035	0,005803	615	0,938400	0,441200	0,000240
380	0,001368	0,000039	0,006450	616	0,923194	0,429080	0,000230
381	0,001502	0,000043	0,007083	617	0,907244	0,417036	0,000221
382	0,001642	0,000047	0,007745	618	0,890502	0,405032	0,000212
383	0,001802	0,000052	0,008501	619	0,872920	0,393032	0,000202
384	0,001996	0,000057	0,009415	620	0,854450	0,381000	0,000190
385	0,002236	0,000064	0,010550	621	0,835084	0,368918	0,000174
386	0,002535	0,000072	0,011966	622	0,814946	0,356827	0,000156
387	0,002893	0,000082	0,013656	623	0,794186	0,344777	0,000136
388	0,003301	0,000094	0,015588	624	0,772954	0,332818	0,000117
389	0,003753	0,000106	0,017730	625	0,751400	0,321000	0,000100
390	0,004243	0,000120	0,020050	626	0,729584	0,309338	0,000086
391	0,004762	0,000135	0,022511	627	0,707589	0,297850	0,000075
392	0,005330	0,000151	0,025203	628	0,685602	0,286594	0,000065
393	0,005979	0,000170	0,028280	629	0,663810	0,275625	0,000057
394	0,006741	0,000192	0,031897	630	0,642400	0,265000	0,000050
395	0,007650	0,000217	0,036210	631	0,621515	0,254763	0,000044

396	0,008751	0,000247	0,041438	632	0,601114	0,244890	0,000039
397	0,010029	0,000281	0,047504	633	0,581105	0,235334	0,000036
398	0,011422	0,000319	0,054120	634	0,561398	0,226053	0,000033
399	0,012869	0,000357	0,060998	635	0,541900	0,217000	0,000030
400	0,014310	0,000396	0,067850	636	0,522600	0,208162	0,000028
401	0,015704	0,000434	0,074486	637	0,503546	0,199549	0,000026
402	0,017147	0,000473	0,081362	638	0,484744	0,191155	0,000024
403	0,018781	0,000518	0,089154	639	0,466194	0,182974	0,000022
404	0,020748	0,000572	0,098540	640	0,447900	0,175000	0,000020
405	0,023190	0,000640	0,110200	641	0,429861	0,167224	0,000018
406	0,026207	0,000725	0,124613	642	0,412098	0,159646	0,000016
407	0,029782	0,000826	0,141702	643	0,394644	0,152278	0,000014
408	0,033881	0,000941	0,161304	644	0,377533	0,145126	0,000012
409	0,038468	0,001070	0,183257	645	0,360800	0,138200	0,000010
410	0,043510	0,001210	0,207400	646	0,344456	0,131500	0,000008
411	0,048996	0,001362	0,233692	647	0,328517	0,125025	0,000005
412	0,055023	0,001531	0,262611	648	0,313019	0,118779	0,000003
413	0,061719	0,001720	0,294775	649	0,298001	0,112769	0,000001
414	0,069212	0,001935	0,330799	650	0,283500	0,107000	0,000000
415	0,077630	0,002180	0,371300	651	0,269545	0,101476	0,000000
416	0,086958	0,002455	0,416209	652	0,256118	0,096189	0,000000
417	0,097177	0,002764	0,465464	653	0,243190	0,091123	0,000000
418	0,108406	0,003118	0,519695	654	0,230727	0,086265	0,000000
419	0,120767	0,003526	0,579530	655	0,218700	0,081600	0,000000
420	0,134380	0,004000	0,645600	656	0,207097	0,077121	0,000000
421	0,149358	0,004546	0,718484	657	0,195923	0,072826	0,000000
422	0,165396	0,005159	0,796713	658	0,185171	0,068710	0,000000
423	0,181983	0,005829	0,877846	659	0,174832	0,064770	0,000000
424	0,198611	0,006546	0,959439	660	0,164900	0,061000	0,000000
425	0,214770	0,007300	1,039050	661	0,155367	0,057396	0,000000
426	0,230187	0,008087	1,115367	662	0,146230	0,053955	0,000000
427	0,244880	0,008909	1,188497	663	0,137490	0,050674	0,000000
428	0,258777	0,009768	1,258123	664	0,129147	0,047550	0,000000
429	0,271808	0,010664	1,323930	665	0,121200	0,044580	0,000000
430	0,283900	0,011600	1,385600	666	0,113640	0,041759	0,000000
431	0,294944	0,012573	1,442635	667	0,106465	0,039085	0,000000
432	0,304897	0,013583	1,494804	668	0,099690	0,036564	0,000000
433	0,313787	0,014630	1,542190	669	0,093331	0,034200	0,000000
434	0,321645	0,015715	1,584881	670	0,087400	0,032000	0,000000
435	0,328500	0,016840	1,622960	671	0,081901	0,029963	0,000000

