

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-236-244

УДК 535.6, 681.7.06

Система цветоделения на основе цветового треугольника для колориметрических исследований в микроскопии

Вера Леонидовна Жбанова✉

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация

Vera-zhbanova@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

Аннотация

Предмет исследования. Исследована система цветоделения на основе разработанного цветового треугольника для проведения научных колориметрических исследований в микроскопии. Предложена система для выявления генетических или химических отклонений образцов по точному изменению цветности. Полученный цветовой треугольник охватывает весь видимый диапазон излучения и ориентирован на колориметрические системы КЗС и XYZ. **Метод.** Основываясь на методике преобразования цветовых пространств, получены кривые сложения нескольких разработанных систем. Подобраны наборы цветоделительных светофильтров под формы кривых на основе выбранной монохромной камеры. Проведено аналитическое исследование трех наборов, из которых выбран оптимальный. Аналитическое исследование системы цветоделения представлено в форме математического моделирования с 14 контрольными цветами из атласа Манселла. Выбранный набор системы экспериментально исследован на разработанной оптико-электронной установке, помещенной в черный короб для исключения световых и цветовых засветок. Одной из важных частей установки является отражающий экран: расположение соответствует рекомендациям освещения/наблюдения согласно Международной комиссии по освещению для измерения колориметрической характеристики образцов. Для объективного анализа измерений выбраны эталонные тест-объекты — стандартизированные цветные оптические стекла. Исследование было основано на оценке групп стекол: желтых, желто-зеленых, зеленых, сине-зеленых. Так как работе выполнено расширение цветового пространства в сторону выбранных цветов для получения точности цветопередачи. **Основные результаты.** При математическом моделировании эксперимента получено изменение цветности в среднем 0,016, а практический результат — 0,027. Средние значения цветности, полученные разработанной системой KZS равны 0,00877. Данный результат является качественнее полученных автором ранее значений при аналитическом исследовании современных систем цветоделения (лучшее значение при широком цветовом треугольнике — 0,00900 и худшее при небольшом треугольнике — 0,04). **Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют признать разработанную систему KZS конкурентноспособной перед современными аналогами. Полученные параметры и характеристики будут использованы при внедрении разработанной системы цветоделения в монохромный цифровой микроскоп для улучшения цветопередачи в микроскопии.

Ключевые слова

цвет, цветность, цветовой треугольник, физиологическая КЗС, цифровое изображение, микроскопия

Благодарности

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

Ссылка для цитирования: Жбанова В.Л. Система цветоделения на основе цветового треугольника для колориметрических исследований в микроскопии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 2. С. 236–244. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-236-244

Color triangle color separation system for colorimetric research in microscopy

Vera L. Zhbanova✉

The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Smolensk, 214013, Russian Federation

Vera-zhbanova@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

Abstract

The paper presents studies of the color separation system based on the developed color triangle for conducting scientific research in microscopy which will allow identifying genetic or chemical deviations of the samples under study by an accurate change in color. The color triangle covers the entire visible range and is focused on the physiological RGB and XYZ colorimetric systems. Based on the method of converting color spaces, the addition curves of the developed systems were found. Based on the curves, sets of color separating light filters were selected to fit the shapes of these curves based on the selected monochrome camera. Three sets are presented. An analytical study of these sets was carried out and one optimal set was selected. An analytical study of this system is presented in the form of mathematical modeling with 14 control colors from the Munsell atlas. The selected set of the system was experimentally studied on the developed optoelectronic setup placed in a black box to exclude light and color flare. One important part of the setup is the reflective screen: the location follows the lighting/observation recommendations of the International Commission on Illumination for colorimetric measurement of samples. For an objective analysis of measurements, reference test objects were selected — standardized colored optical glasses. The study was based on the evaluation of glass groups: yellow, yellow-green, green, blue-green, since the work has expanded the color space in the direction of the selected colors to obtain color accuracy. Previously, the author, in an analytical study of modern color separation systems, obtained results where the best value was found with a wide color triangle of 0.009, the worst 0.04 — with a small one. Thus, it has been proven: the larger the coverage of the color triangle, the smaller the change in color. The obtained values of the developed KZS system are better than modern ones –0.0088 on average. During the mathematical modeling of the experiment, the change in color was obtained 0.016 on average, the practical result — 0.027 on average. The obtained parameters and characteristics will be taken into account when introducing the developed color separation system into a monochrome digital microscope to improve color rendering in microscopy.

Keywords

color, chromaticity, color triangle, physiological RGB, digital image, microscopy

Acknowledgments

The research was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation in 2022–2024 for young scientists and graduate students carrying out promising research and development in priority areas of modernization of the Russian economy SP-748.2022.4.

For citation: Zhbanova V.L. Color triangle color separation system for colorimetric research in microscopy. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 2, pp. 236–244. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-2-236-244

Введение

Одной из важных цифровых сфер научных исследований является микроскопия [1–5]. Это быстро развивающаяся область, которая зависит от методов цифровой обработки изображений. Изображения, полученные с помощью микроскопа, преобразуются в цифровую форму для их хранения, анализа или обработки перед отображением и интерпретацией. Цифровая обработка изображений значительно упрощает процесс извлечения информации об образце из микроскопического изображения. Также обработка может преобразовать изображение таким образом, что отображаемая версия будет более информативной.

