

Цена деления шкал в манселловской системе такова, что 1 единица манселловской светлоты соответствует примерно 2 единицам манселловской насыщенности, а 3 единицы манселловского цветового тона — 5 единицам манселловской насыщенности (Newhall, 1940).

Далее цветовая терминология будет рассматриваться в гл. 8.

7.3 ТРИХРОМАТИЧЕСКОЕ УРАВНИВАНИЕ

Когда цветовые стимулы начинают визуально сравнивать с аддитивной смесью красного, зеленого и синего уравнивающих стимулов, то обнаруживают, что, манипулируя относительными или абсолютными количествами красного, зеленого и синего лучей всегда можно получить цветовое ощущение идентичное тому, которое вызывает любой выбранный стимул (рис. 7.1). Ряд цветовых стимулов, обладающих очень высокой колориметрической чистотой, казалось бы, являются исключением из приведенного правила, но, как будет показано далее, с помощью специальных методик их тоже можно уравнивать.

Феномен трихроматического уравнивания легко объясним в логике трехкомпонентной теории цветового зрения: поскольку все цветовые стимулы анализируются сетчаткой лишь через три различных типа отклика — ρ , γ и β (вероятнее всего пропорционально поглощению тремя фоточувствительными пигментами), зрение не видит разницы между двумя стимулами, вызывающими одни и те же ρ -, γ - и β -сигналы (причем не зависимо от того, каков спектральный состав этих двух стимулов). Отличие в спектральном распределении энергии двух уравненных стимулов может быть весьма впечатляющим, к примеру, когда стимул, энергия которого заполняет весь видимый спектр, может визуально соответствовать свету, состоящему из трех узких спектральных полосок (рис. 7.2): поскольку оба стимула вызывают идентичные ρ -, γ - и β -отклики, визуально они неразличимы.

⇒ Два стимула, которые имеют различный спектральный состав, но визуально идентичны, именуются *метамерной парой* или *метамерами*.

Примечательно, что по ряду стимулов с высокой колориметрической чистотой и по большинству монохроматических стимулов — смесь красного, зеленого и синего световых потоков может точно воспроизвести тот же цветовой тон и субъективную яркость, что и у исследуемого стимула. Вместе с тем, удовлетворительного соответствия по полноте цвета не удастся добиться никогда. Сказанное особо касается сине-зеленых стимулов спектра: смесь только синего и зеленого световых потоков в состоянии воспроизвести стимул, цветовой тон и субъективная яркость которого будут те же, что и у исследуемого стимула, но полнота цвета всегда окажется ниже.

С одной стороны можно говорить, что сей факт дискредитирует трихроматическую теорию цветового зрения, но фактически, он прогнозируется ею, что видно по рис. 7.3, на котором даны кривые чувствительности трех ретинальных рецепторов ρ -, γ - и β .

Давайте рассмотрим случай, когда красный, зеленый и синий световые потоки (R, G и B) являются максимально чистыми, то есть, берем монохроматический свет с длиной волны 650 нм — красный (R), монохроматический свет с длиной волны 530 нм — зеленый (G) и 460 нм — синий (B).

Теперь предположим, что мы пытаемся уравнивать по визуальному восприятию монохроматический свет с длиной волны 490 нм (сине-зеленый).

Понятно, что красный стимул вызовет ρ -отклик, но не вызовет γ - и β -откликов.

