

**А. Френкель, А. Шадрин**

## **КОЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА МОНИТОРОВ. ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

### **Введение**

Данная статья адресована тем, кто хочет освоить методику колориметрической настройки мониторов, методику их правильного использования, технологию организации экранной цветопробы, а также приобрести навык оперативного решения возникающих проблем.

Добиться серьезного результата можно только через понимание сути колориметрии, то есть через предварительное освоение теории вопроса. Особо подчеркнем, что если общая колориметрическая настройка монитора возможна и за счет пошагового выполнения инструкций практической части данной статьи, то организация экранной цветопробы (которая для большинства компаний является конечной целью наладочных мероприятий) и эффективное решение возникающих проблем невозможны без понимания основ колориметрии, изложенных в теоретической части данной работы, а также в общетеоретической статье «Color Management System (CMS) в логике цветовых координатных систем» ([www.rudtp.ru](http://www.rudtp.ru)).

#### **Примечание:**

Как показало время, упомянутая статья требует определенной доработки и уточнения ряда понятий: за период, прошедший с момента ее выхода, авторы получили ряд очень важных исторических сведений. Тем не менее, базовые положения упомянутой статьи остаются верными и важными для понимания сути процессов управления цветовоспроизведением.

### **Терминология**

Перед началом изложения материала необходимо определить базовые термины.

Несмотря на то, что слово «монитор» вынесено в название статьи, в дальнейшем наравне с ним мы будем пользоваться термином «видеосистема», имея в виду под монитором или видеосистемой многокомпонентную аппаратно-программную цифровую систему, состоящую из: *видеокарты компьютера* и ее программного обеспечения, *информационного кабеля*<sup>1</sup> и *собственно дисплея*. В целом, в нашем понимании, «видеосистема» («монитор») — это подсистема общего ДТР-комплекса, берущая начало в том его участке, на вход которого операционная система подает цифровой сигнал визуализации (драйвер видеокарты), и заканчивающаяся поверхностью дисплея.

Таким образом «монитор» и «видеосистема» — синонимы.

---

<sup>1</sup> Значение которого склонны недооценивать.

«Дисплей» в нашей лексике — это электронно-лучевая трубка (или TFT-панель) с блоком управляющей электроники и усилителем видеосигнала, то есть лишь компонент видеосистемы.

Техническое устройство и технологический принцип работы видеосистемы в целом (и дисплеев в частности) широко известны, подробно и хорошо изложены в большом количестве авторитетных источников, и потому их разбор не входит в нашу задачу.

Целью и смыслом настоящей статьи является описание функций видеосистемы с **колориметрических** позиций, то есть описание работы видеосистемы как цветовоспроизводящего устройства, а также подробный рассказ о принципах и методике ее колориметрической настройки, снабженный развернутым теоретическим обоснованием.

## Монитор как трехстимульный визуальный колориметр

Промышленные технологии и мировое разделение труда в начале XX века достигли такого уровня развития, что возникла острая необходимость в точном числовом описании цветовых ощущений людей, стандартизации и инструментальном воспроизведении цветовых ощущений по числовым данным. Можно привести большое количество примеров, когда без точных данных о цвете, которые должны быть переданы с одного предприятия на другое, из города в город, и даже с континента на континент, невозможно создать тот или иной высококачественный промышленный продукт.

Однако цвет — это наше ощущение и не более того. Как его измерить? Казалось бы, задача точного измерения такой эфемерной вещи, как ощущение, невыполнима.

К тому моменту, когда цветовые измерения стали особо необходимы промышленности, уже существовала трехкомпонентная теория Юнга-Гельмгольца<sup>2</sup> и было известно, что, согласно первому закону Грассмана<sup>3</sup>, любой «цвет» может быть получен смешением трех «независимых цветов»<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> ЮНГ (Янг) (Young) Томас (1773-1829), английский ученый, один из основоположников волновой теории света. Сформулировал принцип интерференции (1801), высказал идею о поперечности световых волн (1817). Объяснил аккомодацию глаза, разработал теорию цветного зрения. Ввел характеристику упругости (модуль Юнга). Автор трудов по акустике, астрономии, расшифровке египетских иероглифов.

ГЕЛЬМГОЛЬЦ (Helmholtz) Герман Людвиг Фердинанд (1821-1894), немецкий ученый, иностранный член-корреспондент Петербургской АН (1868). Автор фундаментальных трудов по физике, биофизике, физиологии, психологии. Впервые (1847) математически обосновал закон сохранения энергии, показав его всеобщий характер. Разработал термодинамическую теорию химических процессов, ввел понятия свободной и связанной энергий. Заложил основы теорий вихревого движения жидкости и аномальной дисперсии. Автор основополагающих трудов по физиологии слуха и зрения. Обнаружил и измерил теплообразование в мышцах, изучил процесс сокращения мышц, измерил скорость распространения нервного импульса.

<sup>3</sup> ГРАССМАН (Grassmann) Герман (1809-77), немецкий математик, физик и филолог. Дал первое систематическое построение учения о многомерном евклидовом пространстве. Труды по акустике, цветоведению (законы Грассмана) и электромагнетизму. В 1875 составил словарь к гимнам Ригведы (памятнику древнеиндийской литературы).

<sup>4</sup> Отметим, что трехкомпонентная теория цветового зрения была разработана Юнгом на основе идей Михаила Васильевича Ломоносова, озвученных им в докладе «Слово о происхождении света, новую теорию о цветах представляющее, в публичном собрании Императорской Академии Наук июля 1 дня 1756 года говоренное Михаилом Ломоносовым»: «Я заметил и через многие годы многими прежде догадками, а после доказательными опытами с довольною вероятностью утвердился, что природа эфирных частиц имеет совмещение с тремя родами действующих первоначальных частиц, чувствительные тела составляющих... От первого рода эфира происходит цвет красный, от второго — желтый, от третьего — голубой. Прочие цвета рождаются от смешения первых... Натура тем паче всего удивительна, что в простоте своей многохитростна, и от малого числа причин произносит неисчислимые образы свойств, перемен и явлений».

Здесь следует уточнить: в лексике Грассмана «цвет» — это электромагнитное излучение, вызывающее некое цветовое ощущение, а не само ощущение. Смешивают, конечно, не ощущения (что невозможно), а *физические стимулы*, вызывающие эти ощущения. В результате данного смешения получают новый стимул, который вызывает новое ощущение. Для цветовых ощущений стимулом является электромагнитное излучение в диапазоне 380 — 730 нм.

**Примечание:**

Цветовым стимулом может быть не только электромагнитное излучение, но и физическое, химическое, физиологическое или психическое воздействие, вызывающее в сознании человека цветовое ощущение. Цветовым стимулом может также оказаться комбинация перечисленных факторов. В контексте нашей статьи цветовой стимул — это поток электромагнитного излучения видимой части спектра.

Под «смешением» стимулов мы понимаем ситуацию, когда стимулы перестают восприниматься зрением как самостоятельные, отдельные стимулы и начинают восприниматься как единый стимул. Такое происходит, когда разные стимулы одновременно воздействуют на одну и ту же область сетчатки или когда последовательность воздействия переходит т.н. порог мерцания, когда это мерцание становится незаметным для зрения.

На первый взгляд, цветовой стимул можно охарактеризовать спектральным распределением энергии (СРЭ) данного излучения. Однако одно и то же цветовое ощущение могут вызывать стимулы с различным СРЭ, что известно как явление метамерии. Таким образом, характеристикой цветового стимула является не СРЭ излучения, а лишь то цветовое ощущение, которое он вызывает (при данной цветовой адаптации). Если различные по спектральному составу стимулы вызывают одно и то же цветовое ощущение (при единой цветовой адаптации), то эти стимулы будут равны.

Итак, первый закон Грассмана (закон трехмерности) утверждает: **любое цветовое ощущение может быть получено за счет смешения в определенной пропорции трех независимых стимулов.** Независимость стимулов, по Грассману, состоит в том, что цветовое ощущение, вызываемое одним из тройки стимулов, не может быть получено путем смешения двух других стимулов в каких-либо пропорциях. Такие исходные стимулы называют *кардинальными стимулами*.

Вообще говоря, **условием кардинальности стимулов является возможность получения результирующего стимула, вызывающего ощущение белого цвета. Обязательным при создании результирующего «белого» стимула является присутствие в смеси всех трех исходных стимулов.**

К примеру, выберем в качестве исходных стимулы, которые самостоятельно вызывают ощущение голубого, красного и желтого. По Грассману, эти три стимула независимы, так как цветовое ощущение, вызываемое каждым стимулом по отдельности, не может быть получено путем смешения двух других стимулов в каких-либо пропорциях. Однако, смешивая все три данных стимула, невозможно получить результирующий стимул, вызывающий ощущение белого цвета. Следовательно, эти стимулы не являются кардинальными. Результатом их «некардинальности» является невозможность получения с их помощью результирующих стимулов, лежащих в области пурпурных, фиолетовых и синих цветов.

Свойство кардинальности проявляется только в тройке, причем не может быть ситуации, при которой один стимул из тройки является кардинальным, а два других — нет. Если стимулы отвечают вышеупомянутому требованию, то кардинальны все три, если не отвечают — ни один из стимулов не является кардинальным.

Именно первый закон Грассмана положен в основу измерения цвета, то есть цветовых ощущений человека: для измерения цветового ощущения, вызванного неким стимулом,

можно сложить три кардинальных стимула и найти такое соотношение интенсивностей этих трех стимулов, которое вызовет такое же цветовое ощущение. Тройка *чисел*, выражающая энергетическое *соотношение* между кардинальными стимулами, и будут однозначным численным выражением измеряемого цветового ощущения (или, если угодно, «цвета»). То есть координатами цветового ощущения могут быть: отношения площадей секторов вертушки Максвелла, соотношения потенциалов, приложенных к лампам прожекторов с фильтрами, отношения углов поворота поляризованных световых потоков к поляризационному фильтру и т.п.

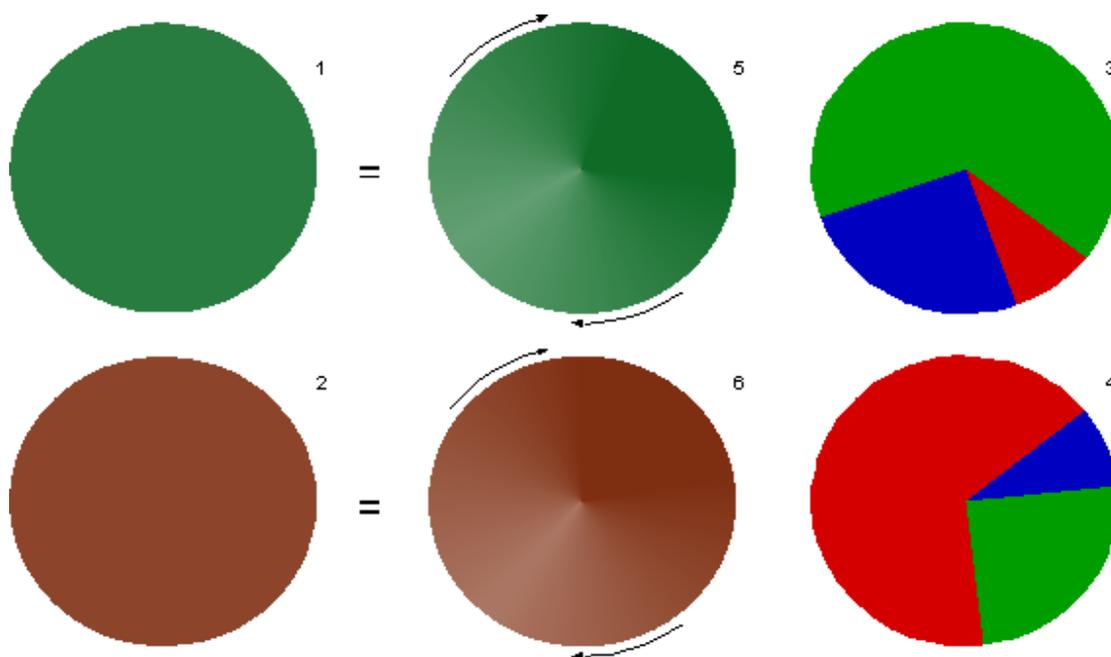


Рис. 1. Измерение цветовых ощущений с помощью вертушки Максвелла: цветовые ощущения, вызываемые окрашенными кругами (1, 2) уравниваются за счет подбора соотношений площадей окрашенных секторов круга вертушки. Секторы окрашены так, что отраженный от них свет представляет собой тройку кардинальных стимулов (в нашем примере — самостоятельно вызывающих ощущение некоего «красного», некоего «зеленого» и некоего «синего»).

Итак, мы имеем способ измерения, но необходимы еще *единицы измерения*.

При измерении цветовых ощущений должна строго соблюдаться единая цветовая адаптация, т.к. при изменении адаптации будут меняться результаты измерений. Цветовая адаптация задается т.н. «точкой белого», т.е. тем, что наблюдатель принимает за белое: чаще всего это источник освещения. Именно от «опорного белого света» зрительная система человека ведет все дальнейшие построения цветовых ощущений, и именно опорный белый свет задает единицы измерения цветовых ощущений, так как является точкой отсчета.

**Примечание:**

Термин «опорный белый свет» предложен проф. П.М. Тиходеевым<sup>5</sup> и представляется нам очень удачным. В лексике СИЕ опорный белый свет именуется либо «четвертым кардинальным стимулом», либо «белым базисным стимулом» (Прист).

<sup>5</sup> ТИХОДЕЕВ Павел Михайлович (1893-1978). Ученый в области светотехники, основатель российской метрологии в области световых измерений, профессор (1930). Разработал теоретические основы уличного освещения. Руководил созданием государственного светового эталона. Государственная премия СССР (1948).

За единицы измерения были приняты такие количества кардинальных стимулов, которые при смешении вызывают то же ощущение, что и выбранный опорный белый свет. От этих количеств отсчитываются удельные количества (доли) стимулов при измерениях.

**Примечание:**

Кардинальные стимулы принято именовать курсивными прописными буквами латинского алфавита, к примеру:  $A B C$ , или  $U V W$  и т.п. Удельное количество (долю) каждого кардинального стимула принято обозначать строчными буквами либо латинского, либо греческого алфавита в курсивном начертании с нижним индексом прямого начертания:

$k_1A k_2B k_3C$ , или  $\alpha_1U \alpha_1V \alpha_1W$  и т.п.

Важно заметить, что «изменение удельного количества стимула» (изменение интенсивности стимула) означает, что СРЭ стимула меняется пропорционально по всему видимому спектру, т.е. энергия излучения по каждой из длин волн меняется с одним и тем же коэффициентом. Как правило, пропорциональность достигается механическим ограничением светового потока (стимула) от некоторого максимального значения.

**Примечание:**

Так, в вертушке Максвелла интенсивность стимулов определяется площадью окрашенных секторов, в колориметрах Английской национальной физической лаборатории и Государственного оптического института (СССР) — углом раскрытия механического обтюлятора светового потока, вращающегося с постоянной скоростью, превышающей порог мерцания (схож с обтюратором кинопроектора), в колориметре Британского императорского колледжа наук и технологии — просветом специальной апертуры и т.п.

Измерения цветовых ощущений можно сравнить со взвешиванием при помощи рычажных весов: на одну «чашку весов» кладется измеряемое цветовое ощущение, а на другую «чашку» кладутся «разновесы» — определенные удельные количества кардинальных стимулов. Эти «разновесы» выверены по эталону — опорному белому свету. Индикатором уравнивания служит человек-наблюдатель, т.к. только человек может знать, равны ощущения или нет. Важно, что при этом нет никакой необходимости в трудном словесном выражении ощущений, что всегда неточно.

Надо заметить, что в реальности, вопреки первому закону Грассмана, далеко не все цветовые ощущения могут быть получены смешением трех кардинальных стимулов. Большую часть ощущений от «спектрально-чистых» (график их спектрального распределения представляет собой узкую полоску) стимулов и вообще ощущения «высоконасыщенных цветов» невозможно уравнивать с помощью кардинальных стимулов. Количество таких «неуравниваемых» ощущений зависит от спектральной чистоты самих кардинальных стимулов (чем чище спектр кардинальных стимулов, то есть, чем уже их спектральный пик — тем большее количество цветов можно уравнивать) и их взаиморасположения в спектре.

Замечено, что наибольшее количество цветовых ощущений можно уравнивать, если использовать кардинальные стимулы, по отдельности вызывающие ощущения высоконасыщенного красного, высоконасыщенного зеленого и высоконасыщенного синего цветов. Однако можно использовать и другие кардинальные стимулы, по отдельности вызывающие иные цветовые ощущения. Желательно (но необязательно), чтобы кардинальные стимулы были узкополосными.

На рис. 2 (а) показаны три тройки узкополосных кардинальных стимулов, вызывающих одно и то же цветовое ощущение (в нашем примере — белое).

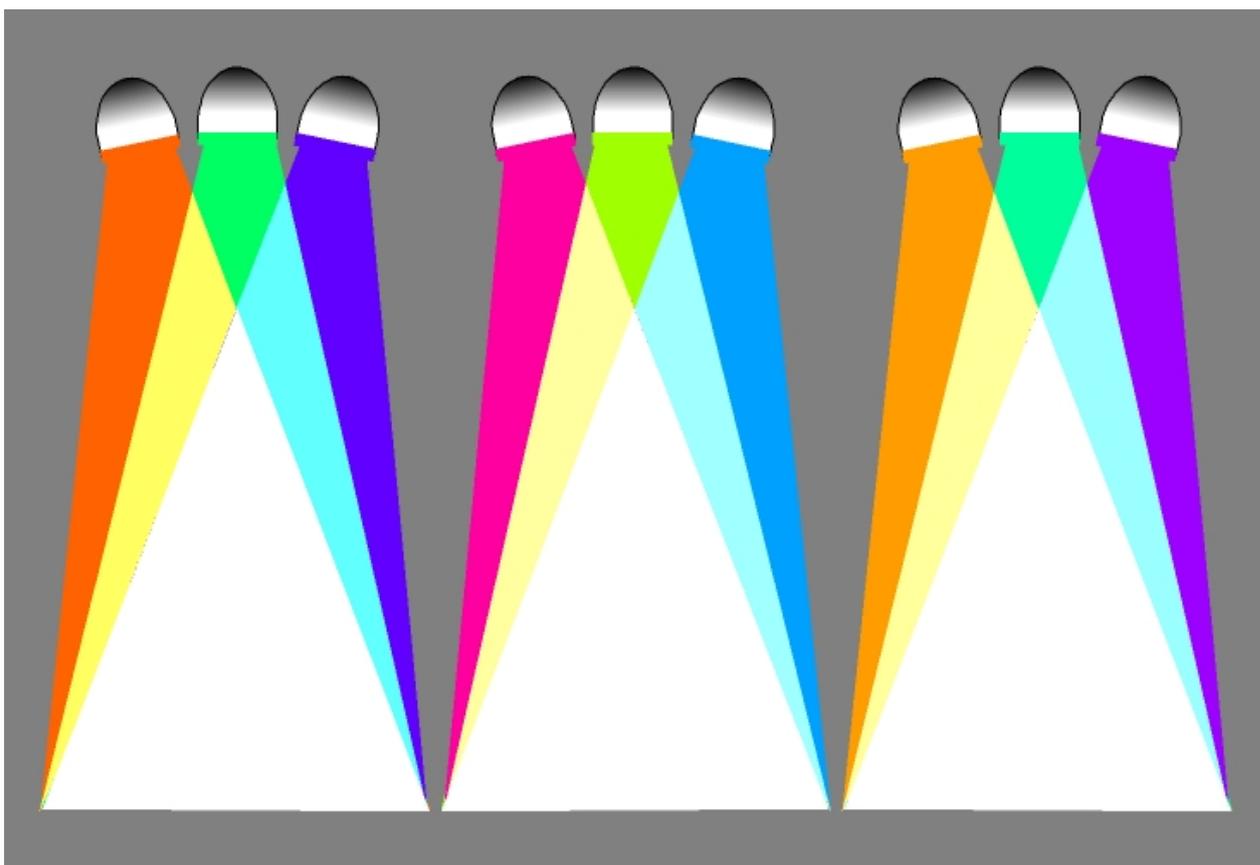


Рис. 2, а.

Ощущения, по отдельности вызываемые кардинальными стимулами первой тройки с некоторой натяжкой могут быть отнесены к привычным «красному», «зеленому» и «синему».

Ощущения, по отдельности вызываемые кардинальными стимулами второй тройки, не могут быть отнесены ни к привычным «красному», «зеленому» и «синему», ни к «голубому», «пурпурному» и «желтому», а занимают некое промежуточное положение.

Ощущения, по отдельности вызываемые кардинальными стимулами последней тройки, радикально отличаются от RGB и CMY-групп.

Поскольку не существует трех таких кардинальных стимулов, смешением которых можно получить все цветовые ощущения, то с «неуравновешиваемыми» ощущениями поступают так же, как со взвешиваемыми предметами, вес которых не определить из-за отсутствия нужных разновесов: имеющиеся разновесы помещают на чашку со взвешиваемым предметом, и вес определяется как разность между весом гирек на двух чашках весов. Аналогично поступают и с «неуравновешиваемыми» ощущениями: к стимулу, вызывающему «слишком» насыщенное ощущение добавляют некоторое удельное количество одного (или даже двух) кардинальных стимулов, которые делают ощущение менее насыщенным. После этого получившееся ощущение уравнивают оставшимися кардинальными стимулами, а удельным количеством кардинальных стимулов, смешанных с измеряемым, присваивают отрицательные значения.

В целом мы получаем *цветовую координатную систему*, в которой любое цветовое ощущение может быть описано через удельные количества кардинальных стимулов, вызывающих это ощущение. Т.е. любое цветовое ощущение может быть выражено через три цветовых координаты, которые могут иметь и отрицательные значения. Такая цветовая

координатная система будет определяться тремя кардинальными стимулами и опорным белым светом.

Практическим решением задачи цветовых измерений на основе описанных принципов стало создание специальных измерительных приборов — *трехстимульных визуальных колориметров*.

**Важное примечание:**

Первый колориметр появился в конце XIX века и представлял собой картонный круг, разделенный на три окрашенных сектора (вертушка Максвелла, см. рис. 1), который освещался белым светом. Круг вращался, и в зависимости от относительной площади секторов возникало то или иное цветовое ощущение.

Затем, в начале двадцатых годов XX века, в Британии, Дж. Гилд (John Guild), работавший в Английской национальной физической лаборатории, создал колориметр оригинальной конструкции, использовавший в качестве источника белого света газополную лампу накаливания с коррелированной цветовой температурой 2856К. Свет от лампы проходил через специальный конверсионный фильтр (фильтр Дэвиса-Гибсона) и приобретал спектр, близкий к спектру дневного света с коррелированной температурой 6500К. От этого же источника свет направлялся на специальные фильтры, в результате чего образовывалось три узкополосных кардинальных стимула с длинами волн: 700,0 нм (вызывает ощущение насыщенного красного), 546,1 нм (вызывает ощущение насыщенного зеленого) и 435,8 нм (вызывает ощущение насыщенного синего).



Рис. 2, б.

В тот же период по заказу Британского исследовательского совета в Императорском колледже наук и технологии работал американский исследователь Райт (W.D. Wright), создавший колориметр собственной конструкции. Основное отличие колориметра Райта от колориметра Гилда состояло в том, что кардинальные стимулы получались за счет прохождения белого света через три призмы со шторками, вырезающими узкие спектральные полосы.

Колориметры Гилда и Райта были использованы для проведения фундаментальных научных исследований, которые в свою очередь легли в основу колориметрического стандарта, принятого Международным Осветительным Конгрессом (CIE) в 1931 году и действующего по сей день. В качестве основного колориметра был выбран колориметр Гилда, а данные Райта были добавлены и усреднены с данными Гилда.

Международный осветительный конгресс принял символы обозначения кардинальных стимулов колориметра Гилда по первым буквам *приблизительных* названий цветовых ощущений, которые эти стимулы вызывают: R — red; G — green; B — blue. Такая, казалось бы, логичная система обозначений внесла в дальнейшем серьезную путаницу в понимание колориметрических принципов, о чем приходится только сожалеть. В то же время мы вынуждены придерживаться принятой тогда системы обозначений RGB.

Независимо от конструктивного решения колориметр должен отвечать следующим требованиям:

1. *Кардинальность* — стимулы колориметра должны быть кардинальными (см. пояснение к первому закону Грассмана).

Обращаем особое внимание на то, что требование кардинальности не означает требования узкополосности: кардинальные стимулы колориметра не обязаны представлять собой узкие спектральные полосы, а могут иметь некую, порой довольно сложную кривую спектрального распределения электромагнитной энергии, как, скажем, в вертушке Максвелла. Чем уже спектр кардинальных стимулов колориметра, тем больше его цветовой охват, и наоборот.

**Примечание:**

Цветовым охватом колориметра называется совокупность цветовых ощущений человека, которые можно измерить без использования отрицательных значений удельных количеств кардинальных стимулов. То есть, цветовой охват колориметра — это совокупность всех цветовых ощущений человека, которые можно **воспроизвести** на данном колориметре, смешивая его кардинальные стимулы.

Гилд и Райт стремились получить узкополосные кардинальные стимулы, так как старались обеспечить максимально возможный цветовой охват своих колориметров, заведомо превышающий охват промышленных цветовоспроизводящих устройств, а также по мотивам научного характера.

2. *Наличие источника «белого света»*, который принимается за опорный.

3. *Энергетическая переменность* — энергетическая интенсивность кардинальных стимулов должна быть изменяема в определенном диапазоне (от нуля до некоего максимума). **При этом СРЭ стимула должно изменяться пропорционально по всему видимому спектру.**

4. *Независимость управления* энергетической интенсивностью стимулов — изменение интенсивности одного стимула не должно приводить к изменению интенсивности двух других.

5. *Временная стабильность* — характер стимулов не должен меняться со временем.

Принципиальная схема трехстимульного колориметра Гилда (CIE) показана на рис. 3

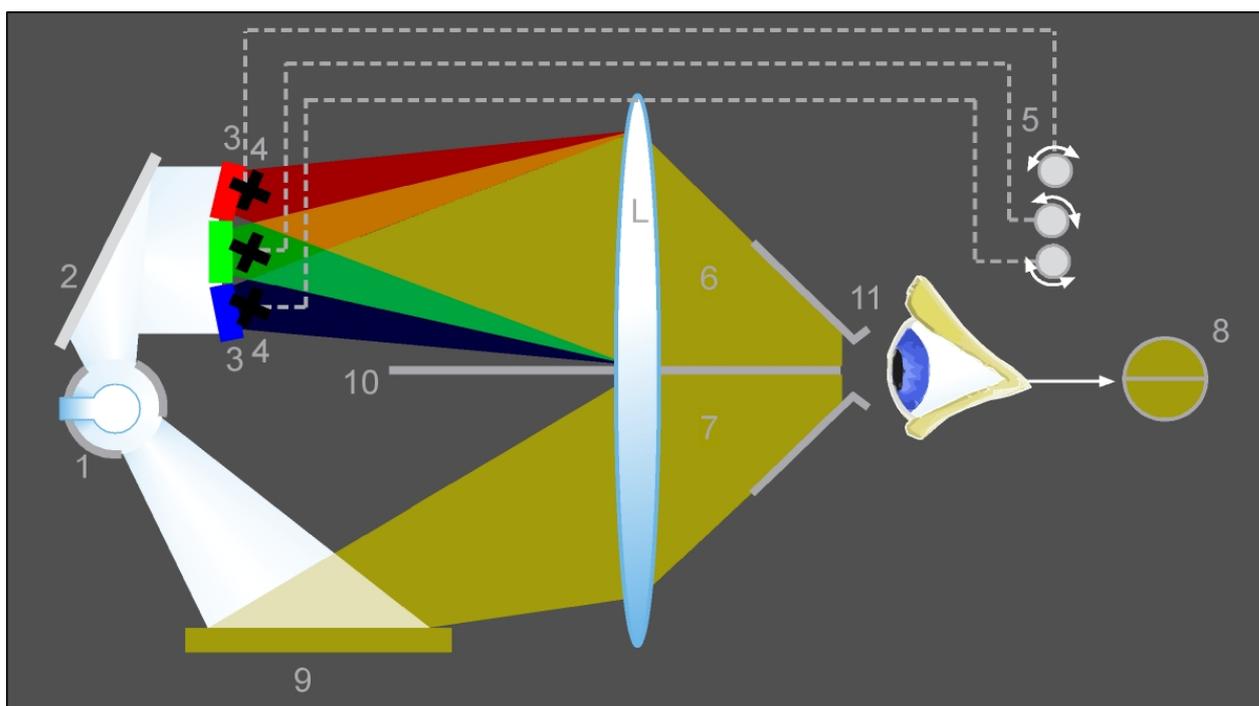


Рис. 3. 1 — источник опорного белого света; 2 — зеркало; 3 — фильтры; 4 — obtюраторы, меняющие интенсивность (удельное количество) стимулов; 5 — регуляторы угла раскрытия obtюраторов; 6 — уравнивающий стимул; 7 — уравниваемый стимул; 8 — поле сравнения; 9 — исследуемый образец; 10 — разделительная перегородка; 11 — визир; L — фокусирующая линза.

Регулировка интенсивности кардинальных стимулов конструктивно и технологически достигается по-разному: в колориметре Гилда интенсивность кардинальных стимулов меняется за счет изменения угла раскрытия вращающихся obtюраторов светового потока, в колориметре Райта — за счет изменения просвета специальных апертур, в вертушке Максвелла — за счет изменения угла сектора на вращающемся с постоянной угловой скоростью цветовом круге и т.д.

Для того чтобы выполнить цветовое измерение, необходима градуировка шкал прибора, которая выполняется по следующему принципу: за ноль принимается положение каждого из трех регуляторов, при котором полностью перекрыт световой поток, то есть цветовые стимулы отсутствуют. За единицу принимается положение регуляторов, при котором уравнивается ощущение от опорного белого света. Участок между положением «0» и «1» разбивается на определенное количество равных промежутков, которые задают цену деления шкал прибора.<sup>6</sup> Важно подчеркнуть, что отсчеты по шкалам будут пропорциональны количеству световой энергии, попадающей на сетчатку глаза наблюдателя, то есть мы получаем **энергетически линейную шкалу измерений**.

Трехстимульный визуальный колориметр позволил решать две принципиальных задачи:

— **измерять цветовые ощущения человека, возникающие при рассмотрении той или иной поверхности или светящегося объекта, то есть давать им численное выражение;**

<sup>6</sup> В колориметре СИЕ положение уравнивания опорного белого света для каждого кардинального стимула было принято за 0,33, что не имеет принципиального значения для измерений.

— создавать стимул, который вызовет цветовое ощущение, соответствующее уже имеющимся числовым данным, то есть воспроизводить заданное цветовое ощущение.

