

УДК 519.7

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЭКОНОМНОГО КОДИРОВАНИЯ ЦВЕТА****М.Ф. Бондаренко¹, С.Ю. Шабанов-Кушнаренко², Ю.П. Шабанов-Кушнаренко³**^{1, 2, 3} ХНУРЭ, г. Харьков, Украина

В статье сформулирована и решена задача о построении системы экономного кодирования цвета. На базе метрической теории конечномерного пространства разработана математическая модель равноконтрастного цветового пространства. Найдены параметры взаимно однозначного и взаимно непрерывного преобразования колориметрического пространства цветов в равноконтрастное цветовое пространство.

КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО, ЦВЕТОВОЙ ПОРОГ, ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ, КОЛОРИМЕТР, РАВНОКОНТРАСТНЫЙ АТЛАС ЦВЕТОВ

Введение

Классическая линейная теория цветового зрения [1] указывает способ кодирования цветов, который в настоящее время широко используется на практике [2]. Этим способом каждый цвет формально представляют в виде вектора $a = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$ трехмерного арифметического пространства [3], называемого колориметрическим. Координаты цвета $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ линейно зависят от спектра породившего его светового излучения. Указанный способ кодирования цвета, несмотря на свою простоту и естественность, имеет существенный недостаток, заключающийся в его неэкономности. Это обнаруживается в том, что психологическое расстояние между цветами, измеряемое числом порогов между ними, не всегда соответствует евклидову расстоянию между концами векторов этих цветов.

Практически это приводит к тому, что одни цвета приходится кодировать с избыточным числом знаков, а другие — с недостаточным [4]. Избыточное число знаков в коде цвета вызывает перерасход объема памяти ЭВМ при запоминании цветных изображений, недостаточное же число ведет к неточной передаче цвета при воспроизведении изображения [5]. Задача об экономном кодировании цвета будет решена, если удастся указать такое взаимно однозначное и взаимно непрерывное преобразование колориметрического пространства цветов в равноконтрастное цветовое пространство, в котором расстояние между его векторами измеряется числом разделяющих их цветовых порогов. До настоящего времени задача об экономном кодировании цвета удовлетворительным образом еще не решена [6, 7].

1. Создание колориметра для измерения цветовых порогов на базе ПК

Проблема экономного кодирования цвета упирается в недостаточную изученность цветовых порогов и отсутствие адекватной математической модели равноконтрастного цветового пространства. Ниже описывается предпринятая в работе попытка решения данной задачи на базе изложенной ранее метрической теории конечномерного простран-

ства. Недостаточная изученность цветовых порогов обусловлена чрезвычайной трудоемкостью выполнения необходимых экспериментов. Для определения цветовых порогов до настоящего времени используются исключительно оптические колориметры, которые имеют весьма сложную конструкцию и большое число регулировок. На выполнение подобных экспериментов исследователь тратит годы упорного и тяжелого труда, получая в результате весьма фрагментарные результаты. Так, например, в опытах Мак-Адама [8, 9], выполненных в 1937 – 1943 гг., которые считаются до сих пор непревзойденными, обследовано всего 25 пороговых зон. Вместе с тем в цветовом пространстве имеется много миллионов пороговых зон. Опыты Мак-Адама выполнялись при фиксированном фоне, хотя очевидно, что в реальных условиях фон, на котором человек видит цвета, меняется. Это вызвано, кроме усложнения эксперимента, еще и тем, что в существующих оптических колориметрах необходимая для выполнения пороговых опытов регулировка фона не предусмотрена.

Представляется, что выход из создавшегося затруднительного положения может быть найден благодаря использованию принципиально новой техники для проведения экспериментов. А именно, современные ПК дают прекрасную возможность создания высокоточного и высокопроизводительного колориметра для изучения цветовых порогов. Изучение состояния вопроса показывает, что такая задача до сих пор никем не решалась и даже не ставилась. Основная идея создания порогового колориметра на базе ПК заключается в следующем. Оптические колориметры всегда создавались для изучения зависимости цвета от светового излучения. Для решения этой задачи использование оптики неизбежно, поскольку световое излучение невозможно исключить из такого эксперимента. Когда же изучаются цветовые пороги, то анализируется лишь связь между цветами, поэтому световые излучения, их породившие, можно и не вводить. Именно поэтому опыты по изучению цветовых порогов можно проводить без оптической техники. Следовательно, формирование цве-

тов на экране ПК является достаточным средством для осуществления пороговых экспериментов. Использование оптических колориметров для изучения цветовых порогов в прежние времена было вынужденным, поскольку отсутствовали другие средства для формирования цвета. В настоящее же время в этом нет необходимости, поскольку цвета можно формировать на экране ПК.

Имеется несколько обстоятельств, препятствующих непосредственному использованию ПК в качестве колориметра для измерения цветовых порогов. Во-первых, цвета, формируемые на экране ПК, маркируются не в той системе, которая общепринята в колориметрии. А пока не будет осуществлена привязка цветов, формируемых ПК, к колориметрической системе, исследователь, производящий на ЭВМ опыты с цветами, не сможет полученные результаты применить для построения равноконтрастного цветового пространства. Во-вторых, количество цветов, которые можно воспроизвести на экране ПК, недостаточно для достижения требуемой точности измерения цветовых порогов. В-третьих, в настоящее время отсутствуют сервисные программы, с помощью которых экспериментатор мог бы беспрепятственно производить на ПК все необходимые эксперименты и связанные с ними расчеты. Именно решению этих задач и посвящена нижеследующая часть этой статьи.

Вопрос об определении колориметрических координат цвета машинных цветов решается на базе использования пространственного закона Талбота [10]. Известно, что мозаика, составленная из достаточно мелких цветных точек, субъективно сливается, и в результате наблюдатель видит непрерывное и однородное цветное изображение. На этом принципе основано действие цветного телевизора. При слиянии цветных точек глаз производит точное линейное усреднение цвета, измеренного в линейной колориметрической системе [11]. В этом и состоит сущность закона Талбота. Разработана программа, которая рассчитывает распределение точек на экране для произвольного заранее заданного цвета. Линейный размер пикселя составляет обычно от 0,2 до 0,3 мм. По каждому из основных цветов (красный, зеленый и синий) предусмотрено 256 уровней интенсивности (от 0 до 255).

Принцип действия программы следующий. Отсутствие цвета на экране дисплея — это черный цвет с колориметрическими координатами (0, 0, 0). Основным красным цветом максимальной интенсивности (маркированный числом 255) принимаем за вектор (1, 0, 0) колориметрического пространства. Аналогичный зеленый цвет принимаем за вектор (0, 1, 0), синий — за вектор (0, 0, 1). Мозаику строим из однотипных блоков, каждый из которых имеет размер $15 \times 15 = 225$ точек. Такого числа точек в мо-

заике достаточно для регулирования интенсивности основных цветов с приемлемой точностью, составляющей $100/225 = 0,45\%$. При этой точности ошибка измерения, как показывает опыт, никогда не выходит за пределы цветового порога.

