

На правах рукописи



РЫБИНА ВИКТОРИЯ АНДРЕЕВНА

**РАВНОКОНТРАСТНОЕ ЦВЕТОВОЕ ПРОСТРАНСТВО НА
ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОРОГОВОГО ЦВЕТОВОГО
ЗРЕНИЯ**

Специальность 2.4.11. – Светотехника

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре светотехники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Научный руководитель: **Григорьев Андрей Андреевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры светотехники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

Официальные

Столяревская Раиса Иосифовна

оппоненты:

доктор технических наук, зам. главного редактора и научный редактор англоязычной версии журнала в ООО "Редакция Журнала "Светотехника"

Жбанова Вера Леонидовна

кандидат технических наук, доцент кафедры электроники и микропроцессорной техники филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва»

Защита диссертации состоится «30» мая 2024 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета МЭИ.112 при ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» по адресу: 111250, Москва, Красноказарменная ул., д.13, корпус Е, ауд. Е-513.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета МЭИ.112

к.т.н.



Сапронов М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В большинстве существующих колориметрических систем (КС) цветовые пороги зрительной системы (ЗС) зависят как от направления изменения цвета в цветовом пространстве (ЦП), так и от координат цветности наблюдаемого излучения. В светотехнике и колориметрии равноконтрастные цветовые пространства (РЦП) позволяют связать расстояние между цветами в этих системах с числом порогов восприятия ЗС независимо от значений координат цвета (цветности) и направления их изменения в РЦП. Такие цветовые пространства позволяют одним числом оценивать отличие человеком любых двух цветов, что используется при расчете качества цветопередачи источников света (ИС), при разработке устройств отображения информации и в ряде других задач. В идеальном РЦП пороговые отличия цвета от эталона представляют из себя в цветовом пространстве сферы постоянного радиуса, независимо от координат цвета эталона. На диаграмме цветности (ДЦ) РЦП – это окружности одного радиуса.

До последнего времени построение РЦП проводилось по двум основным направлениям:

1. ряд цветов, «отстоящих» друг от друга на одинаковом по ощущению расстоянии, собирался в цветовые атласы;
2. вводились нелинейные преобразования стандартных КС, чтобы добиться равноконтрастности преобразованных систем. Такие построения базировались на экспериментальных исследованиях зависимости цветовых порогов и эмпирическом подборе нелинейных преобразований стандартных КС. Недостаток описанных подходов состоит в том, что они не учитывают причин возникновения цветовых порогов и справедливы только для тех условий, в которых производились экспериментальные исследования, по которым они нормировались.

Сопоставление экспериментальных данных по цветоразличению показывает¹, что наиболее точными являются данные Д.Л. МакАдама² по форме близкие к эллипсам. Современные разработанные РЦП имеют характеристики, сильно отличающиеся от идеального РЦП.

Так для РЦП, принятого международной комиссией по освещению (МКО) в 1960 году, среднеквадратическое отклонение (СКО) осей, полученных в нем преобразованных в «окружности» эллипсов, равно 38%, а наибольшее отклонение от диаметра средней окружности достигает 94%. В разработанных позднее РЦП, например, в v_k, v_z, v_c^1 , СКО осей эллипсов составляет 24%, что также далеко от характеристик идеальной РЦП.

¹ Матвеев, А.Б. Равноконтрастная цветовая система / А.Б. Матвеев. Н.М. Беляева // Светотехника. – 1965. – № 9. – С. 1–6.

² MacAdam, D.L. Visual Sensitivities to Color Differences in Daylight // Journal of the Optical Society of America. – 1942. – Vol.32. – pp. 247–274. DOI: [10.1364/JOSA.32.000247](https://doi.org/10.1364/JOSA.32.000247).

В настоящее время не существуют РЦП, которые были бы основаны на физиологически обоснованных апробированных в пороговых условиях наблюдения математических моделях ЗС. Поэтому разработка равноконтрастного цветового пространства, основанного на таких моделях, весьма актуальна.

Целью диссертации является построение равноконтрастного цветового пространства на основе математической модели порогового цветового зрения (ММПЦЗ).