Измерение цветового ощущения на визуальном колориметре проводилось так (разберем на примере измерения цвета окрашенных поверхностей): некая поверхность освещалась опорным белым светом от стандартного источника и представляла собой т.н. верхнее поле сравнения. Наблюдатель, который прошел темновую адаптацию в течение 10–15 минут, вращал регуляторы интенсивности кардинальных стимулов и уравнивал цветовое ощущение от нижнего поля сравнения с ощущением от верхнего. Когда достигалось равенство ощущений, снимались числовые показания.

Полученные на шкале регуляторов колориметра значения и представляли собой координаты цветового ощущения, вызванного светом, отраженным от исследуемого объекта, в цветовой координатной системе данного колориметра, которая, напомним, определяется тремя кардинальными стимулами и опорным белым светом данного колориметра.

Если мы произведем измерение цветового ощущения от той же самой окрашенной поверхности с помощью другого колориметра, имеющего иные кардинальные стимулы и/или иной опорный белый свет, то мы получим иные числовые данные. Что понятно, поскольку другой колориметр — это другая цветовая координатная система.

В практике промышленной колориметрии измерения сразу же стали проводиться на приборах разной конструкции, имевших разный опорный белый свет и разные кардинальные стимулы, что вызвало необходимость создания алгоритма перехода между цветовыми координатными системами разных колориметров.

Такой переход возможен благодаря явлению, определяемому третьим законом Грассмана: **цветовое ощущение от смеси стимулов зависит только от цветового ощущения, вызываемого каждым отдельным стимулом, а не от спектрального состава стимулов.** К примеру,

$$\text{если стимул } A = B \text{ и стимул } C = D, \text{ то } A + C = B + D$$

то есть, если на колориметре «1» были измерены цветовые координаты некоего цветового ощущения, то это же цветовое ощущение можно воспроизвести на колориметре «2», но при этом соотношение удельных количеств кардинальных стимулов колориметра «2» будет отличным от соотношения удельных количеств кардинальных стимулов в колориметре «1». Таким образом, цветовые координаты одного и того же цветового ощущения в цветовых координатных системах разных колориметров будут различными.

Для того чтобы перейти от данных измерения цветового ощущения на одном колориметре к данным другого колориметра, то есть для того, чтобы цветовое ощущение, измеренное на колориметре «1», воспроизвести на колориметре «2», необходимо предварительно на колориметре «2» измерить цветовые координаты кардинальных стимулов и координаты опорного белого света колориметра «1». Ниже в общем виде показана система уравнений такого измерения.

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= c_{11}R_2 + c_{12}G_2 + c_{13}B_2 \\ G_1 &= c_{21}R_2 + c_{22}G_2 + c_{23}B_2 \\ B_1 &= c_{31}R_2 + c_{32}G_2 + c_{33}B_2 \\ W_1 &= c_{41}R_2 + c_{42}G_2 + c_{43}B_2 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $R_1, G_1, B_1$  — кардинальные стимулы колориметра «1»;  $W_1$  — опорный белый свет колориметра «1»;  $R_2, G_2, B_2$  — кардинальные стимулы колориметра «2»;  $c_{11} \dots c_{33}$  — линейные коэффициенты, полученные в результате измерения.

Но  $W_1$  также получается сложением определенных количеств кардинальных стимулов первого колориметра ( $R_1, G_1$  и  $B_1$ ). Следовательно, для первого колориметра можно написать выражение<sup>7</sup>:

$$\alpha_4 W_1 = \alpha_1 R_1 + \alpha_2 G_1 + \alpha_3 B_1$$

Поскольку коэффициент  $\alpha_4$  может быть выражен как:

$$\alpha_4 = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{vmatrix},$$

то, умножив первые три уравнения системы (1) соответственно на  $\alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$ , мы получим:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 R_1 &= \alpha_1 c_{11} R_2 + \alpha_1 c_{12} G_2 + \alpha_1 c_{13} B_2 \equiv d_{11} R_2 + d_{12} G_2 + d_{13} B_2 \\ \alpha_2 G_1 &= \alpha_2 c_{21} R_2 + \alpha_2 c_{22} G_2 + \alpha_2 c_{23} B_2 \equiv d_{21} R_2 + d_{22} G_2 + d_{23} B_2 \\ \alpha_3 B_1 &= \alpha_3 c_{31} R_2 + \alpha_3 c_{32} G_2 + \alpha_3 c_{33} B_2 \equiv d_{31} R_2 + d_{32} G_2 + d_{33} B_2 \end{aligned} \right\} (2)$$

Поэтому переход из системы координат одного колориметра в систему координат другого колориметра будет представлять собой систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} \alpha_{11} R_1 + \alpha_{12} G_1 + \alpha_{13} B_1 &= d_{11} R_2 + d_{12} G_2 + d_{13} B_2 \\ \alpha_{21} R_1 + \alpha_{22} G_1 + \alpha_{23} B_1 &= d_{21} R_2 + d_{22} G_2 + d_{23} B_2 \\ \alpha_{31} R_1 + \alpha_{32} G_1 + \alpha_{33} B_1 &= d_{31} R_2 + d_{32} G_2 + d_{33} B_2 \end{aligned}$$

Для быстроты и удобства иногда записывают так:

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix}$$

Практическое измерение кардинальных стимулов и опорного белого света одного колориметра другим колориметром — очень трудная, почти невыполнимая задача, так как визуальные колориметры представляют собой тяжелые, громоздкие установки.

Однако любой цветовой стимул, в том числе кардинальные стимулы и опорный белый свет колориметров, можно рассматривать как аддитивную смесь узкополосных (спектрально-чистых) стимулов (рис 4).

<sup>7</sup> Для того чтобы не возникало путаницы (и для большей наглядности), линейные коэффициенты, относящиеся к первому колориметру, мы будем обозначать строчными буквами начала греческого алфавита, а коэффициенты, относящиеся ко второму колориметру — строчными буквами начала латинского алфавита.

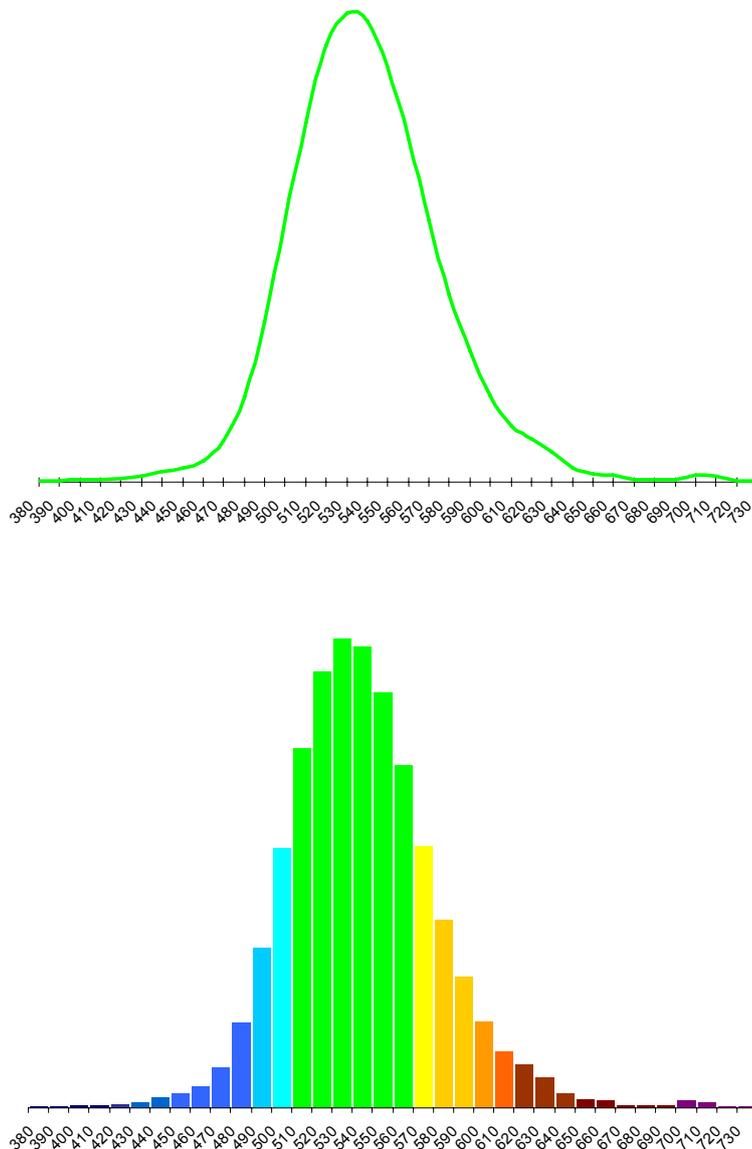


Рис. 4. Некий стимул, вызывающий ощущение «зеленого» цвета (вверху), и тот же стимул, представленный в виде аддитивной смеси узкополосных стимулов (внизу).

Тогда, если мы знаем цветовые координаты каждого из узкополосных стимулов, мы можем узнать и цветовые координаты суммарного стимула. Чтобы узнать цветовые координаты суммарного стимула, необходимо будет сложить нормированные значения цветовых координат измеренных узкополосных (спектрально-чистых) стимулов.

Поэтому нет необходимости в прямых измерениях стимулов одного колориметра другим колориметром. Мы можем (воспользовавшись дифракционной решеткой или призмой со шторками) произвести колориметрические измерения узких спектральных полосок (спектрально-чистых стимулов) на колориметре «2» с определенным шагом (как правило, выбирают 10 Нм) по всему видимому диапазону длин волн и построить т.н. *кривые сложения* (их еще называют «кривыми смещения») для наблюдателей колориметра «2».

Принципиальная схема измерения спектрально-чистых стимулов показана на рис. 5.

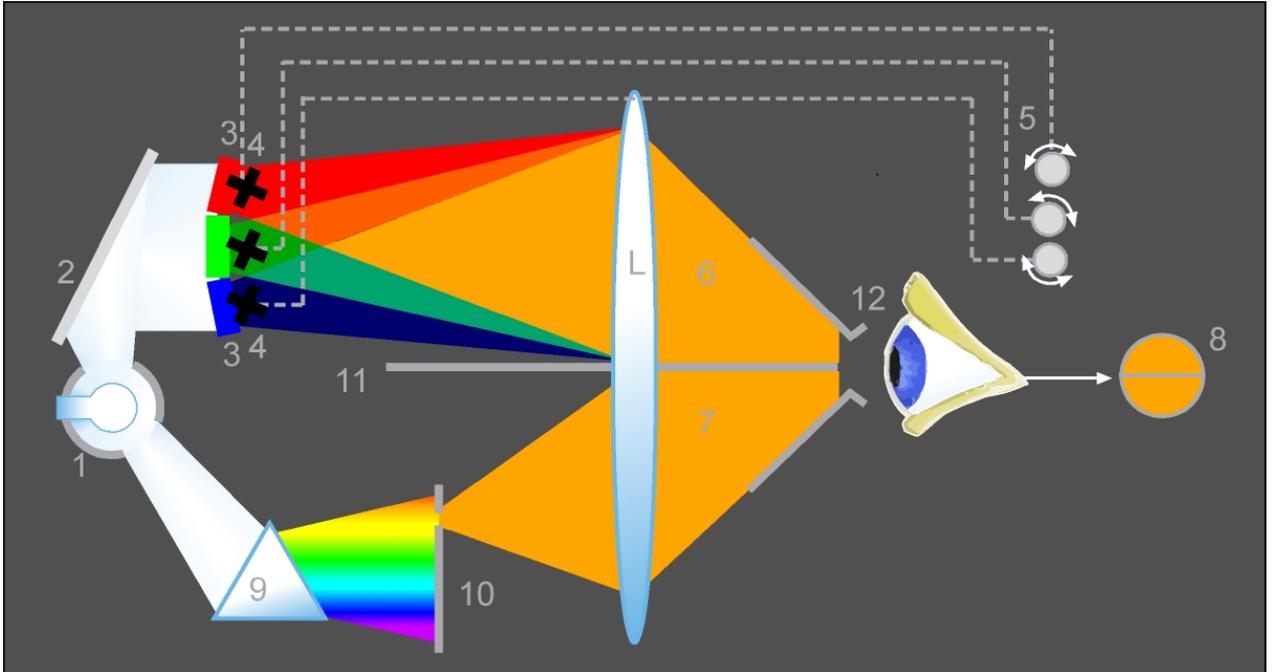


Рис. 5. 1 — источник опорного белого света; 2 — зеркало; 3 — фильтры; 4 — obtюраторы, меняющие интенсивность (удельное количество) стимулов; 5 — регуляторы угла раскрытия obtюраторов; 6 — уравнивающий стимул; 7 — уравниваемый стимул; 8 — поле сравнения; 9 — призма; 10 — шторка с узкой щелью; 11 — разделительная перегородка; 12 — визир; L — фокусирующая линза.

В случае, когда уравнивание спектрально-чистого стимула оказывается невозможным (как мы уже говорили — это характерно для большинства спектрально-чистых стимулов), один или два кардинальных стимула перенаправляют и добавляют к измеряемому спектрально-чистому стимулу, «загрязняя» его (см. рис. 6). Удельным количествам кардинальных стимулов, смешанных с измеряемым, присваивают отрицательные значения (отрицательные значения координат).

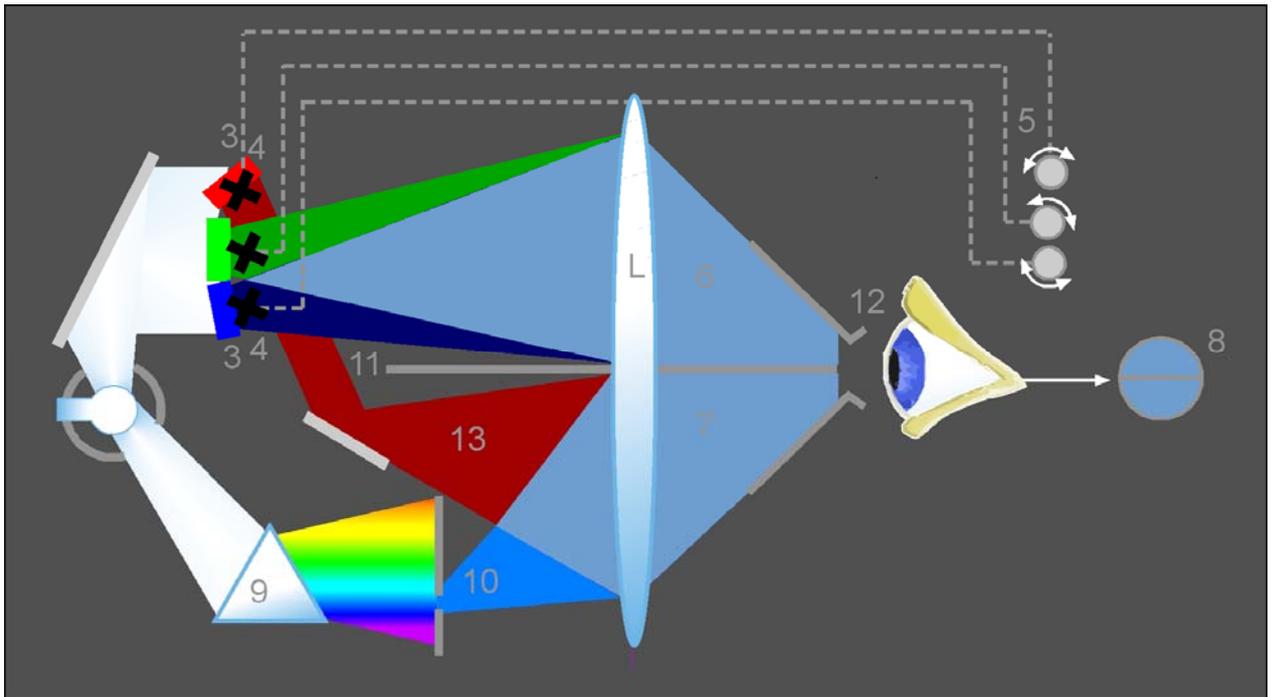


Рис. 6. 1 — источник опорного белого света; 2 — зеркало; 3 — фильтры; 4 — obtюраторы, меняющие интенсивность (удельное количество) стимулов; 5 — регуляторы угла раскрытия obtюраторов; 6 — уравнивающий стимул; 7 — уравниваемый стимул; 8 — поле сравнения; 9 — призма; 10 — шторка с узкой щелью; 11 — разделительная перегородка; 12 — визир; 13 — перенаправленный стимул; L — фокусирующая линза.

Удельные количества кардинальных стимулов колориметра (цветовые координаты), которые уравнивают ощущение от воздействия какого-либо спектрально-чистого (узкополосного) стимула, принято обозначать строчными буквами с горизонтальной чертой наверху и подстрочным индексом, указывающим длину волны измеряемого узкополосного стимула. К примеру, цветовые координаты ощущения от воздействия спектрально-чистого (узкополосного) стимула с длиной волны 470 нм обозначают как:

$$\overline{r_{470}} \quad \overline{g_{470}} \quad \overline{b_{470}}$$

Понятно, что если измерить узкополосные стимулы по всему видимому спектру с шагом, скажем, 10 Нм, то получится 35 троек удельных количеств кардинальных стимулов, то есть 35 наборов цветовых координат. Соответственно, можно построить три графика, где по оси абсцисс отложены длины волн, а по оси ординат — удельные количества кардинальных стимулов. Такие графики носят название *кривых сложения* наблюдателя для данного колориметра.

Процедура измерения на данном колориметре спектрально-чистых узкополосных стимулов по всему видимому диапазону длин волн и построение кривых сложения является процедурой *спецификации* данного колориметра.

Итак, зная кривые спектрального распределения энергии кардинальных стимулов колориметра «1» и кривую спектрального распределения энергии опорного белого света колориметра «1», можно получить выражение кардинальных стимулов колориметра «1» в цветовых координатах колориметра «2»:

$$R_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{r_{2,\lambda}} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{g_{2,\lambda}} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{b_{2,\lambda}} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv e_{11} R_2 + e_{12} G_2 + e_{13} B_2$$

$$G_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{r_{2,\lambda}} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{g_{2,\lambda}} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{b_{2,\lambda}} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv e_{21} R_2 + e_{22} G_2 + e_{23} B_2$$

$$B_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{r_{2,\lambda}} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{g_{2,\lambda}} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{b_{2,\lambda}} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv e_{31} R_2 + e_{32} G_2 + e_{33} B_2$$

где  $\overline{r_{2,\lambda}}$ ,  $\overline{g_{2,\lambda}}$ ,  $\overline{b_{2,\lambda}}$  — ординаты кривых сложения колориметра «2» для данной длины волны;  $S_{r,1,\lambda}$ ,  $S_{g,1,\lambda}$ ,  $S_{b,1,\lambda}$  — спектральное распределение энергии кардинальных стимулов колориметра «1»;  $W_{1,\lambda}$  — спектральное распределение энергии опорного белого света колориметра «1»,

и, соответственно, написать матричное уравнение перехода.

Практическое визуальное колориметрическое измерение спектрально-чистых стимулов и построение кривых сложения проведены независимо друг от друга Гилдом и Райтом в 1926–27 гг. Результаты измерений были рассмотрены в 1931 году Международным Осветительным Конгрессом, усреднены и приняты в качестве международного стандарта.

Для получения узких спектральных полос сквозь призму со щелевой шторкой пропускался белый свет стандарта Английской Национальной Физической Лаборатории, со спектральным составом, показанным на рис. 7а (т.н. В-источник с коррелированной цветовой температурой 4800К). Измерения были проведены в диапазоне от 380 до 730 нм с шагом 10 Нм.

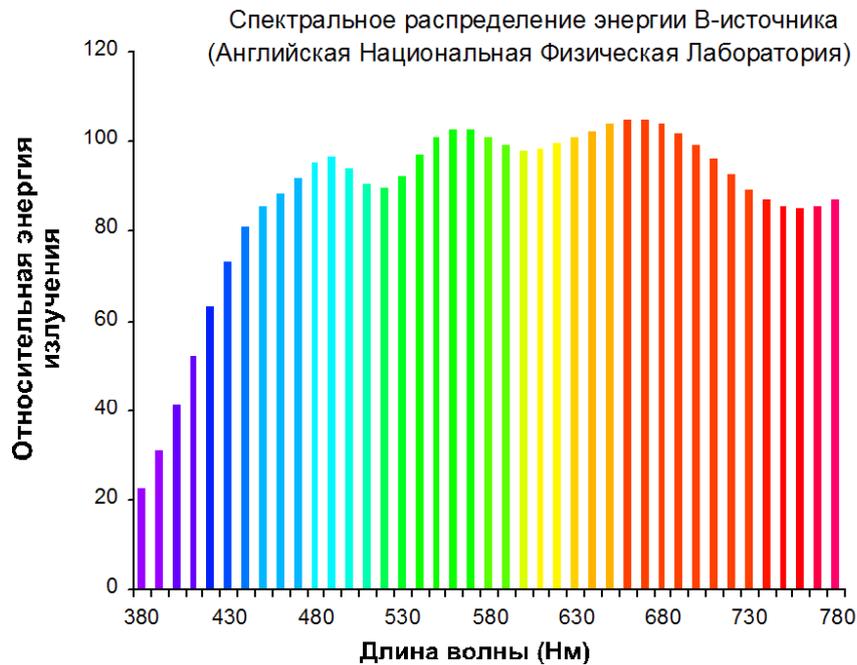


Рис. 7, а. Спектральное распределение энергии В-источника, для наглядности разбитое на узкополосные стимулы.

Результаты измерений спектрально-чистых стимулов, полученных из В-источника,

были пересчитаны на равноэнергетические стимулы. Полученные в результате кривые сложения показаны на рис. 7,б.

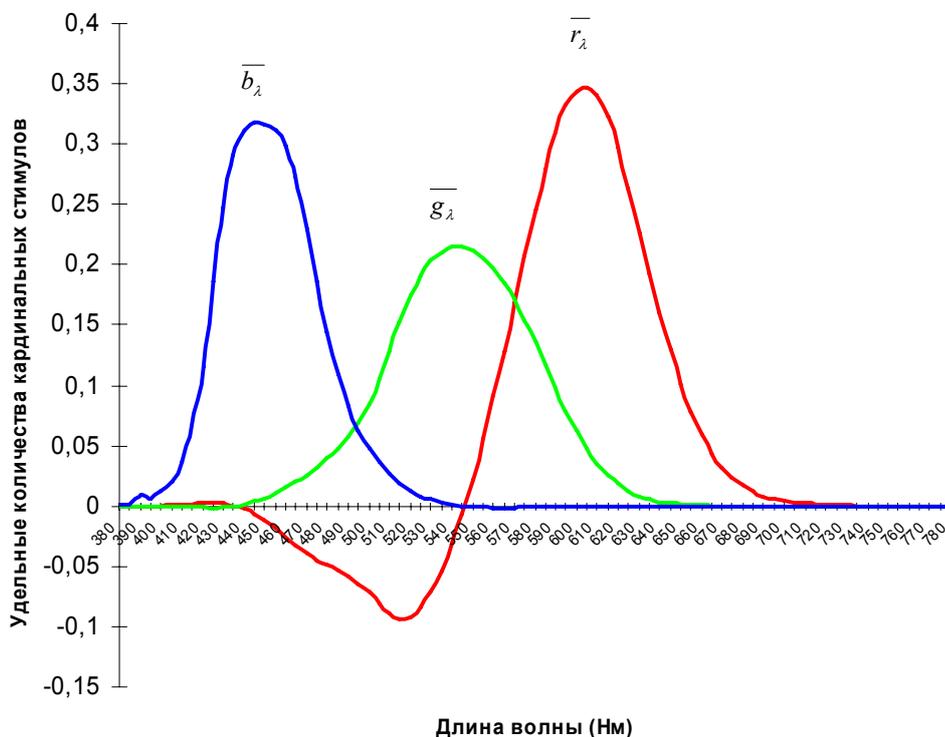


Рис. 7, б. Кривые сложения для наблюдателя колориметра CIE RGB (стандартного наблюдателя). Хорошо видны отрицательные значения на участке 440-550 нм по г-стимулу — это означает, что для визуального уравнивания спектрально-чистых стимулов с длиной волны от 450 до 550 нм к ним потребовалось добавить определенное количество г-стимула. Также понадобились небольшие добавки g-стимула на участке 380-430 нм и b-стимула на участке 550-670 нм (в силу малых значений они не видны на графике).

Обращаем особое внимание на то, что кривые сложения не имеют прямого отношения к широко известным кривым спектральной чувствительности колбочек сетчатки. **Кривые сложения стандартного наблюдателя CIE — это отображение психофизиологической реакции человека на 35 равноэнергетических узкополосных стимулов в видимом диапазоне длин волн электромагнитного излучения.**

Поскольку колориметр CIE RGB (колориметр Гилда) обладает хоть и очень большим, но все же ограниченным цветовым охватом, то с целью ухода от нежелательных отрицательных значений и для удобства вычислений Международный Осветительный Конгресс принял в качестве стандартного абстрактный колориметр CIE XYZ (предложен Д.Б. Джаддом [D.V. Jadd, США], как выход из создавшегося положения), который получен путем замены реальных кардинальных стимулов колориметра Гилда (колориметр CIE RGB) на нереальные кардинальные стимулы (XYZ) и реального опорного белого света — на гипотетический равноэнергетический световой поток (Ideal illuminant) с условной интенсивностью 100 cd/m<sup>2</sup>.

Стимулы XYZ подобраны так, что в кривых сложения колориметра CIE XYZ, при их расчете из кривых сложения CIE RGB, не возникает отрицательных значений (рис. 7 в), а яркостная энергетическая составляющая приходится только на стимул «Y».

Нереальные стимулы XYZ получены путем пропорционального увеличения длин сторон т.н. цветового треугольника, описание которого было бы лишним в данной статье.

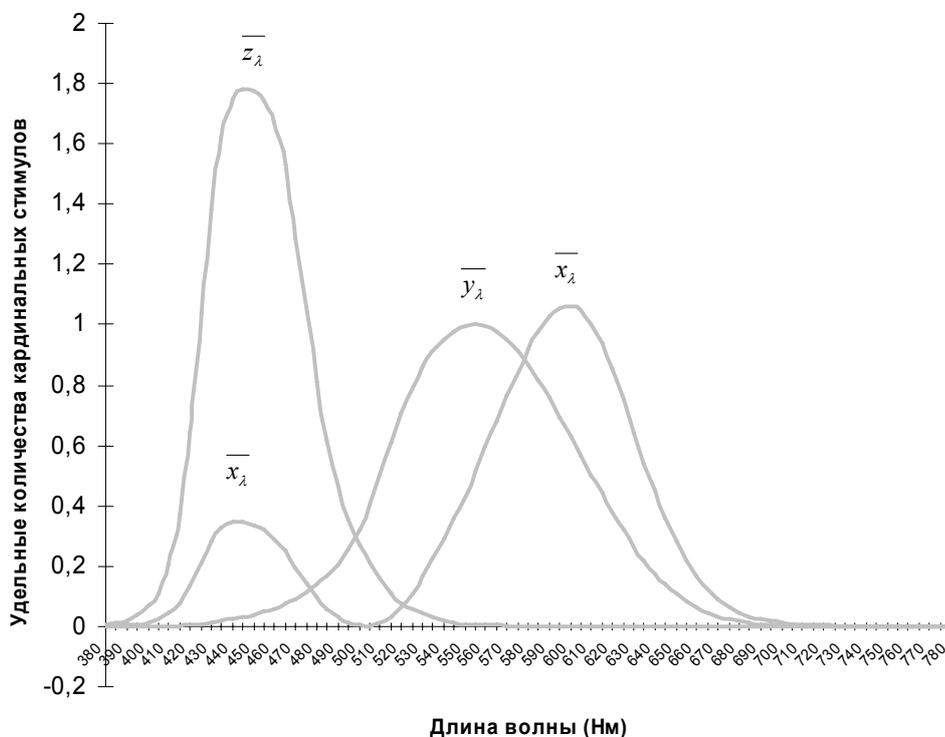


Рис. 7, в. Кривые сложения для наблюдателя абстрактного колориметра CIE XYZ. Хорошо видно, что отрицательных значений нет.

Поскольку стимулы колориметра CIE XYZ нереальны, на графике они обозначены серым.

Ни самого колориметра CIE XYZ, ни его кардинальных стимулов физически не существует (и не может существовать), но данная координатная система очень удобна для осуществления перехода от одного реального колориметра к другому реальному колориметру.

Ниже показана система уравнений, связывающая колориметр «1» с абстрактным колориметром XYZ<sup>8</sup>:

$$R_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{x}_\lambda S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{y}_\lambda S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{z}_\lambda S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv v_{11}X + v_{12}Y + v_{13}Z$$

$$G_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{x}_\lambda S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{y}_\lambda S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{z}_\lambda S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv v_{21}X + v_{22}Y + v_{23}Z$$

$$B_1 = \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{x}_\lambda S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{y}_\lambda S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \bar{z}_\lambda S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} \equiv v_{31}X + v_{32}Y + v_{33}Z$$

<sup>8</sup> Линейные коэффициенты абстрактного колориметра CIE XYZ мы будем обозначать строчными буквами конца греческого алфавита. Для простоты изложения материала в данной и нижеприведенных формулах опущен специальный нормирующий коэффициент.

где  $\overline{x_\lambda}$ ,  $\overline{y_\lambda}$ ,  $\overline{z_\lambda}$  — ординаты кривых сложения колориметра CIE XYZ для данной длины волны;  $S_{r,1,\lambda}$ ,  $S_{g,1,\lambda}$ ,  $S_{b,1,\lambda}$  — спектральное распределение энергии кардинальных стимулов колориметра «1»;  $W_{1\lambda}$  — спектральное распределение энергии опорного белого света колориметра «1».

Таким образом, если некое цветовое ощущение измерено колориметром «1» и известны кривые спектрального распределения энергии (СРЭ) кардинальных стимулов и опорного белого света этого колориметра, то, пользуясь кривыми сложения абстрактного колориметра CIE XYZ, всегда можно выразить цветовые координаты данного цветового ощущения, полученные на колориметре «1», в цветовой координатной системе колориметра CIE XYZ.