436	0,334351	0,018007	1,656405	672	0,076804	0,028077	0,000000
437	0,339210	0,019214	1,685296	673	0,072077	0,026329	0,000000
438	0,343121	0,020454	1,709875	674	0,067687	0,024708	0,000000
439	0,346130	0,021718	1,730382	675	0,063600	0,023200	0,000000
440	0,348280	0,023000	1,747060	676	0,059807	0,021801	0,000000
441	0,349600	0,024295	1,760045	677	0,056282	0,020501	0,000000
442	0,350147	0,025610	1,769623	678	0,052971	0,019281	0,000000
443	0,350013	0,026959	1,776264	679	0,049819	0,018121	0,000000
444	0,349287	0,028351	1,780433	680	0,046770	0,017000	0,000000
445	0,348060	0,029800	1,782600	681	0,043784	0,015904	0,000000
446	0,346373	0,031311	1,782968	682	0,040875	0,014837	0,000000
447	0,344262	0,032884	1,781700	683	0,038073	0,013811	0,000000
448	0,341809	0,034521	1,779198	684	0,035405	0,012835	0,000000
449	0,339094	0,036226	1,775867	685	0,032900	0,011920	0,000000
450	0,336200	0,038000	1,772110	686	0,030564	0,011068	0,000000
451	0,333198	0,039847	1,768259	687	0,028381	0,010273	0,000000
452	0,330041	0,041768	1,764039	688	0,026345	0,009533	0,000000
453	0,326636	0,043766	1,758944	689	0,024453	0,008846	0,000000
454	0,322887	0,045843	1,752466	690	0,022700	0,008210	0,000000
455	0,318700	0,048000	1,744100	691	0,021084	0,007624	0,000000
456	0,314025	0,050244	1,733560	692	0,019600	0,007085	0,000000
457	0,308884	0,052573	1,720858	693	0,018237	0,006591	0,000000
458	0,303290	0,054981	1,705937	694	0,016987	0,006138	0,000000
459	0,297258	0,057459	1,688737	695	0,015840	0,005723	0,000000
460	0,290800	0,060000	1,669200	696	0,014791	0,005343	0,000000
461	0,283970	0,062602	1,647529	697	0,013831	0,004996	0,000000
462	0,276721	0,065278	1,623413	698	0,012949	0,004676	0,000000
463	0,268918	0,068042	1,596022	699	0,012129	0,004380	0,000000
464	0,260423	0,070911	1,564528	700	0,011359	0,004102	0,000000
465	0,251100	0,073900	1,528100	701	0,010629	0,003838	0,000000
466	0,240848	0,077016	1,486111	702	0,009939	0,003589	0,000000
467	0,229851	0,080266	1,439522	703	0,009288	0,003354	0,000000
468	0,218407	0,083667	1,389880	704	0,008679	0,003134	0,000000
469	0,206811	0,087233	1,338736	705	0,008111	0,002929	0,000000
470	0,195360	0,090980	1,287640	706	0,007582	0,002738	0,000000
471	0,184214	0,094918	1,237422	707	0,007089	0,002560	0,000000
472	0,173327	0,099046	1,187824	708	0,006627	0,002393	0,000000
473	0,162688	0,103367	1,138761	709	0,006195	0,002237	0,000000
474	0,152283	0,107885	1,090148	710	0,005790	0,002091	0,000000
475	0,142100	0,112600	1,041900	711	0,005410	0,001954	0,000000

476	0,132179	0,117532	0,994198	712	0,005053	0,001825	0,000000
477	0,122570	0,122674	0,947347	713	0,004718	0,001704	0,000000
478	0,113275	0,127993	0,901453	714	0,004404	0,001590	0,000000
479	0,104298	0,133453	0,856619	715	0,004109	0,001484	0,000000
480	0,095640	0,139020	0,812950	716	0,003834	0,001384	0,000000
481	0,087300	0,144676	0,770517	717	0,003576	0,001291	0,000000
482	0,079308	0,150469	0,729445	718	0,003334	0,001204	0,000000
483	0,071718	0,156462	0,689914	719	0,003109	0,001123	0,000000
484	0,064581	0,162718	0,652105	720	0,002899	0,001047	0,000000
485	0,057950	0,169300	0,616200	721	0,002704	0,000977	0,000000
486	0,051862	0,176243	0,582329	722	0,002523	0,000311	0,000000
487	0,046282	0,183558	0,550416	723	0,002354	0,000850	0,000000
488	0,041151	0,191274	0,520338	724	0,002197	0,000793	0,000000
489	0,036413	0,199418	0,491967	725	0,002049	0,000740	0,000000
490	0,032010	0,208020	0,465180	726	0,001911	0,000690	0,000000
491	0,027917	0,217120	0,439925	727	0,001781	0,000643	0,000000
492	0,024144	0,226735	0,416184	728	0,001660	0,000690	0,000000
493	0,020687	0,236857	0,393882	729	0,001546	0,000558	0,000000
494	0,017540	0,247481	0,372946	730	0,001440	0,000520	0,000000
495	0,014700	0,258600	0,353300	731	0,001340	0,000484	0,000000
496	0,012162	0,270185	0,334858	732	0,001246	0,000450	0,000000
497	0,009920	0,282294	0,317552	733	0,001158	0,000418	0,000000
498	0,007967	0,295051	0,301338	734	0,001076	0,000389	0,000000
499	0,006296	0,308578	0,286169	735	0,001000	0,000361	0,000000
500	0,004900	0,323000	0,272000	736	0,000929	0,000335	0,000000
501	0,003778	0,338402	0,258817	737	0,000862	0,000311	0,000000
502	0,002945	0,354686	0,246484	738	0,000801	0,000289	0,000000
503	0,002425	0,371699	0,234772	739	0,000743	0,000268	0,000000
504	0,002236	0,389288	0,223453	740	0,000690	0,000249	0,000000
505	0,002400	0,407300	0,212300	741	0,000641	0,000231	0,000000
506	0,002926	0,425630	0,201169	742	0,000595	0,000215	0,000000
507	0,003837	0,444310	0,190120	743	0,000552	0,000199	0,000000
508	0,005175	0,463394	0,179225	744	0,000512	0,000185	0,000000
509	0,006982	0,482940	0,168561	745	0,000476	0,000172	0,000000
510	0,009300	0,503000	0,158200	746	0,000442	0,000160	0,000000
511	0,012149	0,523569	0,148138	747	0,000412	0,000149	0,000000
512	0,015536	0,544512	0,138376	748	0,000383	0,000138	0,000000
513	0,019478	0,565690	0,128994	749	0,000357	0,000129	0,000000
514	0,023993	0,586965	0,120075	750	0,000332	0,000120	0,000000
515	0,029000	0,608200	0,111700	751	0,000310	0,000112	0,000000