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить ряд научно-технических задач:

1. На основе теории статистических решений разработать ММПЦЗ по обнаружению цветных объектов [1,2].
2. Разработать методику определения спектральных чувствительностей рецепторов (СЧР) для людей с нормальным цветовым зрением в условиях естественной адаптации ЗС [1,2].
3. Создать экспериментальную установку (ЭУ), реализующую разработанную методику, и провести серию экспериментальных исследований монохроматических порогов ЗС [3,4].
4. Определить параметры физиологической колориметрической системы (ФКС) трихроматов [3,4].
5. Провести математическое моделирование порогов цветоразличения [5,6].
6. Разработать равноконтрастный метод оценки меры отличий двух цветов [5,6].

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Получены новые расчетные выражения для ММПЦЗ, связывающие пороги цветоразличения трихроматов с их СЧР и спектральными характеристиками объектов и фонов [1,2].
2. Доказана некорректность привлечения в качестве наблюдателей дихроматов вместо трихроматов и использования экспериментальных результатов дихроматов для построения ФКС трихромата [1,2].
3. Разработана оригинальная методика определения СЧР трихроматов с использованием экспериментальных данных о порогах обнаружения монохроматических объектов на белом фоне и последующими расчетами с использованием ММПЦЗ. Получены новые зависимости СЧР для трихромата [1,2].
4. Получены параметры новой ФКС, которая полностью согласована со стандартными КС *XYZ* и *RGB* [1,2].
5. На основе ММПЦЗ создано физиологическое РЦП [5,6].

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана, создана и отградуирована ЭУ для исследования монохроматических порогов трихроматов на цветных фонах.
2. Получены новые результаты расчетно-экспериментальных исследований цветных порогов ЗС.
3. Разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее путем обработки экспериментальных результатов по обнаружению монохроматических объектов на цветных фонах рассчитывать СЧР трихромата.
4. Разработано ПО для моделирования порогов цветоразличения ЗС.
5. Введен новый интегральный критерий ошибки (ИКО) для оценки погрешности аппроксимации экспериментальных данных аналитическими зависимостями.

В диссертационной работе использованы общенаучные и специальные методы исследования. Теоретический уровень исследования включал математическое моделирование порогов ЗС человека. При обработке результатов экспериментальных исследований применялся статистический анализ полученных экспериментальных результатов и методы минимизации их отличия от расчетов по математической модели.

Достоверность результатов проведенных исследований обеспечивается использованием апробированных статистических закономерностей, аналитической оценкой погрешности от вводимых в математическую модель ограничений и допущений, а также всесторонними исследованиями методом Монте-Карло погрешностей ЭУ и алгоритма решения системы нелинейных уравнений определяющих СЧР трихромата.

Апробация и внедрение результатов.

Основные положения диссертации отражены в печатных работах, докладывались и обсуждались:

- на научно-технических конференциях «Молодые светотехники России», г. Москва, 2017 - 2019 г.;
- на международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика", 2017 - 2018 г.;
- на международной научной конференции МКО 2021 г.;
- на международной научной конференции по науке и искусству в области освещения *ALC 2022* «Здоровое освещение, здоровая жизнь», 2022 г.

По материалам диссертационной работы опубликовано четыре статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, три статьи в переводном отечественном издании, входящем в *Scopus*, два доклада на иностранном языке на

международных конференциях, шесть докладов на научно-технических конференциях.

Экспериментальная установка доступна и продолжает использоваться для проведения исследовательских работ. Результаты расчетно-экспериментальных исследований диссертационной работы используются на кафедре Светотехники НИУ «МЭИ» при чтении курса лекций «Математическое моделирование зрительной системы человека» учебного плана по направлению 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника».

Положения, выносимые на защиту, вытекают из полученных новых научных результатов:

1. Новые расчетные выражения для ММПЦЗ, связывающие пороги цветоразличения трихроматов с их СЧР и спектральными характеристиками объектов и фонов.
2. Доказательство некорректности привлечения в качестве наблюдателей дихроматов вместо трихроматов и использования экспериментальных результатов дихроматов для построения ФКС трихромата.
3. Методика определения СЧР трихроматов с использованием экспериментальных данных о порогах обнаружения монохроматических объектов на фоне с непрерывным спектром и последующими расчетами с использованием ММПЦЗ.
4. Новые зависимости СЧР для трихромата.
5. Параметры новой ФКС, которая полностью согласована со стандартными КС *XYZ* и *RGB*.
6. Физиологическое РЦП, построенное на основе ММПЦЗ.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цель и задачи исследований, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также указана апробация результатов работы.