Внутри блока используются точки двух цветов: черного и одного из основных цветов (красного, зеленого или синего) максимальной интенсивности (255-я градация). Если требуется получить основной цвет (например, красный) с колориметрической интенсивностью α , то $\alpha \times 225$ точек в блоке берутся красными (255-я градация), остальные $(1 - \alpha) \times 225$ точек — черными. Программа построена так, что распределяет красные точки равномерно по полю блока. Первое поле сравнения имеет размер около 40 мм (в зависимости от размера пикселя), оно состоит из 10×10 блоков и размещается в центре экрана. Второе поле сравнения окружает первое и образовано остальной площадью экрана. На нем формируется основной цвет произвольной интенсивности.

Задача определения колориметрических координат данной компьютерной интенсивности основного цвета состоит в том, чтобы подобрать такое значение колориметрической интенсивности α (назовем ее “мозаичной”) того же основного цвета, при которой цвет центрального мозаичного поля визуально сравнивается с цветом окружающего его поля. Опыты, выполненные описанным методом, показали, что мозаичная интенсивность α каждого основного цвета в пределах точности эксперимента оказывается строго пропорциональной квадрату компьютерной интенсивности x того же цвета. Связь между ними описывается зависимостью

$$\alpha = x^2 / 225^2. \quad (1)$$

Здесь x — машинная координата основного цвета (от 0 до 255), α — мозаичная координата того же основного цвета (от 0 до 1). Пересчет машинных координат цвета в мозаичные и обратно производится программно согласно формуле (1).

Второе препятствие на пути создания компьютерного колориметра, как уже говорилось, заключается в том, что число градаций цвета, которое можно сформировать на экране ПК, неизмеримо меньше того, которое необходимо для достаточно точного измерения цветовых порогов. Так, по каждому основному цвету (красный, зеленый, синий) предусмотрено всего лишь 255 градаций, в то время как требуются многие тысячи.

Для эффективного измерения цветовых порогов необходимо, чтобы дозирование цвета велось, по крайней мере, с точностью до 5% пороговой величины. Требуемое увеличение числа градаций цвета, формируемого на экране компьютера, достигается методом цветовой мозаики, описанным

выше. Тест-поле формируется из блоков, образующих растр 10×10 цветных точек. По заданным колориметрическим координатам цвета, который требуется точно воспроизвести, программно находятся ближайшие к нему 8 грубо дозируемых (255 градаций) компьютерных цветов. В колориметрическом пространстве эти 8 цветов образуют вершины шестигранника, охватывающего точку заданного цвета. Программа, кроме того, находит нужное число точек растра 10×10 для каждого из 8 грубо дозируемых цветов и распределяет эти точки равномерно по площади блока. Таким способом можно получить до 25500 градаций интенсивности по каждому из основных цветов, что обеспечивает 2-3%-ю точность измерения порогов.

2. Разработка методики исследования цветковых порогов

Создание компьютерного колориметра, описанного в предыдущем параграфе, позволило осуществить необходимые опыты по определению цветковых порогов. Прежде чем изложить методику описываемых ниже экспериментов, рассмотрим достижения в этой области, содержащиеся в опубликованных литературных источниках. Ценными исследованиями, в которых цветковые пороги были подвергнуты систематическому изучению, являются работы Райта [12, 13]. Эксперименты проводились на полях сравнения с угловым размером 2° при черном фоне, причем сравниваемые цвета предварительно выравнивались к одной и той же яркости. Опыты были выполнены на оптическом колориметре. Их результаты представлены на рис. 1. Пороги в виде отрезков линий нанесены на цветовой график МКО 1931 г. По указанным направлениям для цветностей, представленных серединами отрезков линий было измерено всего 35 цветковых порогов. Как видно из графика, пороги резко различаются друг от друга по величине.

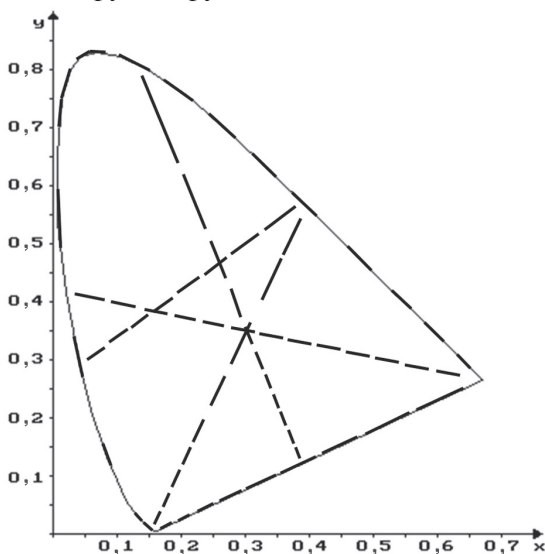


Рис. 1

Отношение максимального порога к минимальному более 9.

Обширные исследования цветковых порогов на одном наблюдателе осуществил Мак-Адам [8, 9, 14]. Они выполнялись на оптическом колориметре для 25 цветов одной и той же яркости ($48 \text{ кд} \cdot \text{м}^{-2}$) на сером фоне половинной яркости, имеющем цветность стандартного источника С. Для каждого цвета измерения выполнялись по 16-ти направлениям в плоскости равной яркости, причем каждое измерение повторялось по 50 раз. В результате усреднения замеров и последующей интерполяции получены пороговые эллипсы, нанесенные на график МКО 1931 года (рис. 2).

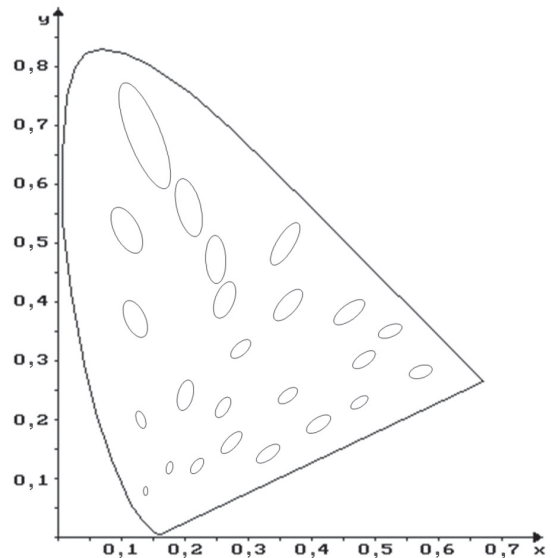


Рис. 2

Отношение максимального порога к минимальному составляет величину около 25. Точность интерполяции ансамбля пороговых точек эллипсом иллюстрируется рис. 3, на котором изображен в увеличенном масштабе верхний эллипс, взятый из рис. 2. Здесь же нанесены пороговые точки, для которых производилась интерполяция. Разброс цветковых порогов, отнесенный к соответствующему радиусу эллипса, достигает 50%. По тщательности и стабильности измерений, а также по объему экспериментального материала опыты Мак-Адама до настоящего времени остаются непревзойденными.