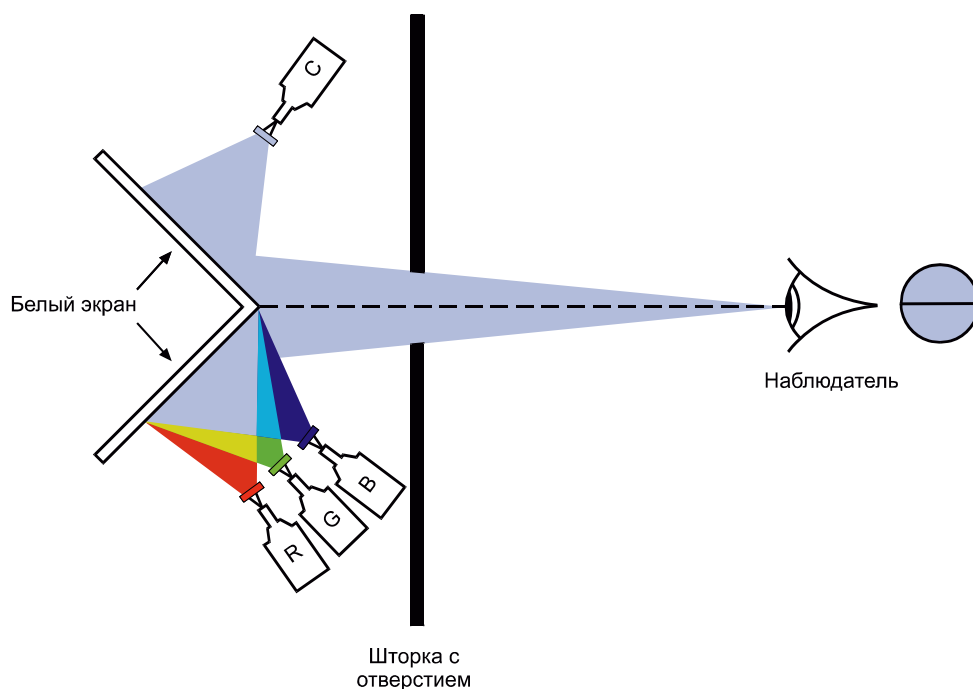


Рис. 7.1 Принцип трихроматического уравнивания. Верхний экран освещен только светом тестового стимула С. Нижний экран освещен смесью красного, зеленого и синего лучей, исходящих от проекторов R, G и В. Управляя интенсивностями красного, зеленого и синего потоков в смеси, можно добиться идентичности ее зрительного восприятия со стимулом С.

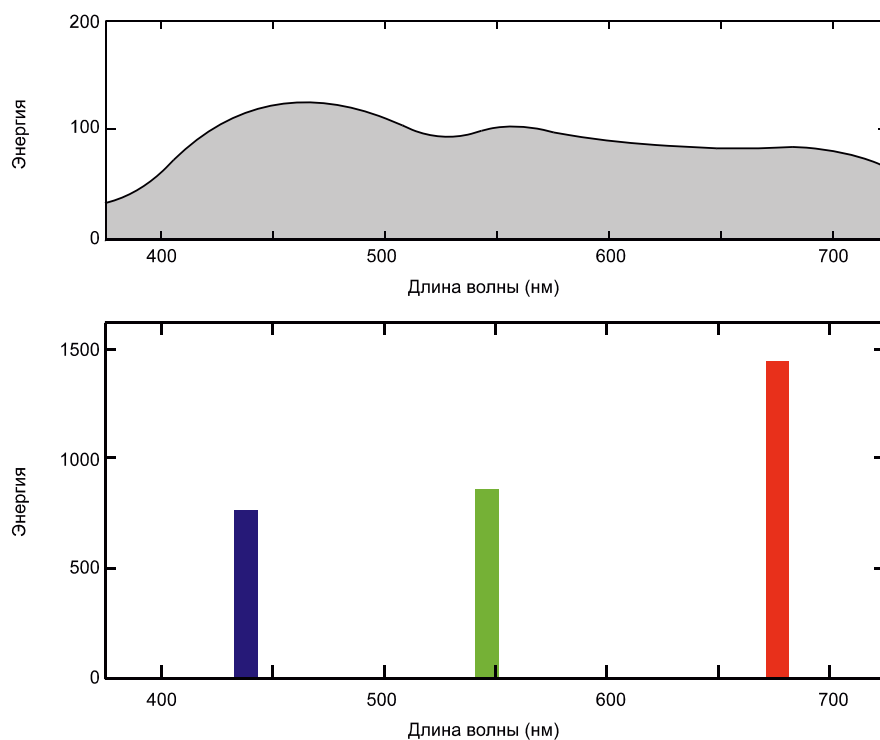


Рис. 7.2 На верхнем рисунке показано спектральное распределение энергии белого света. На нижнем — спектральное распределение света, воспринимаемого точно таким же. **Примечание:** энергетические ординаты графиков различны.

