

Исследование авторских систем цветоделения для регистрации изображений

В.Л. Жбанова¹, И.В. Якименко¹

¹ Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске, Энергетический проезд, д. 1, Смоленск, 214013, Россия

Аннотация

Цель работы – исследование разработанных систем цветоделения на основе цветового треугольника. Подобные системы планируется применять для матричных фотоприемников цифровых микроскопов. В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи: разработка систем цветоделения и их исследование. Для решения задач разработки системы цветоделения матричного фотоприемника использованы основные положения колориметрии, колориметрические системы, их преобразования и способы создания цветовых пространств для определения оптимального цветового пространства с цветовым охватом до 100% видимого цвета, характеристики которого не имеют отрицательных ветвей, что позволит реализовать их в системе цветоделения на основе светофильтров. По результатам математического исследования выбран универсальный набор с системой КЗС-3 с средним отклонением от 14 номинальных значений цвета из атласа Манселла 0,0083. Выбранное пространство имеет цветовой охват 100% видимых цветов и рабочий диапазон от 400 нм до 730 нм. По результатам расчета можно предположить, что цветовое пространство КЗС-3 подошло более всех из-за схожести кривых сложения этой системы с кривыми системы CIEXYZ 1931 г., где кривая красного канала также немного выше кривой зеленого. Далее планируется внедрение разработанной системы цветоделения в цифровой микроскоп для дальнейшего исследования полученных цветных изображений.

Ключевые слова

Матричный фотоприемник, цветоделение, цветовой треугольник, колориметрия, микроскопия.

Research of Author's Color Separation Systems for Image Acquisition

V.L. Zhbanova¹, I.V. Yakimenko¹

¹ The Branch of National Research University «Moscow Power Engineering Institute» in Smolensk» Energy passage, d. 1, Smolensk, 214013, Russia

Abstract

The purpose of the work is to study the developed color separation systems based on the color triangle. Similar systems are planned to be used for matrix photodetectors of digital microscopes. Within the framework of this goal, the following tasks were formulated: development of color separation systems and their study. To solve the problems of developing a color separation system for a matrix photodetector, the main provisions of colorimetry, colorimetric systems, their transformations and methods for creating color spaces were used to determine the optimal color space with a color gamut of up to 100% of the visible color, the characteristics of which do not have negative branches, which will allow them to be implemented in the system color separation based on light filters. Based on the results of a mathematical study, a universal set with a GLC-3 system was selected with an average deviation from 14 nominal color values from the Munsell atlas of 0.0083. The selected space has a color gamut of 100% visible colors and an operating range of 400 nm to 730 nm. According to the results of the calculation, it can be assumed that the GLC-3 color space is the most suitable due to the similarity of the addition curves of this system with the curves of the CIEXYZ 1931 system, where the red channel curve is also slightly higher than the green one.

ГрафиКон 2022: 32-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-22 сентября 2022 г., Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, Рязань, Россия

EMAIL: vera-zhbanova@yandex.ru (В.Л. Жбанова); jakigor@ Rambler.ru (И.В. Якименко)

ORCID: 0000-0001-7597-0675 (В.Л. Жбанова); 0000-0002-1003-8403 (И.В. Якименко)



© 2022 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Further, it is planned to introduce the developed color separation system into a digital microscope for further study of the obtained color images.

Keywords

Matrix photodetector, color separation, color triangle, colorimetry, microscopy.

1. Введение

В цифровой микроскопии основной упор делается на разрешение цифрового снимка. С этой целью применяются различные матричные фотоприемники с высокой чувствительностью в видимой области спектра. Несмотря на доведенную до предела разрешающую способность современных цифровых микроскопов, цветовую составляющую снимка практически не совершенствуют на аппаратном уровне. Основную работу с цветом производят уже после регистрации снимка или уделяется особое внимание фильтрации излучения для детальной работы с ультрафиолетовой областью спектра и флуоресценцией [1-4]. Разработка же представленная в данном труде позволяет работать в видимом диапазоне спектра.