Рис. 3

Более поздние исследования Брауна и Мак-Адама [15] были осуществлены на одном наблюдателе для 38 цветов. Они менее пригодны для целей построения равноконтрастного цветового пространства,

поскольку выполнены для цветов разной яркости, и поэтому их труднее объединить в единую систему. В опытах Брауна [16], выполненных на 12 наблюдателях, яркость цвета также не стабилизировалась. Пороговые эллипсы, построенные по результатам этих двух работ, располагаются на цветовом графике менее системно, чем на рис. 2. Последними упомянем опыты Вышецки и Филдера [17, 18], которые в методическом отношении похожи на опыты Мак-Адама. Отличие состояло в том, что яркость сравниваемых цветов и фона была в два раза меньше, чем у Мак-Адама. Новым явилось то, что измерения порогов выполнялись не на плоскости, а в трехмерном пространстве. В результате была получена серия пороговых эллипсоидов. Точность этих экспериментов ниже, чем в опытах Мак-Адама.

Оценивая приведенные литературные данные, отметим, что в них совершенно отсутствуют опыты, у которых цветовые пороги определялись бы на фоне того же цвета. Как уже говорилось, это связано с непригодностью оптических колориметров к такого рода измерениям. Вместе с тем, очевидно, что подобные эксперименты дали бы наилучшую основу для построения теории равноконтрастного пространства, поскольку в данном случае для каждого цвета фон выбирался бы однозначно, причем простейшим способом. Нарушение этого принципа на практике привело к разному при выборе фона и сделало различные опыты несравнимыми между собой. Стабилизация яркости цветов, для которых определяются пороги, представляется удачным решением. То же можно сказать и об ограничении пороговых испытаний плоскостью равной яркости. В теоретическом плане — это простейшие ограничения, которые препятствуют распаду экспериментального материала.

В свете сказанного, описываемые ниже эксперименты по определению цветовых порогов выполнялись на компьютерном колориметре при следующих ограничениях: 1) цвет фона равен цвету тест-поля; 2) все опыты проводились при одной и той же яркости; 3) цветовые пороги измерялись только в плоскости равной яркости. Если для экспериментов, выполненных при таких условиях, удастся построить адекватную теорию, то она будет иметь наибольшую практическую значимость, поскольку в условиях реального процесса зрения для каждой точки изображения фоном обычно являются цвета, близкие к цвету данной точки как по цветности, так и по яркости.

Обозначим символами R', G', B' координаты цвета в компьютерной системе маркировки, а символами R'', G'', B'' — координаты цвета в «мозаичной» системе. Как было сказано выше, компьютерные и мозаичные координаты связаны между собой квадратичной зависимостью. При этом значению 255 компьютерной маркировки соответс-

твует единичное значение мозаичной маркировки. Отсюда вытекают следующие соотношения:

$$R'' = \frac{R'^2}{255^2}; \quad G'' = \frac{G'^2}{255^2}; \quad B'' = \frac{B'^2}{255^2}. \quad (2)$$

Равенства (2) позволяют осуществлять переход от компьютерных координат цвета к мозаичным и обратно.

Красный, зеленый и синий цвета, маркированные компьютерной координатой 255, согласно американскому стандарту (система NTSC), образуют белый цвет с координатами цветности $x_w = 0,310$; $y_w = 0,316$; [6]. Соотношения яркости этих цветов, согласно стандарту, имеют следующие значения: $0,299:0,587:0,114$ [19]. Яркость синего цвета, маркированного числом 255, принимаем за 1. Тогда яркость красного и зеленого цветов, обозначенных числом 255, составит соответственно $0,299/0,114 = 2,62$ и $0,587/0,114 = 5,16$. Пусть R, G, B — координаты цвета в системе NTSC. Тогда, согласно сказанному выше,

$$R = 2,62R''; \quad G = 5,16G''; \quad B = B''. \quad (3)$$

Равенства (3) позволяют осуществлять переход от мозаичных координат цвета к координатам того же цвета в системе NTSC и обратно.

Пересчет по формулам (2) и (3) дает следующие значения компьютерных координат для красного и зеленого цветов единичной яркости (в системе NTSC):

$$r' = \frac{255}{\sqrt{\frac{0,299}{0,114}}} = 157,45; \quad g' = \frac{255}{\sqrt{\frac{0,587}{0,114}}} = 112,38.$$

Специальные опыты с подравниванием яркости красного и зеленого основных цветов к основному синему интенсивности 255, выполненные с помощью цветовой мозаики, свидетельствуют, что фактические значения машинных координат красного и зеленого цветов соответствуют расчетным в пределах точности измерений.

Свяжем координаты цвета R, G, B принятой здесь системы NTSC с координатами цвета X, Y, Z международной системы МКО. Координаты цветности основных цветов в системе NTSC определяются, согласно стандарту, следующими значениями: $x_R = 0,67$; $y_R = 0,33$; $x_G = 0,21$; $y_G = 0,71$; $x_B = 0,14$; $y_B = 0,08$. Вычисляем координаты ортов R, G, B в системе XYZ . Согласно сказанному ранее, все три орта имеют единичную яркость, поэтому $Y_R = Y_G = Y_B = 1$. Координаты цветности x, y, z связаны с координатами цвета X, Y, Z зависимостями [19]:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z},$$

поэтому:

$$\begin{aligned}
 X_R &= Y_R \frac{x_R}{y_R} = 1 \frac{0,67}{0,33} = 2,0303, \\
 Z_R &= Y_R \frac{1-x_R-y_R}{y_R} = 1 \frac{1-0,67-0,33}{0,33} = 0, \\
 X_G &= Y_G \frac{x_G}{y_G} = 1 \frac{0,21}{0,71} = 0,2958, \\
 Z_G &= Y_G \frac{1-x_G-y_G}{y_G} = 1 \frac{1-0,21-0,71}{0,71} = 0,1127, \\
 X_B &= Y_B \frac{x_B}{y_B} = 1 \frac{0,14}{0,08} = 1,75, \\
 Z_B &= Y_B \frac{1-x_B-y_B}{y_B} = 1 \frac{1-0,14-0,08}{0,08} = 9,75.
 \end{aligned}$$