516	0,034815	0,629346	0,103905	752	0,000289	0,000104	0,000000
517	0,041120	0,650307	0,096667	753	0,000270	0,000097	0,000000
518	0,047985	0,670875	0,089983	754	0,000252	0,000091	0,000000
519	0,055379	0,690842	0,083845	755	0,000235	0,000085	0,000000
520	0,063270	0,710000	0,078250	756	0,000219	0,000079	0,000000
521	0,071635	0,728185	0,073209	757	0,000205	0,000074	0,000000
522	0,080462	0,745464	0,068678	758	0,000191	0,000069	0,000000
523	0,089740	0,761969	0,064568	759	0,000178	0,000064	0,000000
524	0,099456	0,777837	0,060788	760	0,000166	0,000060	0,000000
525	0,109600	0,793200	0,057250	761	0,000155	0,000056	0,000000
526	0,120167	0,808110	0,053904	762	0,000145	0,000052	0,000000
527	0,131115	0,822496	0,050747	763	0,000135	0,000049	0,000000
528	0,142368	0,836307	0,047753	764	0,000126	0,000045	0,000000
529	0,153854	0,849492	0,044899	765	0,000117	0,000042	0,000000
530	0,165500	0,862000	0,042160	766	0,000110	0,000040	0,000000
531	0,177257	0,873811	0,039507	767	0,000102	0,000037	0,000000
532	0,189140	0,884962	0,036936	768	0,000095	0,000034	0,000000
533	0,201169	0,895494	0,034458	769	0,000089	0,000032	0,000000
534	0,213366	0,905443	0,032089	770	0,000083	0,000030	0,000000
535	0,225750	0,914850	0,029840	771	0,000078	0,000028	0,000000
536	0,238321	0,923735	0,028812	772	0,000072	0,000026	0,000000
537	0,251067	0,932092	0,025694	773	0,000067	0,000024	0,000000
538	0,263992	0,939923	0,023787	774	0,000063	0,000023	0,000000
539	0,277102	0,947225	0,021989	775	0,000059	0,000021	0,000000
540	0,290400	0,954000	0,020300	776	0,000055	0,000020	0,000000
541	0,303891	0,960256	0,018718	777	0,000051	0,000018	0,000000
542	0,317573	0,966007	0,017240	778	0,000048	0,000017	0,000000
543	0,331438	0,971261	0,015864	779	0,000044	0,000016	0,000000
544	0,345483	0,976023	0,014585	780	0,000042	0,000015	0,000000
545	0,359700	0,980300	0,013400	781	0,000039	0,000014	0,000000
546	0,374084	0,984092	0,012307	782	0,000036	0,000013	0,000000
547	0,388640	0,987418	0,11302	783	0,000034	0,000012	0,000000
548	0,403378	0,990313	0,010378	784	0,000031	0,000011	0,000000
549	0,418312	0,992812	0,009529	785	0,000029	0,000011	0,000000
550	0,433450	0,994950	0,008750	786	0,000027	0,000010	0,000000
551	0,448795	0,996711	0,008035	787	0,000026	0,000009	0,000000
552	0,464336	0,998098	0,007382	788	0,000024	0,000009	0,000000
553	0,480064	0,999112	0,006785	789	0,000022	0,000008	0,000000
554	0,495971	0,999748	0,006243	790	0,000021	0,000007	0,000000
555	0,512050	1,000000	0,005750	791	0,000019	0,000007	0,000000