Первая глава носит реферативный характер, в ней последовательно анализируются разделы колориметрии, которые относятся к исследованию цветовых порогов, КС, физиологии зрения и ее математическому описанию.

Первый раздел посвящен исследованиям порогов цветоразличения, начиная с общепринятых пороговых эллипсов Д.Л. МакАдама (и совместных исследований с У.Р.Д. Брауном)^{3,4} и заканчивая проверкой их достоверности в ряде современных работ^{5,6}. Несмотря на попытку разных авторов приблизить условия экспериментов к экспериментам Д.Л. МакАдама, полученные данные не согласуются с его результатами. Всегда существует оговорка, что другие наблюдатели (или даже один и тот же наблюдатель, повторяющий наблюдения) могут дать несколько иные результаты⁷.

Во втором разделе анализируются надпороговые вопросы цветоразличения с акцентом на их практическом применении при разработке и тестировании новых РЦП и формул прогнозирования цветовых различий.

На основе рекомендованного МКО⁸ критерия *STRESS*⁹ технические комитеты МКО одобрили следующие пространства: *OSA-UCS*, *DIN99d* и *CAM02-UCS* (и *CAM16-UCS*)¹⁰.

Более подробно были изучены модели цветового восприятия (МЦВ), в которых одним из шагов является учет хроматической адаптации с помощью перехода к СЧР, фактически осуществляется переход к новой КС.

Было создано ПО *CalcLMS_XYZ*, которое позволяет получить параметры КС, необходимые для ее использования в колориметрических расчетах. С его помощью было получено, что хоть современные МЦВ (*CIECAM16*) не имеют отрицательных значений в реакции рецепторов, но они не соответствуют описанию ФКС с точки зрения физиологии. Как видно из рисунка 1, для всех изученных МЦВ при отображении треугольников основных цветов (ОЦ) реальные цвета имеют отрицательные координаты цветности *y*, что соответствует отрицательному ощущению яркости человеком.

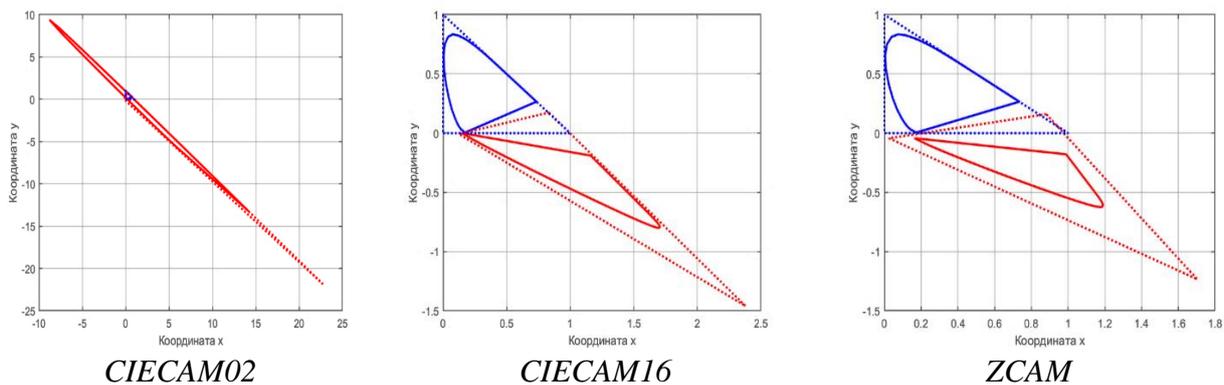


Рисунок 1 – Треугольник ОЦ и ДЦ в *x, y*

³ Brown, W.R.J. Visual Sensitivities to Combined Chromaticity and Luminance Differences/ W.R.J. Brown, D.L. MacAdam // Journal of the Optical Society of America. – 1949. – pp. 808–834. DOI: [10.1364/JOSA.39.000808](https://doi.org/10.1364/JOSA.39.000808)

⁴ Brown, W.R.J. Color Discrimination of Twelve Observers Daylight // Journal of the Optical Society of America. – 1957. – pp. 137–143. DOI: [10.1364/JOSA.47.000137](https://doi.org/10.1364/JOSA.47.000137).