Согласно найденным значениям пересчет координат R, G, B цвета из колориметрической системы NTSC в координаты цвета X, Y, Z системы МКО описывается системой:

$$\begin{cases}
 X = 2,0303R + 0,2958G + 1,75B \\
 Y = R + G + B \\
 Z = 0,1127G + 9,75B
 \end{cases} \quad (4)$$

Обратный переход определяется системой равенств

$$\begin{cases}
 R = 0,5709372X - 0,1591740Y - 0,0861204Z \\
 G = -0,5776139X + 1,1727296Y - 0,0166056Z \\
 B = 0,0066766X - 0,0135555Y + 0,1027560Z
 \end{cases} \quad (5)$$

3. Экспериментальные исследования цветовых порогов

Использование цвета фона, который совпадает с цветами тест-полей, находящимися на пороге различения, позволило сократить число цветов, участвующих в эксперименте, с трех до двух. Во всех экспериментах, выполненных предшествующими исследователями и описанных в предыдущем параграфе, два маленьких тест-поля окружались третьим большим полем, играющим для них роль фона. В описываемых опытах использовались всего два поля: первое — небольшое в центре и второе — обширное поле, окружающее первое. Оба поля играют роль тест-полей, для цветов которых отыскивается пороговое отличие. Второе поле, кроме того, выполняет роль фона. В момент измерения порогового различия цветов тест-полей, цвет внешнего поля отличается всего лишь на один порог от цвета внутреннего поля и совпадает с цветом фона. Первое тест-поле располагается в центре экрана, оно имеет форму квадрата со стороной 20 мм. Фон формируется внутри квадрата со стороной 160 мм. За пределами этого квадрата — темнота (опыты выполнялись в затемненном помещении при отсутствии внешнего освещения). Испытуемый ведет наблюдение двумя глазами, фиксируя взгляд на малом тест-поле и рассматривая его с расстояния

70 см. Экран дисплея перпендикулярен оси зора наблюдателя, который смотрит горизонтально вперед. Угловой размер внутреннего тест-поля — около 2° , внешнего — около 16° .

Цвета, для которых отыскивались пороги, были выбраны следующим образом. Всего использовалось 15 цветов. Их расположение внутри треугольника телевизионных цветов показано на рис. 4. По сравнению с расположением цветов, принятым Мак-Адамом, распределение цветов на плоскости цветового графика более равномерное. Точки цветов, лежащие на периферии треугольника, максимально приближены к его границам.

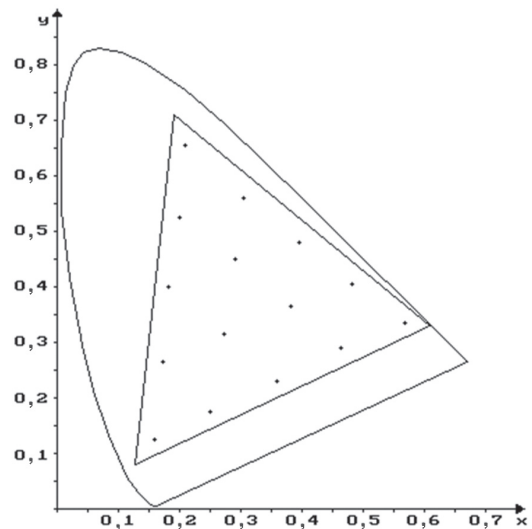


Рис. 4

Они отстоят от границы на величину, лишь немногим превышающую пороговую, что обеспечивает возможность определения порога по любому направлению от данного цвета. Этим достигается максимально возможный охват изучаемой области цветов экспериментом. Яркость всех цветов — единичная (в принятом здесь варианте колориметрической системы NTSC).

Координаты цветности x и y точек (в системе МКО) указаны в табл. 1.

Таблица 1

$x [1] = 0,175$	$y [1] = 0,125$
$x [2] = 0,190$	$y [2] = 0,265$
$x [3] = 0,200$	$y [3] = 0,400$
$x [4] = 0,220$	$y [4] = 0,525$
$x [5] = 0,230$	$y [5] = 0,655$
$x [6] = 0,335$	$y [6] = 0,560$
$x [7] = 0,320$	$y [7] = 0,450$
$x [8] = 0,300$	$y [8] = 0,315$
$x [9] = 0,275$	$y [9] = 0,175$
$x [10] = 0,395$	$y [10] = 0,230$
$x [11] = 0,420$	$y [11] = 0,365$
$x [12] = 0,435$	$y [12] = 0,480$
$x [13] = 0,530$	$y [13] = 0,405$
$x [14] = 0,510$	$y [14] = 0,290$
$x [15] = 0,625$	$y [15] = 0,335$

Пороги для каждого цвета измерялись по 16-ти направлениям. Способ выбора нумерации направлений определяется схемой, изображенной на рис. 5.

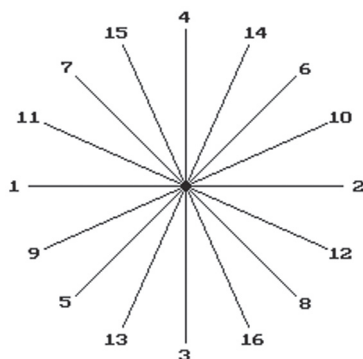


Рис. 5

В каждом эксперименте цветность внешнего тест-поля определялась координатами x и y одной из точек, взятых из табл. 1. Координаты цветности x' и y' внутреннего тест-поля определялись по формулам:

$$x' = 0,0001km, \quad y' = 0,0001kn. \quad (6)$$

Здесь числа m и n указывают направление, по которому цветность внутреннего тест-поля удаляется от цветности внешнего. Они указаны в табл. 2.

Таблица 2

№ направления	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
m	2	-2	0	0	2	2	-2	-2	2	2	-2	-2	1	1	-1	-1
n	0	0	2	-2	2	-2	2	-2	2	-2	1	-1	1	-1	2	-2

Число 0,0001 указывает размер одного продвижения по горизонтали или вертикали. Число m указывает, сколько всех продвижений делается по горизонтали за один шаг движения в заданном направлении. Число n указывает то же самое, но по вертикали. Число k указывает, сколько шагов сделано всего в заданном направлении.

