

Исследование методов определения цветовых различий в равноконтрастной колориметрической системе *CIELAB*

В.Л. ЖБАНОВА

Филиал НИУ «МЭИ» в Смоленске, Смоленск
E-mail: vera-zhbanova@yandex.ru

Аннотация

При анализе цветных изображений возникает задача качественного определения результатов захвата этих изображений цифровыми устройствами на основе равноконтрастных колориметрических систем. В статье описаны методы определения цветового различия, рекомендованные МКО для системы *CIELAB*, рассмотрены математическое описание системы и её модификации, описана разработанная программа расчёта цветового различия по каждому из описанных методов и описано тестирование этой программы на образцах 14 цветов из атласа Манселла. В качестве объекта исследования были выбраны три группы светофильтров красного, зелёного и синего цветов по 7 светофильтров в каждой. Выбор светофильтров обусловлен возможностью их дальнейшего применения при нахождении изменения цвета цифровыми устройствами. Исследовано цветовое различие светофильтров в группах при разных стандартных источниках света и трёх методах расчёта этого различия. Проведён анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности применения каждого метода в разных промышленных областях. Статья может быть полезна специалистам по анализу цвета, контролю качества, цифровым устройствам и машинному зрению.

Ключевые слова: цвет, цветовой сдвиг, цветовое различие, равноконтрастная система, колориметрическая система, светофильтры, контроль качества, оценка, машинное зрение.

Введение

Определение цветовых различий по сей день актуально в светотехнике, химии, несырьевом производстве, полиграфии, колориметрии алмазов и бриллиантов и в др. областях науки

и техники. МКО определила несколько равноконтрастных колориметрических систем и несколько методов нахождения параметра изменения цвета. Формулы для расчёта цветового различия позволяют использовать колориметрию в решении следующих задач: сортировка по цвету и объективная оценка устойчивости окрасок; установка объективных цветовых допусков и их проверка; осуществление высокого качества печати. Задача оценки различий по цвету не имеет общего универсального решения. Современные системы определения цвета в технике и промышленности основаны на опытах по установлению цветового равенства. Каждый потребитель использует любой предложенный метод удобный и понятный для него. Технологии производства постоянно развиваются, машинное зрение совершенствуется, но единого метода оценки качества регистрации и воспроизведения цвета пока не определено.

Подобная неопределённость рождает ряд проблем с адекватной оценкой цвета объектов в разных областях промышленности. Измерение цветовых различий позволяет объективно оценивать точность воспроизведения и предугадывать возможные ошибки. Ставится вопрос о необходимости внедрения систем управления качеством цвета и, как правило, инструментальных методов контроля цвета. Больше всего проблем возникает у пользователей современных цифровых устройств при совмещении цвета на экране с цветом, воспроизводимым реальными отражающими материалами, будь то краска, печатное издание или текстиль [1, 2].

В наши дни при объективной оценке цвета всё чаще прибегают к равноконтрастной колориметрической системе *CIELAB* (обозначается и как $L^*a^*b^*$). Эта система пользуется большим спросом, чем, например, система *CIELUV* (обозначается

и как $L^*u^*v^*$), несмотря на ряд достоинств последней [3]. Относительно новая система *CIECAM₀₂* пока ещё не применяется так широко, как названные, в силу своего сложного математического описания. Хотя сильно искривлённые линии одинакового тона в сине-фиолетовых и пурпурных цветах полностью исправлены, и в целом наблюдается более стабильное выпрямление углов тона сквозь разные уровни яркости по цветам Манселла, *CIECAM₀₂* в сравнении с *CIELAB* требует соблюдения дополнительных условий при оценке цвета, таких как знание средней яркости визуального окружения и адаптационной яркости окружающего цветовой объект фона. Все это вызывает трудности понимания и, как следствие, применения системы пользователями.

Для системы *CIELAB*, по решениям МКО, были предложены различные формулы для расчёта цветового различия ΔE (выражается в форме евклидова расстояние между точками). Всего разработано три метода расчёта цветового различия. Каждый последующий расчёт утяжелялся всё новыми коэффициентами. Но так ли необходимо вводить новые величины, тем самым усложняя выражения? Какой метод будет эффективней и удобней для использования колориметрии, к примеру, лишь как способ анализа качества продукции?