К примеру, если цветовое ощущение, измеренное на колориметре «1», представляет собой цветовые координаты:  $\beta_1 R_1 \beta_2 G_1 \beta_3 B_1$ , то ответ на вопрос «Каковы будут цветовые координаты этого ощущения в системе XYZ?» можно получить, произведя вычисления по формулам:

$$\begin{aligned}\omega_1 X &= \beta_1 \left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{r,1,\lambda} W_{1,\lambda} \right) \\ \omega_2 Y &= \beta_2 \left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{g,1,\lambda} W_{1,\lambda} \right) \\ \omega_3 Z &= \beta_3 \left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{b,1,\lambda} W_{1,\lambda} \right)\end{aligned}$$

И наоборот: зная цветовые координаты ощущения в XYZ и зная спектральные характеристики кардинальных стимулов и опорного белого света колориметра «2», всегда можно рассчитать необходимое соотношение кардинальных стимулов колориметра «2», воспроизводящее данное цветовое ощущение:

$$\begin{aligned}k_1 R_2 &= \frac{\omega_1 X}{\left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{r,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{r,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{r,2,\lambda} W_{2,\lambda} \right)} \\ k_2 G_2 &= \frac{\omega_2 Y}{\left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{g,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{g,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{g,2,\lambda} W_{2,\lambda} \right)} \\ k_3 B_2 &= \frac{\omega_3 Z}{\left( \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_\lambda} S_{b,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_\lambda} S_{b,2,\lambda} W_{2,\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_\lambda} S_{b,2,\lambda} W_{2,\lambda} \right)}\end{aligned}$$

где  $S_{r,2,\lambda}$ ,  $S_{g,2,\lambda}$ ,  $S_{b,2,\lambda}$  — спектральное распределение энергии кардинальных стимулов колориметра «2»;  $W_{2,\lambda}$  — спектральное распределение энергии опорного белого света колориметра «2».

Таким образом, цветовая координатная система абстрактного колориметра CIE XYZ может выступать в роли связующего математического пространства (connecting space) — то есть пространства, связывающего различные реальные (или нереальные, абстрактные) трехстимульные визуальные колориметры.

**Наличие кривых сложения избавляет от необходимости измерения кардинальных стимулов и опорного белого света одного реального колориметра другим реальным колориметром, да и в целом от применения визуальных колориметров, так как дает возможность массового применения дешевых и удобных спектральных измерений в колориметрических целях, что, пожалуй, является одним из главных достоинств системы CIE XYZ на сегодняшний день.**

Еще одним важным достоинством системы является то, что все возможные цветовые ощущения человека имеют уникальные *положительные* цветовые координаты в ЦКС CIE XYZ. Обратное утверждение неверно: поскольку кардинальные стимулы XYZ нереальны, не все математически возможные значения координат соответствуют реальным цветовым ощущениям человека.

Поскольку для CIE XYZ существуют кривые сложения, то достаточно знать кривую спектрального распределения энергии любого стимула, чтобы определить XYZ-координаты цветового ощущения, которое данный стимул вызывает.

$$\sum_{\lambda=380}^{730} \overline{x_{\lambda}} S_{\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{y_{\lambda}} S_{\lambda} + \sum_{\lambda=380}^{730} \overline{z_{\lambda}} S_{\lambda} \equiv \tau_1 X + \tau_2 Y + \tau_3 Z$$

где  $\overline{x_{\lambda}}$ ,  $\overline{y_{\lambda}}$ ,  $\overline{z_{\lambda}}$  — ординаты кривых сложения колориметра CIE XYZ для данной длины волны;  $S_{\lambda}$  — спектральное распределение энергии в цветовом стимуле. Спектральное распределение энергии опорного белого света в данных формулах не учитывается, так как в колориметре CIE XYZ опорный белый свет «является» равноэнергетическим ( $W_{\lambda} = 1$ ).

**Примечание:**

По стандартным формулам всегда можно пересчитать координаты XYZ в координаты любой другой привычной и удобной ЦКС (L\*a\*b\*, Lch и т.п.). Современная компьютерная техника такие простые вычисления производит молниеносно, выдавая в ответ на спектральное измерение стимулов координаты вызываемых ими ощущений в интересующей пользователя ЦКС. Координаты XYZ подчас даже не отображаются в рабочих окнах программ, но необходимо помнить, что первичный расчет цветовых координат по спектральным данным всегда производится для абстрактного колориметра CIE XYZ.

Несмотря на свою нереальность, абстрактный колориметр CIE XYZ гарантирует достоверность обмена данными о цветовых ощущениях людей, что удобно и что используется по сей день, являясь международным колориметрическим стандартом.

\* \* \*

Теперь попробуем взглянуть на монитор как на трехстимульный визуальный колориметр и ответить на два вопроса: «Насколько это устройство отвечает требованиям, предъявляемым к колориметру?» и «Можно ли применить к монитору все те математические операции, о которых говорилось выше?». Для ответа на эти вопросы вспомним требования, предъявляемые к трехстимульному визуальному колориметру, и сопоставим их со свойствами монитора.

**1. Кардинальность — стимулы колориметра должны быть кардинальными.**

Смешивая все три исходных стимула монитора можно получить результирующий стимул, вызывающий ощущение белого цвета. Поэтому можно утверждать, что стимулы монитора кардинальны.

Нас не должно смущать то обстоятельство, что спектральное распределение энергии в кардинальных стимулах монитора представляет собой не узкую полосу (как в классическом колориметре CIE), а некую, необязательно равномерную, кривую (рис. 8, 9).

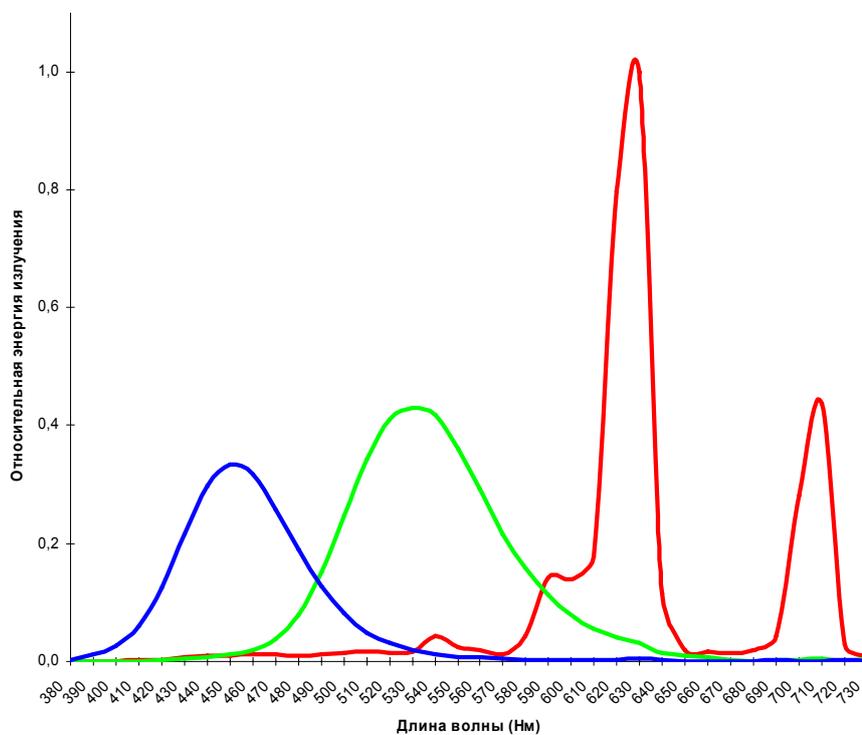


Рис. 8. Спектральное распределение энергии при полной интенсивности кардинальных стимулов CRT-монитора Mitsubishi Diamond Pro 930.

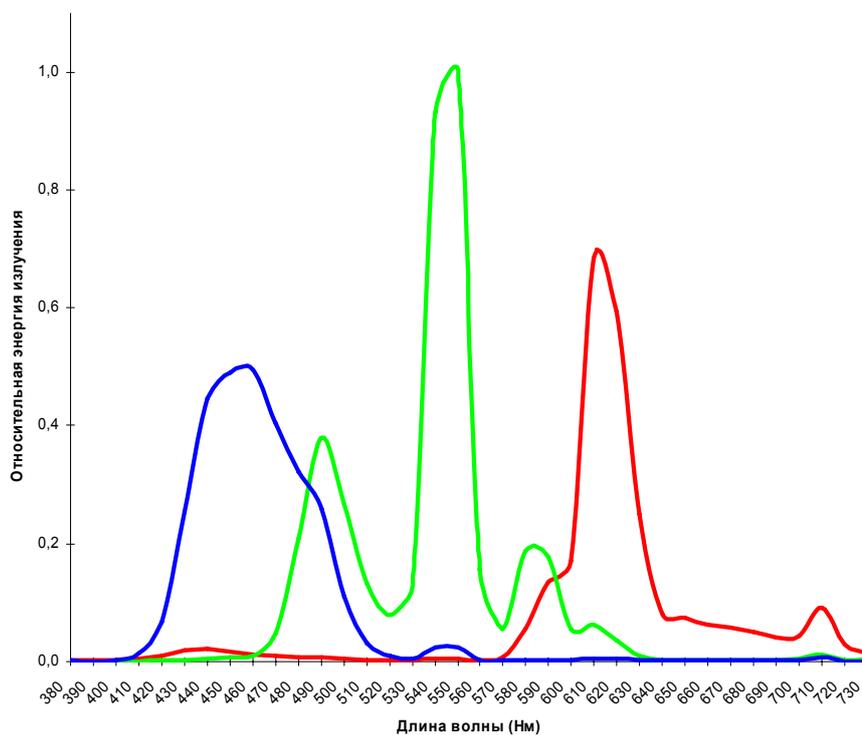


Рис. 9. Спектральное распределение энергии при полной интенсивности кардинальных стимулов TFT-монитора Eizo GC 18.

Спектральная «неузкополосность» кардинальных стимулов мониторов сказывается лишь на цветовом охвате мониторов, который существенно меньше, чем охват классического колориметра CIE RGB (рис. 10), что не лишает стимулы кардинальности.

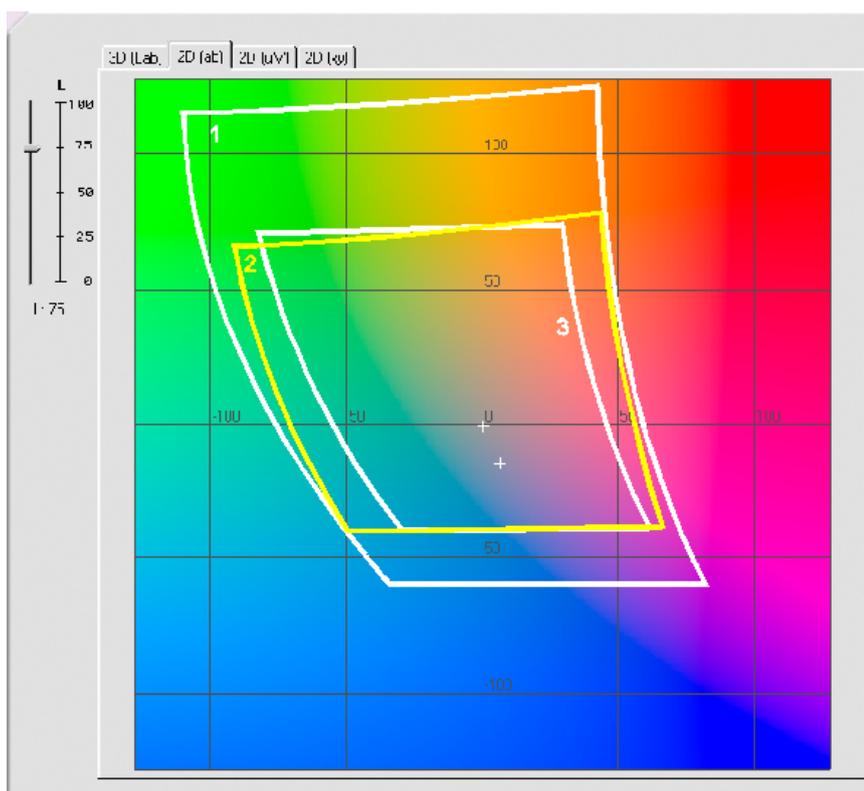


Рис. 10. ЦКС  $L^*a^*b^*$ , уровень светлоты L75. 1 — цветовой охват колориметра CIE RGB; 2 — цветовой охват CRT-монитора Mitsubishi Diamond Pro 920; 3 — цветовой охват TFT-монитора Eizo GC18.

Итак, мы видим, что первое требование, предъявляемое к трехстимульному колориметру, мониторами выполняется.

## 2. Наличие источника «белого света», который принимается за опорный.

Особенностью мониторов как колориметров, является то, что они призваны выполнять только одну из двух возможных функций колориметров: мониторы предназначены лишь для воспроизведения заданного цветового ощущения, но не используются для измерений<sup>9</sup>. Поэтому монитор не имеет самостоятельного источника опорного белого света, но мы *выбираем* свет того источника, который будет задавать уровень цветовой адаптации в процессе работы с данным монитором. Регулируя соотношение интенсивностей кардинальных стимулов монитора, мы добиваемся равенства ощущений от выбранного белого света и от поверхности экрана, задавая тем самым единицы измерения колориметра. Выбранный белый свет и будет являться опорным белым светом. К примеру, в качестве опорного мы можем выбрать свет лампы просмотрного места или свет некоего стандартного *гипотетического* источника (D50, D65 и т.д.).

В мониторах с LCD-дисплеями присутствует источник белого света, но он не может

<sup>9</sup> Сегодня для цветковых измерений используются спектрофотометры — приборы, регистрирующие спектральное распределение энергии, исходящей от объекта. Получив СРЭ данного объекта, программное обеспечение спектрофотометров по ординатам кривых сложения стандартного наблюдателя абстрактного колориметра CIE XYZ определяет цветковые координаты. Затем при необходимости следует пересчет в другие ЦКС. Однако при помощи калиброванного монитора, белая точка которого уравнивается с белой точкой просмотрного места, возможно произвести визуальное измерение окрашенной поверхности в координатной системе данного монитора. Такое упражнение может иметь академический или дидактический интерес.

являться опорным, так как недоступен наблюдателю и с его помощью нельзя осветить что-либо, поскольку световой поток полностью перекрыт жидкокристаллическими «затворами» (подробнее см. главу «Передняя панель дисплея (OSD) и ее настройки»). Поэтому колориметрически видеосистема, оснащенная LCD-дисплеем, принципиально не отличается от видеосистемы с CRT-дисплеем.

Второе требование, предъявляемое к трехстимульному колориметру, мониторами также выполняется.

**3. Энергетическая вариабельность — энергетическая интенсивность кардинальных стимулов должна быть изменяема в определенном необходимом диапазоне. При этом СРЭ кардинального стимула должно изменяться пропорционально по всему протяжению видимого спектра.**

Интенсивность кардинальных стимулов монитора меняется в зависимости от потенциала, приложенного к каналам, то есть в конечном счете в зависимости от значения в файле изображения. Спектральное распределение энергии кардинальных стимулов меняется более или менее пропорционально (рис. 11, 12).

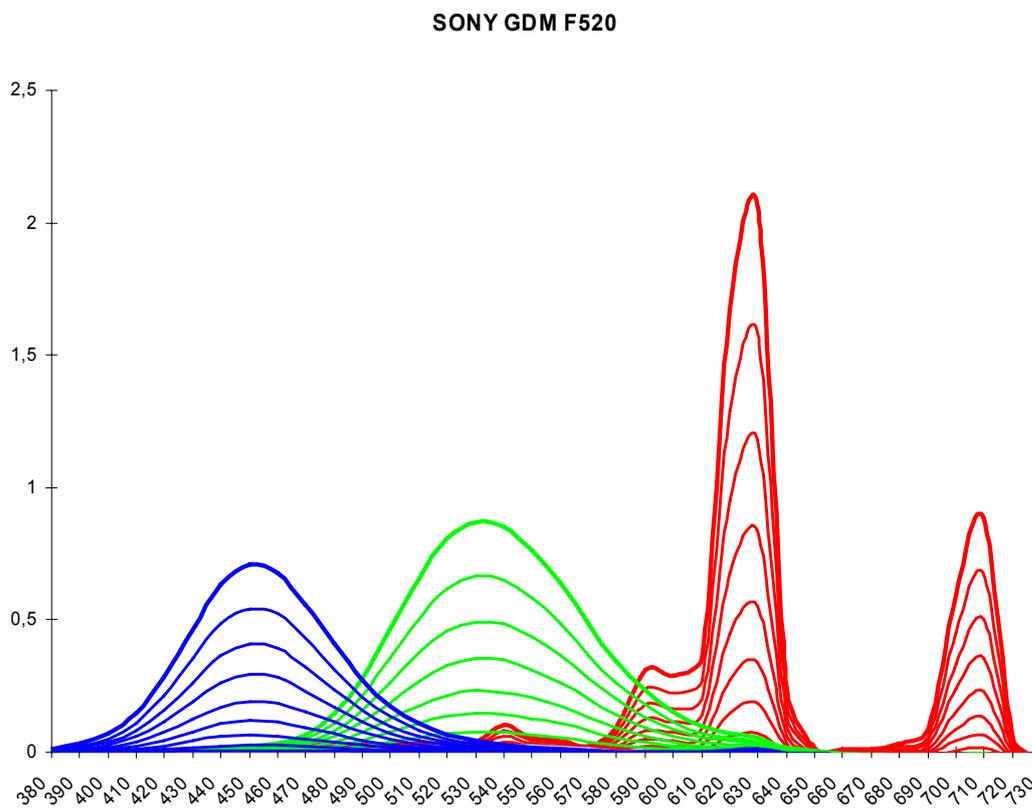


Рис. 11. Кривые спектрального распределения энергии кардинальных стимулов монитора с CRT-дисплеем SONY GDM F520 в полном диапазоне интенсивностей с шагом 12%.

### LCD Sony SDM-N80

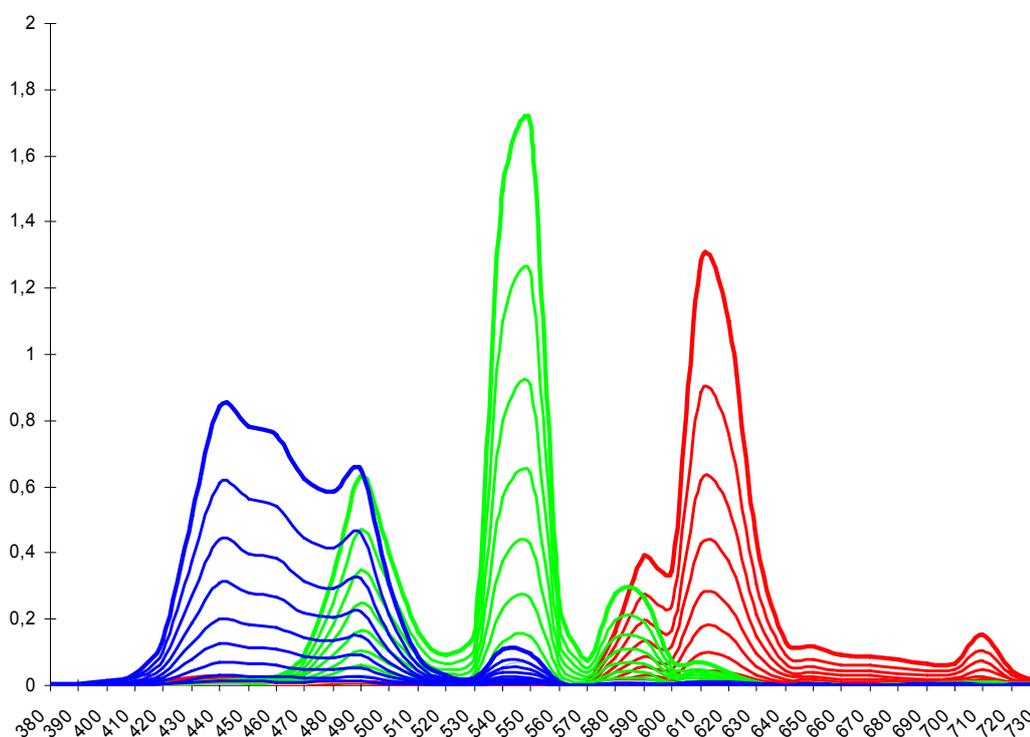


Рис. 12. Кривые спектрального распределения энергии кардинальных стимулов монитора с LCD-дисплеем SONY SDM-N80 в полном диапазоне интенсивностей с шагом 12%.

Пропорциональное изменение кривой спектрального распределения при изменении интенсивности кардинальных стимулов обеспечивает постоянство их цветового тона (Hue) (при меняющихся светлоте и насыщенности), и таким образом, мы можем говорить о *хроматической стабильности* кардинальных стимулов монитора.

Третье требование, предъявляемое к трехстимульному колориметру, мониторами в целом выполняется.

#### **4. Независимость управления энергетической интенсивностью кардинальных стимулов — изменение интенсивности одного кардинального стимула не должно приводить к изменению интенсивности двух других.**

Данное требование выполняется не полностью: неидеально сфокусированный луч, идущий от катодной пушки, часто задевает соседние субпиксели, приводя последние к т.н. паразитному свечению. Даже высококлассные мониторы не лишены эффекта паразитной подсветки люминофоров. Однако незначительная подсветка соседних субпикселей не приводит к выраженным искажениям в цветопроизведении, поэтому в целом можно говорить о том, что монитор удовлетворяет требованию независимости управления энергетической интенсивностью стимулов. Чем выше качество монитора, тем лучше сфокусирован луч, тем точнее он попадает в нужное место и тем больше удовлетворяет монитор требованию независимости управления интенсивностью кардинальных стимулов.

**Примечание:**

Существенное влияние на «поведение» луча, а следовательно, на независимость управления кардинальными стимулами монитора оказывает качество и состояние информационного кабеля, соединяющего видеокарту с дисплеем. В колориметрической настройке монитора нельзя пренебрегать состоянием информационного кабеля — он должен быть максимально высокого качества и исправен.

Четвертое требование, предъявляемое к трехстимульному колориметру, мониторами в целом выполняется.

**5. Временная стабильность — характер стимулов не должен меняться со временем.**

Характер кардинальных стимулов монитора неизменен в течение достаточно длительного промежутка времени работы. Тем не менее требуется регулярная проверка и внесение изменений в параметры настройки монитора, о чем рассказано в главе «Патронаж колориметрически настроенных мониторов».

Пятое требование, предъявляемое к трехстимульному колориметру, мониторами в целом выполняется.

\* \* \*

Таким образом, с некоторыми оговорками монитор можно считать трехстимульным визуальным колориметром. Следовательно, к мониторам применимы все те математические расчеты, которые используются для визуальных трехстимульных колориметров. Такой монитор-колориметр имеет свою собственную цветовую координатную систему, поэтому:

**Если известны цветовые координаты стимула, заданные в ЦКС какого-либо колориметра (в компьютерных системах — это, как правило, RGB-данные абстрактных колориметров или вычисленные XYZ-координаты), мы всегда сможем пересчитать их в цветовые координаты ЦКС монитора (аппаратные значения RGB) и получить требуемый цветовой стимул на экране.**

Фактически монитор представляет собой не единичный колориметр, а совокупность большого количества колориметров, число которых равно числу физических пикселей экрана.

Каждая тройка субпикселей (то есть физический пиксел) электронно-лучевой трубки (TFT-панели) фактически представляет собой визир колориметра, а их общая сумма — поверхность экрана.

В идеале все эти колориметры должны иметь строго одинаковые параметры. На практике это требование полностью удовлетворить невозможно. Поэтому качество дисплея определяется еще и тем, насколько он отвечает данному требованию.

В дальнейшем мы будем говорить о мониторе как о единичном колориметре, подразумевая, что вся совокупность колориметров (пикселей), образующих монитор, имеет одинаковые колориметрические параметры.

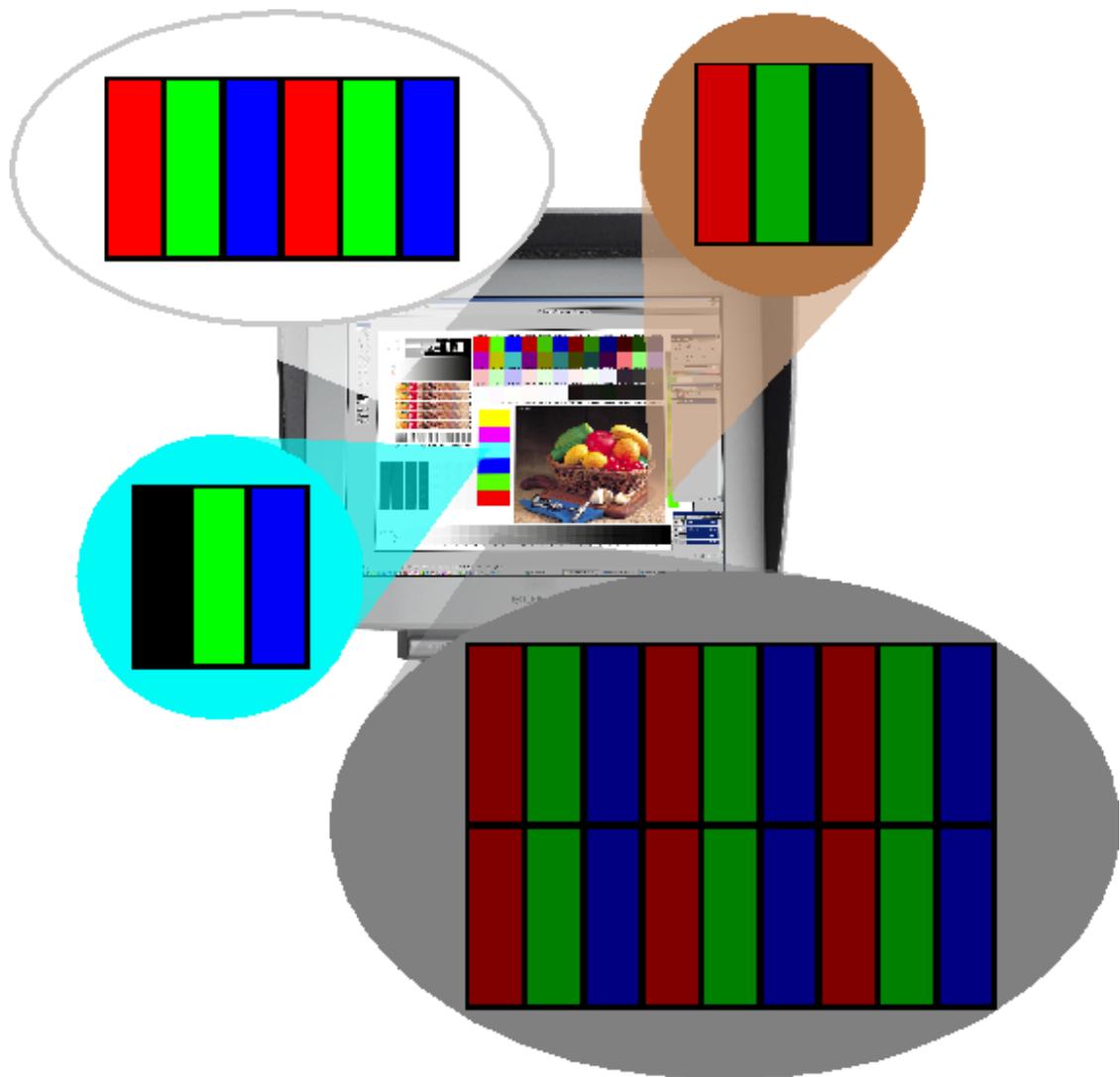


Рис. 13. Показаны тройки и группы троек субпикселей монитора, воспроизводящие разные цвета. Фоновая заливка овалов демонстрирует воспроизводимый цвет.

Как было показано выше, шкала измерений трехстимульного визуального колориметра CIE RGB (колориметра Гилда) энергетически линейна, вследствие чего энергетически линейна и шкала измерений абстрактного колориметра CIE XYZ, который, напомним, является линейным математическим производным колориметра CIE RGB. Однако «шкала измерений» монитора-колориметра энергетически нелинейна по ряду причин, о которых мы будем говорить в следующей главе. Поэтому невозможно непосредственно написать матрицу перехода между колориметром XYZ и монитором, так как матричные преобразования применимы только к уравнениям с линейными коэффициентами.

В следующих главах нам предстоит разобраться в том, чем вызвана энергетическая нелинейность монитора-колориметра, а также в том, как выполняется требуемый матричный пересчет.

## Нелинейность монитора-колориметра

Классический трехстимульный визуальный колориметр энергетически линеен во всех своих составляющих. С монитором-колориметром дело обстоит совершенно иначе: он энергетически нелинеен, и истоки его нелинейности придется искать в истории развития компьютерных технологий.

Мы знаем, что электронно-лучевые трубки телевизоров и дисплеев энергетически нелинейны. Физические принципы, лежащие в основе их работы, задают соотношение между напряжением входного сигнала и интенсивностью свечения люминофора как нелинейную функцию, близкую к степенной.

$$I = kV^\gamma$$

где:  $I$  — интенсивность свечения люминофора;  $V$  — напряжение на катодных пушках;  $k$  — линейный коэффициент.

Степень данной функции, обозначаемую греческой буквой «гамма», принято называть «гаммой нелинейности кинескопа» или «нативной гаммой» (Native gamma). Как правило,  $\gamma=2,2-2,6$ .

Для того чтобы компенсировать нелинейность кинескопа, можно было бы внести необходимое предискажение сигнала в видеоадаптер компьютера, что сделало бы систему видеоадаптер-монитор энергетически линейной. Однако вычислительные мощности персональных ЭВМ того времени позволяли кодировать яркости только в 8-битном представлении (256 уровней). Но восьмибитное энергетически-линейное попиксельное кодирование яркостей объектов изображения операционной системой<sup>10</sup> — т.н. «линейное кодирование» информации о возможных яркостях пикселей — приводит к неприемлемым потерям в качестве изображений.

**Потери качества связаны с тем, что изменение интенсивности ощущения светлоты нелинейно зависит от изменения энергетической интенсивности стимула, вызывающего это ощущение.**

Нелинейность восприятия яркостей объектов не является недостатком зрительной системы человека — наоборот, она является эволюционно-отточенной приспособительной реакцией, обеспечивающей эффективное распознавание деталей теневых объектов: в тенях, как правило, кроется опасность, и в тенях же, как правило, скрываются от опасности животные, пригодные в пищу. Подобная нелинейность восприятия — свойство всех сенсорных систем человека, но **форма кривой нелинейности различна для различных органов чувств**<sup>11</sup>.

В целом отклонение от линейности при восприятии энергетических яркостей можно объяснить эффектом т.н. *латерального торможения зрительных нейронов*. Эффект латерального («соседского») торможения нейронов — это общефизиологическое свойство сенсорных систем человека, в том числе его органа зрения. Если бы эффекта латерального торможения нейронов не было, то график зависимости ощущений светлоты от энергетической интенсивности стимулов представлял бы собой прямую линию, а диапазон

<sup>10</sup> Попиксельное кодирование яркостей объектов изображения операционной системой (кодирование информации о яркости пикселей) — это процесс, при котором некоему диапазону энергетических яркостей объекта ставится в соответствие определенный диапазон чисел. При восьмибитном представлении таких чисел 256 (255+0).

<sup>11</sup> Вопреки широко распространенному мнению, нелинейность восприятия яркостей зрением человека не описывается законом Бугера-Вебера-Фехнера.

воспринимаемых энергетических яркостей был бы очень узким и не соответствовал бы жизненным потребностям.