Цвет тест-полей формируем с помощью мозаики, составленной из блоков размером 10×10 точек. Цвета отдельных точек блока выбираем следующим способом (одинаковым для всех блоков мозаики). По координатам цветности x, y заданного цвета тест-поля отыскиваем координаты этого же цвета X, Z в системе МКО по формулам [19]:

$$X = Y \frac{x}{y}; \quad Z = Y \frac{1-x-y}{y}. \quad (7)$$

Значение координаты Y данного цвета принимаем равным единице. Этим стабилизируется яркость цвета. Далее с помощью формул (5) по известным X, Y, Z вычисляем координаты RGB этого же цвета в системе NTSC. Затем по формулам (2) находим мозаичные координаты R'', G'', B'' цвета и, наконец, по формулам (4) определяем машинные координаты цвета тест-поля R', G', B' . Округляя их в меньшую и большую стороны до ближайших

целых чисел, получаем шесть машинных уровней красного, зеленого и синего основных цветов $R_{\min}, R_{\max}, G_{\min}, G_{\max}, B_{\min}, B_{\max}$.

Выбор цветов для точек блока начинаем с его левого верхнего угла, а затем движемся до конца блока слева направо, после этого переходим вниз на следующий ряд точек и движемся справа налево и так далее. Такой челночный способ обхода точек предотвращает образование муара и обеспечивает достаточно равномерное распределение цвета, видимого наблюдателем, по всей площади тест-поля с расстояния 0,7 м. Первую координату цвета текущей точки берем $R_{\min}$, если среднее значение этой же координаты, подсчитанной для всех предшествующих точек, больше R' . В противном случае берем $R_{\max}$. Аналогично выбираем вторую и третью координаты цвета текущей точки. Для первой точки берем цвет с компьютерными координатами $R_{\max}, G_{\max}, B_{\max}$. Ясно, что при таком способе выбора средняя i -я ($i = 1, 2, 3$) компьютерная координата цвета будет отличаться от той же по счету компьютерной координаты заданного цвета не более чем на 1% одного деления компьютерной шкалы, что обеспечивает приемлемую точность дозирования цвета тест-поля. Строго говоря, вычисление среднего значения следовало бы производить не для компьютерных, а для мозаичных координат, однако различие результатов оказывается ничтожно малым. Описанный способ формирования тест-полей реализован программно.

Во время проведения опыта цвет обоих тест-полей берется одинаковым. После этого числу k последовательно приписываются значения 1, 2, По формулам (6) подсчитываются координаты цветности x', y' внутреннего тест-поля, а по ним корректируется структура мозаики внутреннего поля. При этом подсчитываются приращения координат цвета, что на экране отображается практически мгновенно. Наблюдатель субъективно воспринимает работу программы как плавное изменение цвета по заданному направлению (одному из шестнадцати). Темп изменения цвета может быть по желанию экспериментатора произвольно ускорен или замедлен.

Экспериментатор увеличивает число k до тех пор, пока не обнаружит отличие цвета внутреннего поля от внешнего. После этого он начинает двигаться в противоположном направлении до исчезновения порога. Затем направление движения снова меняется. Такие колебательные движения производятся многократно, при этом темп изменения цвета постепенно снижается, а границы искомого цвета находятся более точно, в результате чего они сближаются. Регистрация координат полученных границ производится после того, как процесс стабилизируется и границы перестанут сближаться. В качестве результата эксперимента

берется цвет тест-поля, равный среднему значению цвета верхней и нижней границ. Описанный опыт повторялся 50 раз и подсчитывалось среднее значение для полученных замеров. Такие опыты производились по 16-ти направлениям для каждой точки. Все это делалось для каждой из 15-ти точек. Всего было произведено 12 тыс. измерений.

По средним значениям координат цвета внутреннего тест-поля по всем 16-ти направлениям для каждого из 15-ти цветов внешнего поля на цветовом графике МКО построены точки пороговых эллипсов (рис. 6). Сравнивая полученные результаты с пороговыми эллипсами Мак-Адама (рис. 2), замечаем, что размеры и ориентация эллипсов меняется в поле цветового графика более регулярно и монотонно, чем у Мак-Адама. Размещение эллипсов на плоскости цветового графика более равномерное.

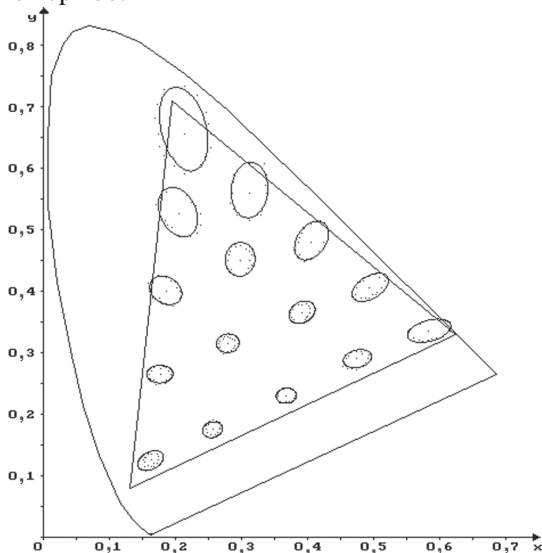


Рис. 6

В области серого цвета на графике Мак-Адама имеет место локальное уменьшение размеров эллипсов. Такое нарушение монотонности изменения параметров эллипсов, несомненно, вызвано влиянием искусственно выбранного серого фона. Эллипс наименьшего размера расположен на границе графика Мак-Адама в левом нижнем углу (синий цвет). На этом же графике эллипс наименьшего размера находится внутри графика в области серо-голубого цвета. Все сказанное позволяет сделать вывод, что результаты наших опытов более предпочтительны в роли экспериментальной основы для проверки теоретических построений.

4. Построение равноконтрастного цветового графика

После того как в предыдущем параграфе были получены эллипсы для цветовых порогов, построенные при условии, что цвет фона совпадает с цветом тест-поля, мы имеем возможность возвратиться к задаче построения равноконтрастно-

го цветового графика. Решение подобной задачи было осуществлено в [20] на основе экспериментов Мак-Адама. Как уже говорилось, пороговые эллипсы Мак-Адама строились для случая, когда цвет фона не совпадает с цветом тест-поля. Поэтому следует ожидать, что построенный на новом экспериментальном материале равноконтрастный цветовой график получится иным. При решении задачи по-прежнему будем руководствоваться аналогией между механизмом цветового зрения и механизмом зрительного восприятия пространства. Вместе с тем следует иметь в виду, что аналогия, сколь бы глубокой она ни была, не обеспечивает полного тождества этих двух механизмов.