В основном матричные фотоприемники, применяемые в цифровых микроскопах, имеют пространственную систему цветоделения со стандартными спектральными характеристиками с общепринятыми цветовыми треугольниками sRGB или AdobeRGB, что существенно уменьшает цветовой охват регистрируемого снимка до 70% видимых цветов. Хотя по цвету можно многое определить, к примеру, химический состав, отдельные части исследуемого объекта. Также не стоит забывать о цветовом разрешении, которое значительно падает при малых цветовых охватах. Решение подобных вопросов особенно актуально в медицинских цифровых микроскопах и эндоскопах.

Целью исследования являются разработанные системы цветоделения для матричных фотоприемников цифровых микроскопов. В рамках поставленной цели были сформулированы следующие задачи: разработка систем цветоделения и их исследование. Для решения задач разработки системы цветоделения матричного фотоприемника использованы основные положения колориметрии, колориметрические системы, их преобразования и способы создания цветовых пространств для определения оптимального цветового пространства с цветовым охватом до 100% видимого цвета, характеристики которого не имеют отрицательных ветвей, что позволит реализовать их в системе цветоделения на основе светофильтров.

Основываясь на рекомендациях [5, стр. 390-398] была разработана цветовая система КЗС-3 с 100% телом цветового охвата видимых цветов. В отличие от системы XYZ МКО 1931 г. В разработанной минимальное включение нереальных цветов при максимальном теле цветового охвата (см. рисунок 1). Также были предложены другие системы близкие к КЗС с цветовым охватом 90% видимых цветов: КЗС-1, КЗС-2.

Опираясь на методику преобразования цветовых пространств [5, стр. 249-256], были найдены кривые сложения разработанных систем. У системы КЗС-3 наблюдается небольшой второстепенный максимум в синей области для кривой красного канала, не более 2% (рисунок 1 е), а у других систем имеются небольшие отрицательные ветви.

Разработано несколько наборов корректирующих светофильтров для реализации разработанных цветовых пространств КЗС-1, КЗС-2 и КЗС-3 с широким телом цветового охвата, включающие более 90% видимых цветов, на основе камеры *KPC-600BH*². Ее монохромная характеристика с высокой чувствительностью подходит для колориметрических расчетов, а сменный объектив позволит интегрировать эту камеру в микроскоп. Наборы корректирующих светофильтров позволяют повторить формы кривых сложения разработанных цветовых треугольников с погрешность в рамках ограниченности цветовых оптических стекол³, т.е. были получены наборы для реализации максимальной одинаковой интенсивности спектральных характеристик. В результате анализа разработанных наборов был предложен один универсальный набор корректирующих светофильтров, под который в дальнейшем подобрана

² http://www.etk-elcom.ru/docs/KPC_600_BH_Rukovodstvo_po_ekspluatatsii.pdf

³ Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. члена-корр. АН СССР, докт. хим. наук, проф. Г. Т. Петровского. – М.: Дом оптики, 1990. – 228 с.: ил. 82, табл. 27

одна из разработанных систем. Характеристики наборов имеют ровные куполообразные кривые с максимумами на 450 нм., 540 нм. и 580 нм., что является удовлетворительным показателем.

