

И.Т. Федоров

Курс общего цветоведения

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
И11

И11 **И.Т. Федоров**
Курс общего цветоведения / И.Т. Федоров – М.: Книга по Требованию, 2021. –
225 с.

ISBN 978-5-458-57537-9

ISBN 978-5-458-57537-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



Серия Книжный Ренессанс

www.samizday.ru/reprint

ВВЕДЕНИЕ

Колориметрия — наука об измерении цвета, который она рассматривает не как некоторое качество зрительного ощущения, но как „такой атрибут физического стимула, который можно определять из установок на тождество по цвету с другими физическими стимулами“ (Смис и Гилд); наш зрительный механизм рассматривается при этом просто как некоторый „нулевой инструмент“.

Поясним это определение.

Под словом „снет“ мы понимаем поле излучения, имеющее около некоторой определенной точки пространства для некоторого пространственного угла, направление которого проходит через эту точку, некоторые определенные свойства. Через нормальный к этому направлению элемент поверхности в единицу площади и пространственного угла проходит количество энергии

$$f(\lambda) d\lambda$$

в форме волн, длина которых заключена между λ и $\lambda + \Delta\lambda$; $f(\lambda)$ — некоторая функция от λ в видимой части спектра.

По этому определению

$$\int f(\lambda) d\lambda d\omega d\sigma dt$$

есть следовательно некоторое количество энергии ($d\omega$ — элемент пространственного угла, $d\sigma$ — элемент поверхности, dt — элемент времени). Некоторый определенный свет задается указанием волновой функции $f(\lambda)$ между $\lambda = 380 \text{ м}\mu$ и $\lambda = 760 \text{ м}\mu$. Когда этот свет попадает в наш глаз, мы видим тот или иной цвет.

Мы принимаем, что глаз помещен в месте, занимаемом нашим элементом поверхности таким образом, что избранное направление проходит вблизи места наилучшего зрения (в области желтого пятна). Мы предполагаем также, что $f(\lambda)$ в области зрачка заметно не изменяется, т. е. что зрачок совершенно заполнен однородным пучком световых лучей. В противоположность этому, как только мы сравниваем различные световые потоки на соприкасающихся полях, $f(\lambda)$ в зависимости от направления изме-

няется скачком для некоторого плоского пучка направлений соответственно резкой прямой линии раздела между обоими полями.

„Многообразие различных видов световых потоков имеет более высокий порядок, чем континуум, а именно порядок пространства функций, т. е. неограниченного числа измерений. Аргюи было бы возможным, что это относится также и к многообразию цветовых качеств или что последнее имеет по меньшей мере очень большое число измерений, как это имеет место в многообразии сложных звуков, так как ухо до известной степени действует как гармонический анализатор. Здесь этого нет. Более того, световые потоки располагаются по принципу одинакового „вида“ на смежных полях на большие группы — каждая размерности пространства функций — и многообразие этих групп одинаково выглядящих световых потоков для наблюдателя с нормальным зрением имеет три измерения — наибольшее из того, что наблюдалось“ (Шредингер).

Шредингер называет поэтому „цветом“ группу одинаково выглядящих световых потоков; отсюда вытекает определение, предложенное Смисом и Гилдом.

Экспериментально твердо установлен факт, что ощущение, вызванное некоторым стимулом, может быть сделано тождественным с ощущением, вызванным смесью надлежащих количеств трех произвольно выбранных, независимых друг от друга „единичных“ стимулов¹. Образно выражаясь, это означает, что какой бы цвет мы ни поместили на одной половине фотометрического поля, мы можем воспроизвести его на другой половине, смешивая в надлежащих количествах три единичных стимула. Символически это можно записать так:

$$F = xX + yY + zZ,$$

где F — некоторый цвет, X , Y , Z , — единичные стимулы, а x , y , z — некоторые вполне определенные числа, находящиеся из опыта.

Если два стимула, хотя бы совершенно различные по своему составу, могут быть приравнены к одинаковым количествам основных стимулов, иными словами, к одному и тому же эквивалентному стимулу, они будут вызывать одинаковые ощущения.