⁵ Georgoula, M. A revisit of the MacAdam colour discrimination ellipses / M.A Georgoula, M.R. Luo, G. Cui // 24th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. – 2016. – pp. 121–125. DOI: [10.2352/ISSN.2169-2629.2017.32.121](https://doi.org/10.2352/ISSN.2169-2629.2017.32.121).

⁶ Luo, M.R. Verification of MacAdam Data / J. Liang, M.R. Luo and M. Georgoula, N. Zhou // Proceedings of 13th AIC Congress 2017. – 2017. – pp. 1–4.

⁷ Robertson, A.R. Uncertainty. Simplicity and Reasonableness – Three Golden Rules of Modelling // AIC 2007 – Color Science for Industry. – 2007. – pp. 5–9.

⁸ CIE 217:2016. Recommended Method for Evaluating the Performance of Colour-Difference Formulae // Vienna, CIE Central Bureau – 2016.

⁹ García, P.A. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences / P.A. García, R. Huertas, M. Melgosa, G. Cui // Journal of the Optical Society of America A. – 2007. – 24(7). – pp. 1823–1829. DOI: [10.1364/josaa.24.001823](https://doi.org/10.1364/josaa.24.001823).

¹⁰ ISO 18314-5:2022(en). Analytical colorimetry. Part 5: Procedure for colorimetric determination of colour differences of object colours according to equidistant colour spaces // ISO Geneva – 2022.

Подобная проверка была проведена и для исследований, в которых предлагались ФКС и указывались координаты цветности ОЦ. Только часть исследователей учитывали, что точка зеленого ОЦ значительна удалена от локуса в положительную сторону координаты y .

В 2006 году технический комитет 1-36 МКО опубликовал доклад¹¹ о выборе набора функций сложения (ФС)¹² и оценках фундаментальных параметров колбочек¹³ (*cone fundamentals, СЧР*) (рисунок 2а), соответствующая КС обозначается как *LMS*. Экспериментальные исследования СЧР А. Стокмана и Л.Т. Шарпа проводились по методике, приводящей к изоляции одного из типов колбочек, с привлечением в качестве наблюдателей вместо трихроматов дихроматов на основе их отбора по тестам ДНК¹⁴. Матрицу перехода для координат цвета из КС *XYZ* в *LMS* авторы представили только спустя 10 лет¹⁵.

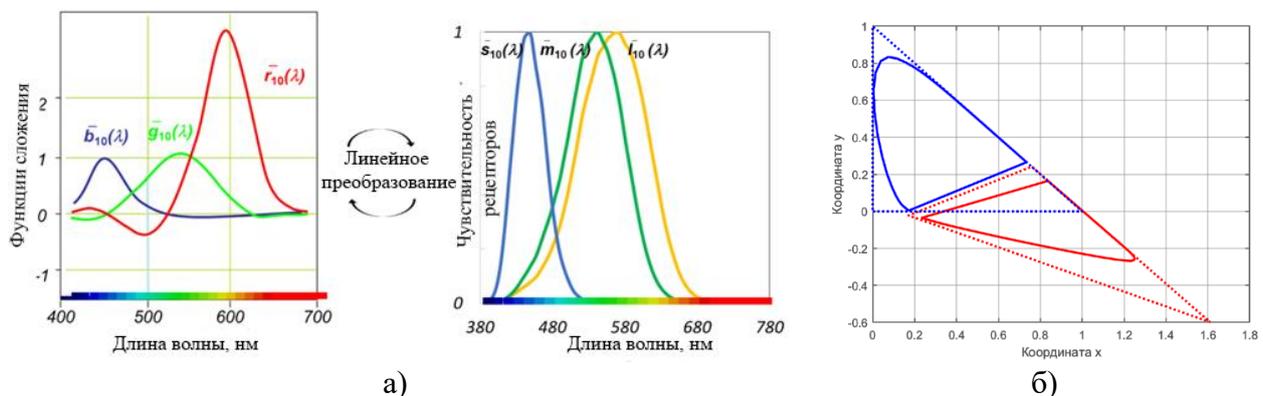


Рисунок 2 – а) ФС У.С. Стайлза и Д.М. Берча и СЧР А. Стокмана и Л.Т.Шарпа и б) треугольник ОЦ *LMS* и ДЦ в xy

Однако, кривые сложения самой ЗС человека определяются не только чувствительностью колбочек, которую можно отследить по тестам ДНК. Ощущение яркости и цветности предметов появляется у человека не на выходе рецепторов, а после обработки их сигналов головным мозгом, а этот (пока неизвестный) алгоритм может быть существенно разный у трихроматов и дихроматов, у которых один приемник отсутствует, а цветное и яркостное восприятие сохраняются [1]. Как видно из рисунка 2б, для треугольника ОЦ КС *LMS* наблюдаются те же отрицательные значения координат цветности y , что и у МЦВ.