Современные конструкции микроскопов связаны с используемым программным обеспечением. Результаты исследований зависят от технологии обработки снимка для получения высококачественных цифровых изображений (формата регистрации снимка, рабочего цветового пространства, методов и алгоритмов цифровой фильтрации).

Наиболее важно исследование цвета объекта в микроскопии для измерения генетических отклонений растений, бактерий и грибов по изменению их цветности при разных условиях питания, температуры, источников света и пр.

Современные рабочие цветовые системы микроскопов: sRGB (standatRGB), AdobeRGB, DCI-P3 RGB охватывают максимум 70 % видимых цветов [6–11]. Альтернативой этим системам могут быть колориметрические системы большого цветового охвата: Wide Gamut RGB и ProPhoto RGB. Применяемые кривые сложения цветовых треугольников колориметрических систем имеют не только второстепенные пики, но и отрицательные ветви. Основная физиологическая колориметрическая система КЗС и международная система XYZ отрицательных ветвей не имеют. У этих систем имеется ряд недостатков при внедрении в цифровые системы: «ни один реальный цвет не может иметь отрицательных координат» [12]; удельные координаты цвета по зеленому и красному каналам практически сливаются и их максимумы расположены примерно на 50 нм друг от друга. Треугольник системы XYZ включает большое количество нереальных цветов, а кривая сложения по красному каналу имеет второстепенный пик, который сложно реализовать в спектральных характеристиках матричных фотоприемников.

В результате анализа современного состояния развития цифровой микроскопии можно прийти к следующим выводам. Улучшить качество изображения возможно, кроме применения ультрафиолетового и инфракрасного излучений при микросъемке, приме-

нив цветовые системы с широким телом цветового охвата.

Цель работы — исследование системы цветоделения с характеристиками близкими к колориметрическим системам КЗС и XYZ. В рамках поставленной цели необходимо решить следующие задачи: выполнить анализ и исследование набора системы цветоделения на основе кривых сложения разработанной системы.

Разработка системы цветоделения

Основываясь на рекомендациях [12, С. 390–398] разработана цветовая система с 100 % телом цветового охвата видимых цветов (рис. 1, а). Система занимает промежуточное место между системами КЗС и XYZ [13]. В настоящей работе цветовой треугольник обозначен — KZS (К — красный, Z — зеленый, S — синий). Треугольник KZS разработан с кривыми сложения, подобными удельным координатам цвета физиологической системы КЗС. В системе KZS пики кривых красного и зеленого каналов разнесены на 20 нм друг от друга, в отличие от кривых КЗС. При этом цветовой треугольник содержит меньшее количество нерельефных цветов, в отличие от цветового пространства Международной комиссии по освещению (МКО) XYZ 1931 г., и минимальный второстепенный пик кривой красного канала. Так как пик имеет размер не более 5 % от интегральной площади всей кривой, то им можно будет пренебречь при реализации системы KZS. По сравнению с современными аналогами разработанное цветовое пространство расширено в сторону зеленых и синих цветов.

Основываясь на методике преобразования цветовых пространств [12, С. 249–256], найдем кривые сложения системы KZS (рис. 1, б) и коэффициенты пересчета (табл. 1). Этот набор позволяет получить наиболее гладкие и ровные спектральные характеристики с пиками, близкими к кривым сложения разработанного цветового треугольника [13].

Под кривые сложения разработанной системы KZS выберем наборы корректирующих светофильтров на основе спектральной характеристики монохромной камеры ZWO ASI120MM-S (mono)¹. Монохромная камера имеет максимум кривой на 520 нм, что близко к 555 нм и позволяет наиболее точно подобрать пики кривых разработанной системы по каждому цветовому каналу. Для реализации системы цветоделения под кривые сложения матричных фотоприемников отберем наборы светофильтров для корректировки спектральной характеристики матричного фотоприемника по следующему выражению:

$$S_{\lambda\tau} = S_{\lambda}\tau_{\lambda 1}, \dots, \tau_{\lambda n},$$

где S_{λ} — спектральная чувствительность матричного фотоприемника; $\tau_{\lambda 1}, \dots, \tau_{\lambda n}$ — коэффициенты пропускания корректирующих светофильтров на определенной длине волны.

Основная разница наборов заключается в параметрах кривой по синему каналу. Каналы по красному и зеленому цветам выбраны максимально близкими относительно кривых сложения системы KZS, исходя из ограничений наборов цветных оптических стекол (табл. 2).

Характеристики наборов имеют ровные куполообразные кривые с максимумами значений на длинах волн: 450 нм, 540 нм и 580 нм (рис. 2). Реализация кривой красного канала ограничена набором цветных оптических стекол. При попытке перенести максимум характеристики ближе к значению 600 нм, происходит уменьшение интенсивности кривой. В связи с этим было принято решение оставить разработанный набор без изменений в пользу большей интенсивности. Для реализации куполообразной характеристики по синему

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://astronomy-imaging-camera.com/product/asi120mm-s> (дата обращения: 02.10.2022).