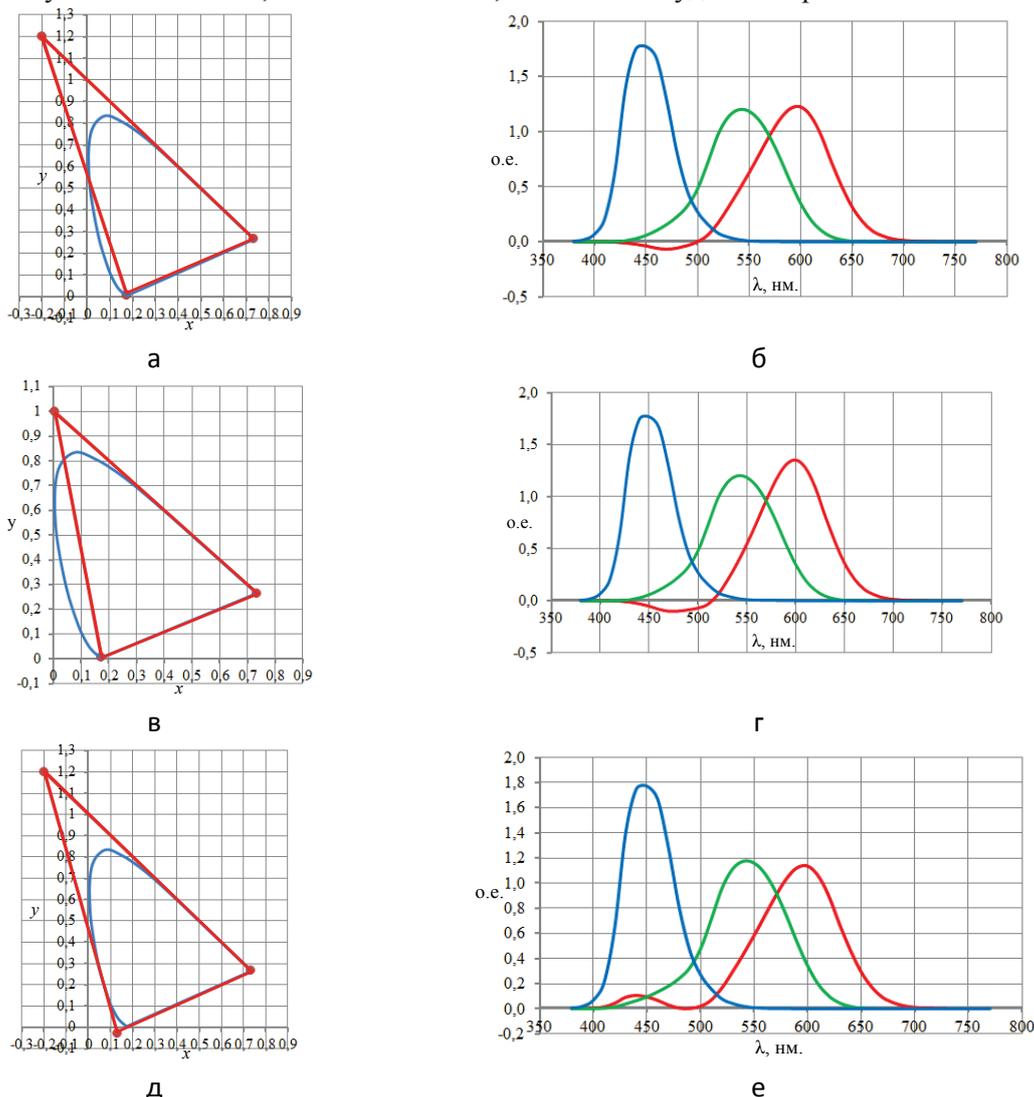


Рисунок 1 – Цветовая система: а – КЗС-1; б – удельные кривые КЗС-1; в – КЗС-2; г – удельные кривые КЗС-2; д – цветовой треугольник КЗС-3; е – удельные кривые КЗС-3

2. Методика исследования наборов систем цветоделения

Было проведено математическое моделирование по нахождению цветности 14 контрольных цветов. Эти контрольные образцы из атласа Манселла предложены Международной комиссией по освещению для оценки цветопередачи и являются стандартом. Параметры и характеристики спектральных коэффициентов яркости приведены в литературе [6, с. 342, с. 417-418]. В качестве источника света выбран стандартный излучатель типа D с температурой 6500 К, т.к. наиболее точно аппроксимирует дневной свет, является для человека естественным и стандартизирован по ГОСТ⁴.

Методика расчета координат цвета контрольных цветов заключалась в интегральном сложении характеристик основных каналов системы цветоделения, исследуемого образца и спектра источника излучения по следующим формулам [6, 7]:

⁴ ГОСТ 7721-89. Источники света для измерений цвета. Типы. Технические требования. Маркировка. – М.: Стандартинформ, 1989. – 20 с.

$$K' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \phi(\lambda) S_K(\lambda) r_N(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

$$Z' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \phi(\lambda) S_Z(\lambda) r_N(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$C' = \int_{\lambda=400\text{нм}}^{770\text{нм}} \phi(\lambda) S_C(\lambda) r_N(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $\phi(\lambda)$ – спектральная энергетическая плотность потока излучения; $S_K(\lambda)$, $S_Z(\lambda)$, $S_C(\lambda)$ – спектральные характеристики каналов основных цветов системы цветоделения; $r_N(\lambda)$ – спектральный коэффициент яркости контрольных образцов.