Для того чтобы найти эквивалентный стимул для лучистой энергии, попадающей в наш глаз от окрашенного образца, мы

¹ Независимость здесь понимается в том смысле, что ни один из этих „единичных“ стимулов не может быть получен из смеси двух других.

представляем себе лучистую энергию разбитой на сумму многих стимулов различных длин воли, входящих в кривую распределения энергии в спектре, причем для каждого из них мы определяем соответствующий ему эквивалентный стимул. Сумма таких эквивалентных стимулов и будет эквивалентным стимулом для всего излучения. Кривые $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ (рис. 1) изображают собою эквивалентные стимулы для любого спектрального стимула, взятого в количестве равном единице (кривые эти построены Сми-

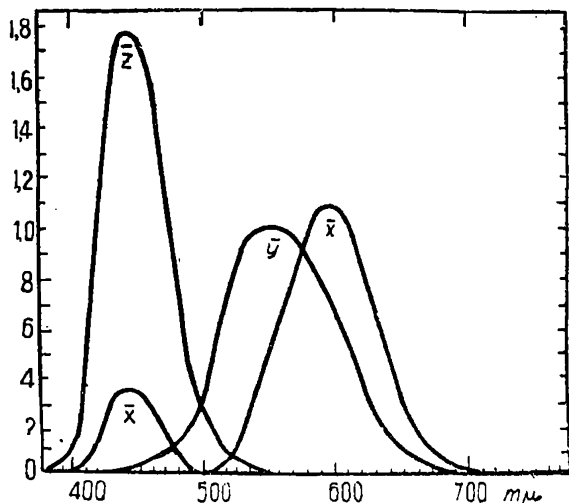


Рис. 1. Эквивалентные стимулы для спектральных цветов.

сом и Гилдом на основании нового определения кривых сложения спектральных цветов Райтом для 10 человек и Гилдом для 7 и приняты Международным осветительным конгрессом в 1931 г.); эквивалентные стимулы для количеств, указанных в кривой распределения лучистой энергии по спектру, могут быть найдены перемножением соответствующих ординат кривой спектрального ражения и кривых $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$.

Очевидно, что если (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) , ..., (x_n, y_n, z_n) — эквивалентные стимулы для спектральных стимулов, то спецификация стимула, полученного аддитивной комбинацией этих компонентов, будет

$$\left(\sum_1^n x_n, \sum_1^n y_n, \sum_1^n z_n \right).$$

Весь этот процесс, схематически изображенный на рис. 2, можно суммировать так: качество света источника определяется кривой распределения его энергии по спектру, цветовые же свойства образца определяются его спектрофотометрической кривой; произведение этих двух кривых дает нам распределение энергии в спектре света, попадающего в

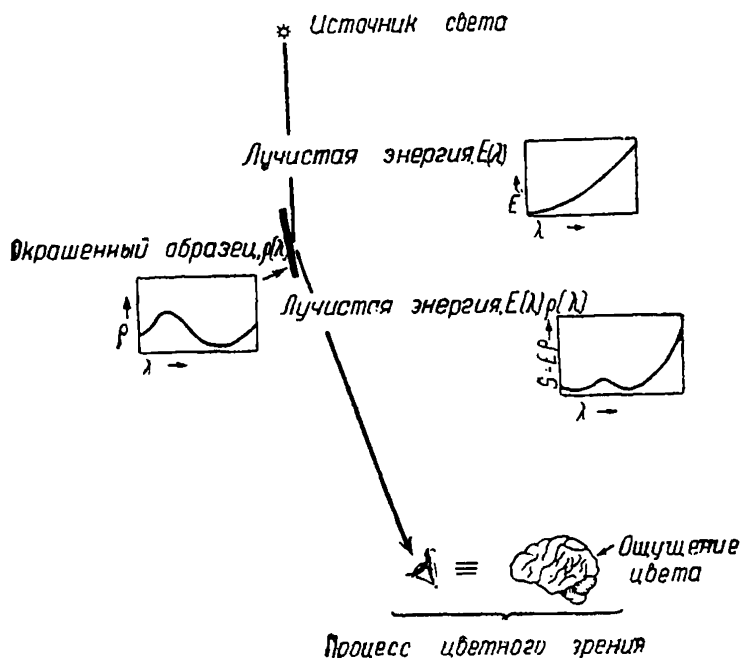


Рис. 2.