В нелинейность восприятия высоких яркостей (при данной точке адаптации по белому) определенную лепту вносит также временная задержка, необходимая для восстановления молекул родопсина колбочек.

Выявлением соотношения между ощущением светлоты и интенсивностью стимулов в течение многих десятилетий занимались такие ученые, как Бугер, Вебер, Фехнер, Гельмгольц и др., а также специалисты СТЕ (Д.Б. Джадд). Результатом этих исследований явилась формула, предложенная Д.Б. Джаддом (т.н. «полином Джадда»).

$$Y = 1,2219L - 0,23111L^2 + 0,23951L^3 - 0,021009L^4 + 0,0008404L^5$$

где: Y — энергетическая яркость стимула; L — ощущение светлоты.

Особенность формулы состоит в том, что аналитически выразить зависимость L от Y невозможно, поскольку полиномы степени 5 (и выше) неразрешимы в радикалах, согласно теореме Абеля.

Сегодня общепринятым аналитическим выражением зависимости L от Y (используется в расчетах СТЕ), позволяющим выполнять аналитические преобразования, является следующая зависимость:

Для  $L < 8$

$$L = \frac{24389}{27} Y \quad (1)$$

Для  $L > 8$

$$L = 116Y^{\frac{1}{3}} - 16 \quad (2)$$

где L — ощущение светлоты; Y — энергетическая яркость.

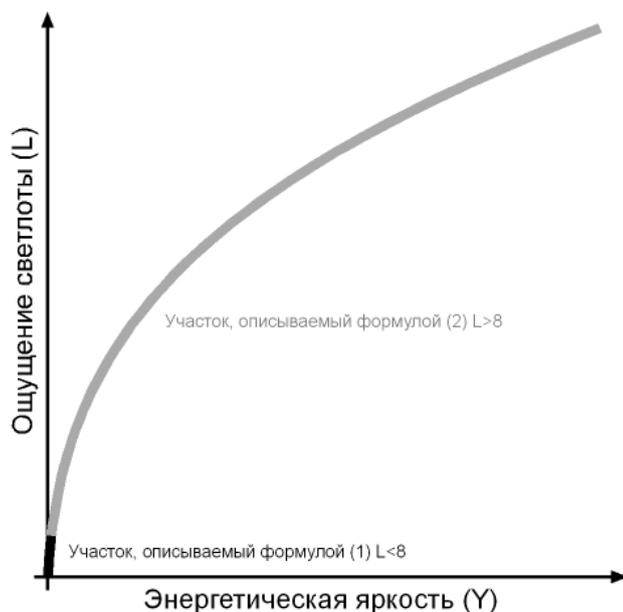


Рис. 14. Зависимость ощущения светлоты (L) от энергетической яркости (Y).

Нелинейность восприятия яркостей приводит к тому, что энергетически линейный градиент будет восприниматься осветленным, и в первую очередь — в тенях, а точка, воспринимаемая как средне-серая, окажется резко смещенной в сторону черного поля (рис. 15, а).

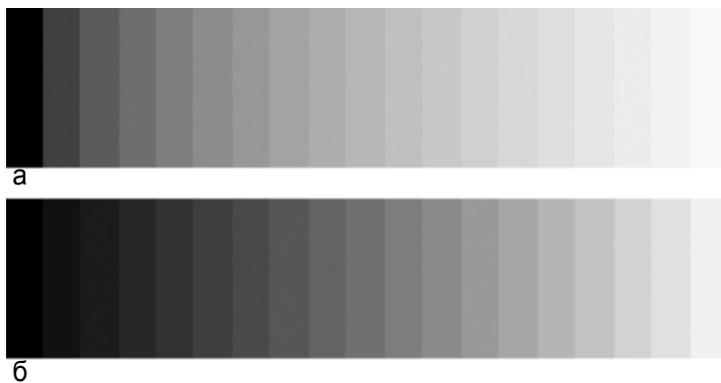


Рис. 15, а) — так выглядит энергетически-линейный градиент (20 градаций + максимальная — белый фон); б) — для сравнения: градиент линейный по ощущению светлоты (энергетически-нелинейный).

Но вернемся к кодированию яркостей и для простоты изложения будем пока вести рассуждения на примере серых полутоновых изображений.

Если восьмибитное кодирование (дискретизацию) яркостей выполнить энергетически линейно, то есть так, чтобы уровни энергетической яркости по всему диапазону отличались друг от друга на одну и ту же величину, то количество уровней, которое придется на ту часть диапазона яркостей, которая воспринимается как тени, будет меньше, чем количество градаций светлоты, которое может различить человек в этой части диапазона. И это несмотря на то, что общее количество градаций светлоты, различаемых человеком, около 128, то есть примерно вдвое меньше, чем общее количество энергетических уровней (256). В то же время в светах будет наблюдаться обратная картина: количество уровней дискретизации будет

неоправданно большим: гораздо большим, чем количество градаций, которое может различить человек (рис. 16).

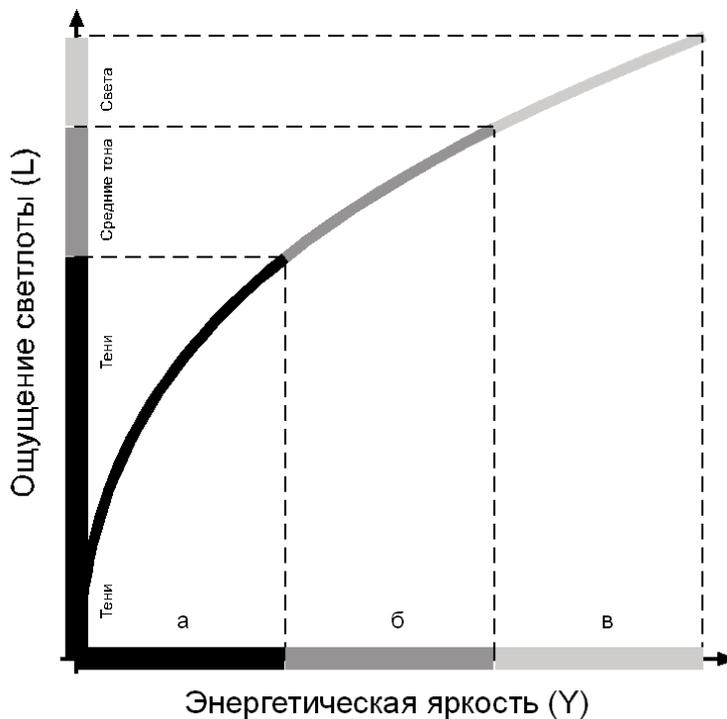


Рис. 16. Отрезок «а» меньше, чем отрезок «тени», — недостаток значений. Отрезок «б» более или менее равен отрезку «средние тона» — относительно равное соотношение. Отрезок «в» больше, чем отрезок «света», — избыток значений.

Таким образом, при восьмибитном линейном кодировании полутонового изображения, с одной стороны, невозможно сохранить информацию о всех деталях, которые человек различает в тенях, а с другой стороны — часть значений, приходящихся на света, оказывается избыточной, так как различия между этими значениями не будут востребованы.

Выходом из создавшегося положения стала *нелинейная дискретизация (нелинейное кодирование) информации о яркостях*. При нелинейной восьмибитной дискретизации отличие одного уровня энергии от другого не является постоянной величиной, то есть шаг дискретизации подчиняется некоторой выбранной зависимости, которая во избежание потерь визуальной информации должна приближать распределение уровней энергетической яркости к функции восприятия яркостей человеком. Введение при кодировании такой нелинейной зависимости называют *предыскажением*.

Для удобства решения технических задач в качестве функции предыскажения выбрали степенную зависимость вида  $y = x^{\frac{1}{\gamma}}$ . Величину  $\gamma$  принято называть «гамма-предыскажения». На платформе РС была принята величина гаммы-предыскажения 2,2 ( $1/2,2=0,45$ ), а на платформе Mac — 1,8 ( $1/1,8=0,55$ ). Графики обеих функций в сравнении с графиком нелинейности восприятия яркостей показаны на рис. 17.

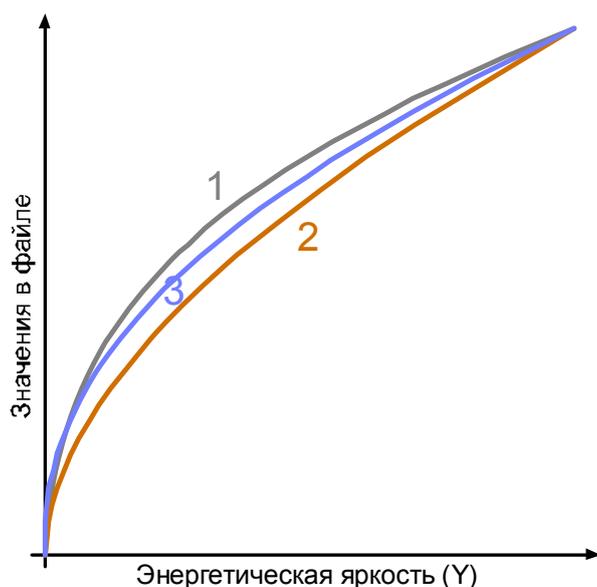
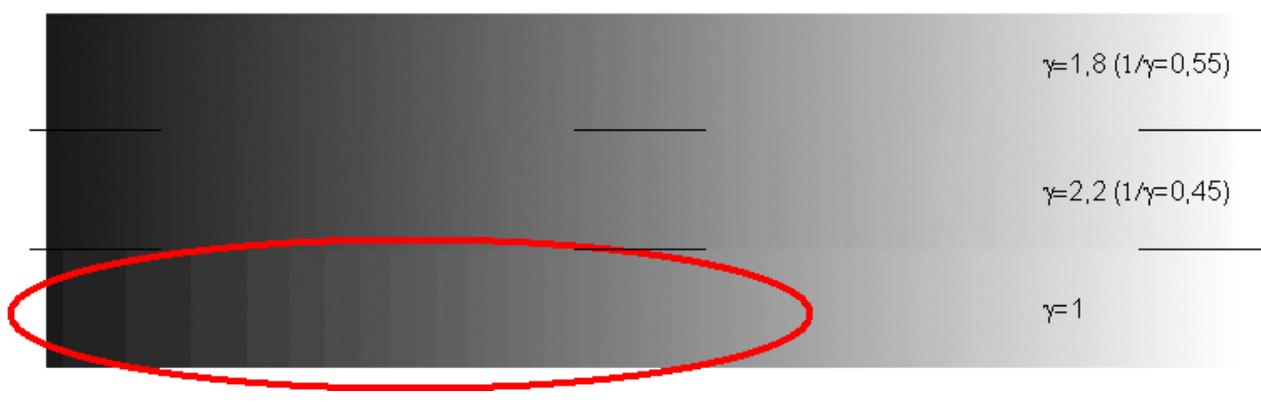


Рис. 17. 1 — кривая нелинейности восприятия яркостей зрением человека; 2 —  $\gamma=1/1,8$ ; 3 —  $\gamma=1/2,2$ .

И первый, и второй варианты предсказания несколько отличаются от функции нелинейности световосприятия, но распределение яркостей в обоих случаях не приводит к столь ощутимым потерям градаций, как при линейной восьмибитной дискретизации (рис. 18)<sup>12</sup>.



<sup>12</sup> Предположим, что в изображении присутствуют объекты с диапазоном яркостей от 0 до 255 Cd/m<sup>2</sup> (что примерно соответствует яркости белой поверхности при освещенности 4750lux — солнце в дымке). При линейном кодировании яркостей изменение яркости на 1 Cd/m<sup>2</sup> будет соответствовать изменению значения в файле на 1. В этом случае мы говорим, что шаг дискретизации постоянен и равен единице (1 ΔCd/m<sup>2</sup>).

При нелинейной восьмибитной дискретизации с гамма 2,2 шаг дискретизации в глубоких тенях очень мал и нарастает очень плавно. К примеру, изменение значения в файле с 5 на 6 будет соответствовать изменению яркости всего лишь на 0,02204 Cd/m<sup>2</sup>, что примерно в 45 раз меньше единицы. В то же время изменение значения в файле с 230 на 231 будет соответствовать изменению яркости на 1,94886 Cd/m<sup>2</sup>, что больше единицы почти вдвое. Только в середине диапазона шаг дискретизации близок к единице. Из сказанного выше понятно, что в системах, где информация о яркостях кодируется в 16 разрядах чисел (65536 значений на диапазон) и выше, необходимость в нелинейном предсказании отпадает. К примеру, изменение яркости на 1 Cd/m<sup>2</sup> (из выбранного нами диапазона 0-255 Cd/m<sup>2</sup>) при 16-битном энергетически линейном кодировании будет описано 257 числами, то есть шаг дискретизации составит примерно 0,0039 ΔCd/m<sup>2</sup>. На некоторых компьютерных платформах, к примеру таких, как Silicon Graphics, где разрядность дискретизации составляет 16 бит и выше, предсказание не вводится, так как в нем нет необходимости.

Рис. 18. Красным обведен теновой участок, на котором хорошо видны потери градаций при восьмибитном линейном кодировании.

Итак, гамма-предыскажение было положено в основу работы всех систем восьмибитного кодирования яркостей, что позволило сохранять максимум визуальной информации об объекте. Любые энергетически-линейные значения должны были подвергаться гамма-предыскажению. К примеру, при сканировании предыскажение сигнала осуществлялось аппаратно, то есть на аналоговой стадии процесса за счет работы электрических схем<sup>13</sup>.

При *создании* 8-битного изображения с помощью графической программы (например, векторного редактора) кодирование также осуществлялось (и осуществляется сегодня) с гамма-предыскажением.

Однако информация, искаженная при кодировании, не могла быть достоверно визуализирована линейной видеосистемой — изображение при визуализации оказалось бы слишком светлым. Необходимо было компенсировать внесенное предыскажение.

Выход из положения оказался очень прост, и в целом он был известен заранее из опыта работы телевидения: воспользовались изначальной нелинейностью кинескопа, о которой мы говорили в начале данной главы. На платформе РС она удачно компенсировала гамма-предыскажение, вносимое при кодировании (2,2). Несмотря на то, что идеальной компенсации предыскажения все-таки не происходило (гамма монитора оказывалась больше, чем гамма предыскажения), до поры не стали предпринимать каких-либо дополнительных действий, так как разница со средней нелинейностью кинескопов составляла десятые доли гамма.

На компьютерной платформе Macintosh (гамма предыскажения 1,8) расхождение было существенным. Потребовалось внести дополнительный технологический узел в схему видеоадаптеров, частично компенсирующий нелинейность кинескопов и доводящий результирующую степень нелинейности системы видеокарта-монитор до  $\gamma=1,8$ .

Результирующую степень нелинейности системы видеокарта-монитор принято называть «*гаммой компенсации предыскажения*» или кратко «*гамма-компенсация*». На платформе РС видеокарта не участвовала в этом процессе, а гамма-компенсация осуществлялась только за счет изначальной гаммы дисплея.

В целом задача более или менее достоверного отображения серых полутоновых изображений на экранах компьютерных дисплеев разных платформ была решена. Понятно, что чем ближе нелинейность видеосистемы к степенной функции и чем ближе величина гамма компенсации к гамме предыскажения, тем ближе общая система к линейной и тем точнее воспроизведение тонов кодированного изображения на экране дисплея.

При восьмибитном RGB-кодировании информации о цвете гамма-предыскажение вносится в каждый канал. Впоследствии каждый канал подвергается гамма-компенсации. Таким образом, **система видеокарта — дисплей представляет собой трехстимульный визуальный колориметр с энергетически-нелинейными шкалами отсчета.**

До появления систем управления цветовоспроизведением (CMS) было принято положение, что любой реальный монитор-колориметр по своим параметрам должен строго соответствовать колориметру, принятому в качестве стандартного на данной компьютерной платформе. Кардинальные стимулы стандартных платформенных колориметров в системе абстрактного колориметра XYZ имеют значения цветовых координат, равные усредненным

---

<sup>13</sup> Сегодня гамма-предыскажение при сканировании осуществляется чаще всего программно, то есть при конверсии программным обеспечением современных сканеров (или цифровых фотокамер) их первичных линейных 12-14-разрядных данных в 8-битовое представление.

значениям цветовых координат люминофоров большого числа дисплеев Apple и большого числа дисплеев IBM PC.

На платформе Macintosh таким стандартизированным колориметром был принят условный колориметр Apple RGB, а на платформе PC — колориметр sRGB (который, кстати, являлся телевизионным стандартом еще с 1961 г). Таким образом, **RGB-значения в файле изображения являлись цветовыми координатами в координатной системе стандартного колориметра данной платформы и без каких-либо изменений подавались на вход видеокарты.** Гамма-предыскажение, заложенное в файл, аналоговым путем устранялось гамма-компенсацией видеосистемы, что в итоге обеспечивало энергетически-линейное воспроизведение яркостей (рис. 19).



Рис. 19. Общая схема, иллюстрирующая процессы гамма-предыскажения и гамма-компенсации. Результатом является линейная передача яркостей объектов сцены пикселями дисплея.

Из сказанного ясно, что качество цветовоспроизведения в первую очередь зависело от того, насколько точно кардинальные стимулы, опорный белый свет и гамма-компенсация видеосистемы соответствовали принятым стандартам (см. табл.).

Абстрактный колориметр	Цветовые координаты кардинальных стимулов в системе CIE XYZ	Цветовые координаты опорного белого света в системе CIE XYZ	Гамма предыскажения
Apple RGB	$R = 0,45X + 0,245Y + 0,0252Z$ $G = 0,316X + 0,672Y + 0,141Z$ $B = 0,184X + 0,0833Y + 0,922Z$	$W = 0,95045X + 1Y + 1,08905Z$ (6500°K)	1,8
sRGB	$R = 0,412X + 0,213Y + 0,0193Z$ $G = 0,358X + 0,715Y + 0,119Z$ $B = 0,18X + 0,0722Y + 0,95Z$	$W = 0,95045X + 1Y + 1,08905Z$ (6500°K)	2,2

Компьютеры Apple изначально создавались для решения графических задач, и компания строго следила за качеством своих видеосистем, то есть за их соответствием платформенному стандарту. На платформе PC (IBM) данной проблеме не уделялось должного внимания, и

качество цветовоспроизведения долгое время было неудовлетворительным.<sup>14</sup> Причина низкого качества цветовоспроизведения мониторами зачастую состояла в том, что дешевый дисплей являлся (и является) продуктом массового, серийного производства, при котором не приходится рассчитывать на строгое соответствие функции изменения интенсивности его (монитора) кардинальных стимулов степенной (и уж тем более на равенство степени по трем каналам).

Только в конце 90-х годов прошлого века производители графических плат стали выделять в памяти видеоадаптеров дополнительную управляемую область, именуемую LUT (Look Up Table). LUT состоит из трех каналов и позволяет вносить коррекцию в функцию изменения интенсивности каждого из кардинальных стимулов монитора-колориметра, приводя ее к степенной (с желаемым значением степени). Расчет значений, которые необходимо ввести в каналы LUT, производит специальное программное обеспечение, речь о котором пойдет ниже. Таким образом, LUT — это последняя инстанция на пути к цифро-аналоговому преобразованию и выходу сигнала на дисплей.

**Примечание:**

Т.н. «цифровые» дисплеи могут воспринимать как аналоговый, так и цифровой сигналы видеокарты и имеют собственный LUT-модуль, управление которым осуществляется при помощи программного обеспечения данного дисплея. Результирующая двойная LUT-коррекция гаммы монитора позволяет добиваться результатов очень высокого качества.

## Принцип работы CMS с монитором

Выше мы рассмотрели схему визуализации файлов, использовавшуюся в период становления графических систем. В современных DTP-системах за достоверность визуализации файлов изображения отвечает Color Management System (CMS). Именно на нее возложена обязанность расчета цветовых координат для монитора-колориметра.

В современной ситуации, когда вычислительные мощности достаточны даже для преобразований 16-битной информации о цвете (не говоря уже о восьмибитной), у нас есть возможность достаточно точного расчета значений удельных коэффициентов для кардинальных стимулов конкретного монитора-колориметра с целью достоверного воспроизведения цветового ощущения, информация о котором заложена в файл изображения.

Помимо Apple RGB и sRGB, сегодня существует большое количество разнообразных абстрактных колориметров (Adobe RGB, WideGamut RGB, ProPhoto RGB и т.д.), в данных которых может быть представлена в файле информация о цветовых ощущениях. Для визуализации таких файлов необходимо выполнить матричные преобразования из цветовых координат какого-либо абстрактного колориметра, в которых представлено изображение в файле, в цветовые координаты монитора-колориметра.

Как сказано выше (в главе «Монитор как трехстимульный визуальный колориметр»), для того чтобы составить матрицу перехода между двумя колориметрами, необходимо выразить кардинальные стимулы одного колориметра в координатной системе другого колориметра. Однако выполнить визуальное измерение кардинальных стимулов абстрактного колориметра с помощью монитора-колориметра невозможно, и, следовательно, невозможно

---

<sup>14</sup> Сегодня, когда для визуализации файлов применяется CMS, различия в качестве цветовоспроизведения между двумя платформами не существует. Однако до сих пор жив стереотип о предпочтительности использования компьютеров Macintosh для решения графических задач.

непосредственно связать их. Но если известны CIE XYZ-координаты кардинальных стимулов обоих колориметров (и абстрактного, и реального), то связь между колориметрами осуществима и можно построить матрицу перехода.

В то же время мы помним, что матричные преобразования выполнимы только для систем линейных уравнений, тогда как данные абстрактных и реальных мониторов-колориметров чаще всего нелинейны (по уже известным причинам). Поэтому схема расчета значений, которые подаются на видеокарту для визуализации файла изображения, должна выглядеть следующим образом:

1. Нормирование данных файла изображения — то есть переход от RGB-данных к удельным коэффициентам.
2. Гамма-компенсация предыскажений — то есть энергетическая *линеаризация* данных.
3. Составление и решение уравнения матричного перехода.
4. Введение необходимого гамма-предыскажения.
5. Ренормировка данных и отправка окончательных значений на видеокарту.

Проиллюстрируем сказанное на примере визуализации видеосистемой Matrox P650+ дисплей SONY GDM F520 (для краткости будем называть ее «монитор SONY») пиксела изображения, информация о цвете которого записана в RGB-данных абстрактного колориметра Adobe RGB. Наша задача — выполнить пересчет в RGB-данные монитора SONY.

1. Нормируем 8-битные значения в файле ( $R_{Adobe}, G_{Adobe}, B_{Adobe}$ ), разделив каждое на 255 и получив коэффициенты  $r_{\gamma, Adobe}, g_{\gamma, Adobe}, b_{\gamma, Adobe}$ .  
Индекс  $\gamma$  указывает на наличие гамма-предыскажения.

2. Выполним гамма-компенсацию предыскажения (линеаризацию), возведя коэффициенты  $r_{\gamma, Adobe}, g_{\gamma, Adobe}, b_{\gamma, Adobe}$  в степень, равную степени предыскажения:

$$r_{\gamma, Adobe}^{\gamma} R_{Adobe} + g_{\gamma, Adobe}^{\gamma} G_{Adobe} + b_{\gamma, Adobe}^{\gamma} B_{Adobe} \equiv r_{Adobe} R_{Adobe} + g_{Adobe} G_{Adobe} + b_{Adobe} B_{Adobe}$$

где прописные литеры курсивного начертания обозначают кардинальные стимулы колориметра.

3. Кардинальные стимулы колориметров Adobe RGB и SONY задаются уравнениями (1) и (2):

$$\begin{array}{l} R_{Adobe} = \varsigma_{11}X + \varsigma_{12}Y + \varsigma_{13}Z \\ G_{Adobe} = \varsigma_{21}X + \varsigma_{22}Y + \varsigma_{23}Z \\ B_{Adobe} = \varsigma_{31}X + \varsigma_{32}Y + \varsigma_{33}Z \\ W_{Adobe} = \varsigma_{41}X + \varsigma_{42}Y + \varsigma_{43}Z \end{array} \quad (1) \quad \text{и} \quad \begin{array}{l} R_{SONY} = \rho_{11}X + \rho_{12}Y + \rho_{13}Z \\ G_{SONY} = \rho_{21}X + \rho_{22}Y + \rho_{23}Z \\ B_{SONY} = \rho_{31}X + \rho_{32}Y + \rho_{33}Z \\ W_{SONY} = \rho_{41}X + \rho_{42}Y + \rho_{43}Z \end{array} \quad (2)$$

где для системы уравнений (1):  $\varsigma_{11} \dots \varsigma_{43}$  известны из спецификации колориметра Adobe RGB, а для системы уравнений (2):  $\rho_{11} \dots \rho_{43}$  известны благодаря *измерениям* кардинальных стимулов SONY с помощью фотоэлектрического колориметра или спектрофотометра.

Проведя преобразования, описанные в главе «Монитор как трехстимульный визуальный колориметр», приходим к уравнению (3):

$$\begin{bmatrix} r_{SONY} \\ g_{SONY} \\ b_{SONY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{Adobe} \\ g_{Adobe} \\ b_{Adobe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \\ \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

**Полученное выражение является уравнением перехода от удельных коэффициентов условного абстрактного колориметра к удельным коэффициентам реального монитора-колориметра.**

4. После решения уравнения (3) остается выполнить предсказание данных, возведя линейные значения  $r_{SONY}, g_{SONY}, b_{SONY}$  в степень  $\frac{1}{\gamma}$ .

$$r_{SONY}^{\frac{1}{\gamma}} R_{SONY} + g_{SONY}^{\frac{1}{\gamma}} G_{SONY} + b_{SONY}^{\frac{1}{\gamma}} B_{SONY} \equiv r_{\gamma,SONY} R_{SONY} + g_{\gamma,SONY} G_{SONY} + b_{\gamma,SONY} B_{SONY}$$

Очевидно то, что при CMS-визуализации совершенно необязательно, чтобы гаммы-предсказания обоих колориметров были одинаковыми. Более того, нет даже необходимости в том, чтобы в каждом из колориметров поканальные гаммы были равны между собой.

**Главное, чтобы кривая нелинейности монитора по трем каналам соответствовала степенной функции и чтобы все значения гамма для обоих колориметров были достоверно известны.**

**Примечание:**

Вообще говоря, необязательно, чтобы предсказание отвечало степенной функции. Теоретически функция может быть любой: необходимо только, чтобы она описывалась аналитически.

5. Последний этап: ренормировка данных — умножение полученных коэффициентов  $r_{\gamma,SONY}, g_{\gamma,SONY}, b_{\gamma,SONY}$  на 255 и получение искоемых значений  $R_{SONY}, G_{SONY}, B_{SONY}$ .

Привычным упрощенным выражением такого перехода является запись:

$$R_{Adobe} G_{Adobe} B_{Adobe} \longrightarrow XYZ \longrightarrow R_{SONY} G_{SONY} B_{SONY},$$

но она не совсем корректна, так как вопреки распространенному мнению координаты XYZ для пикселей изображения не вычисляются, что видно из формулы (3). CIE XYZ используется только в качестве математического пространства связи между колориметрами. С нашей точки зрения, более правильной является запись:

$$R_{Adobe} G_{Adobe} B_{Adobe} \xrightarrow{XYZ} R_{SONY} G_{SONY} B_{SONY}$$

Мы рассмотрели способ вычисления RGB-аппаратных данных (цветовых координат) монитора, когда значения в файле изображения представлены в координатах абстрактных (или реальных) трехстимульных колориметров. Однако достаточно часто значения в файле представляют собой L\*a\*b\*-координаты или аппаратные данные устройств, не являющихся трехстимульными колориметрами (RGB-output-данные, CMYK-данные и др.). В этих случаях применяется следующая схема:

1. Определение по профайлу устройства L\*a\*b\*-координат, соответствующих данным в файле изображения.

**Примечание:**

В случае, если в файл изображения непосредственно записаны L\*a\*b\*-координаты, данный пункт отсутствует в схеме визуализации.

2. Пересчет по формулам взаимно однозначного соответствия L\*a\*b\*-координат в удельные коэффициенты CIE XYZ.

3. Пересчет удельных коэффициентов CIE XYZ по стандартным колориметрическим матрицам в удельные коэффициенты монитора-колориметра.

4. Введение предискажения по требуемой гамма.

5. Ренормировка данных и получение значений  $R_{SONY}$ ,  $G_{SONY}$ ,  $B_{SONY}$ .

**Примечание:**

Если схему работы целиком построить на основе 16-битного представления информации о цвете, то можно было бы полностью отказаться от гамма-предискажений и, соответственно, от гамма-компенсаций, что серьезно упростило бы работу CMS и позволило бы уйти от неизбежных ошибок вычислений. Такая схема, на наш взгляд, является очень перспективной, однако, ее внедрение потребовало бы колоссальной перестройки всей мировой системы Digital Publishing, что вряд ли осуществимо в ближайшее время.

\* \* \*

Итак, мы подошли к тому, чтобы определить мероприятия, превращающие систему видеокарта–монитор в управляемый и предсказуемый трехстимульный визуальный колориметр.

Первое мероприятие заключается в:

— выборе источника опорного белого света и уравнивании его с помощью кардинальных стимулов монитора-колориметра;

— выборе желаемой гамма и точной приводке к ней видеосистемы с помощью LUT видеоадаптера.

Такое мероприятие называется *калибровкой монитора (calibration)*.

Второе мероприятие заключается в:

— определении CIE XYZ-координат кардинальных стимулов монитора-колориметра;

— уточнении получившихся CIE XYZ-координат опорного белого света;

— уточнении получившихся значений гамма для каждого кардинального стимула;

— записи полученной информации в ICC-файл, то есть созданию профайла монитора-колориметра.

Такое мероприятие называется *характеризацией монитора (characterization)*.

**Таким образом, колориметрическая настройка монитора складывается из двух последовательно выполняемых операций: калибровки и характеристики.**

## Механизмы адаптации зрения. Освещение на рабочем месте

В главе «Монитор как трехстимульный визуальный колориметр» мы говорили о том, что от классического трехстимульного визуального колориметра видеосистему отличает то, что она не имеет самостоятельного источника опорного белого света, поэтому в качестве опорного мы вынуждены выбирать свет какого-либо источника.

Казалось бы: выбор опорного белого света — это первый и важнейший шаг в колориметрической настройке монитора как самостоятельного цветовоспроизводящего устройства. На самом деле то, какой именно «белый» свет будет выбран в качестве опорного, не имеет решающего значения. В большинстве случаев на экране монитора мы наблюдаем не отдельно взятый цветовой стимул, а **изображения**, содержащие множество разнообразных цветовых стимулов. В этих случаях, как и в повседневной жизни, зрение включает психофизиологические механизмы адаптации, в частности механизм т.н. *цветовой адаптации* (chromatic adaptation).

Наряду с другими видами адаптации зрения к меняющимся условиям наблюдения (о которых мы будем говорить ниже) цветовая адаптация обеспечивает т.н. *константность цветовосприятия* человеком. Константность цветовосприятия базируется на механизме цветовой адаптации и гарантирует достоверность информации о предметах окружающего мира в непрерывно меняющихся условиях освещения.