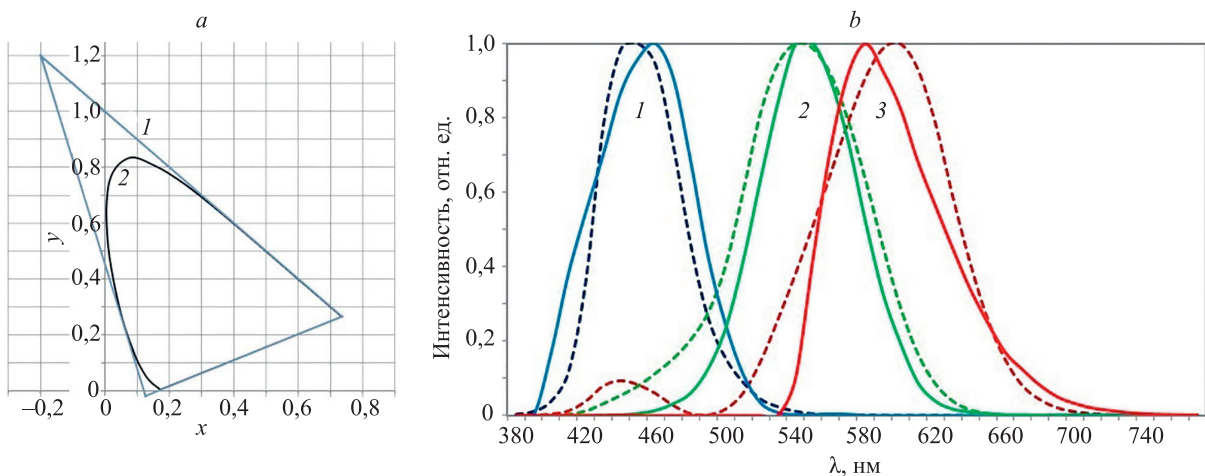


Рис. 1. Характеристики системы KZS: цветовой треугольник (1) и цветовой локус (2) (а); кривые сложения корректирующего набора № 2 цветоделения (сплошные линии) и цветового треугольника (пунктирные линии) по координатам S (1), Z (2), K (3) (б)
 Fig. 1. Characteristics of the KZS system: color triangle (1) and color locus (2) (a); addition curves of the correction set № 2 of the color separation (solid lines) and the color triangle (dashed lines) along the coordinates S (1), Z (2), K (3) (b)

Таблица 1. Параметры цветового треугольника KZS

Table 1. Parameters of the KZS color triangle

Основные цвета	Координаты цветности в системе xy			Коэффициенты пересчета в систему МКО XYZ 1931 г.		
	x	y	z	X	Y	Z
K	0,7347	0,2653	0,0000	0,9692	0,3500	0,0000
Z	-0,2000	1,2000	0,0000	-0,1117	0,6703	0,0000
S	0,1280	-0,0170	0,8550	0,1425	-0,0203	1,0000

Таблица 2. Наборы корректирующих светофильтров

Table 2. Sets of corrective filters

Номер набора	K	Z	S
1	C3C23 OC11 OC17	3C10 C3C23	CC5 ЖС4 C3C23/C3C21
2	C3C23 OC11 OC17	3C10 C3C23	CC5 ЖС3 C3C23/C3C21
3	C3C23 OC11 OC17	3C10 C3C23	CC5 ЖС10 C3C23/C3C21