глаз. Этот свет, проинтегрированный при помощи эквивалентных стимулов спектральных лучей (рис. 1), приводится к трем числам, определяющим ощущение в мозгу наблюдателя с нормальным зрением.

На практике мы находим эти числа, устанавливая на колориметре эквивалентный стимул, составленный из стимулов данного колориметра. Зная, как эти „инструментальные стимулы“ составлены из основных стимулов, легко переходим к этим последним. В косвенной колориметрии эти стимулы определяются без колориметра по кривой распределения энергии в спектре стимула и кривым x , y , z графическим интегрированием без всякого

участия глаза реального наблюдателя. Координаты x , y , z , выраженные в таких единицах, чтобы сумма их равнялась 1, называются трехцветными коэффициентами и определяют собой качество цвета, т. е. его тон и чистоту (или колориметрическую насыщенность).

Исходя из этой схемы, мы в первой части нашего курса дадим необходимые сведения относительно источников света, применяемых в колориметрии, далее изложим спектрофотометрические методы определения спектральных кривых пропускания или отражения света. Затем приведем необходимые сведения из физиологической оптики и изложим основные понятия колориметрии по Шредингеру и Смису, после чего на ряде конкретных примеров покажем, как все это применяется на практике.

В заключение мы дадим схему построения цветового тела и атласа цветов, которой при условии правильного построения и градуирования можно в ряде случаев заменять колориметры.

ПРИРОДА СВЕТА

Природа света с незапамятных времен привлекала внимание ученых и философов. Греки считали, что свет состоит из потока частиц, расходясь лишь в том, распространяются ли они от источника света или исходят из глаза. Обе теории объясняли как кажущееся прямолинейное распространение света, так и явление правильного отражения. Ни одной лучшей теории не появлялось вплоть до XVII в., когда стали накапливаться новые экспериментальные факты, в первую очередь явления интерференции, диффракции, двойного лучепреломления и поляризации. Гюйгенс около 1690 г. показал, что отражение и преломление могут быть объяснены гипотезой, по которой свет, подобно звуку, распространяется продольными волнами. Однако прямолинейное распространение света не получило объяснения, и Ньютон, тщательно проанализировавший новую теорию, вернулся к старой корпускулярной теории. Авторитет Ньютона был столь велик, что волновая теория света не считалась заслуживающей внимания вплоть до 1800 г., когда Юнг и Френель снова вернулись к волновой концепции света. Этим исследователям удалось при помощи волновой теории объяснить не только прямолинейное распространение света, но и явления диффракции и интерференции, приняв, что волны света — волны поперечные, т. е. такие, в которых колебания происходят в направлениях, перпендикулярных к направлению распространения, а не параллельных, как для звука. В 1850 г. Френель нанес решительный удар корпускулярной теории, доказав экспериментально, что скорость света в веществе всегда менее, чем в пустоте, т. е. как раз обратное тому, что требовалось корпускулярной теорией.

Но и волновая теория встретила затруднения. Для распространения волн необходима некоторая среда, причем математические исследования показали, что эфир, придуманный для этой цели, должен иметь некоторые чрезвычайно странные свойства. Так, например, для того, чтобы объяснить огромную скорость света ($300\,000\text{ км/сек}$), эфиру пришлось приписать твердость, трудно совместимую с кажущимся беспрепятственным движением

планет. Открытие Фарадеем и Генри электромагнитных явлений привело в 1873 г. Максвелла к созданию его знаменитой электромагнитной теории распространения электрических и магнитных возмущений. Что эта теория имеет значение и для некоторых оптических явлений было показано около 1888 г., когда Герц установил, что электромагнитные волны обладают многими свойствами световых. И действительно, электромагнитная теория столь успешно объясняла известные оптические явления, что казалось в этой области все исчерпано.