¹¹ CIE 170-1:2006. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part 1 // Vienna, CIE Central Bureau – 2006.

¹² Stiles, W. S. N.P.L. colour-matching investigation: Final report / W.S. Stiles, J.M. Burch // Optica Acta. – 1959. – Vol. 6. – pp. 1–26. DOI: [10.1080/713826267](https://doi.org/10.1080/713826267).

¹³ Stockman, A. Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype / A. Stockman, L.T. Sharpe // Vision Research. – 2000. – 40(13). – pp. 1711-1737. DOI: [10.1016/S0042-6989\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00021-3).

¹⁴ Stockman, A. Isolation of the middle- and long-wavelength-sensitive cones in normal trichromats / A. Stockman, D. A. MacLeod, J. A. Vivien // Journal of the Optical Society of America. – 1993b. – Vol. 10. – pp. 2491–2521. DOI: [10.1364/JOSAA.10.002471](https://doi.org/10.1364/JOSAA.10.002471).

¹⁵ Stockman, A. Cone fundamentals and CIE standards. // Current Opinion in Behavioral Sciences. – 2019. – Vol.30. – pp. 87–93. DOI: [10.1016/j.cobeha.2019.06.005](https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2019.06.005).

Для подтверждения или опровержения высказанных сомнений необходимо разработать методику определения СЧР у трихроматов (в условиях их естественной световой и цветовой адаптации) и ФКС на их основе.

В последующих разделах главы представлены исследования по развитию ММПЦЗ. Как упоминалось ранее алгоритм обработки информации в мозге физиологам пока неизвестен, что заставляет для описания его работы выдвигать различные гипотезы. В математической статистике, при решении задачи выделения сигналов на фоне случайных помех, лучшим алгоритмом считается «оптимальный приемник», алгоритм работы которого при принятии решения использует всю информацию, содержащуюся в изображении. Естественно предположить, что в процессе эволюции характеристики ЗС человека достаточно близко приблизились к характеристикам оптимального приемника. Используемая в ММПЦЗ функция отношения правдоподобия является удобным способом математического описания этого алгоритма.

При выводе выражений в ММПЦЗ учитывается следующее: статистическая независимость сигналов L, M, S рецепторов, нелинейность их реакции в зависимости от яркости, закон Вебера-Фехнера, пороговые условия наблюдения при которых не происходит переадаптации ЗС при предъявлении объекта на фоне и фона без объекта.

Получено выражение¹⁶ для описания порогового обнаружения монохроматического объекта на фоне сложного спектрального состава, в котором взаимосвязаны СЧР и $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda)$ – перепад энергетической яркости монохроматического объекта:

$$L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda)}{\int_{380}^{780} L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda} \right)^2}}, \text{ где (1)}$$

$C_1 - C_3$ – постоянные коэффициенты, $L_{\text{e}\lambda\text{b}}(\lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости фона, $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ – спектральная чувствительность L, M, S рецепторов.

Анализ литературных данных показал актуальность поставленной в диссертации цели и позволил сформулировать решаемые в работе задачи.

Во второй главе разработана новая методика получения СРЧ, которая основана на решении системы уравнений (1), образованной после проведения серии экспериментов, и состоит из двух этапов:

¹⁶ Григорьев А. А. Определение удельных координат цвета физиологической системы с использованием статистической модели цветового зрения / А.А. Григорьев, С.С. Гордюхина // Полупроводниковая светотехника. – 2011. – № 1. – С. 44–47.

1. проведение экспериментов по пороговому обнаружению монохроматического объекта на равномерном фоне методом минимальных изменений (нахождение значений $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$);
2. обработка полученных результатов разработанным ПО *ApprLMSExp*, решающим обратную задачу по нахождению $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ и реализующим метод «наименьших квадратов» с помощью алгоритма «плавающей сетки».