Далее координаты цвета переводились в колориметрическую систему *CIEXYZ* 1931 через рассчитанные коэффициенты перехода по выражению:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_K & X_Z & X_C \\ Y_K & Y_Z & Y_C \\ Z_K & Z_Z & Z_C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K' \\ Z' \\ C' \end{pmatrix} \quad (4)$$

где X_K , X_Z , X_C , Y_K , Y_Z , Y_C , Z_K , Z_Z , Z_C – коэффициенты пересчета для конкретной системы из разработанных КЗС.

Расчет коэффициентов пересчета каждого цветового пространства производился по методике, приведенной в [6, с. 249-256].

После преобразования были найдены координаты цветности в системе xy по формулам:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z};$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z};$$

Для объективной оценки погрешности цветопередачи разработанной системы цветоделения координаты цветности были переведены в равноконтрастную колориметрическую систему uv 1960 г. Так как известно, что при исследовании цветопередачи источников излучения в предложенной системе, точность индекса цветопередачи может быть достигнута при различии исследуемого и стандартного излучения по цветности не более чем на значение 0,0054 [2, 4]. Соотношение координат цветности международной системы xy с координатами в системе uv было найдено по формулам [6]:

$$\begin{cases} u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \\ v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3}. \end{cases} \quad (5)$$

Для сравнения рассчитанных координат были найдены теоретические значения координат цветности 14 образцов при источнике типа D65. Изменение цветности найдено по выражению:

$$\Delta e_{uv} = \sqrt{(u_p - u_t)^2 + (v_p - v_t)^2}, \quad (6)$$

где u_p , v_p – координаты цветности, рассчитанные для системы цветоделения; u_t , v_t – координаты цветности, рассчитанные в системе *CIEXYZ* 1931.

Основной показатель качества системы цветоделения – показатель изменения цветности в равноконтрастной системе. Для систем МКО uv 1960 и г. МКО $u'v'$ 1974 г. можно ориентироваться на 0,00054 [6, с. 342].

Системы uv и $u'v'$ имеют недостатки, как и все равноконтрастные колориметрические системы, и пригодны для сравнения однотипных цветов желательно средней насыщенности. Последнее удобно для сравнения теоретических и практических параметров стандартизированных тест-объектов. Насыщенные цвета необходимо оценивать в координатах цвета таких равноконтрастных систем как *CIELUV* и *CIELAB* [7]. Но в этих системах показателя зависят от яркости, т.е. от системы освещения. Поэтому приведенные равноконтрастные системы будут применены конкретно для анализа колориметра в следующем исследовании.

2.1. Исследование наборов систем цветоделения под характеристику камеры

Для трех наборов систем цветоделения под спектральную характеристику монохромной камеры *KPC-600BH* под каждое из разработанных пространств рассчитаны координаты цвета и цветности 14 контрольных образцов и изменение цветности.

По результатам расчета (см. таблица 1) произведен анализ усредненных значений цветового различия (Δe) по группам образцов средней насыщенности – от №1 до №8, большей насыщенности – от №9 до №12 и специальных №13 (кожа лица) и №14 (листва).

Таблица 1 – Изменение цветности Δe 14 контрольных цветов в системе *uv* 1960 г. для различных наборов систем цветоделения камеры *KPC-600BH*

№	Номера контрольных цветов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Группы цветов	Цвета средней насыщенности								Насыщенные цвета				Лист ва	Кож а	
	Δe	0,032	0,024	0,018	0,027	0,037	0,044	0,042	0,038	0,032	0,017	0,026	0,067	0,030	0,021
КЗС-1	Δe средн.	0,033								0,036				0,030	0,021
	Δe средн.	0,033													
	Δe средн.	0,033													
КЗС-2	Δe	0,041	0,032	0,022	0,038	0,052	0,062	0,057	0,050	0,026	0,021	0,040	0,095	0,038	0,026
	Δe средн.	0,044								0,046				0,038	0,026
	Δe средн.	0,043													
КЗС-3	Δe	0,029	0,021	0,016	0,028	0,040	0,052	0,048	0,041	0,016	0,012	0,029	0,098	0,027	0,018
	Δe средн.	0,034								0,039				0,027	0,018
	Δe средн.	0,034													