Новые, необъяснимые с точки зрения волновой теории факты стали накапливаться с конца прошлого столетия. Рядом исследователей (Столетовым и др.) было найдено, что пространство, окружающее некоторые металлы, делается способным проводить электрический ток при падении света на металл. После открытия Дж. Дж. Томсоном в 1897 г. электрона вполне естественно было полагать, что фотоэлектрический эффект, как назвали открытое Столетовым явление, обязан испусканию электронов металлом под действием света.

Выбрасывание электрона из металла требует затраты некоторого конечного количества энергии, причем эта энергия доставляется, по видимому, светом. Однако подсчеты показывают, что скорость, с которой электрон получает энергию из светового пучка обычной интенсивности, столь мала, что требовалось бы несколько лет для того, чтобы накопить количество энергии, необходимое для вырывания электрона. На самом же деле, как показывает опыт, испускание электронов начинается при освещении металла тотчас же. Вследствие этого пришлось предположить, что энергия в световом пучке не распределена равномерно по своему волновому фронту, но сконцентрирована лишь в некоторых точках его — так, как будто бы свет состоит из отдельных частиц. Накапливались и другие факты, подтверждающие эту точку зрения.

Чтобы дать удовлетворительное объяснение распределению энергии в спектре абсолютно черного тела, Планк вынужден был предположить, что излучающий вибратор испускает энергию не непрерывно, но отдельными порциями, названными квантами. Затем в 1905 г. Эйнштейн указал, что и поглощение света в фотоэлектрическом процессе должно происходить квантами, причем опыт показал, что эти кванты имеют ту же величину, что и в теории Планка.

В течение последнего десятилетия физика была вынуждена пользоваться двумя, по видимому, противоречащими одна другой теориями: волновой теорией для таких явлений, как отражение,

преломление, интерференция, диффракция и поляризация, и квантовой теорией для более поздних открытий — рентгеновы лучи, фотоэлектрический эффект и излучение. Неумение сочетать эти теории, слить их воедино ставило физику в ненормальное положение. Причины, приведшие к созданию этих двух теорий, кроются в том, что мы можем представить себе два способа переноса энергии на расстояние — один в виде волнового движения, другой в виде действительного переноса материи (снаряд, камень). Обе теории в их простейших формах, прекрасно объясняя некоторые оптические явления, были бессильны объяснить другие.

Более глубокий анализ некоторых недавних опытов показал, что обе теории справедливы в известных пределах. Явление Комптона показало, что частицы света могут вести себя подобно частицам материи, из опытов же Дэвиссона и Джермера следовало, что в некоторых условиях электрон ведет себя подобно группе волн.

Новый метод интерпретации физических явлений, могущий повести к синтезу обеих противоположных теорий, был дан волновой механикой. Принимая в качестве отправного пункта эквивалентность материи и энергии, волновая механика постулирует, что с частицей материи всегда связаны волны. Будучи развита главным образом де-Бройлем и Шредингером, она стремится заменить собой обычную ньютонову механику для частиц размеров атомных и менее атомных. Развитие волновой механики не достигло еще такого состояния, чтобы ее можно было вводить в элементарные курсы, и мы будем пользоваться и старой волновой теорией света, и — в некоторых случаях — теорией квант Планка-Эйнштейна, помня, что обе эти теории — частные случаи некоторого более общего принципа.

С самого начала нужно также составить себе ясное представление о тех единицах, в которых мы измеряем свет. Единицы эти трех родов. Примером единиц первого рода может служить эрг. Измерив лучистую энергию, получаемую некоторой поверхностью, при помощи термоэлемента или аналогичного инструмента, мы можем выразить ее в эргах в секунду. Метод этот применим как для видимого, так и для инфракрасного и ультрафиолетового спектров. Единица эта вполне объективна и получаемые результаты не зависят от наблюдателя. Измерения света в энергетических единицах обладают очевидно свойством аддитивности. Если некоторая волна доставляет a единиц энергии в секунду на данную поверхность, а вторая b единиц в секунду, то вместе они доставят $a + b$ единиц. Результаты измерения, выраженные в таких единицах, не дают, разумеется, никакого представления о величине получаемого ощущения.