Для реализации первого этапа была создана ЭУ для экспериментальных исследований (рисунки 3 – 4) [3], состоящая из следующих узлов:

- канала формирования изображения объекта (1-11), интегрирующей сферы (12), объединяющей излучение этих двух каналов, и окуляра (13) для наблюдения изображения двухградусного прямоугольного монохроматического объекта на стенке интегрирующей сферы;
- канала формирования излучения фона для поддержания условий дневного зрения (14,15,17,19).
- каналы для изменения спектрального состава фонового излучения (16-19).

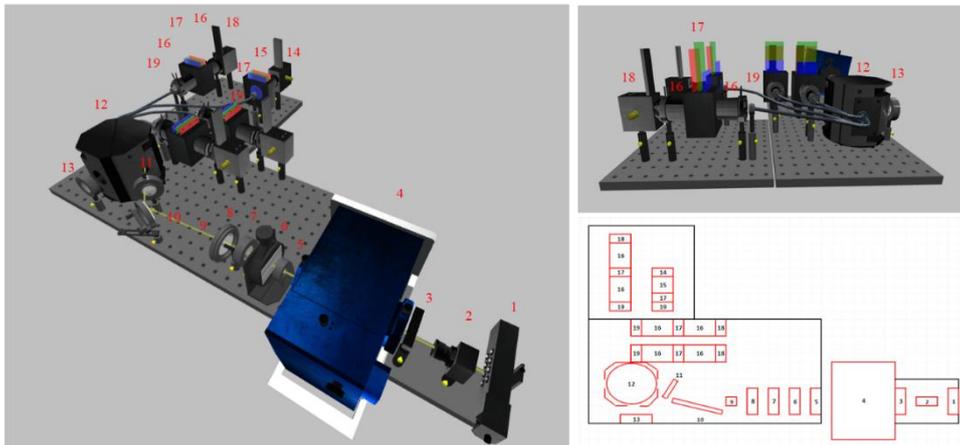


Рисунок 3 – Структурная схема и общий вид ЭУ

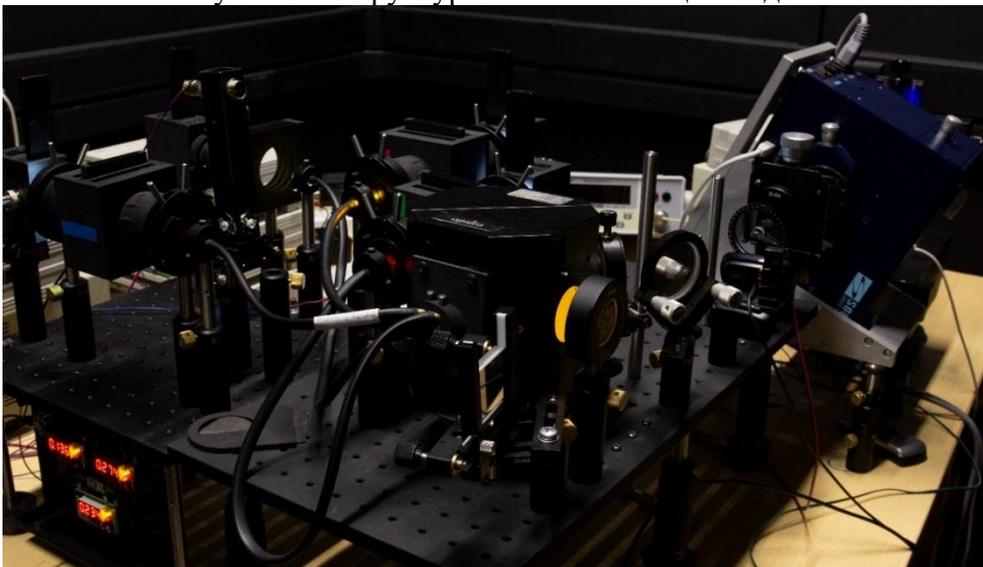


Рисунок 4 – Фотография собранной ЭУ

Была определена погрешность поддержания параметров наблюдаемых изображений при проведении экспериментов, которая не превышала 7%.