556	0,528296	0,999857	0,005304	792	0,000018	0,000006	0,000000
557	0,544692	0,999305	0,004900	793	0,000017	0,000006	0,000000
558	0,561209	0,998326	0,004534	794	0,000016	0,000006	0,000000
559	0,577822	0,996899	0,004202	795	0,000015	0,000005	0,000000
560	0,594500	0,995000	0,003900	796	0,000014	0,000005	0,000000
561	0,611221	0,992601	0,003623	797	0,000013	0,000005	0,000000
562	0,627976	0,989743	0,003371	798	0,000012	0,000004	0,000000
563	0,644760	0,986444	0,003141	799	0,000011	0,000004	0,000000
564	0,661570	0,982724	0,002935	800	0,000010	0,000004	0,000000
565	0,678400	0,978600	0,002750	801	0,000010	0,000003	0,000000
566	0,695239	0,974084	0,002585	802	0,000009	0,000003	0,000000
567	0,712059	0,969171	0,002439	803	0,000008	0,000003	0,000000
568	0,728828	0,963857	0,002309	804	0,000008	0,000003	0,000000
569	0,745549	0,958135	0,002197	805	0,000007	0,000003	0,000000
570	0,762100	0,952000	0,002100	806	0,000007	0,000002	0,000000
571	0,778543	0,945450	0,002018	807	0,000006	0,000002	0,000000
572	0,794826	0,938499	0,001948	808	0,000006	0,000002	0,000000
573	0,810926	0,931163	0,001890	809	0,000005	0,000002	0,000000
574	0,826825	0,923458	0,001841	810	0,000005	0,000002	0,000000
575	0,842500	0,915400	0,001800	811	0,000005	0,000002	0,000000
576	0,857933	0,907006	0,001766	812	0,000004	0,000002	0,000000
577	0,873082	0,898277	0,001738	813	0,000004	0,000001	0,000000
578	0,887894	0,889205	0,001711	814	0,000004	0,000001	0,000000
579	0,902318	0,879782	0,001683	815	0,000004	0,000001	0,000000
580	0,916300	0,870000	0,001650	816	0,000003	0,000001	0,000000
581	0,929800	0,859861	0,001610	817	0,000003	0,000001	0,000000
582	0,942798	0,849392	0,001564	818	0,000003	0,000001	0,000000
583	0,955278	0,838622	0,001514	819	0,000003	0,000001	0,000000
584	0,967218	0,827581	0,001459	820	0,000003	0,000001	0,000000
585	0,978600	0,816300	0,001400	821	0,000002	0,000001	0,000000
586	0,989386	0,804795	0,001337	822	0,000002	0,000001	0,000000
587	0,999549	0,793082	0,001270	823	0,000002	0,000001	0,000000
588	1,009089	0,781192	0,001205	824	0,000002	0,000001	0,000000
589	1,018006	0,769155	0,001147	825	0,000002	0,000001	0,000000
590	1,026300	0,757000	0,001100	826	0,000002	0,000001	0,000000
591	1,033983	0,744754	0,001069	827	0,000001	0,000001	0,000000
592	1,040986	0,732422	0,001049	828	0,000001	0,000000	0,000000
593	1,047188	0,720004	0,001036	829	0,000001	0,000000	0,000000
594	1,052467	0,707497	0,001021	830	0,000001	0,000000	0,000000
595	1,056700	0,694900	0,001000				

Приложение 2 – Цветовая температура T_c в миредах (μ), координаты цветности излучателя Планка на цветовой диаграмме 1976 г. (u'_0 , v'_0) и тангенсы наклонов изотермических линий (t)

T_c, μ	u'_0	v'_0	t	T_c, μ	u'_0	v'_0	t
0	0,18006	0,26352	-0,24341	250	0,22511	0,33439	-1,4512
10	0,18066	0,26589	-0,25479	275	0,23247	0,33904	-1,7298
20	0,18133	0,26846	-0,26876	300	0,2401	0,34308	-2,0637
30	0,18208	0,27119	-0,28539	325	0,24792	0,34655	-2,4681
40	0,18293	0,27407	-0,3047	350	0,25591	0,34951	-2,9641
50	0,18388	0,27709	-0,32675	375	0,264	0,352	-3,5814
60	0,18494	0,28021	-0,35156	400	0,27218	0,35407	-4,3633
70	0,18611	0,28342	-0,37915	425	0,28039	0,35577	-5,3762
80	0,1874	0,28668	-0,40955	450	0,28863	0,35714	-6,7262
90	0,1888	0,28997	-0,44278	475	0,29685	0,35823	-8,5955
100	0,19032	0,29326	-0,47888	500	0,30505	0,35907	-11,324
125	0,19462	0,30141	-0,58204	525	0,3132	0,35968	-15,628
150	0,19962	0,30921	-0,70471	550	0,32129	0,36011	-23,325
175	0,20525	0,31647	-0,84901	575	0,32931	0,36038	-40,77
200	0,21142	0,32312	-1,0182	600	0,33724	0,36051	-116,45
225	0,21807	0,32909	-0,2168				

Приложение 3 – Координаты цвета основных источников белого света

Источник	\bar{x}_w	\bar{y}_w	\bar{z}_w
A	109,850	100	35,585
B	99,072	100	85,223
C	98,074	100	118,232
D50	96,422	100	82,521
D55	95,682	100	92,149
D65	95,047	100	108,883
D75	94,972	100	122,638
E	100	100	100
F2	99,186	100	67,393
F7	95,041	100	108,747
F11	100,962	100	64,350