### **Важное примечание:**

Нужно четко понимать, что перед зрением человека стоит биологическая задача ориентирования в окружающем мире, а не физическая задача регистрации распределения электромагнитных энергий. Точная регистрация распределения электромагнитных энергий — это задача измерительных приборов. **Адаптация зрения сформировалась в процессе эволюции как механизм, который гарантирует константность идентификации объектов окружающего мира в непрерывно меняющихся условиях освещения.** Поэтому адаптация не является «зрительным обманом» или «несовершенством глаза», как часто утверждают, а, наоборот, — совершеннейшим механизмом, обеспечивающим выживание.

К примеру, букет из колокольчиков, васильков и ромашек одинаково выглядит как при дневном свете, так и при свете ламп накаливания: колокольчики остаются сине-фиолетовыми, васильки — голубыми, а ромашки — белыми с желтой сердцевинкой. Цветовые ощущения остаются неизменными, несмотря на то, что спектральный состав света, отраженного от поверхностей, изменяется радикально: благодаря цветовой адаптации мы не замечаем никаких существенных отличий в окраске листьев и цветков.

То же самое происходит, если взять два колориметрически отлаженных монитора с различным по цвету «белым» (различной цветовой температурой белой точки). Если эти два монитора не находятся одновременно в нашем поле зрения, мы, переходя от одного к другому, не увидим разницы в представлении ими одного и того же файла. В первый момент нам может показаться, что имеет место смещение общего колорита изображения, но спустя 1-2 минуты мы уже не в состоянии мысленно найти отличия, так как неизбежно происходит хроматическая адаптация.

### **Примечание:**

Цветовая температура источника света — это условная величина, указывающая на то, что цветовое ощущение, вызываемое данным источником освещения, совпадает с цветовым ощущением, которое вызвало бы планковское абсолютно черное тело, нагретое до той или иной температуры по шкале Кельвина.

Если же два монитора с разной цветовой температурой белой точки одновременно находятся в поле зрения наблюдателя, разница в изображениях будет видна все время.

Из сказанного следует, что выбор цветовой температуры опорного белого света не имеет принципиального значения и лежит в широком диапазоне значений. Критерием выбора цветовой температуры может служить цветовой охват, который у большинства мониторов максимален в районе 6500K по белой точке. При настройке монитора для тех работ, при которых предполагается сравнение изображения на экране с изображением на других носителях (скажем, с полиграфическим оттиском), выбор опорного белого света не может быть произвольным, о чем будет сказано в дальнейшем.

Подчеркнем, что все сказанное о цветовой адаптации справедливо лишь в отношении изображений, состоящих из набора цветowych стимулов, вызывающих *разнообразные* цветовые ощущения в *широком цветовом диапазоне*.

Еще один вид адаптации, влияющий на восприятие изображения, — *адаптация по контрасту*. Дело в том, что независимо от реального энергетического контраста сцены или изображения наше зрение стремится сохранить неизменным **восприятие** общего контраста, то есть обеспечить полноценный *визуальный контраст*. Обеспечение полноценного визуального контраста также эволюционно обусловлено необходимостью получить максимально возможное количество информации об окружающем мире при изменении соотношения энергетических яркостей объектов сцены.

**Примечание:**

Энергетический контраст сцены (изображения) — это разность между минимальным и максимальным уровнями световой энергии в данной сцене (изображении). Численно выражается как отношение максимального уровня энергии к минимальному или как десятичный логарифм этого отношения. Для отражающих (пропускающих) свет объектов определяется как разность между максимальной и минимальной оптическими плотностями.

В результате адаптации по контрасту самый энергетически яркий участок экрана будет приниматься нашим зрением за т.н. *точку белого*, а участок с наименьшей энергией будет приниматься за *точку черного*. Таким образом, точка белого станет опорным белым светом, задающим единицы измерения монитора-колориметра, а точка черного определит нулевые значения кардинальных стимулов, **независимо от того, какова их реальная энергетическая яркость**.

Зрение способно адаптироваться в достаточно широком диапазоне энергетических контрастов. Но этот диапазон имеет нижнюю границу. Наименьший энергетический контраст, при котором еще возможна адаптация и обеспечение полноценного визуального контраста, по данным различных исследований составляет 1:32 — 1:64, то есть 1,5D — 1,8D. Таким образом, если в результате настройки энергетический контраст монитора оказался не ниже 1,8D, то можно быть уверенным в высоком качестве визуализации содержимого графических файлов по параметру визуального контраста.

**Примечание:**

Из сказанного ясно, что не стоит акцентировать внимание на наличии определенного уровня светимости черной точки монитора и не следует пытаться минимизировать его **любой ценой**: в выборе уровня светимости черной точки нужно руководствоваться иными критериями (о них речь пойдет ниже) — желателен лишь заключительный контроль общего энергетического контраста монитора.

Высококачественный полиграфический оттиск самостоятельно выглядит контрастно, имеет полный тоновый диапазон с большим количеством градаций от белого до черного. Однако при одновременном сравнении его с тем же изображением на экране монитора он

выглядит совершенно неудовлетворительным: резко теряет контраст и тоновые градации. В то же время при одновременном сравнении данного изображения на экране с его слайд-оригиналом на ярком просмотрном месте происходит аналогичная метаморфоза — контраст изображения на мониторе и количество его тоновых градаций резко падают. В самом деле, энергетические контрасты данных изображений весьма различны: полиграфический оттиск имеет энергетический контраст порядка 1,9D, монитор порядка 2,4D, слайд — 3,4D.

Описанное изменение визуального контраста происходит только при **одновременном** сравнении изображений, имеющих разный энергетический контраст. Если рассматривать изображения последовательно и через некоторый небольшой промежуток времени, то все три изображения будут иметь одинаковый визуальный контраст и будут выглядеть одинаково хорошо.

То же касается и изображений на дисплеях: при последовательном рассматривании одного и того же изображения на экранах мониторов с разной энергетической яркостью по белой и черной точкам разницы в ощущениях не возникнет за счет адаптации зрения по контрасту. Но при одновременном рассматривании полноценным визуальным контрастом будет обладать изображение на экране того монитора, энергетический контраст которого выше.

Отправной точкой общей адаптации зрения к условиям освещения всегда является *адаптация по яркости*, или, как часто говорят, *адаптация по белому*.

**Важное примечание:**

Когда мы говорим «адаптация по белому», то имеем в виду, что некий стимул определяет не только яркостную адаптацию, но и влияет на хроматическую адаптацию. Т.е. этот стимул имеет максимальную энергетическую яркость. Бывает так, что некий узкополосный стимул (скажем, луч лазера) вызывает ощущение красного, при любом уровне энергии он будет восприниматься как красный и, соответственно, не может служить отправной точкой хроматической адаптации, однако, он определяет адаптацию яркостную. В этом случае мы не можем сказать, что по данному стимулу происходит адаптация по белому, и можем говорить только лишь о яркостной адаптации.

В большинстве же случаев, когда мы рассматриваем изображения, самый яркий участок будет задавать именно адаптацию по белому и будет называться *точкой белого*.

Энергетическая яркость точки белого, то есть объекта, имеющего максимум световой энергии в данной сцене, задает общую чувствительность зрения, или, как еще говорят, определяет уровень общей световой *сенсibilизации* зрения в данных условиях наблюдения. Чем выше уровень максимальной энергии в сцене (энергетический уровень белого), тем выше уровень энергии, принимаемой зрением за черное.

Адаптация по белому — это начальный и определяющий этап адаптации по контрасту и хроматической адаптации.

Итак, мы видим, что общая адаптация зрения к данным условиям наблюдения складывается из:

- адаптации по белому;
- адаптации по контрасту;
- хроматической адаптации.

**Примечание:**

Существуют и другие виды адаптации зрения (например, адаптация по хроматическому контрасту, локальная адаптация и т.д.), но их описание слишком усложнило бы изложение материала.

Важно отметить, что влияние объектов сцены на адаптацию зависит от их относительных размеров. Так, адаптация по белому и, соответственно, адаптация по контрасту зависят от того, какова относительная площадь самого энергетически яркого

предмета в поле зрения. Площадь такого предмета должна быть минимально необходимой для того, чтобы произошла адаптация. По некоторым данным относительная минимально необходимая площадь колеблется в пределах 1/200-1/100 от общей площади поля зрения. Все объекты, обладающие большей энергетической яркостью, но с площадью меньше необходимой, воспринимаются зрением, как блики, не влияющие на общую адаптацию.

Таким образом, общая адаптация зрения человека, работающего с изображением, определяется тем, каковы уровни световых энергий **в поле зрения** и каков их спектральный состав.

В рабочем помещении цветокорректоров находится не только дисплей, но различные предметы, которые также могут влиять на адаптацию. Если в окружении дисплея отыщется объект с большим уровнем световой энергии, чем белая точка монитора, то именно этот объект определит общую адаптацию зрения.

К примеру, если позади дисплея в поле зрения находится наглухо зашторенное окно, то отдергивание штор приведет к резкому падению контраста изображения на экране, так как появление яркого объекта большой площади (окно или световое пятно на стене от дневного света) моментально приведет как минимум к смене уровня адаптации «по яркости» и, соответственно, по контрасту (рис. 20), а скорее всего, и к смене хроматической адаптации.



Рис. 20

Точно так же произойдет смена адаптации, если в поле зрения оператора находится крупный черный предмет, который отражает световой энергии меньше, чем излучает черная

точка монитора. Точку черного в адаптации оператора теперь определит этот предмет, а контраст изображения на экране понизится (рис. 21). Черное на экране перестанет быть черным и будет восприниматься как темно-серое.

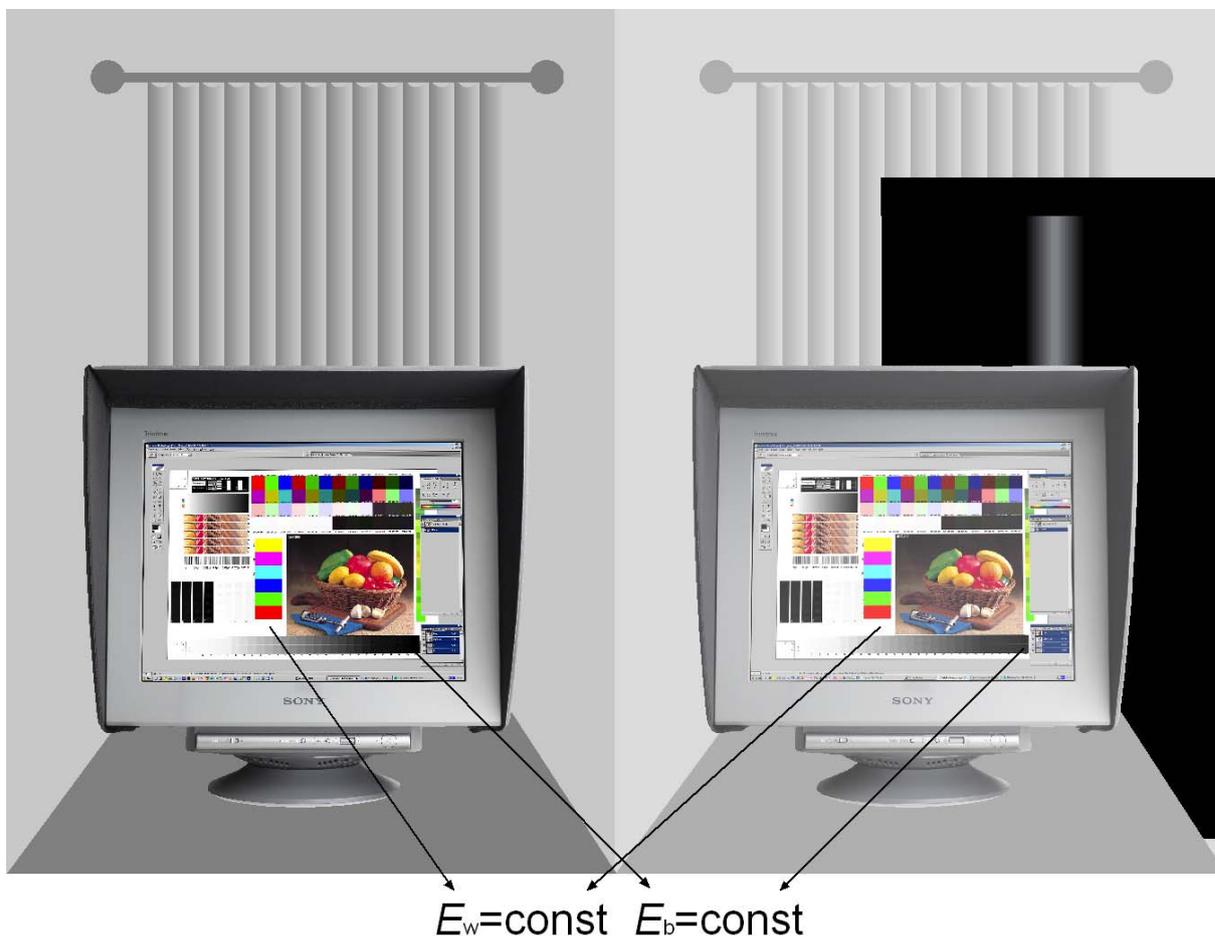
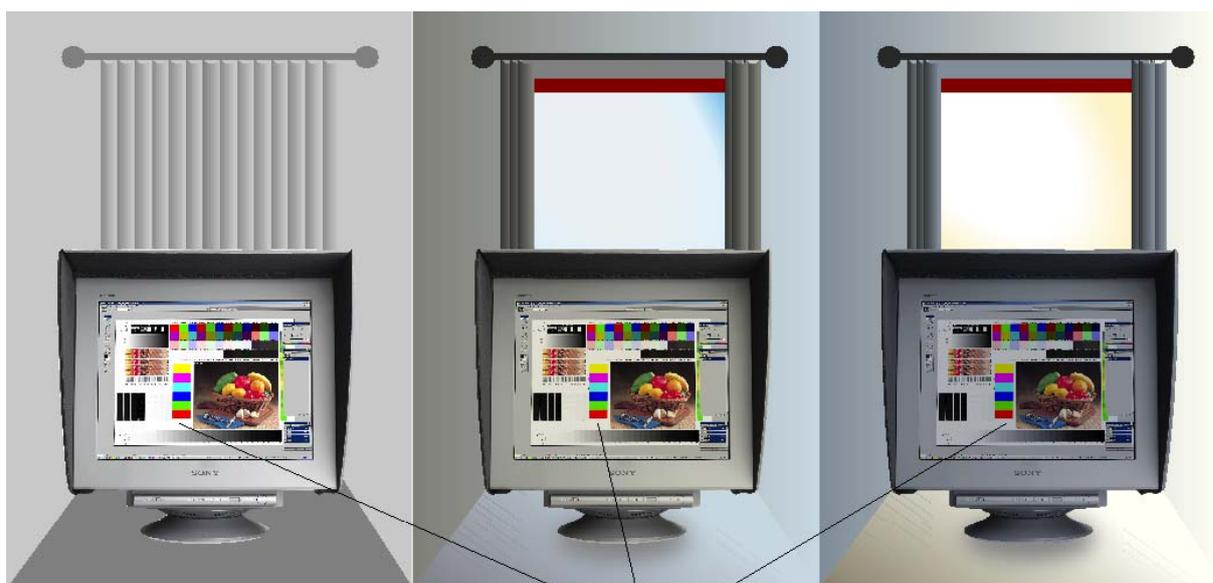


Рис. 21

Если в рабочем помещении цветокорректоров присутствует дневной свет, то адаптация будет непрерывно меняться вместе с естественными изменениями энергетической яркости и цветовой температуры дневного света. Соответственно окажется нестабильным и восприятие изображения на экране: станут меняться его колорит и контраст. Последнее неизбежно приведет к ошибкам цветокоррекции (рис. 22).



$$\alpha_1 R + \alpha_2 G + \alpha_3 B = \text{const}$$

Рис. 22

**Поэтому попытки колориметрической настройки мониторов в помещениях, где присутствует дневной свет, обречены на неудачу и лишены всякого смысла.**

Для обеспечения необходимой адаптации зрения цветокорректоров требуется выполнение следующих условий:

— *полная изоляция помещения от дневного света;*

Изоляция от дневного света не требует больших финансовых затрат и может быть осуществлена на любом предприятии. Желательно, чтобы помещение вообще не имело оконных проемов, но если окна есть, то их нужно наглухо закрыть светонепроницаемой серой (не черной) бумагой или плотной серой светонепроницаемой тканью. Установка подвижных жалюзи или штор не рекомендуется, так как требование полной светоизоляции в этом случае будет регулярно нарушаться сотрудниками.

Изоляция от внешнего освещения приводит к тому, что помещение становится непрветриваемым. Поэтому настоятельно рекомендуется установка split-кондиционера, обеспечивающего подкачку свежего воздуха, постоянство температуры и относительной влажности воздуха в комнате. Экономить средства, отказываясь от приобретения кондиционера, нельзя: это быстро приведет к ухудшению здоровья сотрудников, снижению качества их работы и перегреву оборудования.

— *энергетическая яркость белой точки монитора должна обладать максимальной световой энергией среди предметов, находящихся в поле зрения оператора;*

Из поля зрения цветокорректоров должны быть убраны любые открытые источники освещения (стандартные настольные лампы, бра и проч.), сильно бликующие предметы (полированная посуда, зеркала), предметы, покрытые люминесцентными красками. Важно, чтобы в экране дисплея не отражались светящиеся поверхности (например, другой дисплей), листы белой бумаги, светящиеся предметы. Нужно также следить за тем, чтобы сотрудники не использовали для протирки поверхности кинескопов агрессивных химических средств (этиловый спирт, эфир), которые быстро разрушают антибликовое покрытие дисплеев.

*— энергетическая яркость темных предметов в окружении дисплея должна быть больше, чем яркость черной точки монитора, то есть черная точка монитора должна обладать минимальной световой энергией в поле зрения оператора;*

В поле зрения операторов не должны находиться крупные черные предметы (одежда, мебель, оборудование), между предметами мебели и/или оборудованием не должно быть больших глубоких зазоров. К установке отменяющих козырьков на дисплеях нужно отнестись с осторожностью: их наличие может повлечь за собой появление глубоких теней в поле зрения оператора и смещение адаптации по контрасту. Но бывают ситуации, когда козырьки необходимы.

*— в помещении не должно быть предметов с выраженной цветностью;*

На стенах и столах не должно быть картин, календарей, вырезок из журналов, разноцветных канцелярских принадлежностей и проч. По возможности персонал должен быть обеспечен нейтрально-серыми (не белыми!) халатами или по крайней мере не носить одежды с яркой расцветкой. Рабочие столы должны быть покрыты серым ламинатом.

*— фоновое освещение в помещении должно быть подобрано так, чтобы эквивалентная энергетическая яркость поверхностей в поле зрения оператора по ощущению светлоты лежала примерно посередине между белой и черной точками монитора;*

Фоновое освещение организуется так, чтобы источники света не были видны с рабочих мест операторов. Как правило, люминесцентные светильники устанавливаются на стенах в 20-30 см от потолка и закрываются снизу кожухами-отражателями, направляющими свет в потолок, что обеспечивает рассеянное освещение. Обязательным является наличие нескольких выключателей, позволяющих легко настроить необходимую освещенность, а при необходимости включить «большой» свет, например, для уборки помещения. Фоновое освещение не должно также быть слишком слабым, что приведет к образованию глубоких теней, которые могут оказаться темнее, чем черная точка монитора.

*— цветовая температура освещения в помещении должна быть равна или по крайней мере близка к цветовой температуре белой точки монитора.*

В работе полиграфических предприятий постоянно возникает необходимость в сравнении изображения на экране с его оригиналом или копией на той или иной поверхности. Очевидно, что фоновое освещение не подходит для такого сравнения и необходима организация т.н. *просмотровых мест*.

Просмотровое место — это специальный участок помещения или переносное устройство, обеспечивающие постоянные и строго контролируемые условия просмотра оригиналов изображения и оттисков. Такое место должно быть прежде всего оборудовано высококачественным и достаточно ярким источником освещения (об источниках освещения для просмотровых мест речь пойдет в следующей главе). Фон, на котором рассматриваются изображения, должен быть нейтрально-серым со светлотой (L40–60). Обязательным является наличие **высококачественного** рассеивающего отражателя и козырька, прикрывающего лампу.

Просмотровое место и монитор вместе представляют собой полноценный визуальный трехстимульный колориметр. Источник освещения просмотрового места и будет являться источником опорного белого света, который отсутствует у монитора-колориметра. Для того чтобы привести этот трехстимульный колориметр в рабочее состояние, необходимо визуально уравнять (уравнять по ощущениям) опорный белый свет и белую точку монитора, регулируя количества кардинальных стимулов (RGB) монитора-колориметра.

Когда белая точка монитора и свет просмотрового места будут уравнены, общая адаптация зрения станет единой: адаптация по белому и хроматическая адаптация идентичны, а адаптация по контрасту будет определяться точкой черного на мониторе.

Для работы трехстимульного визуального монитора-колориметра необходимы не только видеосистема в комплексе с просмотрным местом, но и специально оборудованное помещение, в котором данный комплекс находится. Покупка компьютера, высококлассной видеокарты и дисплея не означает, что можно приступать к колориметрической настройке видеосистемы. **Начинать колориметрическую настройку необходимо с грамотной организации рабочих мест цветокорректоров.**

Итак, для обеспечения эффективной и точной работы цветокорректоров необходимо размещение оборудования в т.н. *digital darkroom* — *цифровой темной комнате*, где обеспечена полная изоляция от внешнего (дневного) освещения и поддерживается определенный уровень фоновой освещенности, не вызывающий искажения общей адаптации зрения.

Существуют жесткие стандарты организации digital darkroom (цифровой темной комнаты): ISO 3664:2000 и дополнение к нему — ISO 12646.

Стандарт ISO 3664 описывает условия работы с изображениями, не предназначенными к субтрактивному тиражированию (к примеру, web-дизайн).

Стандарт ISO 12646 описывает требования к колориметрической настройке мониторов и корректирует ISO 3664 для работы с изображениями, предназначенными к субтрактивному тиражированию (полиграфия, фотодело).

	<b>ISO 3664</b>	<b>ISO 12646</b>
Эталонное освещение	CIE D50	CIE D50
D50 Color Rendering Index	90 и выше	90 и выше
D50 Metamerism Index	<4	<4
Цветовая температура окружающего освещения	5000К и ниже	5000К
Освещенность окружения	64-32 люкс (и ниже)	32 люкс (и ниже)
Proof-освещенность (освещенность просмотрных мест)	1500-2500 люкс	1500-2500 люкс
Practical-освещенность (потребительская, «бытовая» освещенность полиграфической продукции)	375-625 люкс	375-625 люкс
Внешнее освещение	Полная светоизоляция	Полная светоизоляция
Блестящие предметы	Не должны отражаться в экране дисплея	Не должны отражаться в экране дисплея
Белая точка монитора	CIE D65	CIE D50
Энергетическая яркость белой точки монитора	75-100 cd/m <sup>2</sup>	80-120 cd/m <sup>2</sup>
Окраска поверхностей окружения (стены, столы)	Нейтрально-серые. Коэффициент отражения 0,6 и ниже.	Нейтрально-серые. Коэффициент отражения 0,6 и ниже.
Эксплуатация оборудования	Регулярная проверка	Регулярная проверка

	оборудования на соответствие спецификации	оборудования на соответствие спецификации
--	---	---

Общий вид стандартной Digital darkroom показан на рис. 23.



Рис. 23. Digital Darkroom в отделе препресс флексографского предприятия «Аляска-ПОФ» (Санкт-Петербург). Полную изоляцию от дневного освещения обеспечивает светонепроницаемый алюмоламинат, закрепленный на стеклопакетах за декоративными серыми жалюзи. Background-освещение: люминесцентные лампы Philips 950, просмотрные устройства: Just-Normlicht Color Master S.

## **Источники света для просмотрных мест и фонового освещения в digital darkroom**

Для решения этой достаточно сложной задачи необходимо определить критерии выбора источника освещения на просмотрном месте, т.н. источника proof-освещения.

Поскольку человек эволюционировал при естественном (солнечном) освещении, то было бы логично предположить, что оптимальным источником освещения может служить дневной свет, который хорошо уравнивается кардинальными стимулами монитора-колориметра. Действительно — дневной свет принят в колориметрии в качестве стандартного, но с определенными оговорками, так как характер дневного освещения непрерывно меняется в зависимости от времени суток, погодных условий и проч., поэтому

использование естественного освещения не подходит для организации просмотрного места и работы цветокорректора.

Очевидно, что для нормальной работы необходим *искусственный* источник освещения, *воспроизводящий* дневной свет с неизменными параметрами. Такие источники существуют как в гипотетическом, так и в явном виде, но все они несколько отличаются друг от друга по фотометрическим и колориметрическим характеристикам.

Рассмотрим их подробно.

Существует целое семейство *гипотетических идеальных* источников стандарта ISO, воспроизводящих дневной свет с различной коррелированной цветовой температурой — т.н. D-источников (D — daylight).

**Примечание:**

Если искусственный источник освещения вызывает такое же цветовое ощущение, что и планковское черное тело, нагретое до определенной температуры, говорят о т.н. *коррелированной цветовой температуре источника*, поскольку сам источник, разумеется, имеет другую температуру.

В обозначении источника используют литеру D и первые два разряда цифр его цветовой температуры. К примеру, D50-источник — условный источник дневного света с коррелированной цветовой температурой 5000K; D65 — то же, но с цветовой температурой 6500K и т.д. На рис. 24 показана кривая спектрального распределения энергии идеального искусственного D50-источника.

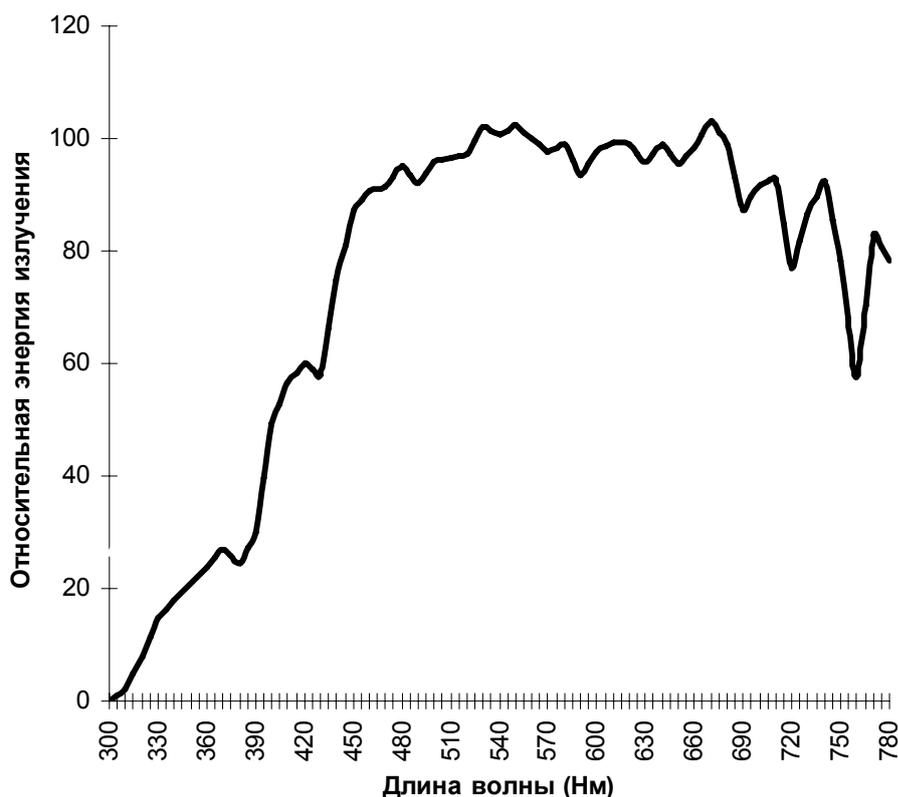


Рис. 24. Спектральное распределение энергии D50-источника.

Реальные искусственные источники освещения не могут быть совершенными, поэтому их качество принято оценивать по следующим параметрам:

**CRI (Color Rendering Index) — индекс цветового соответствия, индекс цветопередачи.** Характеризует точность цветовосприятия стандартным наблюдателем эталонного патча с известными цветовыми координатами при ближайшем D-источнике (в нашем случае D50). Высчитывается по формуле:

$$CRI = 100 - 4,6d_i$$

где  $d_i$  — это расстояние между координатами цвета образца при испытуемом источнике света и его координатами при эталонном D50-источнике в координатной системе CIE  $U^*V^*W^*$ .

Источники высокого качества имеют CRI не ниже 90.

Источники среднего качества 80–90.

Источники низкого качества 50–79.

Чем равномернее спектр осветителя, чем меньше в нем «выбросов» и «провалов», тем выше CRI.

**Примечание:**

Спектрофотометр Eye One Photo с помощью программы iShare позволяет инструментально оценить CRI данного источника.

**Metamerism Index — индекс метамеризма.** Показатель того, насколько хорошо данный источник освещения удерживает неизменность цветового ощущения от двух объектов, которые при теоретическом рассматривании их в свете эталонного D50-источника имеют метамерные кривые СРЭ (рис. 25).

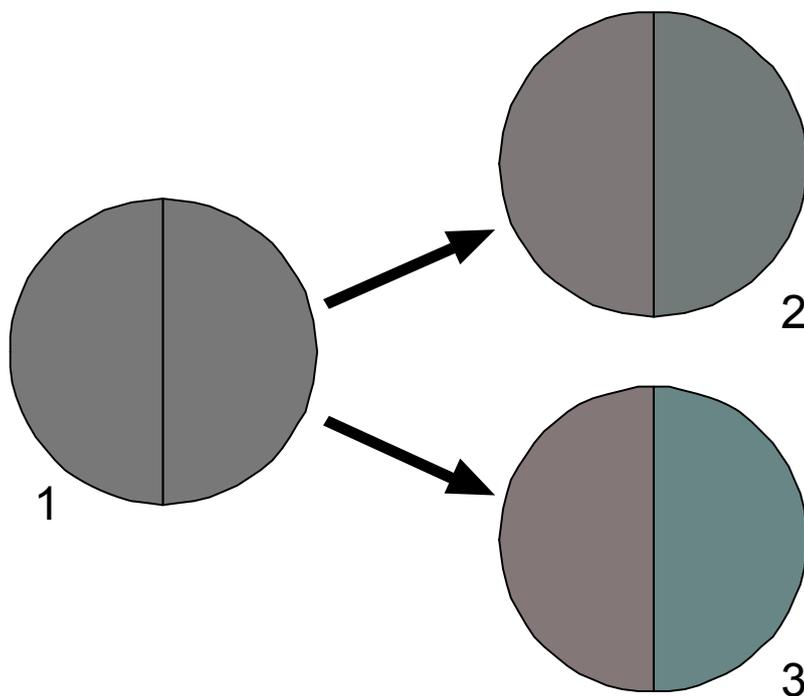


Рис. 25. 1 — два объекта, имеющие метамерные кривые СРЭ, при теоретическом рассматривании их в свете эталонного D50-источника; 2 — эти же объекты при рассматривании их в свете источника с низким индексом метамеризма (эталонный D50-источник, лампы высокого качества); 3 — эти же объекты при рассматривании их в свете источника с высоким индексом метамеризма (лампы низкого качества).