В данной диссертационной работе был введен интегральный критерий (рисунок 5а) отличия кривых СЧР, определяемый (для $\bar{l}(\lambda)$) выражением:

$$f_{\text{int}}^l(\sigma_L) = \frac{\int_{380}^{780} |\bar{l}(\lambda) - \bar{l}_c(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{l}(\lambda) d\lambda}, \text{ где} \quad (2)$$

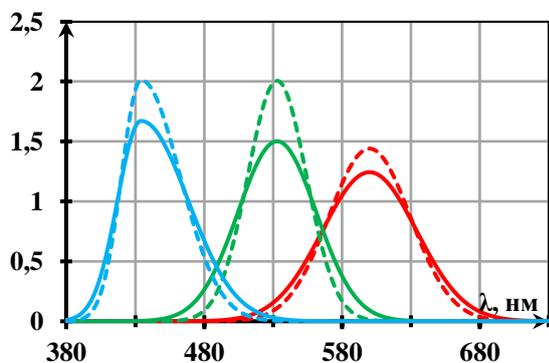
$\bar{l}_c(\lambda)$ и $\bar{l}(\lambda)$ – расчетное и тестовое значение функции $\bar{l}(\lambda)$;

$\sigma_L = \frac{\bar{\sigma}_L}{L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda)}$ – относительное СКО разброса тестовых значений $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$.

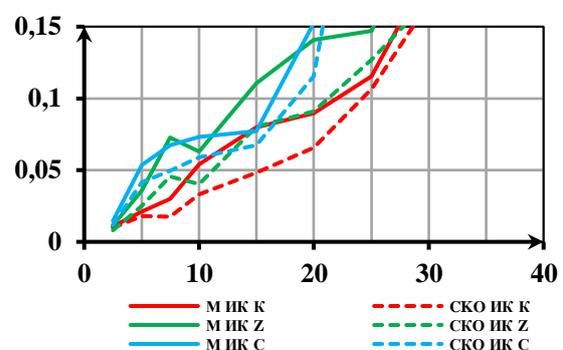
Параметры аппроксимации **LMS** связаны с измеряемыми в эксперименте значениями яркости сложными интегро-дифференциальными зависимостями, поэтому получить аналитическое выражение для погрешности получаемых параметров не представляется возможным. Многовариантные расчеты со случайными значениями параметров позволяют оценить их влияние на конечный результат. Проведенные расчеты (более 500) с решением системы уравнений (1) при использовании тестовых $\bar{l}_c(\lambda)$, $\bar{m}_c(\lambda)$, $\bar{s}_c(\lambda)$ в виде квадратичных экспонент с неизвестными параметрами λ_m и σ позволяют сделать следующие выводы по методике использования ПО *ApprLMSExp*:

1. Отличие начальных оценок параметров аппроксимации максимума кривых **LMS** λ_{lm} , λ_{mm} , λ_{sm} от полученных в ходе решения системы уравнений (1) не должно превышать 4%, т.е. 15 – 30 нм на краях видимого диапазона спектра;
2. Отличие начальных оценок параметров полуширины кривых σ_b , σ_m , σ_s от полученных в ходе решения системы уравнений (1) не должно превышать 40%, т.е. 20 нм для σ_s и 30 нм для σ_b , σ_m .

При появлении погрешности в исходных значениях $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ параметры и зависимости $\bar{l}_c(\lambda)$, $\bar{m}_c(\lambda)$, $\bar{s}_c(\lambda)$, определяются неточно. На рисунке 5б приведена зависимость интегрального критерия ошибки от величины σ_L .