Приложение 4 – Параметры различных типов цветковых пространств RGB

Тип	γ	W	Основной красный			Основной зеленый			Основной синий		
			x_r	y_r	\bar{y}_r	x_g	y_g	\bar{y}_g	x_b	y_b	\bar{y}_b
Lab Gamut	-	D50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Adobe RGB (1998)	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,297361	0,2100	0,7100	0,627355	0,1500	0,0600	0,075285
Apple RGB	1,8	D65	0,6250	0,3400	0,244634	0,2800	0,5950	0,672034	0,1550	0,0700	0,083332
Best RGB	2,2	D50	0,7347	0,2653	0,228457	0,2150	0,7750	0,737352	0,1300	0,0350	0,034191
Beta RGB	2,2	D50	0,6888	0,3112	0,303273	0,1986	0,7551	0,663786	0,1265	0,0352	0,032941
Bruce RGB	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,240995	0,2800	0,6500	0,683554	0,1500	0,0600	0,075452
CIE RGB	2,2	E	0,7350	0,2650	0,176204	0,2740	0,7170	0,812985	0,1670	0,0090	0,010811
ColorMatch RGB	1,8	D50	0,6300	0,3400	0,274884	0,2950	0,6050	0,658132	0,1500	0,0750	0,066985
Don RGB 4	2,2	D50	0,6960	0,3000	0,278350	0,2150	0,7650	0,687970	0,1300	0,0350	0,033680
ECI RGB v2	L*	D50	0,6700	0,3300	0,320250	0,2100	0,7100	0,602071	0,1400	0,0800	0,077679
Ekta Space PS5	2,2	D50	0,6950	0,3050	0,260629	0,2600	0,7000	0,734946	0,1100	0,0050	0,004425
NTSC RGB	2,2	C	0,6700	0,3300	0,298839	0,2100	0,7100	0,586811	0,1400	0,0800	0,114350
PAL/ SECAM RGB	2,2	D65	0,6400	0,3300	0,222021	0,2900	0,6000	0,706645	0,1500	0,0600	0,071334
ProPhoto RGB	1,8	D50	0,7347	0,2653	0,288040	0,1596	0,8404	0,711874	0,0366	0,0001	0,000086
SMPTE-C RGB	2,2	D65	0,6300	0,3400	0,212395	0,3100	0,5950	0,701049	0,1550	0,0700	0,086556
sRGB	-	D65	0,6400	0,3300	0,212656	0,3000	0,6000	0,715158	0,1500	0,0600	0,072186
Wide Gamut RGB	2,2	D50	0,7350	0,2650	0,258187	0,1150	0,8260	0,724938	0,1570	0,0180	0,016875

Приложение 5 – Прямые и инверсированные матрицы коррекции для различных методов колориметрической коррекции

Метод	$[M_A]$			$[M_A]^{-1}$		
XYZ Scaling	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000
	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000
	0,0000000	0,0000000	1,0000000	0,0000000	0,0000000	1,0000000
Bradford	0,8951000	0,2664000	-0,1614000	0,9869929	-0,1470543	0,1599627
	-0,7502000	1,7135000	0,0367000	0,4323053	0,5183603	0,0492912
	0,0389000	-0,0685000	1,0296000	-0,0085287	0,0400428	0,9684867
Von Kries	0,4002400	0,7076000	-0,0808100	1,8599364	-1,1293816	0,2198974
	-0,2263000	1,1653200	0,0457000	0,3611914	0,6388125	-0,0000064
	0,0000000	0,0000000	0,9182200	0,0000000	0,0000000	1,0890636

Приложение 6 – Отражательная способность восьми основных эталонных цветовых поверхностей МКО

λ , нм	$R_1(\lambda)$	$R_2(\lambda)$	$R_3(\lambda)$	$R_4(\lambda)$	$R_5(\lambda)$	$R_6(\lambda)$	$R_7(\lambda)$	$R_8(\lambda)$
360	0,116	0,053	0,058	0,057	0,143	0,079	0,150	0,075
365	0,136	0,055	0,059	0,059	0,187	0,081	0,177	0,078
370	0,159	0,059	0,061	0,062	0,233	0,089	0,218	0,084
375	0,190	0,064	0,063	0,067	0,269	0,113	0,293	0,090
380	0,219	0,070	0,065	0,074	0,295	0,151	0,378	0,104
385	0,239	0,079	0,068	0,083	0,306	0,203	0,459	0,129
390	0,252	0,089	0,070	0,093	0,310	0,265	0,524	0,170
395	0,256	0,101	0,072	0,105	0,312	0,339	0,546	0,240
400	0,256	0,111	0,073	0,116	0,313	0,410	0,551	0,319
405	0,254	0,116	0,073	0,121	0,315	0,464	0,555	0,416
410	0,252	0,118	0,074	0,124	0,319	0,492	0,559	0,462
415	0,248	0,120	0,074	0,126	0,322	0,508	0,560	0,482
420	0,244	0,121	0,074	0,128	0,326	0,517	0,561	0,490
425	0,240	0,122	0,073	0,131	0,330	0,524	0,558	0,488
430	0,237	0,122	0,073	0,135	0,334	0,531	0,556	0,482
435	0,232	0,122	0,073	0,139	0,339	0,538	0,551	0,473
440	0,230	0,123	0,073	0,144	0,346	0,544	0,544	0,462
445	0,226	0,124	0,073	0,151	0,352	0,551	0,535	0,450
450	0,225	0,127	0,074	0,161	0,360	0,556	0,522	0,439
455	0,222	0,128	0,075	0,172	0,369	0,556	0,506	0,426
460	0,220	0,131	0,077	0,186	0,381	0,554	0,488	0,413
465	0,218	0,134	0,080	0,205	0,394	0,549	0,469	0,397
470	0,216	0,138	0,085	0,229	0,403	0,541	0,448	0,382