Индекс метамеризма вычисляется по специальной и довольно сложной формуле (ISO 3664, Annex B, B3) на основании спектрометрии 8 эталонных образцов, освещенных А-источником (с последующим пересчетом СРЭ на эталонный D50-источник) и при освещении этих же образцов испытываемым источником.

Индекс метамеризма ниже 4 считается показателем высокого качества источника.

Индекс метамеризма 4–8 считается показателем среднего качества источника.

Индекс метамеризма выше 8 считается показателем низкого качества источника.

Характерная спектральная кривая высококачественной пятилюминофорной люминесцентной лампы, пригодной для освещения просмотровых мест, показана на рис. 26.

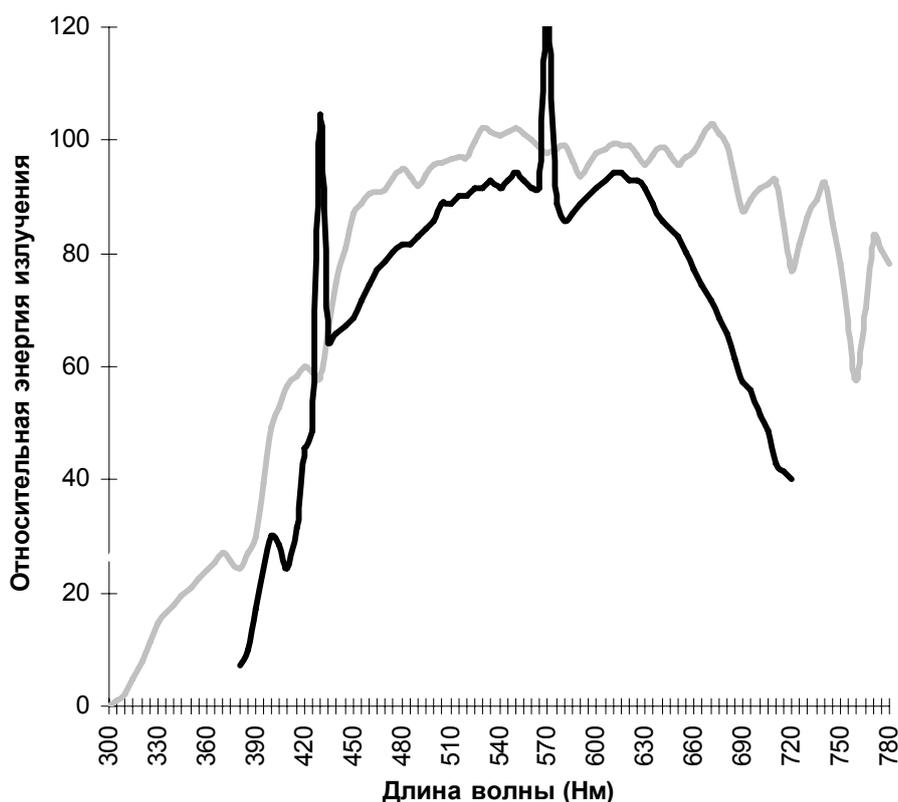


Рис. 26. Спектральная кривая высококачественной люминесцентной лампы GraphicsLite 100 D50 Color Viewing Lamp в сравнении со спектральной кривой эталонного D50-источника.

— Color Rendering Index >90

— Metamerism Index <4

Характерная спектральная кривая дешевой люминесцентной лампы, пригодной лишь для организации фоновое освещение в темной комнате, показана на рис. 27 (в сравнении с D50-источником).

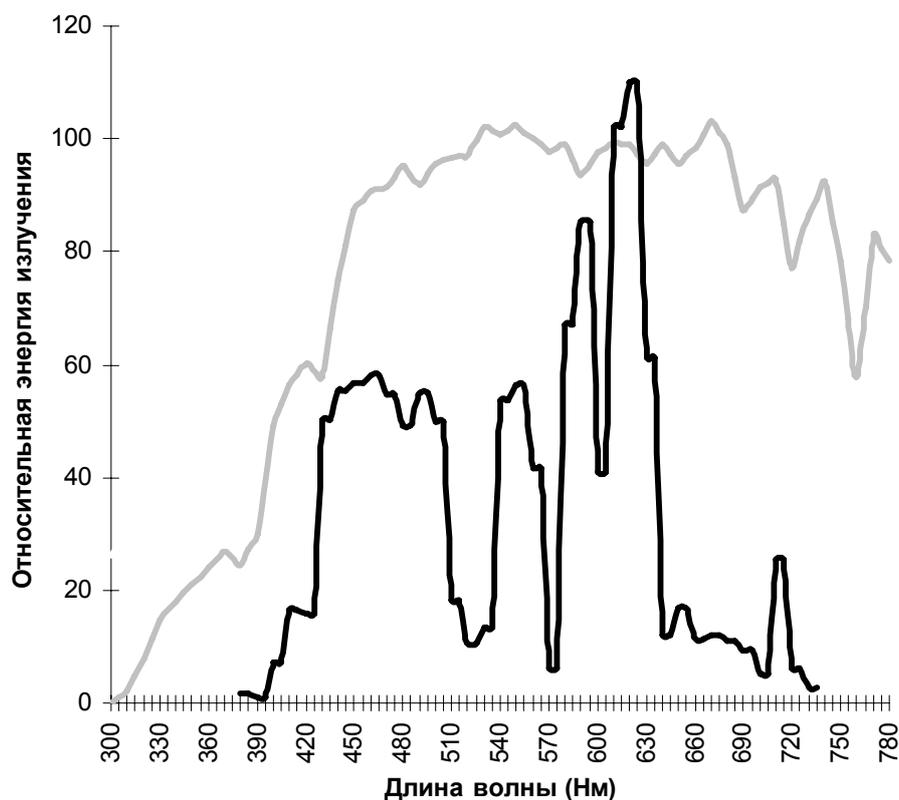


Рис. 27. Характерная спектральная кривая дешевой люминесцентной лампы в сравнении со спектральной кривой эталонного D50-источника.

- Color Rendering Index <90
- Metamerism Index >4

**Таким образом, для оценки качества источника освещения недостаточно информации о значении одной только коррелированной цветовой температуры, и следует обращать пристальное внимание еще на два параметра: Color Rendering Index и Metamerism Index.**

Производители высококачественных источников освещения для компенсации спектральных выбросов иногда применяют дополнительные лампы или специальные компенсирующие фильтры. В этом случае в спецификации изделия указываются результирующие Color Rendering Index и Metamerism Index.

На предприятиях, занятых тиражированием изображений на поверхностях, источником proof-освещения (определяющим точку адаптации), с которым, очевидно, должна быть уравнена белая точка монитора по энергетической яркости и цветовой температуре, является источник освещения просмотрочного места. Для того чтобы задать точку адаптации, необходимо, чтобы источник освещения на просмотрочном месте находился в непосредственной близости от экрана монитора, подобно тому как находятся в непосредственной близости поля сравнения визуального колориметра. Промышленность, в

частности компании GTI (США)<sup>15</sup> и Just-Normlicht (Германия)<sup>16</sup>, для этих целей предлагает портативные просмотрные устройства (рис. 28).

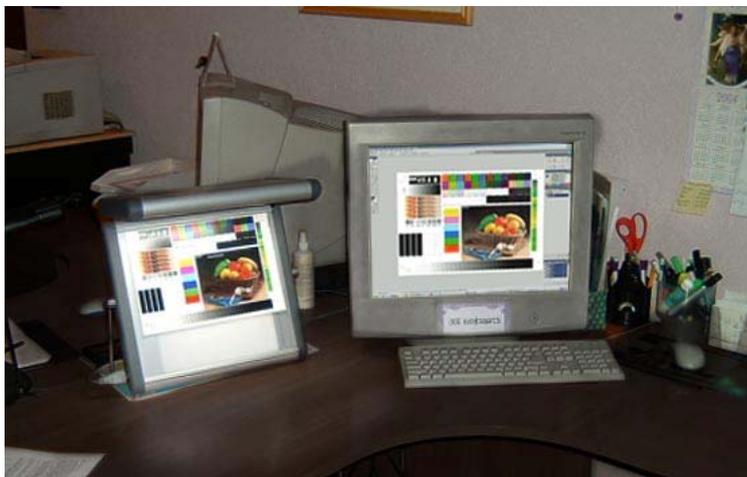


Рис. 28. Просмотровое устройство Just Normlicht 5000 CM5/VM 2С. (Хорошо видны ошибки, допущенные при обустройстве рабочего места цветокорректора: коричневая окраска стола, пестрые канцелярские принадлежности в поле зрения и др.).

**Примечание:**

Просмотровое устройство может быть расположено между двумя соседними рабочими местами, что экономит средства предприятия.

В просмотрных устройствах источником освещения является люминесцентная лампа особо высокого качества (пяти- или семилюминофорная) с коррелированной цветовой температурой 5000К, с высоким показателем CRI (>90) и низким индексом метамеризма (<4).

Просмотровые устройства бывают трех видов (рис. 29, 30, 31):

- «на отражение». Стоимость лежит в пределах 500–600\$ (формат А4);
- «на просвет». Стоимость лежит в пределах 150–200\$ (формат А5);
- «комбинированные» (просвет/отражение). Стоимость лежит в пределах 900–1200\$ (формат А4).

---

<sup>15</sup> [www.graphiclite.com](http://www.graphiclite.com)

<sup>16</sup> [www.just-normlicht.com](http://www.just-normlicht.com)



Рис. 29. Просмотровые устройства «на отражение». Слева — просмотровое устройство производства Just Normlicht с лампой среднего класса. Справа — устройство производства GraphicLite (GTI) с лампой высшего класса (GTI Full Spectrum).



Рис. 30. Просмотровые устройства «на просвет». Слева — просмотровое устройство производства Just Normlicht с лампой среднего класса. Справа — устройство производства GraphicLite (GTI) с лампой высшего класса (GTI Full Spectrum).



Рис. 31. Комбинированные просмотровые устройства. Слева — просмотровое устройство производства Just Normlicht с лампой среднего класса. Справа — устройство производства GraphicLite (GTI) с лампой высшего класса (GTI Full Spectrum).

Для выхода на заданные параметры лампа просмотрного устройства требует разогрева в течение 15–20 минут.

Срок службы лампы просмотрных устройств, то есть период неизменности ее характеристик, ограничен и составляет, как правило, 2500 часов непрерывной работы (примерно 1 год при работе в течение 8 часов ежедневно), поэтому рекомендуем заранее запастись 2–3 дополнительными лампами (их стоимость порядка 30\$).

При выборе модели просмотрного устройства необходимо, чтобы оно имело т.н. *диммер* — регулятор яркости лампы. Если устройство не имеет диммера и яркость лампы фиксирована (к примеру, устройство Just Normlicht 5000 CM5/VM 2C), то освещенность поверхностей будет равна примерно 1800 люксам, что соответствует яркости эталонной белой поверхности 100 cd/m<sup>2</sup>. Не всякий монитор, калиброванный на D50, сможет обеспечить такую яркость белой точки. Например, монитор с высококлассным дисплеем SONY GDM F520, калиброванный на D50 в режиме Professional, достигает по белой точке лишь 92–93 cd/m<sup>2</sup>. Согласно стандарту ISO 3664, интенсивность свечения лампы просмотрного устройства настраивается таким образом, чтобы уровень освещенности поверхностей лежал в диапазоне 1500–2500 люкс (яркость эталонной белой поверхности 82–135 cd/m<sup>2</sup>). Наилучшей является освещенность 1800 lux, которая соответствует яркости идеального диффузного отражателя 100cd/m<sup>2</sup>. Однако, как мы уже сказали, устанавливать освещенность больше чем 1900 люкс (белая точка 110 cd/m<sup>2</sup>) не рекомендуется, т.к.:

— во-первых, высока вероятность того, что монитор не сможет обеспечить такой уровень энергетической яркости белой точки, в особенности если его диагональ больше 19 дюймов;

— во-вторых, практически у всех моделей CRT-дисплеев (даже самого высокого класса) при яркости белой точки выше 110 cd/m<sup>2</sup> становятся сильно заметными расфокусировка лучей и нарушение их сведения;

— в-третьих, излишняя интенсивность освещения на просмотрном месте делает заметными те детали поверхности (фактуру бумаги, ее волокна, царапины, трещины, отпечатки пальцев и прочие дефекты), которые мешают восприятию самого изображения.

Установка освещенности белой поверхности в диапазоне 900–1400 люкс (яркость эталонной белой поверхности 51–77 cd/m<sup>2</sup>) вполне возможна, но формально она не соответствует принятому стандарту.

Уменьшение уровня освещенности белой поверхности на просмотрном месте ниже 900 люкс (яркость эталонной белой поверхности ниже 50 cd/m<sup>2</sup>), то есть фактический выход на Practical-освещенность не рекомендуется, так как приводит минимум к трем нежелательным эффектам:

— отклонению спектра осветителя просмотрного места от номинала и определенному хроматическому сдвигу (чаще в пурпурную или красную области), рис. 32;

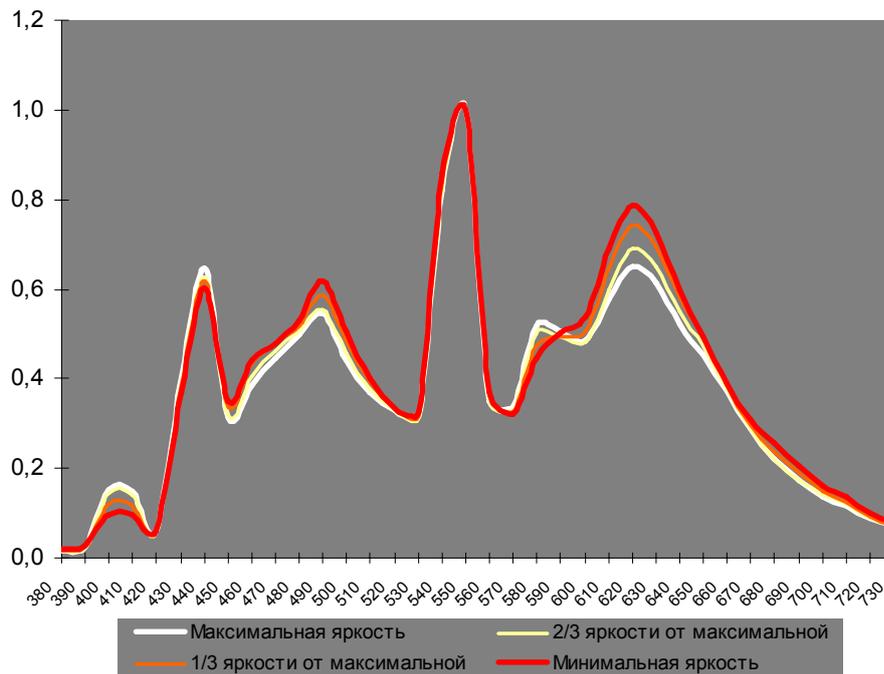


Рис. 32. Нормированные кривые СРЭ лампы просмотрного устройства Just-Normlicht Color Master S при четырех положениях диммера. На графике хорошо видно нарастание относительной интенсивности пика «красного» люминофора (630 Нм) и понижение относительной интенсивности «синего» (415Нм) при диммерном снижении общей энергетической яркости лампы, что ведет к смещению цветового тона (Hue) «белого» света на 20° в красную сторону.

- на поверхности: к потерям деталей изображений в тенях;
- в мониторе: к осязатому снижению его цветового охвата (напомним, энергетическая яркость белой точки дисплея должна быть уравнена с яркостью белой поверхности на просмотрном месте. Уровень яркости в данном случае будет много меньше максимально возможного уровня яркости белой точки монитора, что существенно снижает его цветовой охват).

Для организации фоновое освещения в темной комнате рекомендуются марки люминесцентных осветителей производства Just-Normlicht:

Тип лампы	Цветовая температура	Длина	Цена (Eur)
LL/SE 8 Watt	5000 Kelvin	290 mm	18
LL/SE 13 Watt	5000 Kelvin	530 mm	18
LL/SE 15 Watt	5000 Kelvin	438 mm	18
LL/SE 18 Watt	5000 Kelvin	590 mm	18
LL/SE 36 Watt	5000 Kelvin	1200 mm	21
LL/SE 36 Watt	5000 Kelvin	1000 mm	12
LL/SE 58 Watt	5000 Kelvin	1500 mm	21

Лампы указанного производителя являются оптимальным выбором для организации фоновое освещения. Нужно учитывать, что большого количества ламп не требуется: к примеру, для организации фоновое освещения в комнате площадью 20 кв. м. понадобится не более десятка осветителей марки LL/SE 1x15 438 mm. В то же время, нужно помнить о том, что выгорание люминофоров и изменение спектра излучения данных ламп происходит довольно быстро, примерно через 2000-2500 часов от момента установки, что требует регулярной проверки и замены светильников.

Для организации фоновое освещения подойдут также лампы марки Philips 950 (CRI 93).

**Примечание:**

Для организации просмотровых мест в последнее время в продажу поступили светильники нового типа на основе галогенных ламп накаливания, свет которых проходит через специальный конверсионный фильтр. Такие светильники обеспечивают идеально ровное распределение энергии и высокий CRI. Пока еще их коррелированная цветовая температура несколько ниже необходимых 5000К (4700–4800К), однако, это не мешает их эффективному использованию.

## **Выбор параметров колориметрической настройки монитора**

После того как выполнены все необходимые мероприятия по организации digital darkroom, приступают к колориметрической настройке монитора. Но прежде чем запустить программное обеспечение и взять в руки измерительный прибор, нужно ответить себе на вопрос: **как мы хотим использовать данный монитор-колориметр?**

Возможны, как минимум, четыре варианта ответа:

— *монитор-колориметр будет использован как самостоятельное цветовоспроизводящее устройство*, задача которого состоит в точной передаче цветовых ощущений, данные о которых записаны в файл изображения. Визуального сравнения изображений на экране с изображениями на других носителях проводиться не будет (обработка изображений для печати на удаленном предприятии, Web-дизайн, просмотр видеофильмов);

— *монитор-колориметр будет использован как цветопробное устройство*, эмулирующее работу конкретного субтрактивного устройства (все виды полиграфии, фотодело), то есть предполагается регулярное визуальное сравнение изображений на экране с оттисками;

— *монитор-колориметр будет использован как визуализатор изображений, полученных при сканировании слайдов*, то есть предполагается регулярное сравнение изображения на экране со слайд-оригиналами;

— *монитор-колориметр будет использоваться и как самостоятельное, и как цветопробное устройство, и как слайдскан-визуализатор* (полифункциональная система).

Первые три варианта обозначим как «монитор-колориметр с фиксированными параметрами настройки».

Под *полифункциональной* мы понимаем систему, которая позволяет оперативно и без значительных потерь точности визуализации перестраивать монитор за счет LUT (Look Up Table) видеоадаптера на любой из перечисленных вариантов использования, не **изменяя при этом установок передней панели дисплея (OSD)<sup>17</sup> и не проводя новых**

---

<sup>17</sup> OSD — On Screen Display.

**инструментальных измерений.** Такая система может быть построена, если в распоряжении пользователя имеется программный пакет Profile Maker (Gretag Macbeth).

**Примечание:**

В полном смысле полифункциональная система станет лишь тогда, когда наряду с механизмом LUT-управления белой точкой и величиной гамма пользователь получит в свое распоряжение механизм LUT-управления черной точкой монитора.

В зависимости от того, каким будет ответ, должны быть правильно выбраны величины следующих параметров:

- энергетической яркости белой точки;
- цветовой температуры белой точки;
- необходимого энергетического контраста монитора;
- энергетической яркости точки черного.

Принципы выбора величин этих параметров для разных вариантов использования монитора-колориметра представлены в таблице.

Параметр	Монитор-колориметр с фиксированными параметрами настройки			Монитор-колориметр как полифункциональная система
	Монитор-колориметр как самостоятельное цветовоспроизводящее устройство	Монитор-колориметр как цветопробное устройство	Монитор-колориметр как слайдскан-визуализатор	
<b>Энергетическая яркость белой точки</b>	Выбирается исходя из ощущения оптического комфорта, как правило, 80–90 cd/m <sup>2</sup> . Следует иметь в виду, что оптический комфорт может быть достигнут как на больших, так и на меньших значениях яркости, но: — выбор большей яркости приведет к сокращению срока службы кинескопа у CRT-дисплеев; — выбор меньших значений яркости приведет к потерям деталей в глубоких тенях изображений.	Уравнивается с энергетической яркостью тиражной белой поверхности на просмотрном месте.	Энергетическая яркость белой точки должна быть в 9–15 раз ниже, чем энергетическая яркость поверхности просмотрного устройства на просвет: высокая энергетическая яркость белой точки просмотрных устройств на просвет продиктована высоким уровнем вуали слайдов (0,15–0,21D).	Выбирается максимально возможной. В дальнейшем любая необходимая меньшая энергетическая яркость достигается за счет изменений в LUT видеокарты.
<b>Цветовая температура белой точки</b>	Выбирается исходя из чувства оптического комфорта или максимума цветового охвата монитора (как правило, 6500K)	Уравнивается с цветовой температурой света просмотрного места, отраженного от тиражной поверхности.	Уравнивается с цветовой температурой света просмотрного устройства на просвет (как правило, 5000K)	Выбирается исходя из максимума цветового охвата монитора (как правило, 6500K). В дальнейшем любая требуемая цветовая температура достигается за счет изменений в LUT.
<b>Необходимый</b>	Выбирается	Должен быть равен	Выбирается	Выбирается

<b>энергетический контраст монитора</b>	максимально возможным и задается уровнем энергетической яркости черной точки (при выбранном уровне белой).	энергетическому контрасту оттисков.	максимально возможным и задается уровнем энергетической яркости черной точки, что обусловлено высоким энергетическим контрастом слайда за счет максимальных оптических плотностей в районе 3,4D (примечание 2) .	максимально возможным и задается уровнем энергетической яркости черной точки.
<b>Энергетическая яркость точки черного</b>	Критерием выбора является минимальная энергетическая яркость, при которой: — различимы детали в глубоких тенях изображений; — минимальна хроматическая компонента черной точки.	Критерием выбора является уровень энергетической яркости черной точки оттиска (примечание 1).	Критерием выбора является минимальная энергетическая яркость, при которой: — различимы детали в глубоких тенях изображений; — минимальна хроматическая компонента черной точки. Приоритет отдается различимости деталей в тенях (примечание 3).	Критерием выбора является минимальная энергетическая яркость, при которой: — различимы детали в глубоких тенях изображений; — минимальна хроматическая компонента черной точки. Приоритет отдается различимости деталей в тенях, так как зрение человека менее требовательно к цветопередаче в зонах низких энергий.

**Примечания к таблице.**

**Примечание 1.**

Уровень энергетической яркости в cd/m<sup>2</sup> при освещенности 1800 люкс (эквивалентная яркость идеального диффузного отражателя 100 cd/m<sup>2</sup>) будет равен величине Y в ЦКС XYZ ( величину Y можно взять из референса промеров принтерной тест-карты или из профайла устройства).

**Примечание 2.**

Энергетическая яркость поверхности просмотровых устройств на просвет колеблется в диапазоне 950–1270 cd/m<sup>2</sup> (ISO 3664), что позволяет увидеть детализовку в самых глубоких тенях слайда. Для того чтобы высокая яркость просмотрового устройства не вызвала смещения адаптации по максимальной энергии, свободное от слайда поле просмотрового устройства следует прикрывать непрозрачной серой шторкой и только после этого включать лампу просмотрового устройства.

**Примечание 3.**

При использовании Profile Maker нужно постараться «поймать» минимум энергетической яркости, при которой программа не пытается выправлять черную точку «по своему усмотрению» за счет LUT (подробно см. главу «Калибровка монитора с помощью Profile Maker 5.x.x»).

После того как выбор перечисленных параметров сделан, необходимо выбрать еще один параметр: величину степени нелинейности видеосистемы, то есть величину гамма-

компенсации. Как уже говорилось, выбор определяется величиной гамма-предыскажения, принятой на данной компьютерной платформе (Mac — 1,8; PC — 2,2).

**Примечание:**

При визуализации файлов с помощью CMS-aware приложений (серьезные графические редакторы — Adobe, Macromedia, Corel) величина гамма-компенсации не имеет принципиального значения и может лежать в широком диапазоне. Если же есть необходимость в визуализации файлов с помощью программ, не использующих CMS (различные файл-виверы и т.д.), величина гамма-компенсации должна соответствовать величине гамма-предыскажения, принятой на данной компьютерной платформе.

Когда пользователь четко определил для себя вариант использования монитора-колориметра и, отталкиваясь от этого, определил величины параметров колориметрической настройки видеосистемы, необходимо выставить выбранные параметры кнопками передней панели дисплея. Установить выбранные параметры можно как *визуально*, так и *при поддержке измерительного прибора и программного обеспечения калибровки монитора*.

**Визуальная установка параметров колориметрической настройки монитора**

Визуальная установка выбранных параметров настройки проводится не только тогда, когда в распоряжении пользователя нет измерительного устройства, но в первую очередь когда инструментальная установка не дает желаемого результата, что чаще всего возникает в обстановке, не отвечающей стандарту ISO 3664, — то есть, в большинстве случаев. К примеру: цветовая температура источника освещения просмотрового места, задающая хроматическую адаптацию, не равна 5000K или используется источник с очень низким качеством спектра; стены помещения имеют хроматический компонент или позади монитора находится темный объект, смещающий адаптацию по контрасту относительно просмотрового места, и т.п.

**Примечание:**

При визуальной установке параметров настройки нельзя ориентироваться на численные значения OSD-панели, так как они всегда являются относительными, к примеру: отклонение значения цветовой температуры на OSD-панели от реального даже у высококлассных дисплеев может достигать  $\pm 500\text{--}700\text{K}$ .

В визуальной установке параметров поможет таблица:

Параметр	Монитор-колориметр с фиксированными параметрами настройки			Монитор-колориметр как полифункциональная система
	Монитор-колориметр как самостоятельное цветовоспроизводящее устройство	Монитор-колориметр как цветопробное устройство	Монитор-колориметр как слайдскан-визуализатор	
<b>Энергетическая яркость точки черного</b>	Регулируется позицией Brightness при поддержке страницы Brithness&Contrast утилиты Nokia Test. Уровень черной точки выводят на минимум, а затем повышают до появления отличия поля 1% от фона.	Регулируется позицией Brightness при поддержке страницы Brithness&Contrast утилиты Nokia Test. Уровень светлоты черной точки делают максимально приближенным к	Регулируется позицией Brightness при поддержке страницы Brithness&Contrast утилиты Nokia Test. Уровень черной точки выводят на минимум, а затем повышают до появления отличия	Регулируется позицией Brightness при поддержке страницы Brithness&Contrast утилиты Nokia Test. Уровень черной точки выводят на минимум, а затем повышают до появления отличия поля 1% от фона.

		уровню светлоты черной точки тиражного оттиска. Отметим, что черная точка оттиска — это участок изображения, запечатанный максимально возможным количеством красок, а не одной лишь черной краской.	полей 2-3% от фона. Различимостью поля 1% приходится жертвовать для достижения максимально возможного энергетического контраста (2,9–3,1D)	
<b>Цветовая температура белой точки</b>	Выбирается исключительно исходя из чувства оптического комфорта и регулируется RGB-gain.	С помощью RGB-gain визуально уравнивается с цветовой температурой света просмотрового места, отраженного от поверхности, принятой за эталонную. Такой поверхностью может служить лист высококачественной плотной бумаги, не содержащей оптических отбеливателей. Наилучшим вариантом является металлическая пластина, покрытая оксидом магния или бария.	С помощью RGB-gain визуально уравнивается с цветовой температурой света просмотрового устройства на просвет.	Поскольку визуально оценить цветовую температуру белой точки монитора невозможно, то остается выбрать на OSD-панели значение 6500K или режим sRGB (присутствует в некоторых моделях дисплеев). В дальнейшем любая необходимая цветовая температура достигается за счет изменений в LUT видеокарты.
<b>Энергетическая яркость белой точки</b>	Регулируется с помощью позиции Contrast.	С помощью позиции Contrast визуально уравнивается с энергетической яркостью белой поверхности тиражного оттиска на просмотровом месте.	С помощью позиции Contrast визуально уравнивается с энергетической яркостью просмотрового устройства на просвет, проходящего через засвеченный (прозрачный) участок слайд-пленки. Желательно использовать пленку среднего (6 см по ширине) или большого формата (4x5 дюймов). Свободное от пленки место на просмотровом	Позиция Contrast устанавливается на границу зоны насыщения дисплея (как правило, максимум). В дальнейшем любая необходимая меньшая энергетическая яркость достигается за счет изменений в LUT видеокарты.

			устройстве нужно закрыть рамкой из черной бумаги или заклеить черной изолянтной.	
--	--	--	--	--

Обращаем внимание на то, что **параметры, регулируемые кнопками передней панели дисплея, взаимно влияют друг на друга**. Поэтому вполне вероятно, что желаемый результат не будет достигнут с первого раза. Скорее всего, потребуется два-три цикла установки выбранных параметров.

### **Инструментальная установка параметров колориметрической настройки монитора**

Инструментальная установка параметров колориметрической настройки монитора может быть проведена с помощью измерительного прибора (спектрофотометра или фотоэлектрического колориметра) и программного обеспечения разных производителей.

**Примечание:**

Независимо от типа программного обеспечения для контроля получившегося энергетического контраста монитора необходим завершающий замер черной и белой точек в системе XYZ. Энергетический

контраст оценивается по десятичному логарифму отношения значений координат  $\frac{Y_{white}}{Y_{black}}$ .

\* \* \*

Итак, **самое сложное в колориметрической настройке видеосистемы — это обеспечение правильных условий освещения и осмысленный выбор параметров настройки**, который проводится исходя из поставленной задачи. Дальнейшие действия — гамма-приводка и построение профайла — просты и являются прерогативой измерительного оборудования и различных программ, которые в большинстве случаев успешно справляются со своей задачей.

Безусловно, программы всех производителей (Gretag Macbeth, X-Rite, Fuji, Monaco и проч.) помогают пользователю в OSD-установке параметров настройки исходя из усредненных критериев выбора, но прежде всего ориентироваться следует на критерии, которые обсуждались в данной главе, т.е. исходя из задач, для которых будет использоваться монитор-колориметр.