Требовалось провести исследование трёх методов нахождения изменения цвета в равноконтрастной системе *CIELAB* и определить наиболее точный и универсальный из них. Методика настоящего исследования заключалась в математическом моделировании основных положений колориметрии, колориметрических систем и их преобразования.

Анализ методов расчёта в системе *CIELAB*

Фундамент объективной оценки цветовых различий – возможность представления цветов некими точками, являющимися концами векторов, расположенных в цветовом пространстве близко друг к другу. С увеличением евклидова расстояния между точками будут увеличиваться и различия между цветами. Это означает, что в первом приближении величину ΔE можно применять для объективной оценки уровня цветовых различий

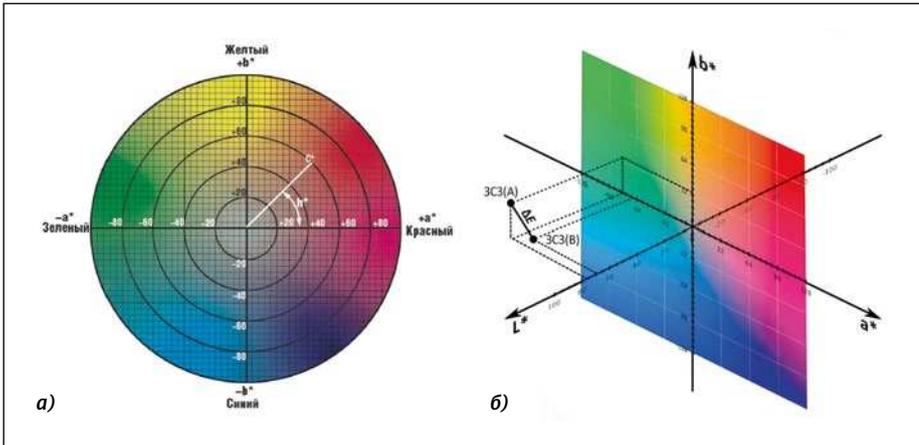


Рис. 1. Цветовое пространство *CIE LAB* с полярными координатами *C* и *H* (а) и цветовое различие в нём светофильтра ЗСЗ (представленное как евклидово расстояние) при стандартных источниках света типов *A* и *B* (б)

природных объектов. Пример изменения цветности объекта при освещении разными источниками (в примере, типов *A* и *B*) приведён на рис. 1.

Рассмотрим различные формулы для расчёта ΔE в системе *CIE LAB*.

В 1976 г. МКО была рекомендована формула

$$\Delta E_{1976} = \left[(\Delta a)^2 + (\Delta b)^2 + (\Delta L)^2 \right]^{1/2},$$

где $\Delta a = a_1^* - a_2^*$, $\Delta b = b_1^* - b_2^*$,

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

Она позволяла достаточно легко определять различия между цветами, но у неё были и свои недостатки. Система *CIE LAB* является криволинейным преобразованием системы *XYZ* МКО, и потому такой подход к нахождению изменения цвета в корне неверен.

Учитывая это, МКО предложила модификацию самой системы *CIE LAB* – *CIE LCH*. При этом были предложены полярные координаты цветового тона *H* и цветности *C* (рис. 1). Координата *H* обозначается как h_{ab}° и является «угловой», а координата *C* обозначается как C_{ab} и является «радиальной», относительно центра координат (оси L^*):

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2},$$

$$h_{ab}^* = \arctg(b^* / a^*).$$

Подобная модификация позволила описывать цвет в этой системе как процесс представления цвета аппаратом человеческого зрения.

Поэтому для повышения точности МКО в 1994 г. утвердила новую формулу:

$$\Delta E_{1994} = \left[\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где $\Delta L = L_1^* - L_2^*$; $\Delta C = C_1^* - C_2^*$;