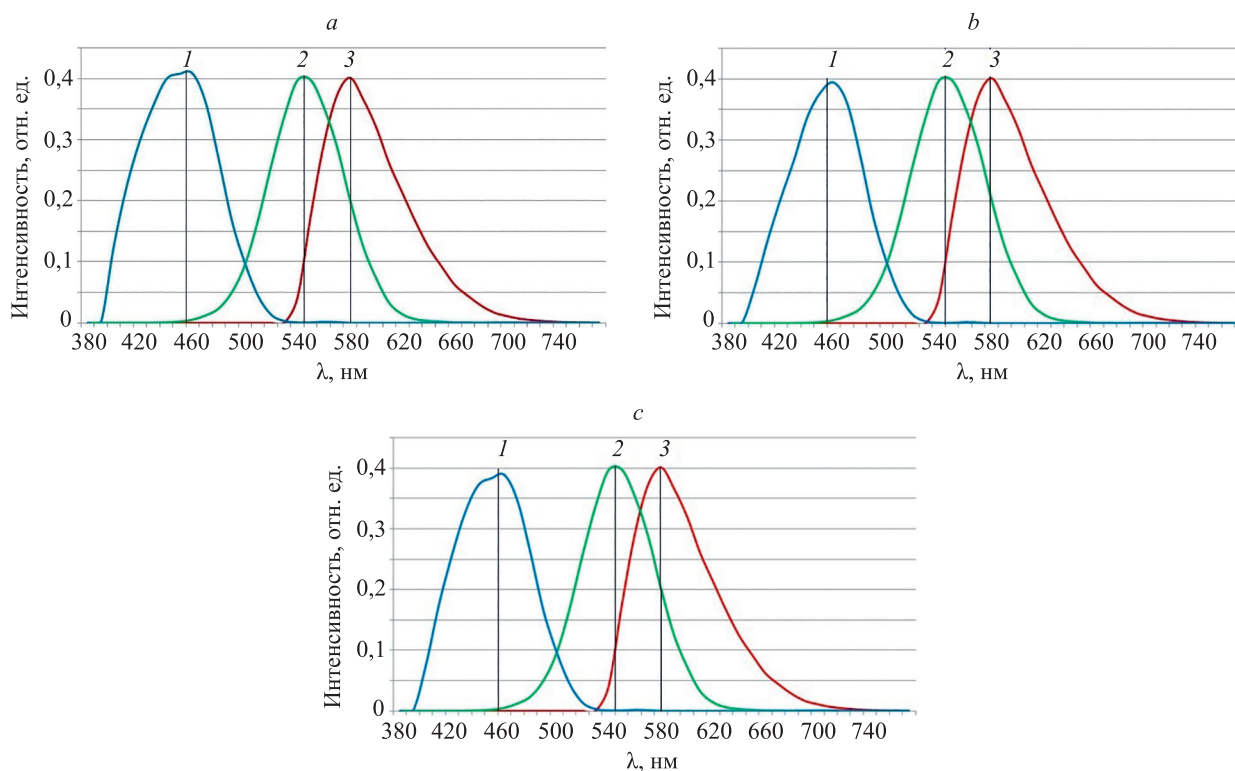


Рис. 2. Кривые сложения цветового треугольника (по координатам S (1), Z (2), K (3)) для наборов: № 1 (a); № 2 (b); № 3 (c)

Fig. 2. Addition curves of the color triangle (according to the coordinates S (1), Z (2), K (3)) for sets: № 1 (a); № 2 (b); № 3 (c)

каналу со светофильтром CC5 необходимо применить светофильтр C3C23, который исключает «хвост» кривой в длинноволновой части спектра. Отметим, что возможно использование вместо пары CC5 + C3C23

светофильтр CC15 — в этом случае характеристика совпадает с максимумом кривой синего канала системы KZS, но становится широкой в коротковолновой области, что приводит к расширению всей характеристики.

Аналитическое исследование разработанной системы

Исследуем наборы на допустимое отклонение по цветности. Выберем 14 контрольных цветов из атласа Манселла в системе *uv* 1960 г. для различных универсальных наборов систем цветоделения относительно источника D65. Методика расчета координат цвета контрольных цветов заключается в интегральном сложении характеристик основных каналов системы цветоделения исследуемого образца и спектра источника излучения по следующим формулам [12, 14]:

$$K' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda)S_K(\lambda)r_M(\lambda)d\lambda,$$

$$Z' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda)S_Z(\lambda)r_M(\lambda)d\lambda,$$

$$S' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda)S_S(\lambda)r_M(\lambda)d\lambda,$$

где $\varphi(\lambda)$ — спектральная энергетическая плотность потока излучения; $S_K(\lambda)$, $S_Z(\lambda)$, $S_S(\lambda)$ — спектральные характеристики каналов основных цветов системы KZS цветоделения; $r_M(\lambda)$ — спектральный коэффициент яркости контрольных образцов.

Переведем координаты цвета в колориметрическую систему МКО XYZ 1931 через рассчитанные коэффициенты перехода (табл. 1):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_K & X_Z & X_S \\ Y_K & Y_Z & Y_S \\ Z_K & Z_Z & Z_S \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K' \\ Z' \\ S' \end{pmatrix},$$

где $X_K, X_Z, X_S, Y_K, Y_Z, Y_S, Z_K, Z_Z, Z_S$ — коэффициенты пересчета для системы KZS.

После преобразования найдем координаты цветности в системе *xу* по выражениям:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \tag{1}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \tag{2}$$

где X, Y, Z — координаты цвета; x, y — координаты цветности в системе *xу*.

Для объективной оценки погрешности цветопередачи разработанной системы цветоделения KZS переведем координаты цветности в равноконтрастную колориметрическую систему *uv* 1960 г.:

$$\begin{cases} u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \end{cases}. \tag{3}$$

Найдем изменение цветности по выражению:

$$\Delta e_{uv} = \sqrt{(u_p - u_t)^2 + (v_p - v_t)^2}, \tag{4}$$

где u_p, v_p — координаты цветности, рассчитанные для системы KZS (практика); u_t, v_t — координаты цветности, рассчитанные в системе МКО XYZ 1931 (теория).

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

В результате исследования выявлено, что все три набора превышают значение 0,0054, являющееся максимальным при определении точности индекса цветопередачи излучения [12, С. 342]. Отметим, что при анализе изменения цветов, особенно насыщенных, такие показатели можно считать удовлетворительными. Из трех систем цветоделения выбран набор с минимальным отклонением цветности.

Таблица 3. Изменение цветности универсальных наборов систем цветоделения
Table 3. Change in color of universal sets of color separation systems

Наборы цветов	Величина Δe	Номера контрольных цветов													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
		Цвета средней насыщенности							Насыщенные цвета					Листва	Кожа
1	По цветам	0,013	0,010	0,004	0,004	0,004	0,002	0,008	0,011	0,024	0,008	0,009	0,028	0,012	0,004
	По группам цветов	0,006							0,017					0,012	0,004
	Среднее по всем цветам	0,00996													
2	По цветам	0,008	0,005	0,004	0,007	0,012	0,014	0,014	0,012	0,004	0,002	0,006	0,023	0,007	0,005
	По группам цветов	0,009							0,009					0,012	0,004
	Среднее по всем цветам	0,00877													
3	По цветам	0,010	0,006	0,004	0,006	0,008	0,010	0,013	0,013	0,017	0,002	0,010	0,016	0,009	0,005
	По группам цветов	0,008							0,011					0,009	0,005
	Среднее по всем цветам	0,00915													

В качестве эксперимента для разработанной системы KZS предложены коэффициенты преобразования известных цветовых пространств: sRGB, AdobeRGB, PAL/SECAM, ProPhotoRGB, DCI-P3, Wide Gamut RGB. Среднее арифметическое Δe составило от 0,009 до 0,04. Лучшее значение получено при Wide Gamut RGB, наихудшее — PAL/SECAM, т. е. чем больший охват у цветового треугольника, тем меньше изменение цветности. В работе [14] доказано, что небольшой цветовой треугольник позволяет корректировать только широкие спектральные характеристики матричных фотоприемников с второстепенными и отрицательными ветвями. Таким образом, разработанная система цветоделения на основе цветового треугольника KZS имеет большой потенциал в колориметрических исследованиях, в частности, в микроскопии.