При сравнении результатов со значением $\Delta e = 0,0054$ можно заметить: набор для КЗС-1 превышает это значение в 6,1 раза, для КЗС-2 – в 7,9 раза, а для КЗС-3 – в 6,3 раза. Однако $\Delta e = 0,0054$ используется для анализа цветопередачи источника излучения, где важно, чтобы отклонения спектра не искажали колориметрические измерения. Тем более, что в области источников излучения цветовые пороги ровные – округлой формы, а в области насыщенных цветов вытянутые – эллиптические [10, 11]. Поэтому полученные отклонения можно считать приемлемыми. В подтверждение можно привести исследование современных цветовых систем, применяемых для обработки цифровых изображений, на основе спектральных характеристик различных матричных фотоприемников [12-15]. Для более полного анализа предложенные наборы были пересчитаны в равноконтрастную систему $u'v'$ 1974 г., как и в приведенном исследовании по следующим формулам:

$$\begin{cases} u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}; \\ v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \end{cases} \quad (7)$$

Далее было найдено изменение цветности по формуле (6). Система $u'v'$ 1974 г. является модификацией системы *uv* 1960 г. с расширенными областями желтой, оранжевой и красной цветности.

В результате были получены средние значения для набора под КЗС-1 – 0,042, для КЗС-2 – 0,054, а для КЗС-3 – 0,048. Если сравнивать полученные показатели со значениями из исследованиях [13, 16], где для распространенной системы *sRGB* лучший результат 0,03, а

худший – 0,09, то можно отметить положительный результат для каждого набора корректирующих светофильтров. Стоит также отметить, что разработанные системы имеют небольшой показатель изменения цветности для насыщенных цветов 0,025, который для системы *sRGB* составил не менее 0,1, а лучший показатель достигнут только для *Wide Gamut RGB* – 0,06. Последнее еще раз доказывает насколько важно увеличение тела цветового охвата для цифровых систем. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанные системы цветоделения являются конкурентоспособными.

2.2. Исследование универсальных наборов систем цветоделения

Также было найдено цветовое различие для универсальной системы цветоделения по коэффициентам перехода системы КЗС-1 (см. таблица 2 и 3). Для двух других цветовых пространств КЗС-2 и КЗС-3 значения составили 0,012 и 0,014, соответственно. Разница между системами КЗС-1 и КЗС-2 составляет 0,00002.

Таблица 2 – Изменение цветности Δe 14 контрольных цветов в системе *uv* 1960 г. для универсального набора 1 в системе КЗС-1 при источнике D65

№	Номера контрольных цветов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Теория	X	349	291	253	216	264	298	352	398	218	580	128	66	622	99
	Y	315	306	322	312	326	315	311	332	119	624	215	68	604	124
	Z	259	158	105	225	426	611	561	479	46	127	162	292	436	57
	x	0,37 8	0,38 6	0,37 2	0,28 7	0,26 0	0,24 4	0,28 8	0,32 9	0,57 0	0,43 6	0,25 4	0,15 5	0,37 4	0,35 3
	y	0,34 1	0,40 5	0,47 4	0,41 4	0,32 1	0,25 7	0,25 4	0,27 4	0,31 1	0,46 9	0,42 6	0,16 0	0,36 3	0,44 3
	u	0,23 9	0,21 7	0,18 7	0,15 5	0,16 4	0,17 4	0,21 1	0,23 4	0,40 7	0,22 5	0,13 4	0,13 5	0,22 7	0,18 6
	v	0,32 3	0,34 3	0,35 8	0,33 6	0,30 4	0,27 6	0,27 8	0,29 2	0,33 4	0,36 3	0,33 6	0,20 8	0,33 0	0,34 9
Практика	X	99	82	70	59	75	86	102	114	60	161	34	20	176	28
	Y	85	84	91	85	87	82	82	88	31	175	58	15	165	35
	Z	77	46	31	65	124	176	165	140	14	36	48	79	126	16
	x	0,38 0	0,38 5	0,36 5	0,28 3	0,26 3	0,25 0	0,29 3	0,33 3	0,57 2	0,43 2	0,24 3	0,17 4	0,37 8	0,34 9
	y	0,32 7	0,39 8	0,47 5	0,40 6	0,30 5	0,23 9	0,23 5	0,25 8	0,29 7	0,47 0	0,41 4	0,13 4	0,35 2	0,44 3
	u	0,24 6	0,22 0	0,18 3	0,15 5	0,17 1	0,18 6	0,22 4	0,24 6	0,42 2	0,22 2	0,13 0	0,16 4	0,23 3	0,18 3
	v	0,31 8	0,34 1	0,35 8	0,33 3	0,29 8	0,26 7	0,26 9	0,28 5	0,32 9	0,36 3	0,33 2	0,18 9	0,32 7	0,34 9
Δe	0,00 9	0,00 3	0,00 4	0,00 3	0,00 9	0,01 5	0,01 6	0,01 4	0,01 5	0,00 3	0,00 6	0,03 5	0,00 7	0,00 2	
Δe ср.	0,009							0,015				0,00 7	0,00 2		
Δe ср.	0,01														