$\Delta H = \sqrt{\Delta a^2 + \Delta b^2 - \Delta C^2}$; $K_L = 1$, $K_C = 1$ и $K_H = 1$ (взвешивающие коэффициенты обычно равны единице, но могут и принимать определённые значения для графики, полиграфии, текстильной промышленности и т.д.),

$$S_L = 1, \quad S_C = 1 + K_1 C_{12}^*, \quad S_H = 1 + K_2 C_{12}^*,$$

$$L_{12}^* = (L_1^* + L_2^*) / 2, \quad C_{12}^* = (C_1^* + C_2^*) / 2.$$

Затем формулу доработали, и в 2000 г. МКО приняла новую:

$$\Delta E_{2000} = \left[\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H} \right) \right]^{1/2},$$

$$\text{где } \Delta H = 2\sqrt{C_1^* C_2^*} \sin \left[\frac{H_1^* - H_2^*}{2} \right],$$

$$S_L = 1 + \frac{K_2 (L_{12}^* - 50)^2}{\sqrt{20 + (L_{12}^* - 50)^2}},$$

$$H_{12}^* = (H_1^* + H_2^*) / 2, \quad S_H = 1 + K_2 C_{12}^* T,$$

$$T = 1 - 0,17 \cos(H_{12}^* - 30^\circ) + 0,24 \cos(2H_{12}^*) + 0,32 \cos(3H_{12}^* + 6^\circ) - 0,20 \cos(4H_{12}^* - 64^\circ),$$

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

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left[(H_{12}^* - 275^\circ) / 25 \right]^2 \right\},$$

$$R_C = 2 \sqrt{\frac{C_{12}^{*7}}{C_{12}^{*7} + 25^7}}.$$

Формулы 2000 г. включают более сложные показатели насыщенности, цветового тона и светлоты, но анализ получаемого евклидова расстояния проводится как в предыдущем методе. Различия по цвету рассматриваются в связи с определением допусков, в пределах которых соблюдается цветовое равенство. Так, в цветовом пространстве *CIE LAB*, специально построенном для выравнивания допусков к задаче определения цветового равенства, одинаковыми для визуального восприятия считаются цвета, отстоящие друг от друга не более чем на 1 единицу ΔE .

Разработка и тестирование программы

Для расчёта и анализа цветовых различий в системе *CIE LAB* была разработана программа в среде «*MATLAB*», которая позволяет запрограммировать формулы для определения цветовых сдвигов ΔE_{1976} , ΔE_{1994} и ΔE_{2000} .

Особенностью алгоритма для построения программы является соблюдение определённого условия: если цветности образцов попадают в разные квадранты, то при расчёте следует учитывать, что при $H_{12}^* \geq 180^\circ$ из значения этой координаты следует вычитать 360° и затем определять среднее. Также учитывается поправка к значению координаты a^* :

$$a^* = (1 + G) a_o^*,$$

$$G = 0,5 \left(\sqrt{\frac{C_o^{*7}}{C_o^{*7} + 25^7}} \right),$$

$$C_o^* = \sqrt{a_o^{*2} + b_o^{*2}},$$

Значения ΔE в пространстве *CIELAB* для источников типов *A* и *B*

ΔE	Номер образца														Среднее ΔE
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
2000	12,53	18,87	51,67	33,43	42,05	85,07	28,33	17,20	2,95	18,69	18,80	11,86	14,58	54,42	29,3
1994	32,01	37,07	43,30	46,22	54,13	62,69	55,30	40,51	7,70	29,62	34,20	17,09	35,52	45,81	38,7
1976	99,99	98,06	99,11	110,74	106,86	116,43	124,59	122,41	45,57	87,26	113,72	57,53	99,90	99,93	98,7

где a_0^* и b_0^* – значения определенные при переходе от системы *XYZ* МКО к *CIELAB* с учётом координат цветности источника белого света. Последнее показывает, что координаты цветности системы уже не являются независимыми, т.к. включают коэффициент яркости источника света.

За исходные данные в процессе тестирования были приняты координаты контрольных образцов 14 цветов из атласа Манселла для оценки цветопередачи, описанных в известной методике измерений [4]. В качестве образцов были взяты цвета серо-красный, серо-жёлтый, жёлто-зелёный, светло-зелёный, светло-голубой, светло-синий, светло-фиолетовый, пурпурный, красный, жёлтый, зелёный, синий, розоватый (цвет кожи) и зелёный (цвет листьев). В качестве эталонного излучения принимался стандартный источник света. Координаты цвета в программе были пересчитаны для стандартных источников типов *A* и *B* по ГОСТ Р 55703–2013 из системы *XYZ* МКО в систему *CIELAB* по формулам

$$L^* = 116(Y/Y_0)^{1/3} - 16,$$

$$a^* = 500 \left[(X/X_0)^{1/3} - (Y/Y_0)^{1/3} \right],$$

$$b^* = 200 \left[(Y/Y_0)^{1/3} - (Z/Z_0)^{1/3} \right],$$

где X_0, Y_0, Z_0 – координаты цвета соответствующего источника света; X, Y, Z – координаты цвета образца.