Экспериментальное исследование разработанной системы

Для исследования системы цветоделения была собрана экспериментальная установка (рис. 3) [15]. Главные элементы установки: система освещения (источник питания, источник излучения, отражающий экран), тест-объект, объектив, система анализа (система цветоделения, ноутбук или ПК), система юстировки. Заметим, что система цветоделения состоит из набора корректирующих светофильтров и черно-белой камеры; система юстировки предполагает регулировку положения источника относительно объектива и настройку объектива.

Экспериментальная установка помещена в короб 3 (рис. 3), покрытый изнутри черным бархатом для исключения цветовых помех. Источник излучения 2 подключен к источнику питания 1. Диффрагма 4 с коллиматором 5 позволяет реализовать параллельный пучок лучей от источника 2 для равномерного освещения тест-объекта 6 и экрана 7. Излучение от источника, падающее под углом 45° на тест-объект 6 и отража-

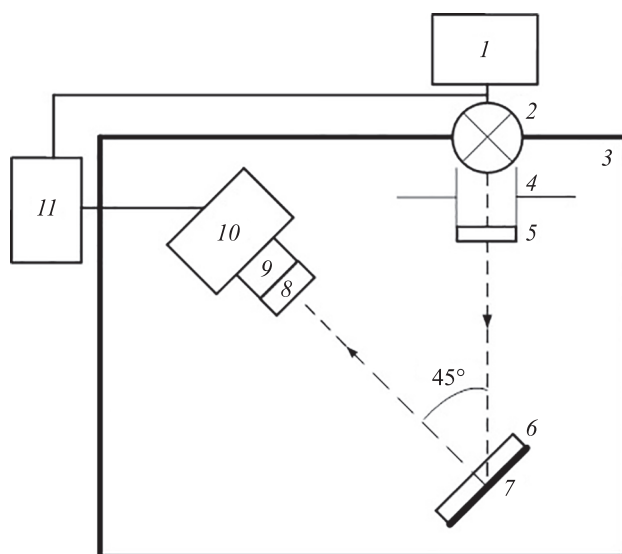


Рис. 3. Функциональная схема экспериментальной установки

Fig. 3. Functional diagram of the experimental setup

ющееся от экрана 7 под углом 0° к регистрирующей черно-белой камере 10, проходит через набор корректирующих светофильтров 8, объектив 9 и попадает на матрицу камеры 10. Цифровые снимки отображаются на персональном компьютере 11 и далее регистрируются и обрабатываются программно.

Одна из важных частей установки — отражающий экран и его расположение. В качестве экрана выбран отражатель с показателем отражения 90 % — Standard 90 № 812693. В соответствии с рекомендациями МКО для измерения колориметрической характеристики образцов принята схема освещения/наблюдения — $45^\circ/0^\circ$. Таким образом, тест-объект освещается пучком, ось которого составляет с нормалью к образцу угол $45 \pm 5^\circ$. Образец наблюдается под углом $0 \pm 5^\circ$ относительно нормали согласно МКО и ГОСТ¹.

Для объективного анализа измерений подберем эталонные тест-объекты — стандартизированные цветные оптические стекла². Из групп желтых (ЖС17, ЖС19, ЖС20), желто-зеленых (ЖЗС9, ЖЗС18, ЖЗС5), зеленых (ЗС3, ЗС8, ЗС10), сине-зеленых (СЗС5, СЗС7, СЗС16) цветных оптических стекол выберем по три светофильтра, так как разработанное цветовое пространство расширено в сторону данных цветов, поэтому важно знать точность цветопередачи этих областей.

Так как координаты цветности цветных оптических стекол в каталоге представлены относительно источников типа А и В, то в качестве источника излучения в исследовании использована лампа накаливания, работающая в режиме типа А (цветовая температура 2856 К) из условий ГОСТ 10771-82³ и ГОСТ Р 55703-2013⁴. Лампа накаливания работает от стабилизированного источника. Для реализации спектра типа А лампы подобрано питание 11 В. Режим работы лампы контролировался вольтметром, измеряющим напряжение на ней.

Перед началом эксперимента были проведены расчеты выбранных светофильтров в разработанной системе относительно источника типа А (табл. 4). Расчет координат цвета выбранных 12 светофильтров производился по следующим формулам:

$$K' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda) S_K(\lambda) \tau_N(\lambda) d\lambda,$$

$$Z' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda) S_Z(\lambda) \tau_N(\lambda) d\lambda,$$

$$S' = \int_{\lambda=400 \text{ нм}}^{770 \text{ нм}} \varphi(\lambda) S_S(\lambda) \tau_N(\lambda) d\lambda,$$

¹ ГОСТ Р 52489-2005. Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 1. Основные положения. Введ. 01.01.2007. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.