**Примечание:**

Сказанное не означает, что усредненные критерии, предлагаемые программами, не могут удовлетворить пользователя в ряде случаев, например, при настройке монитора как самостоятельного цветовоспроизводящего устройства.

Для осуществления гамма-приводки программы предлагают шаги (степы), благодаря которым выполняются необходимые измерения и последующее автоматическое внесение изменений в LUT. Затем следуют шаги, при которых выполняются необходимые измерения, построение и сохранение профайла видеосистемы. Все программы дают возможность выполнять гамма-приводку и характеризацию как отдельно, так и слитно, когда сразу по завершении гамма-приводки автоматически начинается промер патчей характеризации.

**Примечание:**

Исключение составляет программа Heidelberg View Open 4, которая не выполняет гамма-приводку, а рассчитывает на то, что гамма-приводка уже выполнена с помощью какой-либо сторонней программы, или же сразу строит табличный профайл (что с нашей точки зрения делает программу совершенно бессмысленной).

**Выбор и установка параметров настройки монитора-колориметра с последующей гамма-приводкой видеосистемы являются слагаемыми процесса, который и является собственно калибровкой монитора.**

Подробное описание методики калибровки монитора — т.е. методики инструментальной установки выбранных параметров настройки и методики гамма-приводки — будет рассмотрено нами позже на примере работы программного пакета Profile Maker 5.x.x.

## **Программное обеспечение и измерительное оборудование, необходимые для настройки монитора**

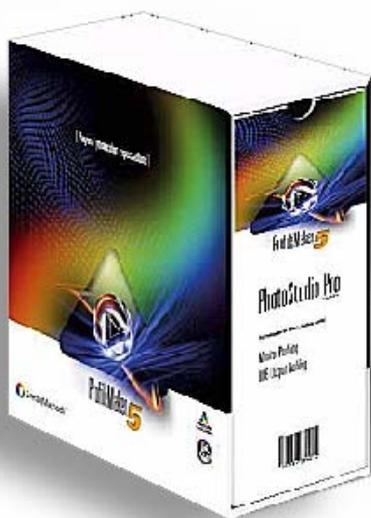
Колориметрическую настройку монитора производит *человек* с помощью измерительного оборудования и при поддержке специального программного обеспечения. Подобно тому как оригинал-макет издания может быть создан с помощью разных программ, так и колориметрическая настройка монитора может быть выполнена оператором при поддержке программного обеспечения разных производителей.

Программный пакет ProfileMaker 5.x.x компании GretagMacbeth ([www.gretagmacbeth.com](http://www.gretagmacbeth.com)) является на сегодня безусловно самым развитым и надежным программным обеспечением *работ* (а не измерительных приборов, как порой принято считать), связанных с колориметрической настройкой цветовоспроизводящих устройств, в частности — мониторов. На его основе и будет построено изложение практического материала в данной статье.

**Важное примечание:**

Тем, кто не имеет возможности воспользоваться программным пакетом ProfileMaker 5.x.x, мы рекомендуем работу с программой Eye-One Match 3, которая входит в комплект поставки измерительных приборов GretagMacbeth, а также бесплатно распространяется на официальном сайте компании. Данная

программа представляет собой слегка упрощенный вариант программного модуля настройки мониторов Profile Maker, с несколько ограниченными возможностями и с видоизмененным адаптированным пользовательским интерфейсом. В то же время качество колориметрической настройки мониторов с помощью Eye-One Match 3 очень высокое, идентичное качеству ProfileMaker 5.x.x.



ProfileMaker 5.x.x выпускается в трех модификациях, имеющих одинаковый программный модуль настройки монитора:

- ProfileMaker 5.x.x [Publish Pro](#),
- ProfileMaker 5.x.x [Photostudio Pro](#),
- ProfileMaker 5.x.x [Packaging Pro](#).

Рис. 33. Программный пакет Profile Maker 5

Однако указанного программного обеспечения недостаточно для успешной настройки видеосистемы. Необходимо запастись также вспомогательными программами: популярной утилитой Nokia Test, а также утилитами ColorLab 2,77, Calibration Tester и Display Profile, бесплатно распространяемыми компанией GretagMacbeth.

В выборе измерительного прибора предпочтение можно отдать спектрофотометру Spectrolino производства Gretag Macbeth. Однако стоимость такого прибора очень высока — около 4000Eur.



Меньшим по стоимости (около 2000Eur), но несколько уступающим Spectrolino по качеству измерений в тенях является спектрофотометр EyeOne, выпускаемый тем же предприятием.

Рис. 34. Спектрофотометр Spectrolino



Рис. 35. Спектрофотометр EyeOne

Приемлемыми по качеству, но существенно более дешевыми являются фотоэлектрические колориметры EyeOne Display и EyeOne Display II<sup>18</sup> (стоимость около 200Eur и 250Eur соответственно), производства также GretagMacbeth,



Рис. 36. Фотоэлектрический колориметр EyeOne Display

и Monitor Optimizer DTP-92 (предназначен для настройки видеосистем только с CRT-дисплеями) производства американской фирмы X-Rite (стоимость около 400Eur)<sup>19</sup>.

<sup>18</sup> Поддерживается версиями Profile Maker 5.0.2 и выше.

<sup>19</sup> Для успешной работы устройства с Profile Maker 5.x.x на PC-платформе необходимо установить последнее обновление его драйвера (интерактивная ссылка).



Рис. 37. Фотоэлектрический колориметр X-Rite Monitor Optimizer DTP-92

Несмотря на вполне удовлетворительные результаты работы, нужно учитывать, что точность измерений, а следовательно, и точность настройки монитора при использовании спектрофотометров выше, чем при использовании колориметров.

На сегодняшний день список устройств, поддерживаемых Profile Maker 5.x.x, для выполнения emission-измерений ограничен перечисленными приборами.

Тем, кто уже имеет в наличии измерительный прибор, несовместимый с Profile Maker, рекомендуем разобраться в теоретических основах и принципах колориметрической настройки мониторов, изложенных в данной статье, и перенести эти принципы на работу с имеющимся программным обеспечением.

Тем, кто не может воспользоваться измерительным оборудованием, на помощь придет утилита Adobe Gamma, входящая во все графические программы Adobe. Методика работы с Adobe Gamma дана в приложении.

## Предварительная неколориметрическая настройка монитора

Прежде чем приступать к настройке монитора, необходимо дать дисплею проработать в интенсивном (лучше в круглосуточном) режиме в течение месяца с целью стабилизации параметров.

Перед тем как приступить к каким бы то ни было манипуляциям, необходимо:  
— прогреть дисплей как минимум в течение 35-45 минут (желательно 1 час);

### **Примечание:**

С целью экономии времени в период прогрева аппарата можно установить необходимое программное обеспечение.

— выполнить команду «Reset all parameters» («All Reset») из меню передней панели и команду «Degauss».

### **Важное примечание:**

Невыполнение команд «Reset all parameters» и «Degauss» может привести к неудаче при попытке калибровки и характеристики монитора.

Затем при помощи утилиты Nokia Test (заглавная страница) (рис. 38) производится отладка «геометрии» устройства при выбранном уровне экранного разрешения и частоты вертикальной развертки (пользователи дисплеев Nec-Mitsubishi могут воспользоваться утилитой NaviSet).

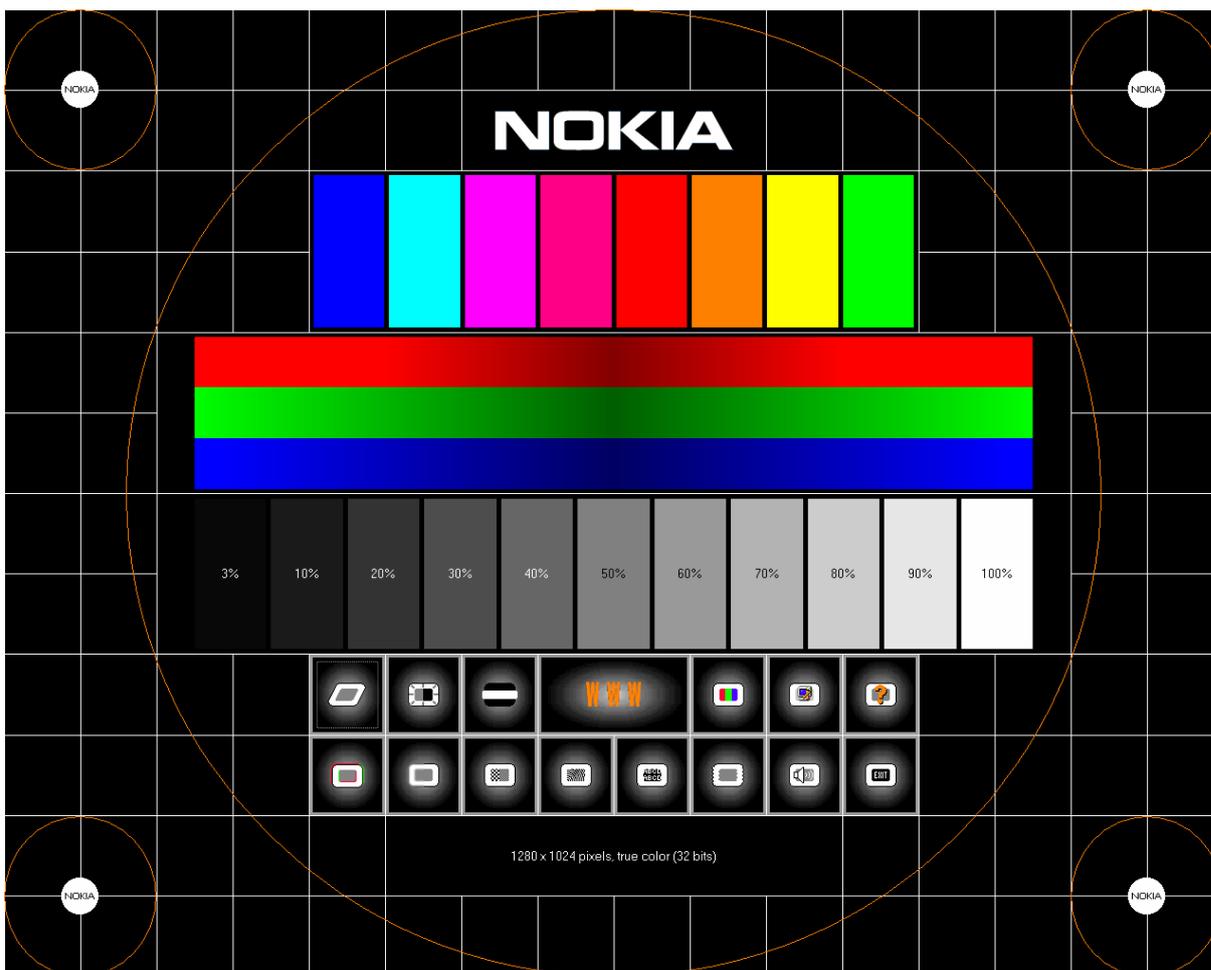


Рис. 38. Заглавная страница утилиты Nokia test.

Частота вертикальной развертки дисплея должна быть не ниже 75Гц.

Разрядность экранного представления цвета всегда должна быть равна 32 bit.

Режимы «засыпания» компьютера и дисплея, какие бы то ни было варианты «красочного» оформления desktop должны быть отключены. Рабочий стол должен иметь либо нейтрально-серую заливку, либо нейтрально-серую текстуру, как показано на рис. 39.

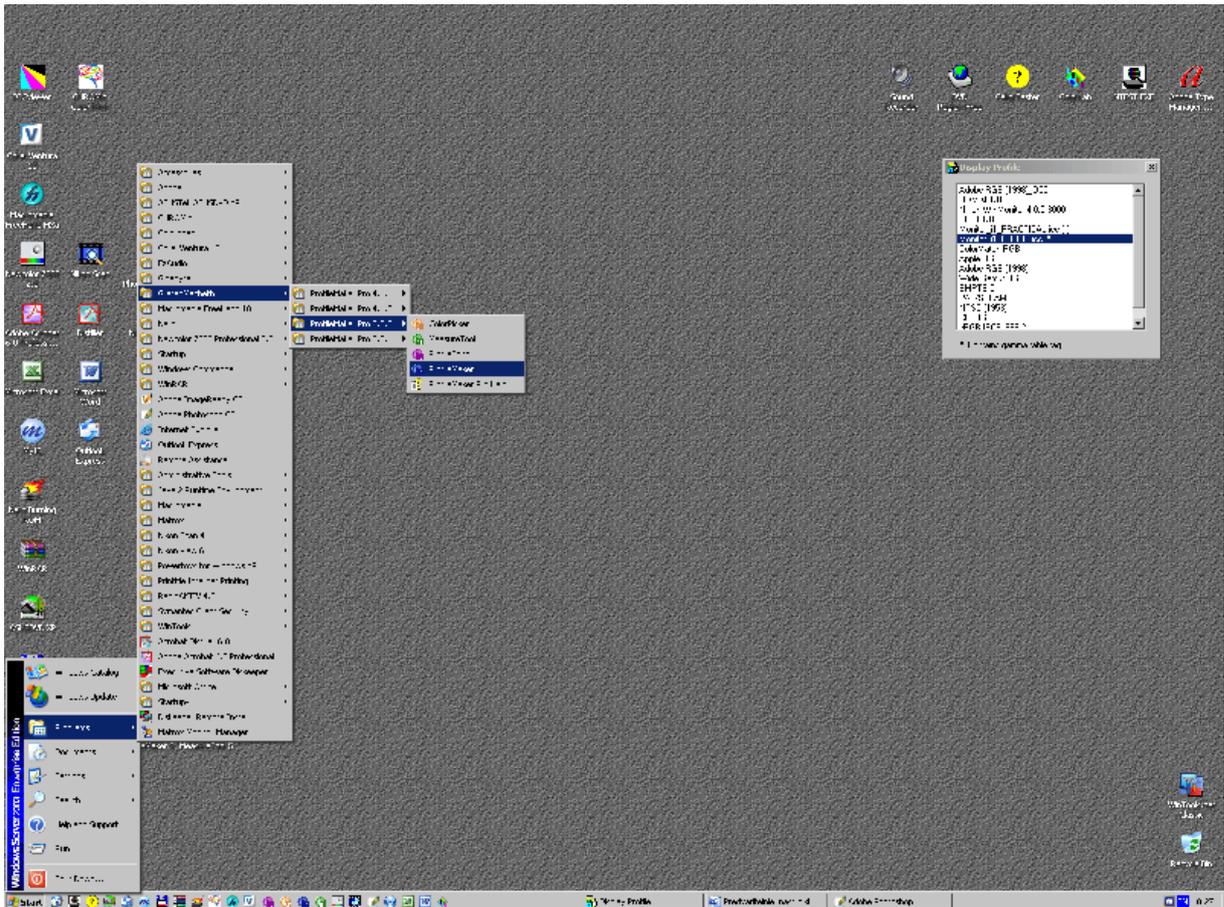


Рис. 39.

Функция «Screensaver» должна иметь хроматически нейтральную заставку.

Затем необходимо выполнить еще два мероприятия: добиться максимальной конвергенции RGB-лучей по горизонтали и вертикали, воспользовавшись любой из функций: «Convergence», «Focus» или «Readability» утилиты Nokia Test (рис. 40),

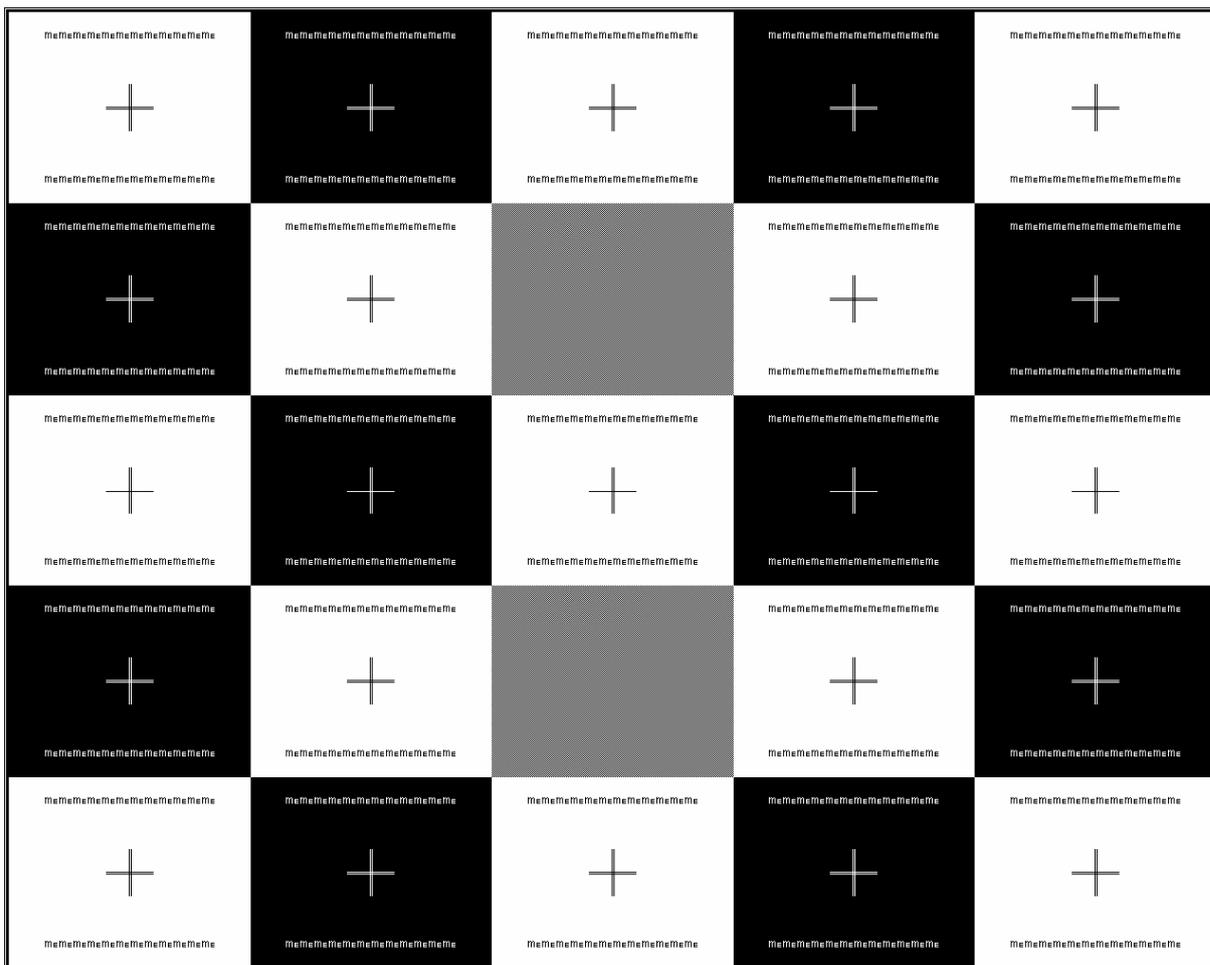


Рис. 40. Интерфейс функции «Focus», которая хорошо подходит и для настройки сведения лучей.

а также добиться визуальной равномерности свечения экрана по всему полю (функция «Color», режим «белое поле»).

Сведение лучей отлаживают, глядя в центр экрана через увеличительное стекло. При этом манипулируют опциями «horizontal&vertical convergence», вызываемых кнопками передней панели дисплея. Данная операция очень важна, так как качество сведения лучей оказывает радикальное влияние на точность последующих измерений.

**Примечание:**

Отладка сведения лучей с помощью увеличительного стекла — крайне утомительная для зрения процедура.

Равномерность свечения регулируют опциями «parity» (также вызываемыми кнопками передней панели), заполнив экран сплошным белым полем. Лучше отлаживать равномерность свечения с помощью измерительного прибора, выполняя промеры по углам экрана и приняв при этом за константу цветовые координаты белого поля в центре дисплея. Процедуру можно считать выполненной, когда dE не будет превышать 1-1,5. Следует отметить, что далеко не всякий монитор (даже профессионального класса) может обеспечить такой уровень равномерности по всей поверхности экрана, но нужно стремиться свести отличия к минимуму.

**Важное примечание:**

Опции OSD-панели дисплея у разных производителей имеют разные и не всегда понятные наименования. Потребуется время и эксперименты, прежде чем удастся понять их назначение.

## Передняя панель дисплея (OSD) и ее настройки

Клавиши передней панели дисплея позволяют выполнять настройку работы видеосистемы за счет изменения сугубо аппаратных параметров, которые можно разделить на три категории.

*Первая категория настроек* — это настройки, определяющие видеосистему как трехстимульный визуальный колориметр. Именно эти настройки представляют для нас непосредственный интерес. К ним относятся: позиция «RGB gain», позиция «Contrast», позиция «Brightness», позиция «RGB bias».

*Вторая категория настроек* — это настройки, обеспечивающие минимум пространственных и резкостных aberrаций изображения, приводящие в норму неколориметрические параметры изображения («геометрия» экрана, фокусировка лучей и их сведение).

*Третья категория настроек* — вспомогательная, обеспечивающая удобство работы с первыми двумя категориями (OSD position, Language и т.п.).

Предложенная классификация является смысловой классификацией, но часто производители дисплеев не придерживаются ее, опции передней панели дисплея дают вперемежку, что несколько затрудняет работу.

Остановимся подробно на первой категории настроек.

### CRT-дисплеи

В главе «Нелинейность монитора-колориметра» мы показали упрощенную формулу соотношения между напряжением входного сигнала и энергетической яркостью свечения люминофоров. В данной главе необходимо дать полную формулу для каждого канала (кардинального стимула) отдельно и для их совместной работы:

$$Y_R = Y_{R0} + (Y_{R\max} - Y_{R0}) \left[ \frac{\alpha_R V_{Ri} + \beta_R}{Y_{R\max}} \right]^{\gamma_R}$$

$$Y_G = Y_{G0} + (Y_{G\max} - Y_{G0}) \left[ \frac{\alpha_G V_{Gi} + \beta_G}{Y_{G\max}} \right]^{\gamma_G}$$

$$Y_B = Y_{B0} + (Y_{B\max} - Y_{B0}) \left[ \frac{\alpha_B V_{Bi} + \beta_B}{Y_{B\max}} \right]^{\gamma_B}$$

где:  $V_i$  — напряжение входного сигнала;  $V_{\max}$  — максимальное напряжение входного сигнала;  $Y_0$  — т.н. остаточная энергетическая яркость при  $V_i=0$ ;  $Y_{\max}$  — максимальная энергетическая яркость при  $V_i = V_{\max}$ ;  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  — константы.

Результирующая формула для суммы трех каналов:

$$Y_W = Y_{W0} + (Y_{W\max} - Y_{W0}) \left[ \frac{\alpha_W V_{Wi}}{Y_{W\max}} + \beta_W \right]^{\gamma_W}$$

### Позиция «RGB gain» («RGB»)

Присутствует в дисплеях высокого класса.

Раздельно регулирует уровень максимальной интенсивности кардинальных стимулов по каждому из каналов в ответ на максимальное указание в файле изображения: 255 255 255. Технически осуществляется за счет раздельного усиления сигнала контроллерами дисплея по каждому каналу.

На графике (рис. 41) показано, к чему приводит изменение значений «RGB gain» («RGB»).

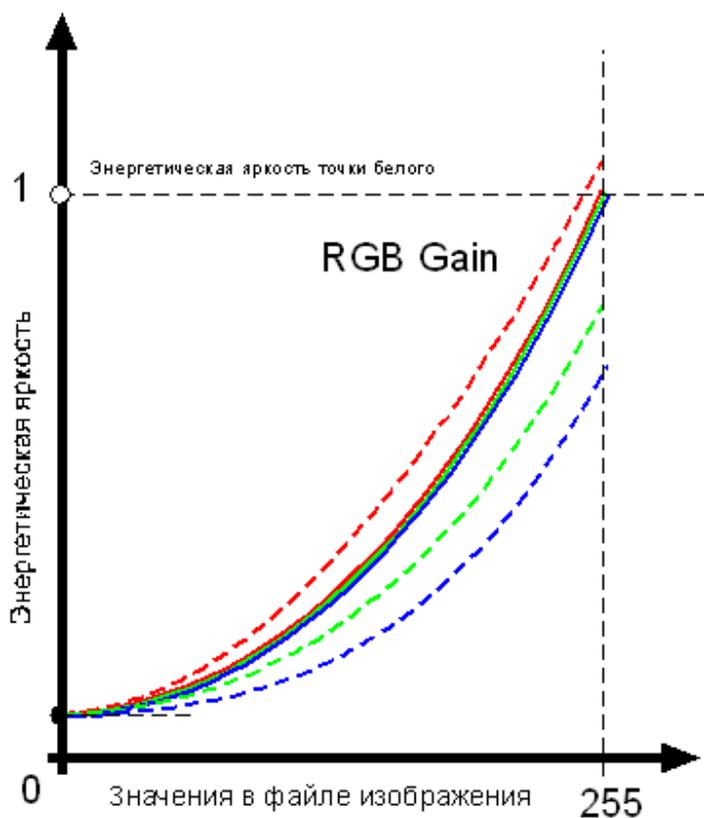


Рис. 41.

Данная настройка является параметром, определяющим цветовую температуру и энергетическую яркость опорного белого света (белую точку монитора).

Высококласные дисплеи наряду с «RGB gain» («RGB») имеют упрощенный вариант данной настройки, обозначаемый как «Color Temperature».

«Color Temperature» содержит набор дискретных вариантов соотношения интенсивности кардинальных стимулов. Количество шагов колеблется от 3 (соответствующих цветовым температурам 5000К, 6500К и 9300К) до 43 шагов (в этом случае пользователь может выбрать нужное соотношение в диапазоне от 5000К до 9300К с шагом в 100К). Несмотря на то, что производитель должен гарантировать соответствие данных цифр реальной цветовой температуре белой точки при уровне ее светимости 100

cd/m<sup>2</sup>, на практике этого соответствия нет, а более или менее точная регулировка возможна только при использовании «RGB gain» («RGB»).

Дисплеи офисного класса позиции «RGB gain» («RGB») не имеют, а ограничиваются «Color Temperature» по двум-трем ступеням. Точная настройка цветовой температуры белой точки в них невозможна.

#### Позиция «Contrast».

Присутствует во всех дисплеях.

Название «Contrast» унаследовано из телевизионной практики и, как будет показано ниже, лишь отчасти соответствует колориметрической сути данного параметра. Изменение аппаратных значений позиции «Contrast» приводит к изменению уровня энергетической яркости опорного белого света (белой точки монитора) за счет синхронного изменения максимальной интенсивности кардинальных стимулов, то есть сохраняя соотношение их интенсивностей в ответ на максимальное значение в файле изображения (255 255 255). Технически осуществляется за счет синхронного усиления сигнала контроллерами дисплея по каждому каналу.

В практике настройки высококлассных дисплеев зона постоянства цветовой температуры при изменении значений «Contrast» лежит в пределах 60-110 cd/m<sup>2</sup>.

На графике (рис. 42) показано, как влияет изменение значений «контраста» на энергетическую яркость белой точки.

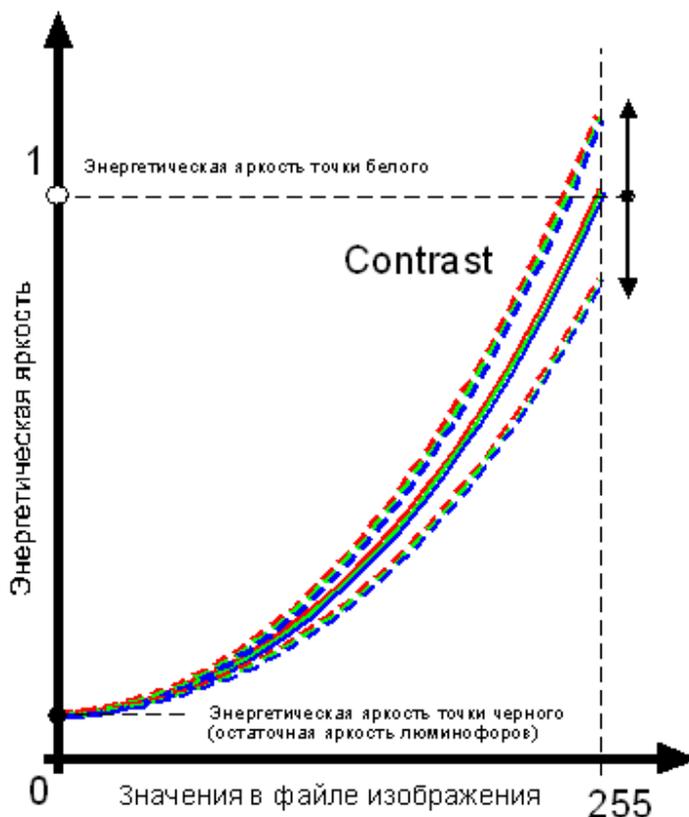


Рис. 42.

#### Примечание:

Изменение энергетической яркости белой точки (яркости опорного белого света) при постоянстве уровня яркости черной меняет общий энергетический контраст монитора. Отсюда у данной настройки и

родилось название «Contrast». По ряду сведений в продаже начали появляться аппараты, где термин «Contrast» заменен на более точный термин «White point level».

### Позиция «Brightness»

Присутствует во всех дисплеях. Название унаследовано из телевизионной практики, но колориметрически совершенно некорректно.

Позиция «Brightness» («Яркость») позволяет синхронно перемещать диапазон всех возможных яркостей дисплея вверх и вниз, меняя как максимальную, так и остаточную яркость свечения люминофоров. Технически осуществляется за счет синхронного смещения сигнала контроллерами дисплея по каждому каналу.

На графике тонопередачи (рис. 43) показано, к чему приводит изменение значений «Brightness».

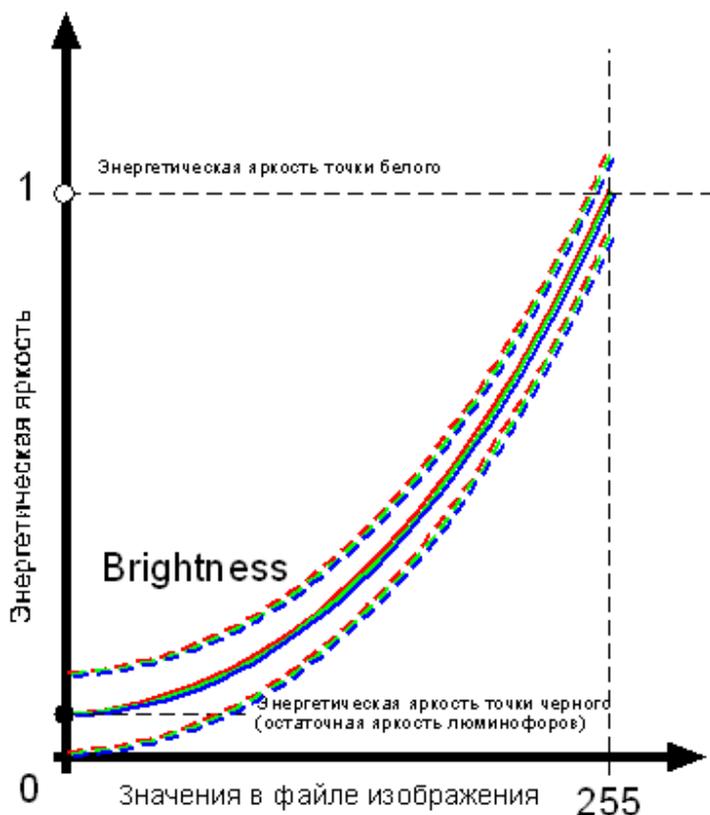


Рис. 43.