Расчёт цветового различия координат цвета при выбранных источниках света предоставляет возможность анализа всех трёх рассматриваемых методов МКО (табл. 1). Среднее значение ΔE_{1976} отличается от среднего значения ΔE_{1994} в 2,6 раза, среднее значение ΔE_{1976} отличается от среднего значения ΔE_{2000} в 3,4 раза, а среднее значение ΔE_{1994} отличается от среднего значения ΔE_{2000} в 1,3 раза. Евклидово

расстояние между точками ΔE по формуле 1976 г. заметно больше, чем по формулам 1994 и 2000 гг., что было ожидаемо из-за нелинейности шкалы цветности.

При освещении разными источниками становится заметно различие, осязаемое даже визуально. Расчётные значения ΔE в десятки раз превышают допуски цветового равенства, вследствие чего потребуются дополнительные расчёты.

Исследование цветового различия

Для подробного анализа и оценки полученных результатов было предложено взять образцы трёх основных цветов: красного, зелёного и синего. Так как результаты работы будут применены в исследовании реального источника типа *A* и колориметрических систем, то были выбраны реальные объекты из набора цветных оптических стекол, соответствующих ГОСТ 9411–91. В дальнейшем полу-

ченные результаты будут приняты как эталонные значения при исследовании выбранных светофильтров на оптико-электронной установке. Ввиду ограниченного набора светофильтров исходными данными для исследования послужили координаты 7 светофильтров красного цвета (КС10, КС11, КС13, КС14, КС15, КС17, КС19), 7 светофильтров зелёного цвета (ЗС1, ЗС3, ЗС7, ЗС8, ЗС8, ЗС10, ЗС11) и 7 светофильтров синего цвета (СС2, СС4, СС5, СС8, СС15, ЗС9, ЗС20). Эти светофильтры и источник *A* представлены на цветовом графике x, y (рис. 2).

Координаты цветности этих светофильтров приведены в каталоге¹ для источников типов *A* и *B*. Поэтому последние были выбраны как основные, чтобы не приносить погрешности при пересчёте цвета для других источников света в проводимое исследование (рис. 1, б). Координаты цветности

¹ Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. проф. Г.Т. Петровского. М.: Дом оптики, 1990 г. 228 с.

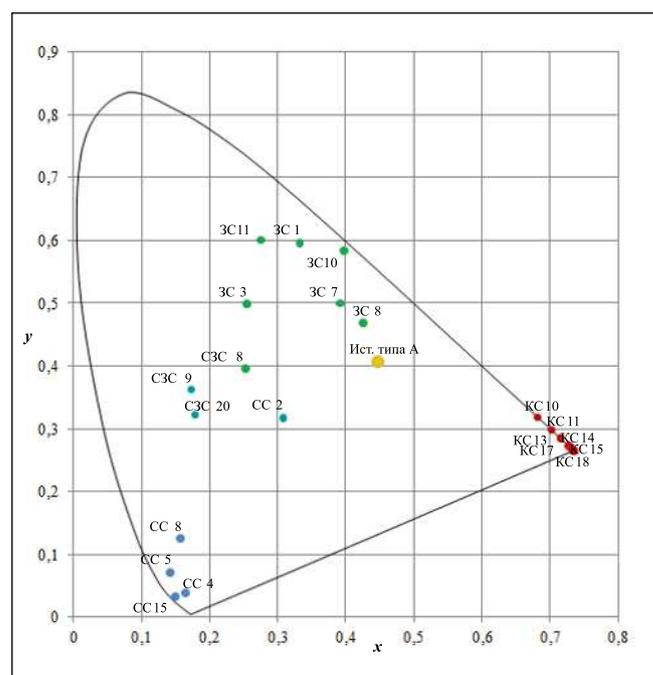


Рис. 2. Координаты исследуемых светофильтров на цветовом графике x, y при источнике типа *A*