² Цветное оптическое стекло и особые стекла. Каталог / Под ред. проф. Г.Т. Петровского. М.: Дом оптики, 1990 г. 228 с.

³ ГОСТ 10771-82. Лампы накаливания светоизмерительные рабочие. Технические условия. Введ. 01.01.1983. М.: Стандартинформ, 1988. 20 с.

⁴ ГОСТ Р 52489-2005. Материалы лакокрасочные. Колориметрия. Часть 1. Основные положения. Введ. 01.01.2007. М.: Стандартинформ, 2006. 12 с.

где $\tau_{\lambda}(\lambda)$ — спектральный коэффициент пропускания светофильтров.

Координаты и значения изменения цветности рассчитаем по формулам (1)–(4).

Суть методики заключается в получении трех снимков по каждому каналу K, Z и S и их дальнейшей обработке для нахождения яркости по каждому каналу. Далее выполним преобразование полученных значений в системы МКО XYZ, xu и uv . Все преобразования проводились в среде MATLAB в разработанной программе [16]. Перед исследованием были проведены измерения на ZWO ASI120MM-S (mono) по 5 раз на каждый канал [17, 18]. В результате были получены параметры, показывающие стабильность работы цифровой камеры.

На экспериментальной установке были измерены координаты цветности источника излучения и рассчитаны координаты цветности для определения соответствия полученных значений ГОСТ. Так как при измерении источника по красному каналу происходило полное насыщение камеры, то для всех трех каналов при измерениях применялось оптическое стекло HC1 — нейтральный светофильтр с относительно ровным коэффициентом пропускания от 400 до 770 нм и понижением интенсивности примерно до 75 %. Полученные значения согласуются с ГОСТ¹, где допускается отклонение координат цветности от номинального значения x и y в пределах $\pm 0,02$. Изменение координат цветности источника составило 0,0145 в системе uv 1960 г., что на 0,0091 больше максимального значения 0,0054. Если учесть погрешность самой системы 0,0017, то получим 0,0074 погрешности при эксперименте.

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

После подготовительных расчетов измерим координаты цвета выбранных 12 светофильтров (табл. 5). По полученным значениям рассчитаем координаты цветности тест-объектов в системах xu 1931 г. и uv 1960 г.

Наилучший показатель равен нулю изменения цветности, когда нет изменения цветности. Заметим, что при измерениях данное значение неизбежно. Например, при сравнении цветности двух ламп (исследуемой и стандартной) допустимо отклонение 0,0054 [12, С. 342], которое получено при измерении слабонасыщенных цветов (в случае с лампами — желтых). Если обратить внимание на табл. 3, расчет насыщенных цветов всегда дает большие цветовые сдвиги, особенно цвета красный № 9 и синий № 12, где изменение составило до 0,028. Исходя из этого, значения в табл. 5, полученные практическим путем, можно считать приемлемыми для разработанной системы.

При сравнении данных из табл. 4 и табл. 5, очевидно несоответствие результатов по качественным показателям. Например, значения для светофильтров ЖС17, ЖС19, ЖС20 и СЗС16 должны быть с большими показателями изменения цветности. Но только ЖС17 и СЗС16 согласуются с математическим моделированием. Значит, есть погрешность измерений. Показатель изменения цветности (табл. 5) в целом получен не ниже значения 0,02, что может указывать на систематическую погрешность. Отметим, что при математическом моделировании изменение цветности составило 0,0155 (табл. 4). Тогда, при среднем значении показателей 0,0271 (табл. 5) получим общее отклонение — 0,0116. Подобное отклонение может быть результатом применения цветного оптического стекла в качестве системы цветоделения (поглощение в стекле), 8-битного изображения, а также динамического диапазона матрицы.

Выполним сравнение полученных значений с экспериментальными измерениями современной цифровой

Таблица 4. Координаты цветности и изменения цветности светофильтров относительно источника типа А в системах xu 1931 г. и uv 1960 г.

Table 4. Chromaticity coordinates and changes in the chromaticity of light filters relative to a type A source in the 1931 xu and 1960 uv systems

Координаты цвета	Светофильтры											
	Желтые			Желто-зеленые			Зеленые			Сине-зеленые		
	ЖС17	ЖС19	ЖС20	ЖЗС9	ЖЗС18	ЖЗС5	ЗС3	ЗС8	ЗС10	СЗС5	СЗС7	СЗС16
Теория												
x	0,523	0,470	0,530	0,429	0,482	0,465	0,259	0,423	0,399	0,404	0,333	0,424
y	0,464	0,430	0,454	0,510	0,473	0,450	0,503	0,471	0,578	0,418	0,411	0,417
u	0,278	0,260	0,287	0,208	0,250	0,249	0,121	0,216	0,175	0,224	0,183	0,237
v	0,370	0,357	0,369	0,370	0,368	0,361	0,354	0,362	0,379	0,348	0,339	0,350
Практика												
x	0,542	0,494	0,549	0,446	0,500	0,487	0,249	0,441	0,413	0,424	0,346	0,445
y	0,446	0,416	0,435	0,496	0,459	0,434	0,508	0,459	0,567	0,410	0,408	0,408
u	0,298	0,282	0,308	0,221	0,266	0,269	0,116	0,231	0,184	0,240	0,192	0,254
v	0,368	0,356	0,367	0,369	0,367	0,360	0,354	0,361	0,379	0,348	0,340	0,349
Δe	0,020	0,021	0,022	0,014	0,016	0,020	0,006	0,015	0,009	0,016	0,009	0,018
Δe среднее	0,0155											