Изменение значения «Brightness» («Black point level») определяет, с одной стороны, уровень светимости черной точки дисплея (остаточную яркость) и (вместе с изменением значений «Contrast») радикально влияет на энергетический контраст монитора. С другой стороны, регулировка «Brightness» призвана обеспечить различимость деталей в глубоких тенях изображений.

Регулировка «Brightness» не должна приводить к изменению соотношений остаточной яркости люминофоров, то есть к изменению соотношения минимальной интенсивности кардинальных стимулов колориметра. Это означает, что изменение уровня «Brightness» в широком диапазоне значений не должно приводить к появлению в черной точке сильно

выраженного хроматического компонента. В целом высококлассные дисплеи удовлетворяют данному требованию.

### Позиция «RGB bias»

Доступна в некоторых профессиональных моделях дисплеев, к примеру таких, как SONY GDM серии F. Некоторые модели фирм CTX и Mitsubishi содержат «RGB bias» в т.н. инженерных настройках, которые становятся доступны пользователю лишь при введении определенного шифра с передней панели (к примеру включение дисплея при одновременно нажатых клавишах яркости и контраста). Большинство дисплеев не имеют на передней панели доступа к «RGB bias».

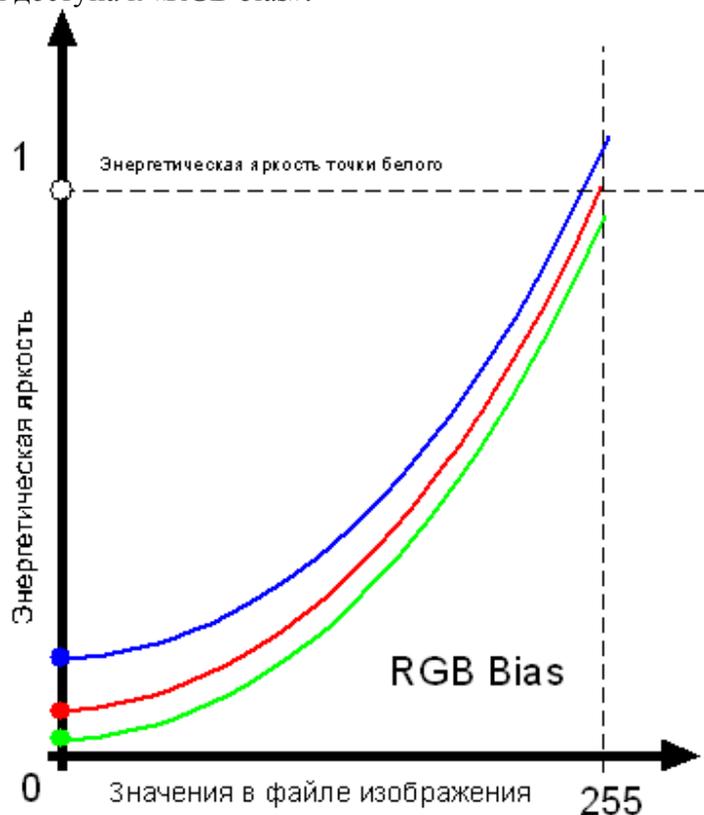


Рис. 44.

Позиция «RGB bias» позволяет **раздельно** для каждого стимула перемещать диапазон всех возможных яркостей вверх и вниз, меняя как максимальную, так и остаточную яркость свечения люминофоров. Технически осуществляется за счет раздельного смещения сигнала контроллерами дисплея по каждому каналу.

Настройка «RGB bias» — прерогатива производителя дисплея, и именно этому параметру фирмы уделяют особое внимание. При настройке высококлассных аппаратов мы рекомендуем позиции «RGB bias» оставлять данными по умолчанию и вмешиваться в них только тогда, когда есть уверенность в необходимости такого вмешательства, к примеру, когда эти настройки случайно изменены неопытным пользователем или когда заводские установки не обеспечивают нейтральность черной точки устройства.

#### Примечание1:

Как мы уже говорили, все перечисленные параметры взаимно влияют друг на друга. Например, повышение энергетической яркости черной точки (изменение «Brightness») приводит к увеличению энергетической яркости белой точки; изменение минимальной энергетической яркости в одном из каналов

(регулировка «RGB bias») приводит к изменению максимальной энергетической яркости в этом канале, в результате чего меняются и цветность и энергетическая яркость белой точки монитора. Поэтому требуемые параметры настройки достигаются методом последовательных приближений (как правило, два-три цикла).

**Примечание 2:**

В комплект поставки современных дисплеев производства Nec-Mitsubishi входит бесплатная утилита NaviSet (ее также можно скачать с <http://www.necmitsubishi.com/naviset/>), которая позволяет производить интерактивную регулировку их аппаратных настроек. Информационный обмен дисплей-компьютер осуществляется через стандартный VGA-кабель. После установки программы в Display Properties появляется дополнительная закладка «Monitor Adjustment» (рис. 45).

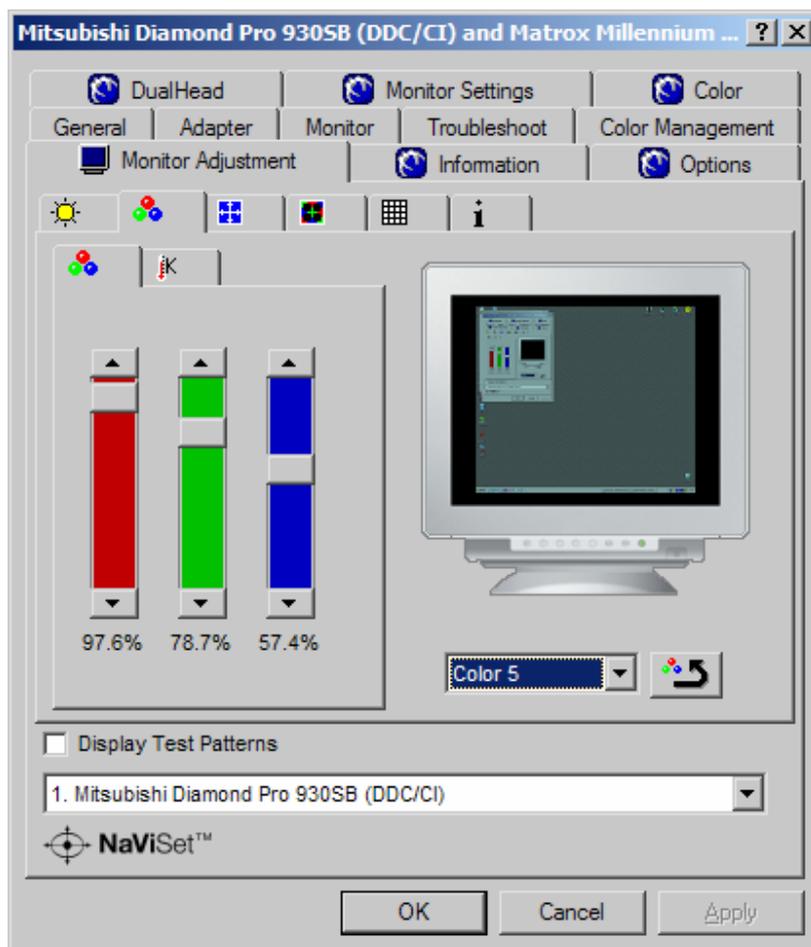


Рис. 45. Интерфейс утилиты NaviSet.

### LCD-дисплеи

Видеосистема с LCD-дисплеем, так же как и видеосистема с CRT-дисплеем, отвечает требованиям трехстимульного визуального колориметра, но пока еще несколько уступает последней по качеству кардинальных стимулов (менее ровный спектр, не всегда пропорциональное изменение интенсивности), а также имеет слишком высокий уровень светимости черной точки, что при стандартной (по ISO) светимости белой точки не обеспечивает достаточный энергетический контраст монитора. К тому же из-за несовершенства технологии многие дисплеи не в состоянии обеспечить хроматическую нейтральность черной точки и глубоких теней, а также постоянство яркости пикселей по

всему полю экрана, что особенно заметно на темных заливках. Чаще всего черная точка и глубокие тени имеют выраженный синий сдвиг (рис. 46).

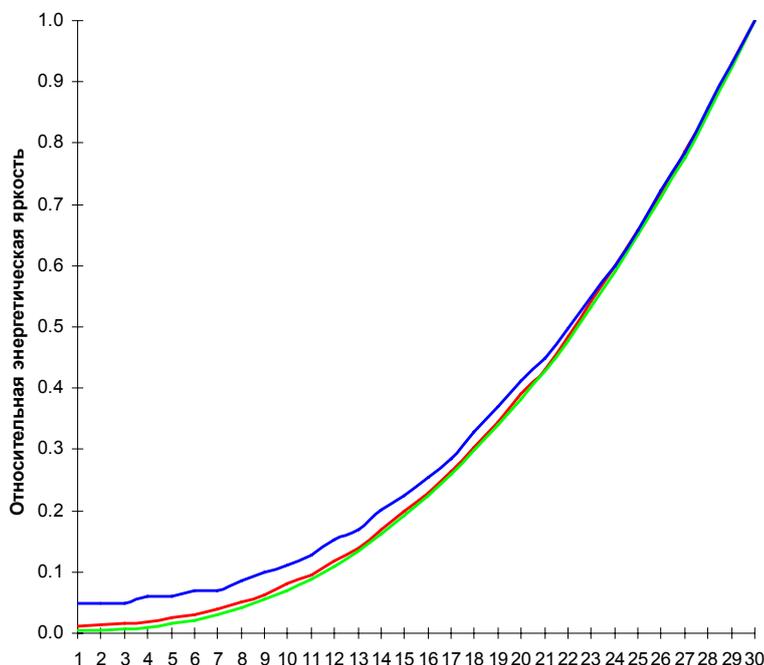


Рис. 46. Графики нелинейности энергетической яркости кардинальных стимулов монитора с дисплеем Eizo GC-18 (гамма 2,2) после одного года эксплуатации. Измерения были произведены сразу же после выполнения калибровки с гамма 2,2. Хорошо видно, что остаточная яркость «синего» кардинального стимула в 5 раз выше, чем энергетическая яркость двух других.

**Важное примечание:**

Из сугубо коммерческих соображений подавляющее большинство компаний прекратило производство высококачественных CRT-дисплеев. Следует отметить, что только самые дорогостоящие (\$2000-3500) LCD-дисплеи могут обеспечить **колориметрическое качество** на уровне CRT-дисплеев **среднего** класса. Тем, кто решает вопрос выбора дисплея для профессиональной работы с изображениями, настоятельно рекомендуем воспользоваться пока еще имеющейся возможностью и приобрести высококачественный CRT-дисплей SONY GDM F-520, Mitsubishi Diamond Pro 2070SB, Mitsubishi Diamond Pro 930SB, или LaCie 22" electronblue IV (производства Франции или Японии).

В LCD-дисплеях кардинальные стимулы образуются за счет прохождения белого света через «RGB»-фильтры, а их интенсивность регулируется хроматически нейтральными жидкими кристаллами за счет изменения угла поляризации RGB-лучей перед прохождением их через общий поляризационный фильтр (рис. 47). То есть, интенсивность кардинальных стимулов может только *понижаться* от некоего максимального значения, задаваемого источником белого света.

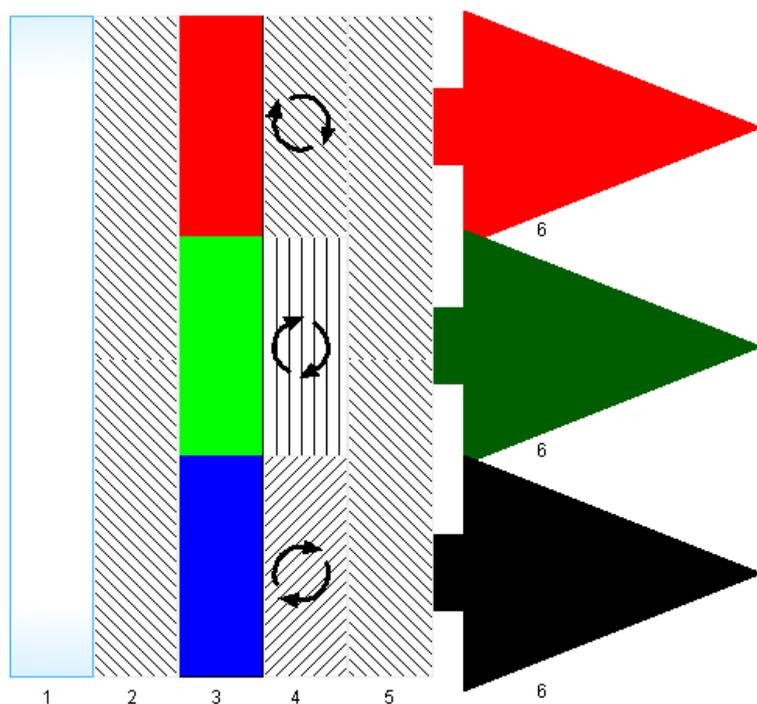


Рис. 47. Принципиальная схема LCD-дисплея. 1 — источник белого света; 2 — первый поляризационный фильтр; 3 — «RGB»-фильтры; 4 — жидкие кристаллы, меняющие угол поляризации; 5 — общий поляризационный фильтр; 6 — результирующая интенсивность кардинальных стимулов при разных углах поляризации.

#### **Позиция «Brightness»**

Синхронно перемещает диапазон всех возможных яркостей дисплея вверх и вниз за счет изменения яркости источника белого света.

#### **Позиция «Contrast»**

Одновременно понижает максимальную яркость всех трех кардинальных стимулов от максимально возможной за счет синхронного изменения начального угла поляризации жидких кристаллов для каждого канала.

#### **Позиция «RGB gain» («RGB»)**

Раздельно регулирует уровень максимальной интенсивности кардинальных стимулов по каждому из каналов в ответ на максимальное указание в файле изображения: 255 255 255. Технически осуществляется за счет раздельного изменения начального угла поляризации жидких кристаллов для каждого канала.

#### **Позиция «RGB bias»**

В LCD-дисплеях отсутствует.

## **Калибровка монитора с помощью Profile Maker 5.x.x**

Из всех существующих программ пакет Profile Maker 5.x.x предлагает наиболее развитый механизм, учитывающий задачи пользователя. Основным преимуществом Profile

Maker является то, что на сегодняшний день только эта программа позволяет настраивать монитор как полифункциональную систему, а также то, что, в отличие от большинства других программ, при гамма-приводке Profile Maker 5.x.x ориентируется не на измерение градиента энергетических яркостей каждого кардинального стимула в отдельности, а на измерение «нейтрального» градиента. Такое измерение, с одной стороны, позволяет выполнить приводку системы к требуемой гамма, с другой — удерживать нейтраль относительно выбранной белой точки по всему диапазону, несмотря на определенную хроматическую нестабильность кардинальных стимулов.

### **Калибровка монитора с CRT-дисплеем, как полифункциональной системы**

Программный пакет Profile Maker 5.x.x строит логику калибровки данного типа видеосистемы по следующему принципу:

— *основная калибровка*, осуществляемая по параметрам, которые предлагаются программой по умолчанию. Установка предлагаемых колориметрических параметров производится за счет OSD-панели при поддержке измерительного прибора, гамма-приводка осуществляется за счет LUT видеоадаптера;

— *возможные дополнительные калибровки (пользовательские)*, осуществляемые **только за счет управления LUT**, на основании измерений, выполненных при основной калибровке.

Параметрами основной калибровки являются:

1. Максимально возможная энергетическая яркость белой точки, граничащая с зоной насыщения дисплея, но не достигающая ее.
2. Цветовая температура белой точки 6500К.
3. Минимально возможная энергетическая яркость черной точки при которой, с одной стороны, в глубоких тенях изображений остаются различимыми детали, с другой — минимален ее хроматический компонент.
4. Требуемая гамма монитора.

#### **Примечание:**

В программе по умолчанию установлена гамма 1,8, к которой с помощью LUT видеокарты будет приведена нелинейность видеосистемы. Пользователям РС нужно сразу выбрать значение 2,2.

Данные параметры позволяют обеспечить соответствие видеосистемы стандарту ISO 3664 и «выжать» из нее как из самостоятельного цветовоспроизводящего устройства максимум возможностей.

Любое дальнейшее желаемое изменение параметров монитора-колориметра производится за счет регулировки уровня сигнала, подаваемого с видеокарты, при условии неизменности OSD-настроек дисплея.

LUT видеокарты управляем программно, что обеспечивает удобство работы при необходимости быстрой смены параметров основной калибровки на параметры пользовательской калибровки. К примеру, в течение двух-трех минут можно изменить энергетическую яркость и цветовую температуру (цветность) белой точки, визуальную уравнивая ее с яркостью и цветностью субтрактивного носителя (бумаги), освещенного светом просмотрочного места. Загрузив же специальный файл настроек (reference), можно в течение секунды корректно поменять все параметры основной калибровки монитора-колориметра на параметры пользовательской (за исключением параметров черной точки, которые всегда остаются неизменными, что является недостатком программы). То есть, полифункциональная система дает возможность моментально превращать монитор из самостоятельного

цветовоспроизводящего устройства в цветопробное устройство или в слайдскан-визуализатор, а затем возвращаться назад (рис. 48).



Рис. 48.

Основные и пользовательские калибровочные настройки могут быть выполнены как с помощью функции «Monitor» программы Measure Tool пакета Profile Maker 5.x.x, так и с помощью самого Profile Maker. Мы рекомендуем пользоваться Measure Tool, так как после выполнения калибровки, перед началом измерений патчей характеристики, желателен контроль результата калибровки. При использовании ProfileMaker возможности контроля нет, так как промер патчей характеристики начинается автоматически, сразу после окончания калибровки.

Желательно, чтобы процедура основной калибровки осуществлялась в полной темноте во избежание «паразитной» подсветки дисплея посторонними источниками.

После подключения измерительного устройства и запуска Measure Tool\ Monitor на экране появляется интерфейс *первого «степа»* процедуры основной калибровки (рис. 49).

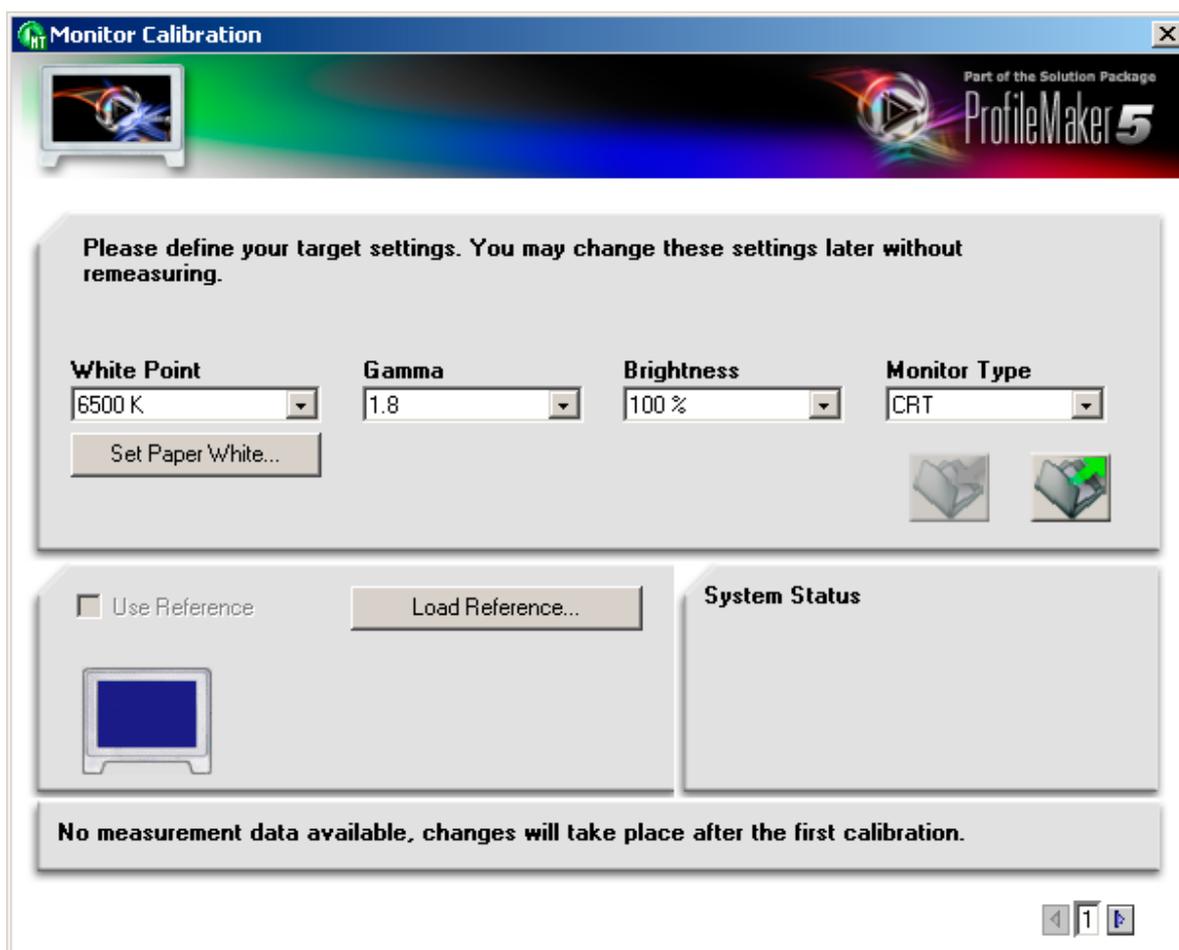


Рис. 49. Первый «шаг» процедуры калибровки.

В списке «White Point» цветовая температура белой точки по умолчанию указана 6500K (согласно рекомендациям ISO 3664 по настройке мониторов как самостоятельных устройств), к этой температуре будет приведен монитор с помощью «RGB gain» при поддержке четвертого «шага» программы.

В списке «Gamma» по умолчанию установлена гамма 1.8, к которой с помощью LUT видеокарты будет приведена нелинейность видеосистемы. Напомним, что пользователям PC нужно выбрать значение 2,2.

В списке «Brightness», вопреки терминологии, принятой в телевизионной и компьютерной практике, позиция «100%» указывает на то, что при основной калибровке энергетическая яркость белой точки останется равной той, что будет установлена при настройке аппаратной позиции «Contrast» (третий «шаг»).

В списке «Monitor Type» следует выбрать тип дисплея: CRT (электронно-лучевая трубка).

Об использовании кнопок «Set Paper White», «Load reference» и флажка «Use reference» речь пойдет ниже, так как они используются только при повторном вызове первого «шага».

*Второй «шаг»* — интерфейс настройки максимально возможной энергетической яркости белой точки («Contrast») (рис. 50).



Рис. 50. Второй «шаг» процедуры калибровки.  
 (Показано наиболее удобное позиционирование измерительного прибора i1 Display II при настройке мониторов с CRT-дисплеями.)

Принцип работы этого «шага» основан на том, что программа (под контролем измерительного устройства) «ловит» нижнюю границу т.н. зоны насыщения дисплея по белой точке. Внутри зоны насыщения дисплей не реагирует на изменение сигнала, поступающего с видеокарты, то есть изменение сигнала от максимального (255 255 255) и ниже (до некоей границы) не приводит к изменению энергетической яркости белой точки и, соответственно, не приводит к изменению ощущения ее светлоты (рис. 51).

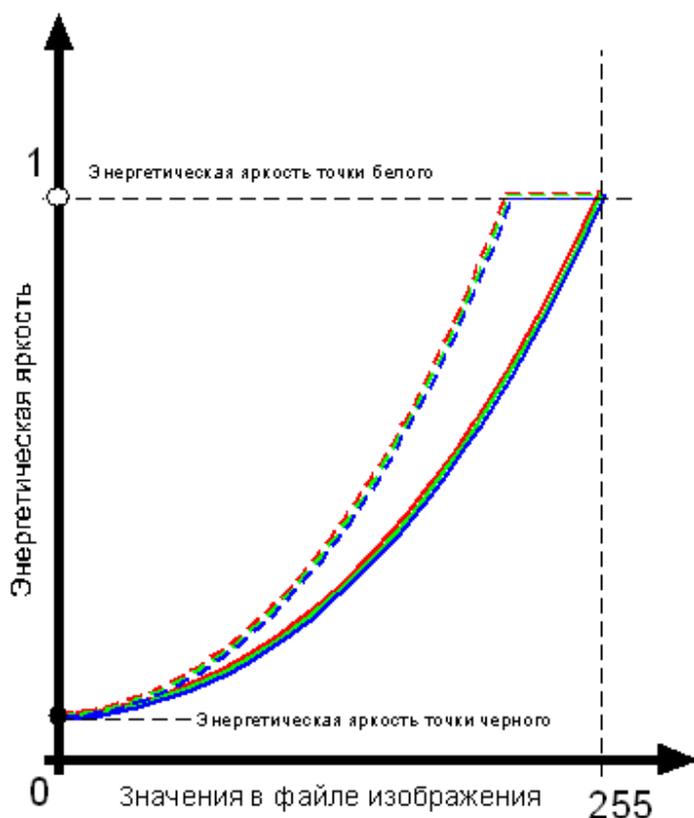


Рис. 51. Сплошная линия — тонопередающая кривая дисплея, не достигшего зоны насыщения по белой точке. Пунктир — тонопередающая кривая дисплея, достигшего зоны насыщения по белой точке.

Позицию «Contrast» следует выставить на максимальное значение и нажать кнопку «Start».

**Примечание:**

Пользователи видеосистем с дисплеями Nec-Mitsubishi могут воспользоваться утилитой NaviSet, позволяющей проводить интерактивную регулировку аппаратных настроек дисплея и не испытывать неудобств из-за недостатка внешнего освещения; некоторое неудобство создает необходимость регулярного переключения между интерфейсами программ с помощью клавиш Alt+Tab).

Программа последовательно выдаст на экран два светлых патча: первый, заданный значениями 242 242 242; второй, заданный значениями 255 255 255.

Если измерительное устройство не определит достаточной яркостной разницы между ними, то это означает, что дисплей по белой точке достиг зоны насыщения и верхняя контрольная стрелка Quality Indicator уйдет вправо.

Значения «Contrast» в этом случае понижают до тех пор, пока нижняя и верхняя стрелки Quality Indicator не совпадут. Понижение должно быть плавным и очень медленным, поскольку программа дает прибору команду на непрерывную серию замеров (время одного замера около 1 сек). При быстром понижении легко «прозевать» нижнюю границу зоны насыщения, уйти ниже и потерять из-за этого часть энергетического контраста монитора.

В то же время большинство CRT-дисплеев даже при максимальном значении позиции «Contrast» не достигает зоны насыщения, в высоких светах изображений остаются различимыми детали, а стрелки Quality Indicator после первого же замера чаще всего оказываются совпавшими.

*Третий «стен»* — «Brightness» («Яркость»). Фактически — это интерфейс настройки черной точки дисплея.

Принцип настройки, как уже было сказано выше, основан на том, что с помощью измерительного устройства программа ищет оптимальное значение энергетической яркости черного поля (черной точки) при которой, напомним, соблюдаются два условия: появление устойчивой различимости деталей в глубоких тенях изображений и сохранение максимально возможной хроматической нейтральности.

Если целиком следовать указаниям программы, то пользователь должен выставить аппаратную позицию «Brightness» («Яркость») на передней панели дисплея в минимальное положение, нажать кнопку «Start», а затем, плавно повышая значения «Brightness», добиться совмещения нижней и верхней стрелок Quality Indicator. В этом случае, как правило, достигается значение энергетической яркости черной точки 0,2–0,6 cd/m<sup>2</sup>, что при энергетической яркости белой точки 100 cd/m<sup>2</sup> обеспечит энергетический контраст монитора 2,6–2,2D. Такие значения энергетического контраста легко обеспечат полноценный визуальный контраст, позволят организовать экранную цветопробу печатных процессов, то есть окажутся вполне достаточными для тех случаев, когда заранее известно, что видеосистема не будет использована как слайдскан-визуализатор.

Если предполагается использование системы в том числе и как слайдскан-визуализатора, то для достижения максимального энергетического контраста, при котором еще сохраняется (или лишь слегка снижается) различимость в глубоких тенях изображений, мы рекомендуем доводить индикатор только до появления желто-зеленой стрелки<sup>20</sup> (рис. 52), тогда энергетическая яркость черной точки окажется в районе 0,1–0,12 cd/m<sup>2</sup>, что обеспечит энергетический контраст монитора (при яркости белой точки 100 cd/m<sup>2</sup>) 3,0–2,9D.

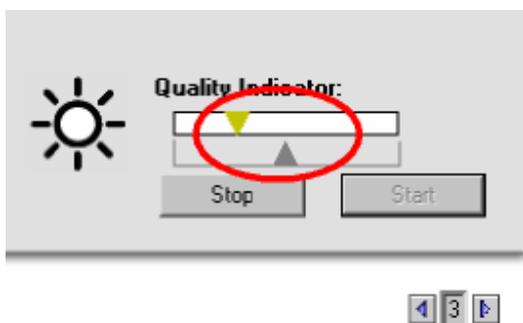


Рис. 52. Примерное положение Quality Indicator, обеспечивающее допустимый минимум энергетической яркости черной точки.

Нельзя забывать о том, что измерительные приборы дают сильную погрешность измерений в глубоких тенях изображений, из-за чего положение стрелки Quality Indicator может оказаться нестабильным. В этом случае необходимо визуально оценить ее среднее местоположение.

**Примечание:**

В случае, если при цветовой температуре белой точки 5000K ее яркость окажется в районе 120–140 cd/m<sup>2</sup> (формально не соответствует ISO 3664), энергетический контраст при данной методике может выйти на 3,07–3,15D, что уже близко к энергетическому контрасту слайда. Поэтому, если монитор используется только для визуализации сканированных слайдов, в особенности если требуется регулярная демонстрация результатов сканирования заказчикам, мы рекомендуем устанавливать в видеосистеме CRT-дисплей с Super Bright-режимом работы. Нужно помнить при этом, что Super Bright-режим чаще всего не подчиняется регулировке RGB-gain.

<sup>20</sup> Цвет стрелки задается программой за счет R193 G198 B0.