Цветовое различие красных светофильтров

Наименование светофильтра	Цветовые сдвиги			Сравнение ΔE		
	ΔE_{1976}	ΔE_{1994}	ΔE_{2000}	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{1994}$	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{2000}$	$\Delta E_{1994}/\Delta E_{2000}$
КС10	2,08	0,63	0,79	3,3	2,6	0,8
КС11	0,97	0,25	0,35	3,9	2,8	0,7
КС13	9,44	2,82	2,60	3,3	3,6	1,1
КС14	0,19	0,06	0,06	3,3	3,0	0,9
КС15	0,06	0,04	0,02	1,5	3,0	2,0
КС17	0,13	0,05	0,04	2,3	3,0	1,3
КС18	0,32	0,15	0,11	2,2	3,0	1,4
Среднее значение	1,9	0,6	0,6	3,3	3,3	1,0

Таблица 3

Цветовое различие зелёных светофильтров

Наименование светофильтра	Цветовые сдвиги			Сравнение с ΔE		
	ΔE_{1976}	ΔE_{1994}	ΔE_{2000}	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{1994}$	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{2000}$	$\Delta E_{1994}/\Delta E_{2000}$
ЗС11	20,15	7,36	6,29	2,7	3,2	1,2
ЗС7	31,93	18,02	15,97	1,8	2,0	1,1
ЗС10	14,11	5,03	7,94	2,8	1,8	0,6
СЗС8	37,78	22,87	21,89	1,7	1,7	1,0
ЗС8	31,34	18,08	20,55	1,7	1,5	0,9
ЗС3	35,53	17,82	13,07	2,0	2,7	1,4
ЗС1	20,09	7,46	8,05	2,7	2,5	0,9
Среднее значение	28	13,7	13,1	2,0	2,1	1,0

x и y следует переводить в координаты цвета XYZ по выражению

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{Y}{y}x \\ Y \\ \frac{Y}{y}(1-x-y) \end{pmatrix}.$$

Изменения координат выбранных светофильтров при освещении разными источниками света достаточно заметны в цветовом пространстве *CIELAB* (рис. 3).

В программе были определены цветовые различия каждым из рассмотренных методов для выбран-

ных наборов красных, зелёных и синих светофильтров при двух стандартных источниках света – типов *A* и *B* (табл. 2–4). Рассчитанные значения цветового различия показывают, что отдельные образцы систематически занижают ранг различий по цвету по сравнению со средним значением, в то время как другие – постоянно завышают его.

Оценки ΔE показали, что в среднем результаты расчётов по формуле 1976 г.: 1) по группе зелёных светофильтров в 2 раза больше, чем по формулам 1994 и 2000 гг.; 2) по группе синих светофильтров больше в 2,2 и 2,6 раз, чем по формулам 1994 и 2000 гг. соответственно; 3) по группе красных светофильтров в среднем

в 3,2 раза² больше, чем по формулам 1994 и 2000 гг. Кроме того, из таблицы, в целом, видно, что различие методов расчёта по формулам 1994 и 2000 гг. незначительно.

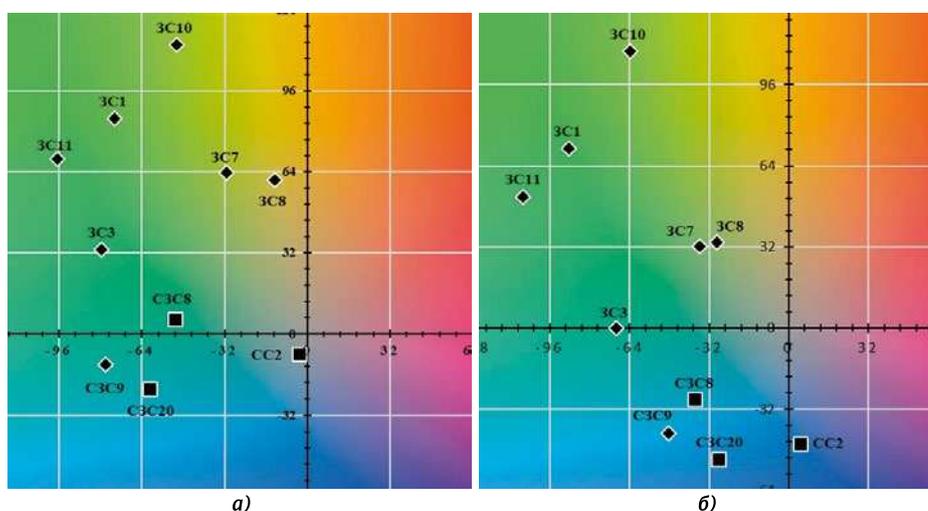
Заключение

Полученные расчётные данные показывают, что в отношении системы *CIELAB* не следует применять метод МКО 1976 г., который не учитывает её особенностей. Он подходит для про-