Одно из важных различий состоит в том, что физическое пространство обладает метрикой, тогда как для колориметрического пространства метрика вообще не введена. Оно задано лишь с точностью до любых аффинных преобразований. Поэтому все координатные системы, которые можно ввести в колориметрическом пространстве, равноправны, в том числе и косоугольные. Для физического же пространства подходят только прямоугольные координатные системы, поскольку только с ними согласуется его метрика. В связи с этим выбор направления координатных осей и масштабов по ним для физического пространства не вызвал никаких затруднений. Для колориметрического же пространства этот выбор представляет особую проблему. В случае использования косоугольных координат переход от одной координатной системы к другой приводит, вообще говоря, к перекосу пространства и к неодинаковым его деформациям по различным направлениям, нарушающим равенство расстояний. Поэтому эффект равноконтрастности может быть достигнут только при единственной аффинной деформации пространства (с точностью до смещения пространства, его поворотов и изменения масштаба, которые сохраняют равенство расстояний).

Исходной информацией для построения равноконтрастного цветового графика являются найденные пороговые эллипсы, изображенные на рис. 6. Пороговые эллипсы нанесены на диаграмме цветности МКО с координатами x и y , которые выражаются через координаты цвета X, Y, Z зависимостями (7). Диаграмма цветности получена следующим образом [19]. Цветовое пространство рассекается плоскостью, пересекающей оси X, Y, Z в точках $(1,0,0)$, $(0,1,0)$ и $(0,0,1)$. Получаемый на ней отпечаток локуса цветов затем проектируется на плоскость XY .

Возьмем в цветовом пространстве произвольную координатную систему UVW с началом в точке черного цвета и рассечем полученный в ней локус цветов какой-нибудь плоскостью. Из теории проективных преобразований [21] известно, что

отпечаток локуса на такой плоскости можно получить из диаграммы цветности с помощью проективного преобразования

$$u = \frac{ax}{bx + cy + d}, \quad v = \frac{y}{bx + cy + d}. \quad (8)$$

Здесь u, v – некоторые прямоугольные координаты на плоскости сечения; a, b, c, d – параметры проективного преобразования. Варьируя числовые значения параметров a, b, c, d , всегда можно получить из диаграммы цветности такой отпечаток локуса, который совпадет с его отпечатком на произвольном сечении цветового пространства при любой координатной системе. Говоря о совпадении отпечатков, мы имеем в виду возможность совмещения полученного отпечатка с заданным путем его перемещений и поворотов на плоскости сечения и изменения его масштаба.

Зададимся теперь вопросом, каким должен быть отпечаток сечения локуса плоскостью равной яркости, чтобы эту плоскость можно было принять в качестве аналога кампиметрической плоскости. Очевидно, для этого достаточно, чтобы на ней один из эллипсов превратился в круг, причем его диаметр был меньше, чем наименьший размер любого из оставшихся эллипсов. Местоположение этого круга совпадает с центром шахматной доски Гельмгольца. Для выполнения проективных преобразований диаграммы цветности по формулам (8) была разработана специальная программа. Изменяя значения параметров проективного преобразования и наблюдая на экране дисплея деформации эллипсов на диаграмме цветности, мы обнаружили, что в круг с наименьшим диаметром может обращаться только эллипс, находящийся в зоне серого цвета. Этот факт подтвердил аналогию между ахроматическим лучом в цветовом пространстве и зрительной осью в физическом пространстве. Полученное сечение локуса представлено на рис. 7.

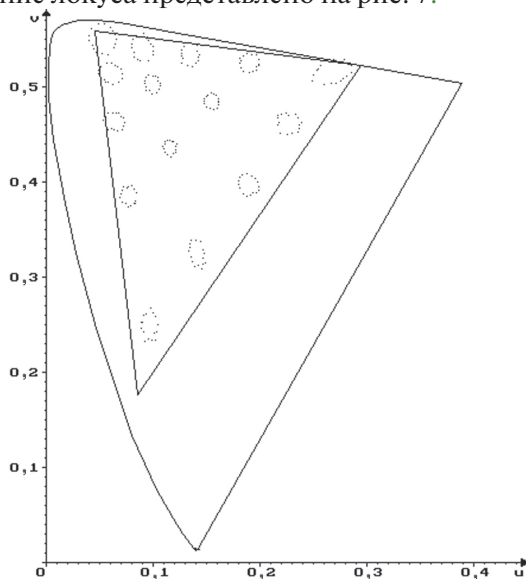


Рис. 7

Ему соответствуют следующие значения параметров проективного преобразования: $a = 3,2$; $b = 2,4$; $c = 3,4$; $d = 2,5$.

Осталось подобрать численное значение параметра R доски Гельмгольца с таким расчетом, чтобы деформация диаграммы цветности по формулам (9) превратила эллипсы в окружности [20].

$$\xi = \frac{k \cdot \arctg \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{R}}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \xi'; \quad \eta = \frac{k \cdot \arctg \frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{R}}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \eta'. \quad (9)$$

С известным приближением это удастся осуществить при $R = 0,16$. Преобразование производилось с помощью специально созданной программы. Полученный график представлен на рис. 8. Это и есть искомый равноконтрастный цветовой график. Отклонение экспериментальных точек от расчетных положений (окружности одинакового радиуса) не превышает 25%.

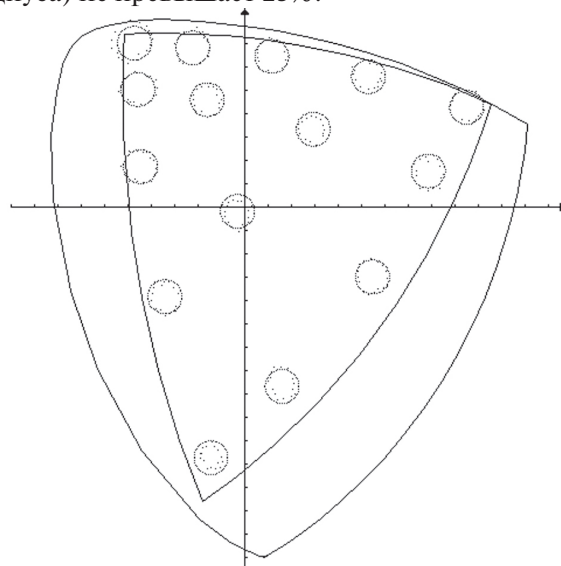


Рис. 8

Отношение максимального размера эллипса к минимальному не превосходит значения 1,5. Если мы ограничимся лишь проективным преобразованием, то отношение максимального размера эллипса к минимальному увеличивается до трех. На исходной же диаграмме цветности МКО это отношение возрастает до 8. Полученный результат свидетельствует о том, что аналогия между механизмами формирования диаграммы цветности и поля зрения человека, которой мы руководствовались, полностью себя оправдала. Теперь уже с полным основанием можно утверждать, что трехмерное цветовое пространство соответствует трехмерному физическому пространству, окружающему человека. Точке черного цвета цветового пространства соответствует оптический центр глаза. Лучам равной цветности в цветовом пространстве соответствуют лучи физического пространства, исходящие из оптического центра глаза. Ахроматическому

лучу соответствует зрительная ось. Равноконтрастной диаграмме цветности соответствует карта поля зрения. Линиям равного цветового тона на равноконтрастной диаграмме цветности соответствуют радиальные линии на карте поля зрения. Линиям равной насыщенности соответствуют кольцевые линии на карте поля зрения. Точке белого цвета на диаграмме цветности соответствует центр поля зрения.