Для всех универсальных наборов камеры *KPC-600BH* и разработанных систем было рассчитано изменение цветности в системе *uv* 1960 г. (см. таблицу 4).

Таким образом, удалось разработать систему цветоделения с цветовыми пространствами КЗС с наилучшими характеристиками и большим телом цветового охвата системы.

Таблица 3 – Изменение цветности Δe 14 контрольных цветов в системе $u'v'$ 1974 г. для универсального набора 1 в системе КЗС-1 при источнике D65

№	Номера контрольных цветов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Теория	u'	0,23 9	0,21 7	0,18 7	0,15 5	0,16 4	0,17 4	0,21 0	0,23 4	0,40 7	0,22 5	0,13 4	0,13 4	0,22 7	0,18 6
	v'	0,48 4	0,51 4	0,53 7	0,50 4	0,45 6	0,41 4	0,41 7	0,43 8	0,50 0	0,54 4	0,50 4	0,31 2	0,49 5	0,52 4
Практика	u'	0,24 6	0,22 0	0,18 3	0,15 5	0,17 1	0,18 6	0,22 4	0,24 6	0,42 2	0,22 2	0,13 0	0,16 4	0,23 3	0,18 3
	v'	0,47 7	0,51 1	0,53 7	0,50 0	0,44 8	0,40 0	0,40 4	0,42 8	0,49 3	0,54 4	0,49 8	0,28 4	0,49 0	0,52 3
Δe		0,01 1	0,00 4	0,00 4	0,00 4	0,01 1	0,01 8	0,01 9	0,01 6	0,01 6	0,00 3	0,00 7	0,04 1	0,00 8	0,00 2
Δe ср.		0,011						0,009						0,00 8	0,00 2
Δe ср		0,012													

По наименьшим отклонениям были выбраны наилучшие цветовые пространства для каждого набора (см. таблица 5).

Таблица 4 – Изменение цветности Δe 14 контрольных цветов в системе uv 1960 г. для универсальных наборов при источнике D65

Система	Набор-1	Набор-2	Набор-3
КЗС-1		0,01009	0,00850
КЗС-2		0,01013	0,00819
КЗС-3		0,01069	0,00868
			0,00855
			0,00834
			0,00891

Таблица 5 – Изменение цветности Δe 14 контрольных цветов в системе uv 1960 г. для различных универсальных наборов систем цветоделения камеры КРС-600ВН при источнике D65

№	Номера контрольных цветов														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Группы цветов	Цвета средней насыщенности								Насыщенные цвета				Листва	Кожа	
	Δe	0,009	0,003	0,004	0,003	0,009	0,015	0,016	0,014	0,015	0,003	0,006	0,035	0,007	0,002
Набор 1 (КЗС-1)	Δe ср.	0,0091						0,0079				0,039	0,026		
	Δe ср.	0,01009													
	Δe ср.	0,00819													
Набор 2 (КЗС-2)	Δe	0,004	0,002	0,002	0,006	0,011	0,014	0,011	0,008	0,003	0,005	0,006	0,037	0,004	0,002
	Δe ср.	0,0072						0,0048				0,047	0,032		
	Δe ср.	0,00819													
Набор 3 (КЗС-3)	Δe	0,004	0,001	0,002	0,006	0,011	0,015	0,012	0,008	0,004	0,005	0,006	0,037	0,004	0,002
	Δe ср.	0,0074						0,0051				0,036	0,024		
	Δe ср.	0,00834													