² Столь большое различие может быть объяснено особенностями самой системы *CIELAB*, которая несколько «растянута» в области красных оттенков и «сжата» в сине-зелёной области [3].

Цветовое различие синих светофильтров

Наименование светофильтра	Цветовые сдвиги			Сравнение ΔE		
	ΔE_{1976}	ΔE_{1994}	ΔE_{2000}	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{1994}$	$\Delta E_{1976}/\Delta E_{2000}$	$\Delta E_{1994}/\Delta E_{2000}$
CC2	39,98	14,02	13,71	2,9	2,9	1,0
CC4	19,16	7,40	4,16	2,6	4,6	1,8
C3C9	42,68	22,40	19,80	1,9	2,2	1,1
C3C20	45,77	25,32	21,21	1,8	2,2	1,2
CC8	40,06	19,18	15,20	2,1	2,6	1,3
CC5	27,40	11,31	8,77	2,4	3,1	1,3
CC15	11,356	4,05	2,51	2,8	4,5	1,6
Среднее значение	31,6	14,9	12,5	2,1	2,5	1,2

Рис. 3. Координаты исследуемых зелёных светофильтров (на срезе цветового пространства *CIELAB*), освещаемых источниками света типов А (а) и В (б)

стных систем $L^*u^*v^*$ и $W^*u^*v^*$, которые более линейны относительно XYZ. Этот расчётный метод даёт несколько завышенные изменения цветов, что может приводить к неверной интерпретации изменения цвета объектов.

Наиболее точен для оценки изменения цвета метод МКО 2000 г., учитывающий больше нюансов в описании цвета. Однако это необходимо там, где целью является описание самого цвета: полиграфия, колориметрия, графика и т.п., а в промышленности главная задача, решаемая с помощью колориметрических систем, – контроль качества. Определение цветового различия – одно из средств соблюдения ГОСТ и СанПиНи, и потому для контроля качества продукции более подходит метод МКО 1994 г., по результатам схожий с методом МКО 2000 г., но при этом включающий все необходи-

мые переменные для точного расчёта и не отягощённый дополнительными параметрами и вычислениями.

Следует отдельно сказать о малонасыщенных и малоразличимых цветах. При оценке таких объектов чаще используют метод МКО 1976 г. Но ведь и в этих цветах происходит изменение угла и радиуса относительно центра координат, что также следует учитывать. Поэтому наиболее оптимален для таких цветов метод МКО 1994 г.

В дальнейшем возможно сравнение равноконтрастных систем *CIELAB* и *CIECAM*, хотя *CIELAB* уже зарекомендовала себя, как наиболее понятная и удобная в использовании система, что особенно важно для использования колориметрии как средства контроля качества и разработки продукции. Соответствующий тест по

анализу цветовых различий объектов, использующихся при обработке и изменении цвета, мог бы предоставить объективную оценку качества регистрации и воспроизведения цвета современными цифровыми устройствами [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джэдд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. – М.: Мир, 1978. – 592 с.
2. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчёты и измерения. – СПб: Питер, 2009. – 224 с.
3. Иванов В.Е., Широких Т.В. Сравнение равноконтрастных колориметрических систем // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 44–47.
4. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
5. Zhanova V.L., Nubin V.V. A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // Light & Engineering. – 2014 – Vol. 22, No. 2. – P. 84–89.



Жбанова Вера Леонидовна, кандидат техн. наук. Окончила в 2011 г. МЭИ (Смоленский филиал). Доцент кафедры оптико-электронных систем филиала НИУ «МЭИ» в Смоленске.

Область научных интересов: колориметрия, полупроводниковые фотопреобразователи