Таблица 5. Изменение цветности светофильтров в системе uv 1960 г. при экспериментальных измерениях
 Table 5. Change in the color of filters in the uv system of 1960 during experimental measurements

СФ	Координаты цветности в системах xy 1931 г. и uv 1960 г.								Разность в системе uv 1960 г.		Δe
	Результаты измерений				Каталожные параметры ¹						
ЖС17	x	0,4451	u	0,2416	x	0,5069	u	0,2667	Δu	-0,0252	0,0281
	y	0,4384	v	0,3569	y	0,4680	v	0,3694	Δv	-0,0125	
ЖС19	x	0,4303	u	0,2355	x	0,4687	u	0,2600	Δu	-0,0245	0,0247
	y	0,4308	v	0,3536	y	0,4290	v	0,3570	Δv	-0,0033	
ЖС20	x	0,4899	u	0,2592	x	0,5320	u	0,2883	Δu	-0,0291	0,0292
	y	0,4616	v	0,3664	y	0,4537	v	0,3688	Δv	-0,0025	
ЖЗС9	x	0,3764	u	0,2029	x	0,4330	u	0,2096	Δu	-0,0068	0,0233
	y	0,4312	v	0,3486	y	0,5107	v	0,3709	Δv	-0,0223	
ЖЗС18	x	0,4168	u	0,2335	x	0,4850	u	0,2512	Δu	-0,0176	0,0269
	y	0,4144	v	0,3483	y	0,4745	v	0,3686	Δv	-0,0203	
ЖЗС5	x	0,4053	u	0,2318	x	0,4660	u	0,2509	Δu	-0,0191	0,0258
	y	0,4005	v	0,3435	y	0,4468	v	0,3608	Δv	-0,0173	
ЗС3	x	0,2367	u	0,0970	x	0,2551	u	0,1208	Δu	-0,0238	0,0298
	y	0,6029	v	0,3706	y	0,4965	v	0,3526	Δv	0,0179	
ЗС8	x	0,3744	u	0,2040	x	0,4252	u	0,2189	Δu	-0,0149	0,0211
	y	0,4241	v	0,3467	y	0,4683	v	0,3617	Δv	-0,0150	
ЗС10	x	0,3972	u	0,2031	x	0,3970	u	0,1723	Δu	0,0308	0,0374
	y	0,4681	v	0,3590	y	0,5840	v	0,3803	Δv	-0,0213	
СЗС5	x	0,3541	u	0,2065	x	0,4041	u	0,2246	Δu	-0,0180	0,0233
	y	0,3805	v	0,3329	y	0,4172	v	0,3478	Δv	-0,0148	
СЗС7	x	0,3513	u	0,2068	x	0,3435	u	0,1888	Δu	0,0180	0,0207
	y	0,3748	v	0,3309	y	0,4137	v	0,3411	Δv	-0,0101	
СЗС16	x	0,3526	u	0,2067	x	0,4230	u	0,2361	Δu	-0,0295	0,0344
	y	0,3775	v	0,3319	y	0,4176	v	0,3497	Δv	-0,0178	
Δe среднее											0,0271

¹ 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.

камеры [15]. В результате среднее значение для желтых светофильтров составило 0,004, зеленых — 0,039, сине-зеленых — 0,022, а средний результат по трем группам — 0,022. В связи с этим можно отметить конкурентоспособность разработанной системы с учетом того, что она построена на основе цветных оптических стекол, которые поглощают часть излучения, а не на тонких пленках, как современные системы цветоделения по типу Байера (RGBG).

Заключение

Разработан цветовой треугольник KZS с кривыми сложения, близкими к кривым удельных координат физиологической системы КЗС. Разработана система цветоделения на основе цветных оптических стекол под кривыми сложения разработанной системы на основе спектральной характеристики монохромной цифровой камеры.

Проведено аналитическое и экспериментальное исследования разработанных систем цветоделения. Аналитическое исследование представлено в форме математического моделирования работы предложенных трех наборов с 14 контрольными цветами из атласа Манселла. По сравнению с ранее полученными результатами, значения цветности с использованием разработанной системы KZS качественно лучше современных — в среднем 0,00877. Результаты показали, что чем больший охват у цветового треугольника, тем меньше изменение цветности.

В результате анализа выбран набор корректирующих светофильтров для системы цветоделения с цветовым пространством KZS. Проведено экспериментальное и аналитическое исследования на основе четырех групп стандартизированных цветных оптических стекол на собранной экспериментальной установке. При математическом моделировании получено изменение цветности в среднем 0,016, экспериментальный результат

— 0,027. При сравнении полученных значений с экспериментальными измерениями современной цифровой камеры (средний результат по трем группам стекол — 0,022), можно отметить конкурентоспособность разработанной системы перед исследованными цифровыми системами. При реализации спектральных характеристик предлагаемой системы на основе тонких пленок, как в матричных фотоприемниках, экспериментальный результат можно будет значительно уменьшить.

Полученные параметры и характеристики будут учтены при внедрении разработанной системы цветоделения в монохромный цифровой микроскоп, что позволит провести экспериментальное сравнение с современными цветовыми системами в этих устройствах. Исследования могут быть полезны специалистам в области цифровых и оптико-электронных устройств и систем.