3. Результаты

По результатам расчетов выбран универсальный набор-3 с системой КЗС-3 с показателем $\Delta e = 0,0083$, т.к. именно в этом наборе лучшие показатели «листва» и «кожа». Приведенное значение больше 0,0054 на 0,0029, что является хорошим показателем для измерения, особенно насыщенных цветов. Выбранное пространство имеет цветовой охват 100% видимых цветов и рабочий диапазон от 400 нм до 730 нм.

Следует отметить, что при расчете для универсальных наборов при источнике типа А, изменение цветности для систем в среднем составило 0,0055 как в системе МКО 1960, так и МКО 1974 г. Подобные исследования показывают насколько источник влияет на изменение цветности и метамерность самих цветов.

Также можно предположить, что цветовое пространство КЗС-3 подошло более всех из-за схожести кривых сложения этой системы с кривыми системы *CIEXYZ* 1931 г., где кривая красного канала также немного выше кривой зеленого канала.

Далее планируется внедрение разработанной системы цветоделения в цифровой микроскоп для дальнейшего исследования полученных цветных изображений.

4. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке стипендии Президента Российской Федерации в 2022-2024 годах для молодых ученых и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-748.2022.4.

5. Список источников

- [1] Waggoner A. S., Wachman E. S., Farkas D. L. Optical filtering systems for wavelength selection in light microscopy // *Current Protocols in Cytometry*. 2001. Т. 15. №. 1. pp. 2.4. 1-2.4. 11. DOI: 10.1002/0471142956.cy0204s15.
- [2] Reichman J. Handbook of optical filters for fluorescence microscopy. Chroma Technology Corporation. – 2017. P. 40.
- [3] Fernanda Laezza. Improved Methods for Fluorescence Microscopy Detection of Macromolecules at the Axon Initial Segment // *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2016. Vol. 10(11). DOI:10.3389/fncel.2016.00005.
- [4] Rainer Heintzmann, Gabriella Ficz. Breaking the resolution limit in light microscopy // *Briefings in functional genomics and proteomics*. 2006. Vol. 5. № 4. pp. 289-301. DOI: 10.1016/B978-0-12-407761-4.00022-1.
- [5] Домасев М., Гнатюк С. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. СПб.: Питер. 2009. 224 с.
- [6] 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.
- [7] Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Знак. 2006. 972 с.
- [8] Жбанова В.Л. Регистрация цвета матричными фотоприемниками: учебное пособие. Смоленск: Универсум. 2019. 73 с. ISBN 978-5-91412-420-2.
- [9] Gomez-Polo C., Montero J., Gomez-Polo M., Casado A.M. Comparison of the CIE Lab and CIE DE 2000 Color Difference Formulas on Gingival Color Space // *Journal of prosthodontics-implant esthetic and reconstructive dentistry*. 2020. Vol. 29. Iss. 5. pp.401-408.
- [10] Кириллов Е.А. Цветоведение: Учеб. пособие для вузов. М.: ЛЕГПРОМБЫТИЗДАТ. 1987. 128 с.
- [11] Юстова Е.Н. Цветовые измерения (колориметрия). СПб.: Издательство С.-Петербургского университета. 2000. 397с.
- [12] Жбанова В.Л., Нюбин В.В. Метод улучшения цветопередачи цифровых фото- и видеокамер // *Светотехника*. 2014. №4. С. 73-74.
- [13] Жбанова В.Л. Оценка и подбор цветовых пространств для цифровых систем // *Светотехника*. 2020. № 5. С. 53-60.
- [14] Жбанова В.Л., Парвулюсов Ю.Б. Принципы построения колориметра для оценки насыщенных цветов // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2016. №3. С.135-140.
- [15] Zhanova V.L., Nubin V.V. A method of improving colour rendition of digital photo- and videocameras // *Light & Engineering*. 2014. Vol. 22. №2. pp. 84-89.
- [16] Zhanova V.L., Zhanov I.L. A method for analysing the color rendering of digital cameras // *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2021. 21(3). pp. 326–333.