Люкс служит примером второго рода единиц. Он определяется¹ как освещенность, создаваемая одной свечой на расстоянии одного метра. Чтобы наглядно представить себе величину люкса, приведем данные, характеризующие некоторые освещенности (табл. 1).

Таблица 1

О с в е щ е н н о с т ь		Люксы
В средних широтах прямыми лучами солнца		до 100 000
В полнолуние		ок. 0,25
В комнатах {	днем	100—2 000
	вечером	10— 15
Для чтения {	не очень мелкого шрифта	30— 50
	мелкого шрифта	70—100
Для тонких ювелирных работ		200—300

Освещенность измеряется обыкновенным фотометром. Предположим, что мы хотим измерить освещенность, создаваемую некоторым источником света в некоторой точке. Мы помещаем в эту точку тот или иной фотометр и затем перемещаем с противоположной стороны стандартную свечу, пока не получим одинаковой яркости обеих половин поля зрения фотометра. Если d —расстояние свечи от фотометра, освещенность, создаваемая измеренным источником, будет $\frac{1}{d^2}$ люксов.

Мы поступаем таким образом и когда источник света того же цвета, что и стандартная свеча, и когда он иного цвета; в последнем случае результаты будут менее точны, т. е. установить на равенство по яркости разноцветные поля окажется труднее, чем одноцветные. Будут сказываться также и аномалии в цветном зрении наблюдателя. Цветнослепой наблюдатель (около 4% мужчин) совершенно непригоден для этих измерений. Люкс есть следовательно единица наполовину объективная, наполовину субъективная.

Люксы обладают свойством аддитивности. Если некоторая лампа создает освещенность в a люксов в некоторой точке, находящейся на некотором расстоянии, а другая дает освещенность в b люксов в точке на том же расстоянии, то вместе они создадут освещенность в $a + b$ люксов (закон Эбнея). Люксы измеряют

¹ Сводка определений главнейших фотометрических величин дана в приложении I.

стимул, но не ощущение яркости. При удвоении освещенности ощущение яркости не удвоится. Люкс определяет лишь некоторый уровень ощущения, но не в состоянии дать расстояние от одного уровня до другого. Аддитивность освещенностей можно проверить на простой фотометрической скамье. Пусть например красная, зеленая и синяя вакуумные калильные лампы помещены по одну сторону фотометрического приспособления на различных расстояниях от последнего, причем две из них слегка смещены с оптической оси, так что они не заслоняют друг друга. На другом конце пусть будет поставлена обычная вакуумная лампа с бесцветной колбой. Передвигая эту „белую“ лампу, можно измерить освещенность, даваемую одной, двумя или тремя окрашенными лампами. В табл. 2 приведены результаты, полученные для одной серии таких измерений.

Таблица 2

И с т о ч н и к с в е т а	Л ю к с ы
Красный	3,23
Зеленый	2,46
Синий	3,10
Красный + зеленый	5,53 (5,69)
Зеленый + синий	5,53 (5,56)
Синий + красный	5,77 (6,33)
Красный + зеленый + синий	7,57 (8,79)

Цифры, поставленные в скобках, получены простым суммированием первых трех. Результаты показывают степень точности, получаемой при подобных сильно гетерохромных (разноцветных) фотометрированиях.

Третий тип единиц — единица ощущения яркости. Эта единица совершенно субъективна по своей природе и имеет очень малое применение.

Для уяснения разницы между единицами освещенности и единицами ощущения яркости рассмотрим такой опыт. Поместим фотометрическое приспособление в середине фотометрической скамьи длиной в 360 см, расположенной в темной комнате. Две вакуумные лампы А и В (рис. 3), каждая примерно по 32 свечи, помещены на концах скамьи и уравнены по силе света. Затем, в то время как один экспериментатор производит наблюдение, другой приближает А к фотометрическому приспособлению до тех пор, пока не получит едва заметной разницы в яркостях