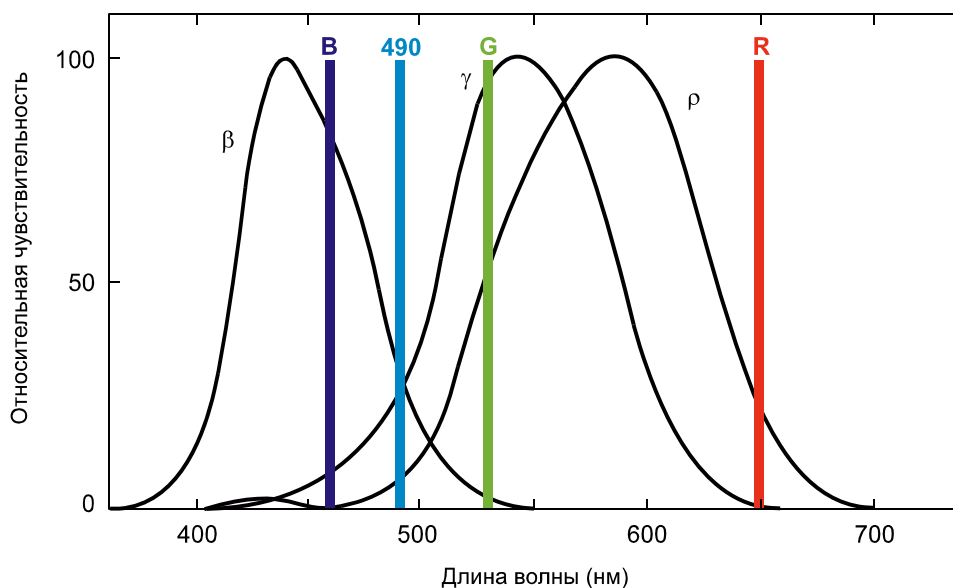


Рис. 7.3 Типичный набор кривых ρ , γ , β , представляющих предполагаемые кривые спектральной чувствительности фоторецепторов сетчатки глаза (взято с рис. 2.2).

Зеленый стимул вызовет в основном γ -отклик, но также и немалый ρ -отклик, и лишь весьма незначительный отклик β .

Синий стимул даст в основном отклик β с небольшой добавкой γ -отклика, но отклика ρ не будет.

Отклики, представленные на рис. 7.3 в виде удельных мощностей каждого из трех стимулов RGB, могут быть расположены в виде таблицы:

Для удельной мощности R-стимула	$\rho = 24$	$\gamma = 0$	$\beta = 0$
Для удельной мощности G-стимула	$\rho = 56$	$\gamma = 92$	$\beta = 4$
Для удельной мощности B-стимула	$\rho = 0$	$\gamma = 9$	$\beta = 75$

Теперь по исследуемому монохроматическому стимулу с длиной волны 490 нм:

$$\rho = 8 \quad \gamma = 26 \quad \beta = 26$$

Следовательно, для визуального уравнивания со смесью стимулов RGB необходимо выбрать такие их количества, которые вызовут те же величины колбочковых откликов.

Поскольку B-стимул дает в основном β -отклик, мы выбираем одну треть от его мощности, дабы получить большую часть требуемого β -отклика. Таким образом, имеем:

$$\text{Для } 1/3 \text{ мощности B-стимула} \quad \rho = 0 \quad \gamma = 3 \quad \beta = 25$$

Коль скоро нам необходимы 23 единицы γ -отклика, и поскольку R-стимул их дать не может, мы можем получить нужное количество γ -отклика при помощи G-стимула, и понадобится нам $1/4$ его мощности. Таким образом:

$$\text{Для } 1/4 \text{ мощности G-стимула} \quad \rho = 14 \quad \gamma = 23 \quad \beta = 1$$

Следовательно, $1/3$ мощности стимула В и $1/4$ мощности стимула G в сумме дадут:

$$\rho = 14 \quad \gamma = 26 \quad \beta = 26$$

Понятно, что хотя мы и добились корректных величин откликов γ и β , мы получили при этом ρ -отклик почти вдвое больший, чем необходимо (при этом даже не добавляя стимул R — поскольку его добавка еще больше увеличит ρ -отклик, сделав смесь еще менее похожей на тестовый стимул). Таким образом, не существует варианта смеси монохроматических световых потоков с длинами волн в 650, 530 и 460 нм, способного обеспечить визуальное равенство с монохроматическим стимулом длиной волны в 490 нм (что подтверждается экспериментально).

Сей факт, однако, вполне предсказуем по кривым рис. 7.3, которые являются количественным выражением трихроматической теории цветового зрения (но не ее опровержением): ρ - и β -кривые рис. 7.3 накладываются друг на друга, в результате чего возбудить одни только γ -колбочки принципиально невозможно. Следовательно, высокочистые сине-зеленые стимулы не могут быть уравнены аддитивными смесями красного, зеленого и синего световых потоков.

Когда в качестве уравнивающих стимулов выбраны монохроматические потоки с различными длинами волн или когда уравнивающие стимулы состоят из широких спектральных полос, то всегда найдутся колориметрически чистые стимулы, которые невозможно будет уравнивать по зрительному ощущению.