5. Разработка способа экономного кодирования цвета

Изложенные выше исследования позволяют предложить способ экономного кодирования цвета. Он основан на пересчете координат цветности из системы xu , рекомендованной МКО, в разработанную равноконтрастную систему. Прямой пересчет производится по формулам:

$$u = \frac{2,5x}{-2,4x + 10,88y + 3,2}, \quad v = \frac{8y}{-2,4x + 10,88y + 3,2}, \quad (10)$$

$$\xi' = u - 0,135, \quad \eta' = v - 0,427, \quad (11)$$

$$\xi = \frac{k \cdot \arctg \frac{\sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}}{R}}{\sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}} \cdot \xi', \quad \eta = \frac{k \cdot \arctg \frac{\sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}}{R}}{\sqrt{\xi'^2 + \eta'^2}} \cdot \eta'. \quad (12)$$

Обратный – по формулам:

$$\xi' = \frac{0,16 \operatorname{tg}(\frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{1,5})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \xi, \quad \eta' = \frac{0,16 \operatorname{tg}(\frac{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}}{1,5})}{\sqrt{\xi^2 + \eta^2}} \cdot \eta, \quad (13)$$

$$u = \xi' + 0,135, \quad v = \eta' + 0,427, \quad (14)$$

$$x = \frac{3,2u}{2,4u + 3,4v + 2,5}; \quad y = \frac{v}{2,4u + 3,4v + 2,5}. \quad (15)$$

Ниже приводится пример пересчета. Пусть $x = 0,2$; $y = 0,3$. Тогда

$$\begin{aligned} u &= 0,0836, \quad v = 0,4011, \\ \xi' &= -0,0474, \quad \eta' = -0,0279, \\ \xi &= -24,54, \quad \eta = -14,45. \end{aligned}$$

Пусть $\xi = 0,01$, $\eta = 0,01$. Тогда

$$\begin{aligned} \xi' &= 0,0000, \quad \eta' = 0,0000, \\ u &= 0,1310, \quad v = 0,4290, \\ x &= 0,310, \quad y = 0,316. \end{aligned}$$

Единица младшего разряда получаемых таким способом кодов соответствует одному цветовому порогу. Таким образом, использование предлагаемых кодов, с одной стороны, обеспечивает точное воспроизведение цвета, а с другой – предельную экономию памяти при запоминании цветовых изображений.

Зависимости, предназначенные для экономного кодирования цвета, стандартизованы Междуна-

родной комиссией по освещению (МКО). Первый стандарт был принят в 1960 году [6], он имел вид зависимостей

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3},$$

предложенных Мак-Адамом. Специальные исследования показали, что отношение максимального размера пороговых эллипсов к минимальному достигает пяти.

Второй и пока последний стандарт – система CIELUV, рекомендована МКО в 1976 г. по предложению Вышецки [6]. В плоскости равной яркости используется растянутый в полтора раза по вертикальной оси (модифицированный) график Мак-Адама 1960 года, дополнительно введены следующие эмпирические зависимости для различного уровня яркости:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_w}} - 16,$$

$$u^* = 13 L^* (u' - u'_w), \quad v^* = 13 L^* (v' - v'_w),$$

где

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3};$$

Y, Y_w – координаты исследуемого и белого цветов в системе МКО 1931 года; u', v', u'_w, v'_w – координаты цветности исследуемого и белого цветов в модифицированной системе Мак-Адама. В этой системе ошибка увеличивается до отношения (9), но зато цветовые коды можно пересчитать для всех точек цветового пространства, а не только для цветов равной яркости.

Предлагаемые в работе зависимости имеют следующие отличия от стандартизованных зависимостей МКО. В основе схемы лежат два простых и легко проверяемых закона: $\gamma = \beta, \rho = k\alpha$ [20]. Проведенные экспериментальные исследования показали, что эти законы выполняются для цветового зрения человека с высокой точностью. Они основаны не только на эмпирическом материале, но построены согласно простой теоретической схеме, открытой Гельмгольцем в механизме зрительного восприятия пространства. Численные значения параметров рекомендуемых преобразований получены для случая, когда фон равен наблюдаемому цвету, что является лучшим приближением к условиям реального видения предметов, чем в случае постоянной фиксации фона для всех цветов (а именно это заложено в основу стандартов МКО). Отношение между максимальным и минимальным размерами пороговых эллипсов не превышает 1,5, что в 4 раза ниже, чем в стандарте 1960 года. Все сказанное дает основание рекомендовать формулы (10)–(12) в качестве уточнения стандарта МКО.

Для удобства практического пользования формулами (10)–(12) разработан компьютерный цве-

товой атлас, в котором сформированы все различаемые глазом телевизионные цвета. Все цветовое пространство расслаивается плоскостями равной яркости. Положение плоскости равной яркости фиксируется по желанию с точностью до одного порога на уровне любой яркости. Для этой яркости формируется равноконтрастный график цветности. Одновременно можно вывести на экран ПК некоторую часть цветового атласа (в зависимости от масштаба). По желанию пользователя различия между соседними полями можно задать как допороговыми, так и сверхпороговыми с любым заданным шагом. Кроме того, можно вывести на экран код любого цвета и его координаты цвета XYZ , и координаты цветности xu . Погрешность задания цвета в координатах цветности xu не превышает 0,0005.

Использование цвета фона, равного цвету тест-поля, привело к тому, что эффекты Бецольда-Брюкке и Эбнея [19] отсутствуют, а яркостные и цветовые пороги в пределах принятого диапазона изменения интенсивности цвета практически точно подчиняются закону Вебера-Фехнера. Для проверки этого факта формировались цилиндрические сечения цветового тела, соосные его ахроматической оси и оценивалась степень постоянства насыщенности в каждом сечении. Кроме того, производились в разных направлениях плоские сечения цветового тела, проходящие через ахроматическую ось, и оценивалась степень постоянства цветов в каждом таком сечении. Кроме того, для различных цветностей проверялись по различным направлениям пропорциональность цветовых порогов уровню яркости цвета.