475	0,214	0,143	0,094	0,254	0,410	0,531	0,429	0,366
480	0,214	0,150	0,109	0,281	0,415	0,519	0,408	0,352
485	0,214	0,159	0,126	0,308	0,418	0,504	0,385	0,337
490	0,216	0,174	0,148	0,332	0,419	0,488	0,363	0,325
495	0,218	0,190	0,172	0,352	0,417	0,469	0,341	0,310
500	0,223	0,207	0,198	0,370	0,413	0,450	0,324	0,299
505	0,225	0,225	0,221	0,383	0,409	0,431	0,311	0,289
510	0,226	0,242	0,241	0,390	0,403	0,414	0,301	0,283
515	0,226	0,253	0,260	0,394	0,396	0,395	0,291	0,276
520	0,225	0,260	0,278	0,395	0,389	0,377	0,283	0,270
525	0,225	0,264	0,302	0,392	0,381	0,358	0,273	0,262
530	0,227	0,267	0,339	0,385	0,372	0,341	0,265	0,256
535	0,230	0,269	0,370	0,377	0,363	0,325	0,260	0,251
540	0,236	0,272	0,392	0,367	0,353	0,309	0,257	0,250
545	0,245	0,276	0,399	0,354	0,342	0,293	0,257	0,251
550	0,253	0,282	0,400	0,341	0,331	0,279	0,259	0,254
555	0,262	0,289	0,393	0,327	0,320	0,265	0,260	0,258
560	0,272	0,299	0,380	0,312	0,308	0,253	0,260	0,264
565	0,283	0,309	0,365	0,296	0,296	0,241	0,258	0,269
570	0,298	0,322	0,349	0,280	0,284	0,234	0,256	0,272
575	0,318	0,329	0,332	0,263	0,271	0,227	0,254	0,274
580	0,341	0,335	0,315	0,247	0,260	0,225	0,254	0,278
585	0,367	0,339	0,299	0,299	0,247	0,222	0,259	0,284
590	0,390	0,341	0,285	0,214	0,232	0,221	0,270	0,295
595	0,409	0,341	0,272	0,198	0,220	0,220	0,284	0,316
600	0,424	0,342	0,264	0,185	0,210	0,220	0,302	0,348
605	0,435	0,342	0,257	0,175	0,200	0,220	0,324	0,384
610	0,442	0,342	0,252	0,169	0,194	0,220	0,344	0,434
615	0,448	0,341	0,247	0,164	0,189	0,220	0,362	0,482
620	0,450	0,341	0,241	0,160	0,185	0,223	0,377	0,528
625	0,451	0,339	0,235	0,156	0,183	0,227	0,389	0,568
630	0,451	0,339	0,229	0,154	0,180	0,233	0,400	0,604
635	0,451	0,338	0,224	0,152	0,177	0,239	0,410	0,629
640	0,451	0,338	0,220	0,151	0,176	0,244	0,420	0,648
645	0,451	0,337	0,217	0,149	0,175	0,251	0,429	0,663
650	0,450	0,336	0,216	0,148	0,175	0,258	0,438	0,676
655	0,450	0,335	0,216	0,148	0,175	0,263	0,445	0,685
660	0,451	0,334	0,219	0,148	0,175	0,268	0,452	0,693
665	0,451	0,332	0,224	0,149	0,177	0,273	0,457	0,700
670	0,453	0,332	0,230	0,151	0,180	0,278	0,462	0,705
675	0,454	0,331	0,238	0,154	0,183	0,281	0,466	0,709
680	0,455	0,331	0,251	0,158	0,186	0,283	0,468	0,712

685	0,457	0,330	0,269	0,162	0,189	0,286	0,470	0,715
690	0,458	0,329	0,288	0,165	0,192	0,291	0,473	0,717
695	0,460	0,328	0,312	0,168	0,195	0,296	0,477	0,719
700	0,462	0,328	0,340	0,170	0,199	0,302	0,483	0,721
705	0,463	0,327	0,366	0,171	0,200	0,313	0,489	0,720
710	0,464	0,326	0,390	0,170	0,199	0,325	0,496	0,719
715	0,465	0,325	0,412	0,168	0,198	0,338	0,503	0,722
720	0,466	0,324	0,431	0,166	0,196	0,351	0,511	0,725
725	0,466	0,324	0,447	0,164	0,195	0,364	0,518	0,727
730	0,466	0,624	0,460	0,164	0,195	0,376	0,525	0,729
735	0,466	0,323	0,472	0,165	0,196	0,389	0,532	0,730
740	0,467	0,322	0,481	0,168	0,197	0,401	0,539	0,730
745	0,467	0,321	0,488	0,172	0,200	0,413	0,546	0,730
750	0,467	0,320	0,493	0,177	0,203	0,425	0,553	0,730
755	0,467	0,318	0,497	0,181	0,205	0,436	0,559	0,730
760	0,467	0,316	0,500	0,185	0,208	0,447	0,565	0,730
765	0,467	0,315	0,502	0,189	0,212	0,458	0,570	0,730
770	0,467	0,315	0,505	0,192	0,215	0,469	0,575	0,730
775	0,467	0,314	0,510	0,194	0,217	0,477	0,578	0,730
780	0,467	0,314	0,516	0,197	0,219	0,485	0,581	0,730
785	0,467	0,313	0,520	0,200	0,222	0,493	0,583	0,730
790	0,467	0,313	0,524	0,204	0,226	0,500	0,585	0,731
795	0,466	0,312	0,527	0,210	0,231	0,506	0,587	0,731
800	0,466	0,312	0,531	0,218	0,237	0,512	0,588	0,731
805	0,466	0,311	0,535	0,225	0,243	0,517	0,589	0,731
810	0,466	0,311	0,539	0,233	0,249	0,521	0,590	0,731
815	0,466	0,311	0,544	0,243	0,257	0,525	0,590	0,731
820	0,465	0,311	0,548	0,254	0,265	0,529	0,590	0,731
825	0,464	0,311	0,552	0,264	0,273	0,532	0,591	0,731
830	0,464	0,310	0,555	0,274	0,280	0,535	0,592	0,731