Монохроматический стимул с длиной волны 490 нм уравнивать удастся тогда, когда он оказывается в составе тройки уравнивающих стимулов, но в этом случае всегда найдутся другие монохроматические стимулы, которые не поддаются трихроматическому уравниванию.

Однако вернемся к исходным трем стимулам RGB с длинами волн соответственно 650, 530 и 460 нм.

Понятно, что когда вместо того, чтобы добавлять часть стимула R к смеси, состоящей из $1/3$ мощности стимула В и $1/4$ мощности стимула G, мы добавим ее к стимулу *уравниваемому* (490 нм), мы все-таки сможем получить цветовое соответствие: в данный момент мы имеем 14 единиц ρ -отклика по уравнивающей смеси, но только 8 единиц ρ -отклика по исследуемому стимулу, и понятно, что добавка 6 единиц ρ -отклика по исследуемому стимулу приведет к его визуальному уравниванию со смесью G- и В-стимулов. Итак, необходимую величину ρ -отклика по исследуемому стимулу получаем добавкой к нему $1/4$ мощности стимула R:

$$\text{Для } 1/4 \text{ мощности R-стимула} \quad \rho = 6 \quad \gamma = 0 \quad \beta = 0$$

Таким образом, получаем ситуацию, при которой:

Исследуемый (уравниваемый) стимул (490 нм) + 1/4 мощности стимула R
соответствуют по зрительному ощущению

1/4 мощности стимула G + 1/3 мощности стимула B

Добавку одного из уравнивающих стимулов к стимулу уравниваемому (а не к смеси уравнивающих) обычно отмечают знаком «минус»:

Исследуемый (уравниваемый) стимул (490 нм)
соответствует по зрительному ощущению

1/4 мощности стимула G + 1/3 мощности стимула B – 1/4 мощности стимула R.

Опираясь на принцип отрицательных значений, можно описать все цветовые стимулы путем выбора соответствующих пропорций трех аддитивно смешанных уравнивающих стимулов. Отметим, что отрицательные значения возникают вследствие т.н. *паразитного возбуждения* колбочек, вызываемого стимулами R, G и B (см. раздел 2.5).

7.4 ФУНКЦИИ ЦВЕТОВОГО СООТВЕТСТВИЯ

Коль скоро у нас есть возможность описать любой цветовой стимул с помощью аддитивных смесей трех уравнивающих стимулов (как было показано выше), теоретически мы можем специфицировать все цветовые стимулы видимого спектра. Такая работа была выполнена практически, и ее результат чаще всего представляют в виде трех кривых (рис. 7.4), в которых определенные количества R-, G- и B-стимулов, требуемые для визуального уравнивания монохроматических стимулов по каждой из длин волн (с малым шагом), даны как функция от длины волны.

Как и следовало ожидать, экстремум каждой кривой приходится на ту зону спектра, где находится соответствующий уравнивающий стимул и стоит отметить также, что все три кривые содержат участки с отрицательными значениями (наибольший у R-стимула в сине-зеленой части спектрального диапазона).

Для удобства необходимые количества RGB-стимулов выражают, как правило, не в удельных энергиях, а в произвольных безразмерных единицах, полученных исходя из того, что некий белый стимул уравнен равновеликими значениями RGB-стимулов. На рис. 7.4 в качестве источника белого света¹ использован гипотетический стимул, энергия которого по всем длинам волн видимого спектра одинакова. Такой источник весьма значим для колориметрии и именуется *равноэнергетическим источником* (S_e). Когда для определения единиц используется иной источник, или когда единицы определены фотометрически (к примеру, в канделах на метр квадратный или люксах), или когда используются энергетические единицы — кривые не будут отличаться по форме, но только по высоте: ординаты всех трех окажутся умноженными на три различных коэффициента.

Ординаты обсуждаемых кривых принято обозначать соответственно как $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ и именовать *кривыми смешения* (color-mixture curves) или *функциями цветового соответствия* (color-matching functions).

Колориметрическая интерпретация функций цветового соответствия звучит так: монохроматический стимул с длиной волны λ вызывает точно такое же зрительное ощущение, что и смесь удельных количеств стимула R, стимула G и стимула B. Аналогично по каждому монохроматическому стимулу (с постоянным малым шагом) во всем диапазоне видимого спектра, то есть:

¹ Т.н. «опорного белого света» — Прим. пер.