Литература

1. Jeckel H., Drescher K. Advances and opportunities in image analysis of bacterial cells and communities // *FEMS Microbiology Reviews*. 2021. V. 45. N 4. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa062>
2. Spring K.R., Russ J.C., Davidson M.W. Digital imaging in optical microscopy – basic concepts in digital image processing. Microscopy primer. OLIMPUS CORPORATION.
3. Murphy D.B. Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging. John Wiley & Sons, 2001. 368 p.
4. Wu Q., Merchant F.A., Castleman K.R. Microscope Image Processing. Academic Press, 2008. 548 p.
5. Wayne R. Light and Video Microscopy. Academic Press, 2014. 358 p.
6. Зено Б.Х. Валидация лиц с помощью обнаружения глаз, рта и цвета кожи // *Прикладная информатика*. 2018. Т. 13. № 1(73). С. 69–81.
7. Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. М.: Мир. 1978. 592 с.
8. Жбанова В.Л. Вопросы применения цифровой колориметрии в современных научных исследованиях // *Светотехника*. 2021. № 2. С. 5–14.
9. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. М.: Энергоатомиздат, 1990. 240 с.
10. Лурье А.А., Косиков А.Г. Теория и практика цифровой обработки изображений. М.: Научный мир, 2003. 168 с.
11. Новаковский С.В. Цвет на экране телевизора (Основы телевизионной колориметрии). М.: Радио и связь, 1997. 168 с.
12. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: учеб. пособие для вузов в 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия. М.: Энергоатомиздат, 1989. 432 с.
13. Жбанова В.Л. Разработка систем цветоделения матричных фотоприемников для научных исследований // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 8. С. 69–74. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-69-75>
14. Жбанова В.Л. Оценка и подбор цветовых пространств для цифровых систем // *Светотехника*. 2020. № 5. С. 53–60.
15. Жбанова В.Л., Жбанов И.Л. Метод исследования цветопередачи цифровых камер // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 3. С. 326–333. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-326-333>
16. Жбанова В.Л., Жбанов И.Л. Программа для обработки цифрового изображения четырехкадровой камеры: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU2022615119. 29.03.2022.
17. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2010. 304 с.
18. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (колориметрия). СПб.: Издательство СПбГУ, 2000. 397 с.

Автор

Жбанова Вера Леонидовна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация, orcid.org/0000-0001-7597-0675, Vera-zhbanova@yandex.ru

References

1. Jeckel H., Drescher K. Advances and opportunities in image analysis of bacterial cells and communities. *FEMS Microbiology Reviews*, 2021, vol. 45, no. 4. <https://doi.org/10.1093/femsre/fuaa062>
2. Spring K.R., Russ J.C., Davidson M.W. *Digital imaging in optical microscopy — basic concepts in digital image processing*. Microscopy primer. OLIMPUS CORPORATION.
3. Murphy D.B. *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*. John Wiley & Sons, 2001, 368 p.
4. Wu Q., Merchant F.A., Castleman K.R. *Microscope Image Processing*. Academic Press, 2008, 548 p.
5. Wayne R. *Light and Video Microscopy*. Academic Press, 2014, 358 p.
6. Zeno B.H. Face validation using skin, eyes and mouth detection. *Journal of Applied Informatics*, 2018, vol. 13, no. 1(73), pp. 69–81. (in Russian)
7. Judd D.B., Wyszecki G. *Color in Business, Science and Industry*. John Wiley & Sons, 1975, 553 p.
8. Zhbanova V.L. Features of digital colourimetry application in modern scientific research. *Light and Engineering*, 2021, vol. 29, no. 3, pp. 146–158. <https://doi.org/10.33383/2021-028>
9. Krivosheev M.I., Kustarev A.K. *Color Measurements*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990, 240 p. (in Russian)
10. Lure A.A., Kosikov A.G. *Theory and Practice of Digital Image Processing*. Moscow, Nauchny mir Publ., 2003, 168 p. (in Russian)
11. Novakovskii S.V. *Color on a TV Screen (Basics of TV Colorimetry)*. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1997, 168 p. (in Russian)
12. Meshkov V.V., Matveev A.B. *Lighting Technology Foundations. Part 2: Physiological Optics and Colorimetry*. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1989, 432 p. (in Russian)
13. Zhbanova V.L. Development of color separation systems for matrix photodetectors for scientific research. News of the Tula state university. *Technical sciences*, 2022, no. 8, pp. 69–74. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2022-8-69-75>
14. Zhbanova V.L. Evaluation and selection of colour spaces for digital systems. *Light and Engineering*, 2020, vol. 28, no. 6, pp. 86–94. <https://doi.org/10.33383/2020-024>
15. Zhbanova V.L., Zhbanov I.L. A method for analysing the color rendering of digital cameras. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 326–333. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-3-326-333>
16. Zhbanova V.L., Zhbanov I.L. Program for digital image processing of a four-frame camera. *Certificate of the computer program registration no. RU2022615119*. 29.03.2022. (in Russian)
17. Kirillovskii V.K. *Modern Optical Research and Measurements*. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010, 304 p. (in Russian)
18. Iustova E.N. *Color Measurements (Colorimetry)*. St. Petersburg, SPbU Publ., 2000, 397 p. (in Russian)

Author

Vera L. Zhbanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Smolensk, 214013, Russian Federation, orcid.org/0000-0001-7597-0675, Vera-zhbanova@yandex.ru