Приложение 7 – Отражательная способность шести дополнительных эталонных цветковых поверхностей МКО

λ , нм	$R_9(\lambda)$	$R_{10}(\lambda)$	$R_{11}(\lambda)$	$R_{12}(\lambda)$	$R_{13}(\lambda)$	$R_{14}(\lambda)$
360	0,069	0,042	0,074	0,189	0,071	0,036
365	0,072	0,043	0,079	0,175	0,076	0,036
370	0,073	0,045	0,086	0,158	0,082	0,036
375	0,070	0,047	0,098	0,139	0,090	0,036
380	0,066	0,050	0,111	0,120	0,104	0,036
385	0,062	0,054	0,121	0,103	0,127	0,036
390	0,058	0,059	0,127	0,090	0,161	0,037
395	0,055	0,063	0,129	0,082	0,211	0,038
400	0,052	0,066	0,127	0,076	0,264	0,039
405	0,052	0,067	0,121	0,068	0,313	0,039
410	0,051	0,068	0,116	0,064	0,341	0,040
415	0,050	0,069	0,112	0,065	0,352	0,041
420	0,050	0,069	0,108	0,075	0,359	0,042
425	0,049	0,070	0,105	0,093	0,361	0,042
430	0,048	0,072	0,104	0,123	0,364	0,043
435	0,047	0,073	0,104	0,160	0,365	0,044
440	0,046	0,076	0,105	0,207	0,367	0,044
445	0,044	0,078	0,106	0,256	0,369	0,045
450	0,042	0,083	0,110	0,300	0,372	0,045
455	0,041	0,088	0,115	0,331	0,374	0,046
460	0,038	0,095	0,123	0,346	0,376	0,047
465	0,035	0,103	0,134	0,347	0,379	0,048
470	0,033	0,113	0,148	0,341	0,384	0,050
475	0,031	0,125	0,167	0,328	0,389	0,052
480	0,030	0,142	0,192	0,307	0,397	0,055
485	0,029	0,162	0,219	0,282	0,405	0,057
490	0,028	0,189	0,252	0,257	0,416	0,062
495	0,028	0,219	0,291	0,230	0,429	0,067
500	0,028	0,262	0,325	0,204	0,443	0,075
505	0,029	0,305	0,347	0,178	0,454	0,083
510	0,030	0,365	0,356	0,154	0,461	0,092
515	0,030	0,416	0,353	0,129	0,466	0,100
520	0,031	0,465	0,346	0,109	0,469	0,108
525	0,031	0,509	0,333	0,090	0,471	0,121
530	0,032	0,546	0,314	0,075	0,474	0,133
535	0,032	0,581	0,294	0,062	0,476	0,142
540	0,033	0,610	0,271	0,051	0,483	0,150
545	0,034	0,634	0,248	0,041	0,490	0,154

550	0,035	0,653	0,227	0,035	0,506	0,155
555	0,037	0,666	0,206	0,029	0,526	0,152
560	0,041	0,678	0,188	0,025	0,553	0,147
565	0,044	0,687	0,170	0,022	0,582	0,140
570	0,048	0,693	0,153	0,019	0,618	0,133
575	0,052	0,698	0,138	0,017	0,651	0,125
580	0,060	0,701	0,125	0,017	0,680	0,118
585	0,076	0,704	0,114	0,017	0,701	0,112
590	0,102	0,705	0,106	0,016	0,717	0,106
595	0,136	0,705	0,100	0,016	0,729	0,101
600	0,190	0,706	0,096	0,016	0,736	0,098
605	0,256	0,707	0,092	0,016	0,742	0,095
610	0,336	0,707	0,090	0,016	0,745	0,093
615	0,418	0,707	0,087	0,016	0,747	0,090
620	0,505	0,708	0,085	0,016	0,748	0,089
625	0,581	0,708	0,082	0,016	0,748	0,087
630	0,641	0,710	0,080	0,018	0,748	0,086
635	0,682	0,711	0,079	0,018	0,748	0,085
640	0,717	0,712	0,078	0,018	0,748	0,084
645	0,740	0,714	0,078	0,018	0,748	0,084
650	0,758	0,716	0,078	0,019	0,748	0,084
655	0,770	0,718	0,078	0,020	0,748	0,084
660	0,781	0,720	0,081	0,023	0,747	0,085
665	0,790	0,722	0,083	0,024	0,747	0,087
670	0,797	0,725	0,088	0,026	0,747	0,092
675	0,803	0,729	0,093	0,030	0,747	0,096
680	0,809	0,731	0,102	0,035	0,747	0,102
685	0,814	0,735	0,112	0,043	0,747	0,110
690	0,819	0,739	0,125	0,056	0,747	0,123
695	0,824	0,742	0,141	0,074	0,746	0,137
700	0,828	0,746	0,161	0,097	0,746	0,152
705	0,830	0,748	0,182	0,128	0,746	0,169
710	0,831	0,749	0,203	0,166	0,745	0,188
715	0,833	0,751	0,223	0,210	0,744	0,207
720	0,835	0,753	0,242	0,257	0,743	0,226
725	0,836	0,754	0,257	0,305	0,744	0,243
730	0,836	0,755	0,270	0,354	0,745	0,260
735	0,837	0,755	0,282	0,401	0,748	0,277
740	0,838	0,755	0,292	0,446	0,750	0,294
745	0,839	0,755	0,302	0,485	0,750	0,310
750	0,839	0,756	0,310	0,520	0,749	0,325
755	0,839	0,757	0,314	0,551	0,748	0,339