Атлас цветов, реализованный на ПК, обладает рядом преимуществ по сравнению с существующими атласами (атлас Манселла [19], атлас DIN [6] и другие). Цвета его полей строго фиксированы и не зависят от характера освещения нарисованных. Число цветов атласа практически неограничено, можно сформировать любой желаемый цвет в пределах принятого диапазона цветов. Атлас реализует равноконтрастное цветовое пространство. Для любого цвета указываются его координаты в любой системе (колориметрической XYZ , RGB , машинной и других).

Формулы (10)-(12), определяющие равноконтрастное цветовое пространство, колориметр на базе ПК и атлас цветов рекомендуются для практического применения.

Выводы

На базе ПК создан программируемый колориметр — система, позволяющая проводить колориметрические эксперименты. Ее возможности в некоторых отношениях шире, чем у оптического колориметра: во-первых, работа ведется не с излучениями, а с

цветами, во-вторых — можно ставить эксперименты с переменным цветом фона, что позволяет изучать индукцию цветового зрения. Возможны также эксперименты с динамическими изображениями для изучения адаптационных явлений.

Экспериментально исследованы пороги цветоразличения с учетом влияния явления цветовой индукции в пределах цветового треугольника системы NTSC.

На основе результатов эксперимента построена модель и найдены параметры преобразования колориметрического пространства цветов в равноконтрастное цветовое пространство.

По найденной аналитической модели равноконтрастного цветового пространства создан программируемый равноконтрастный цветовой атлас с изменяемым шагом и яркостью, независимый от внешнего освещения.

Предложен метод экономного кодирования цветового сигнала, содержащего полную (для человеческого зрения) и неискаженную информацию о цвете.

Список литературы: 1. Нюберг, Н.Д. Измерение цвета и цветовые стандарты [Текст] / Н.Д. Нюберг — М.: Стандартизация и рационализация, 1933. — 104 с. 2. Зингер, Б. Достижения в технике передачи и восприятия изображений [Текст] / Сост. Б. Зингер, Р. Кола, Д.Ф. Барбе, С.Б. Кампана / Пер. с англ. Ю.Н. Богачкова и др.; Под ред. Ю.Н. Богачкова. — М.: Мир, 1980. — 312 с. 3. Бондаренко, М.Ф. Компараторная идентификация цветового зрения человека [Текст] / М.Ф. Бондаренко, С.Ю. Шабанов-Кушнаренко, Ю.П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. — 2008. — № 2(68). — С. 3-12. 4. Смирнов, А.Д. Математические модели теории передачи изображений [Текст] / А.Д. Смирнов — М.: Связь, 1979. — 96 с. 5. Прэтт, У.К. Методы передачи изображений: Сокращение избыточности [Текст] / У.К. Прэтт, Д.Д. Саркисон, Г.Д. Ханс и др.; под ред. У.К. Прэтта / Пер. с англ. под ред. Л.С. Виленчика. — М.: Радио и связь, 1983. — 264 с. 6. Мешков, В.В. Основы светотехники [Текст] / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев; Ч.2. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 429 с. 7. Цуккерман, И.И. Цифровое кодирование телевизионных изображений [Текст] / И.И. Цуккерман, Б.М. Кац, Д.С. Лебедев и др.; под ред. И.И. Цуккермана. — М.: Радио и связь, 1981. — 239 с. 8. Mac-Adam, D.L. Projective transformations of I.C.I. color specifications [Текст] / D.L. Mac-Adam // JOSA, 1937, Vol. 27. — P. 294. 9. Mac-Adam, D.L. Specification of small chromaticity differences [Текст] / D.L. Mac-Adam // JOSA, 1943, Vol. 33. — P. 18. 10. Теплов, Б.М. О законах пространственного и временного смешения цветов [Текст] / Б.М. Теплов, С.П. Яковлева // Зрительные ощущения и восприятия. — М.: Соцэкгиз, 1935. — Т.2. — С. 79-96. 11. Talbot, H. Experiments of light [Текст] / H. Talbot // Phil. Mag., 1834, №5. — P. 65-91. 12. Wright, W. The graphical representation of small colour differences [Текст] / W. Wright // JOSA, 1943, Vol. 33. — P. 232-245. 13. Wright, W. The sensitivity of the eye to small colour differences [Текст] / W. Wright // Proc. Phys. Soc, London, 1941, Vol. 53. — P.93-106.

14. Mac-Adam, D.L. The graphical representation of small color differences [Текст] / D.L. Mac-Adam // JOSA, 1943, Vol. 33. — P. 632. 15. Brown, W. R. L. Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences [Текст] / Brown W. R. L., Mac Adam D. L. // JOSA, 1949, Vol. 39, № 10. — P. 808-834. 16. Brown, W. R. L. Color discrimination of twelve observers [Текст] / W. R. L. Brown // JOSA, 1957, Vol. 49. — P. 134-143. 17. Wyszecki, G. Color-differences matches [Текст] / G. Wyszecki, G. Fielder // JOSA, 1971, Vol. 61. — P. 1501. 18. Wyszecki, G. New color-matching ellipses [Текст] / G. Wyszecki, G. Fielder // JOSA, 1971, Vol. 61. — P. 1135. 19. Мешков, В.В. Основы светотехники [Текст] / В.В. Мешков — Ч. 2. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. — 416 с. 20. Бондаренко, М.Ф. Практические приложения компараторной идентификации линейных конечномерных объектов [Текст] / М.Ф. Бондаренко, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко // Бионика интеллекта: науч.-техн. журнал. — 2009. — № 2(70). — С. 00-00. 21. Ефимов, Н.В. Высшая геометрия [Текст] / Н.В. Ефимов. — М.: Физматгиз, 1961. — 580 с.

Поступила в редколлегию 10.09.2009

УДК 519.7

Розробка системи ощадливого кодування кольору / М.Ф. Бондаренко, С.Ю. Шабанов-Кушнарченко, Ю.П. Шабанов-Кушнарченко // Біоніка інтелекту: наук.-техн. журнал. — 2009. — № 2 (71). — С. 13-23.

У статті описано постановку й результати колориметричних експериментів з дослідження порогів кольоророзрізнєння. Побудовано аналітичну модель перетворєння колориметричного простору кольорів у рівноконтрастний кольоровий простір.

Іл. 8. Бібліогр.: 21 найм.

UDC 519.7

The colour economical coding system engineering / M.F. Bondarenko, S.Yu. Shabanov-Kushnarenko, Yu.P. Shabanov-Kushnarenko // Bionika intellekta: Sci. Mag. — 2009. — № 2 (71). — P. 13-23.

In article colorimetric experiments statement and results on research of colorimetric thresholds are described. The analytical model of colorimetric spaces transformation of colours in equal-contrast colour space is constructed.

Fig. 8. Ref.: 21 items.