760	0,839	0,758	0,317	0,577	0,748	0,353
765	0,839	0,759	0,323	0,599	0,747	0,366
770	0,839	0,759	0,330	0,618	0,747	0,379
775	0,839	0,759	0,334	0,633	0,747	0,390
780	0,839	0,759	0,338	0,645	0,747	0,399
785	0,839	0,759	0,343	0,656	0,746	0,408
790	0,839	0,759	0,348	0,666	0,746	0,416
795	0,839	0,759	0,353	0,674	0,746	0,422
800	0,839	0,759	0,359	0,680	0,746	0,428
805	0,839	0,759	0,365	0,686	0,745	0,434
810	0,838	0,758	0,372	0,691	0,745	0,439
815	0,837	0,757	0,380	0,694	0,745	0,444
820	0,837	0,757	0,388	0,697	0,745	0,448
825	0,836	0,756	0,396	0,700	0,745	0,451
830	0,836	0,756	0,403	0,702	0,745	0,454

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ И ЕЕ НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год - профессор М.А. Резунов;
- с 1947 по 1972 год - профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.

с 2007 года по настоящее время - почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

1938 по 1970 кафедра входила в состав оптического факультета.

В 1970 году кафедра вошла в состав факультета оптико электронного приборостроения, который в 1976 году был переименован в инженерно-физический факультет.

В 1998 г кафедра вошла в состав факультета оптико-информационных систем и технологий.

В 2015 году кафедра вошла в состав факультета лазерной и световой инженерии

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское

бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП).

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков. В 1959 году в лаборатории начал работать Г.Г. Ишанин, который с 1966 по 1972 год исполнял обязанности заведующего этой лабораторией.

В 1965 году Г.Г. Ишаниным начал разработку теории, методов расчета и проектирования, а также технологии и конструктивных решений приемников на основе термоупругого эффекта в кристаллическом кварце. Приемники на термоупругом эффекте были внедрены в серийное производство. На основе этих приемников для промышленности разрабатывались измерители параметров импульсного и непрерывного лазерного излучения в большом динамическом диапазоне. Научно-исследовательские работы, проведенные в указанном направлении, легли в основу учебной дисциплины "Источники и приемники оптического излучения".

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований кафедры ОЭПиС оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения профессора М.М. Мирошникова (директор ГОИ им С.И. Вавилова с 1966 по 1989 год) член-корреспондент Российской академии наук (1984), Герой Социалистического Труда (1976), лауреат Ленинской премии (1981).

Важным методическим аспектом подготовки инженеров, которые внедряли и отстаивали профессора С.Т. Цуккерман и профессор М.М. Мирошников, явилась подготовка инженеров по роду будущей деятельности (инженер-исследователь, инженер-конструктор, инженер-технолог), а не по виду приборов. Сейчас это называется компетентностным подходом к подготовке специалистов.

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число фундаментальных и поисковых НИР, а также ОКР. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области

прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов. (В.Л. Мусяков, В.В. Коротаев, И.А. Коняхин).

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 16 монографий, 12 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков – автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:

- разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;
- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;

- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;

Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;

Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.

Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Кортаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеoinформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП). Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию видеoinформационных и информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеoinформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты,

молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

Тематики НИОКР выполняемых на кафедре ОЭПиС и в научно-образовательном центре оптико-электронного приборостроения в 2007-2015 годах.

- Исследования и разработки в области проектирования оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) различного назначения, в том числе:
- анализ и обработка изображений;
- методы оптического контроля и компьютерная обработка данных оптического контроля;
- видеоинформационные измерительные системы;
- видеоинформационные системы наблюдения;
- видеоинформационные импульсные системы наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированные телевизионно-тепловизионные системы наблюдения;
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационные системы;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов.

Кафедра ОЭПиС занимается разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,
- разработка (выбор) оптической системы,
- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

Заказчикам кафедра ОЭПиС сдает законченное изделие.

Образовательные программы, реализуемые на кафедре ОЭПиС

Направления подготовки и специальности реализуемые кафедрой ОЭПиС Университета ИТМО в области Опотехники и Оптико-электронного приборостроения.

Направление подготовки «12.03.02 - Опотехника».

Профили бакалаврской подготовки:

Оптико-электронные приборы и системы;

Видеоинформационные системы.

Срок обучения – 4 года.

Магистерские программы: «12.04.02 - Опотехника»

Оптико-электронные методы и средства обработки
видеоинформации;

Оптико-электронные приборы и системы безопасности;

Срок обучения – 2 года.

Направление подготовки «27.04.05 - Инноватика»

Магистерская программа:

Инноватика в опотехнике.

Срок обучения – 2 года.

Специальность:

12.05.01 - Оптико-электронные информационно-измерительные
приборы и системы.

Образовательная программа: Оптико-электронные
информационно-измерительные приборы и системы.

Срок обучения – 5,5 лет

Аспирантура

**05.11.07 Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы**

По состоянию на 2015 год на кафедре работают 6 докторов наук.

В период с 2007 по 2014 год на кафедре были защищены
22 диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми
кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов
наук в возрасте до 35 лет.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры:
<http://oeps.ifmo.ru/>

**Горбунова Елена Васильевна
Чертов Александр Николаевич**

**КОЛОРИМЕТРИЯ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49