а) К расчету интегрального критерия ошибки

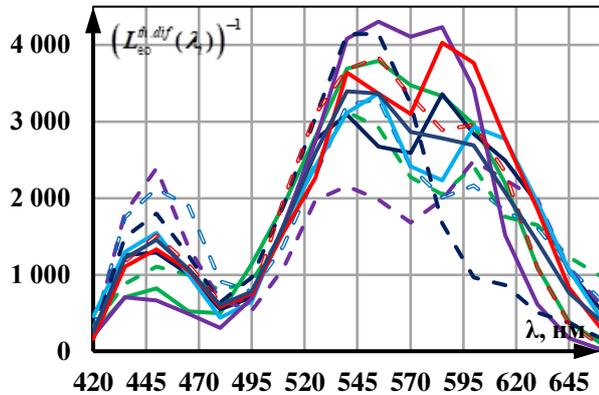


б) Зависимость интегрального критерия от σ_L

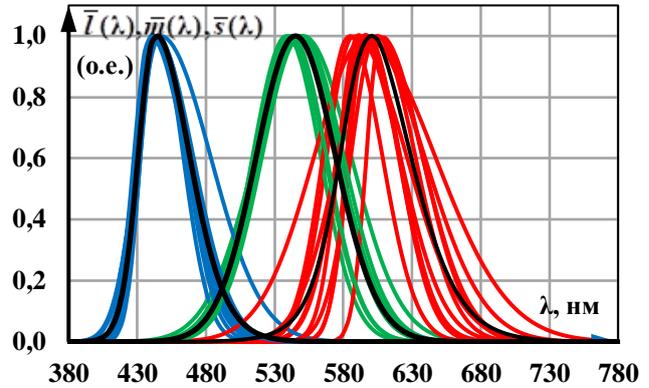
Рисунок 5 – Влияние σ_L на интегральный критерий ошибки

Если задаться суммарной погрешностью определения $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ в 10%, то допустимое значение σ_L в экспериментах по определению $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ – 7%.

Ниже приведены полученные экспериментальные результаты (рисунок 6).



а) Экспериментальные зависимости $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ для 10 трихроматов



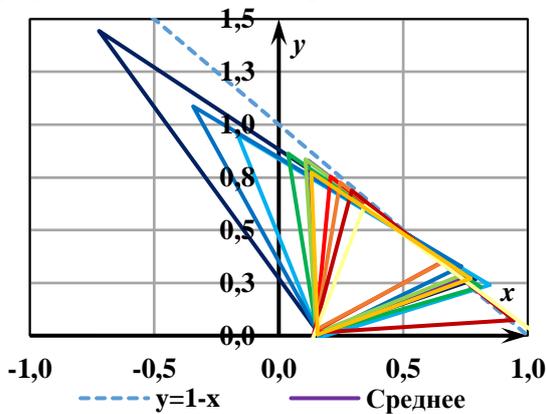
б) СЧР 10 наблюдателей и усредненные значения (черные линии)

Рисунок 6 – Результаты экспериментального исследования трихроматов

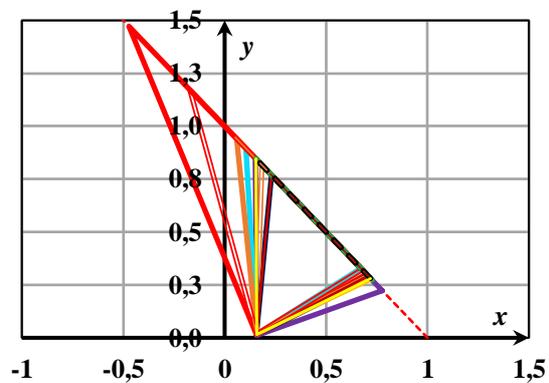
После определения средних спектральных зависимостей $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$, значения которых в относительных единицах приведены на рисунке 6б черным цветом, необходимо установить их корреляцию со стандартом МКО – КС **RGB** и **XYZ** 1931 года.

Алгоритм ПО *CalcC*, которое моделировало искусственных «дихроматов» с использованием СЧР трихроматов, основан на уравнивании цветов дихроматами. Задавая нулевую чувствительность одного из рецепторов, возможно получить соответствующие координаты цветности ОЦ.

Для всех десяти исследованных наблюдателей и для усредненного наблюдателя были рассчитаны эти координаты в системе **XYZ** (рисунок 7а). Поскольку форма кривых исследованных наблюдателей не совпадает со средними кривыми наблюдателей, по которым была построена система **XYZ**, то их треугольники ОЦ пересекают ДЦ **XYZ**.



а) ТОЦ исходные



б) ТОЦ после коррекции СЧР

Рисунок 7 – Треугольники ОЦ для всех наблюдателей

Поэтому были рассчитаны такие кривые, которые наилучшим образом соответствуют КС XYZ . Это было сделано с помощью метода, использующего псевдообратную матрицу и метод «наименьших квадратов», который позволяет найти ближайшее приближение полученных функций к функциям наблюдателей Д. Гилда и В.Д. Райта [1]. Треугольники ОЦ после такой обработки представлены на рисунке 7б.

Полученные на предыдущих этапах работы результаты позволяют разработать КС $(LMS)_{phys}$ с хорошей точностью согласованную с КС RGB и XYZ :

1. Координаты цветности основного цвета L_{phys} в системе XYZ равны $(0.7347; 0.2653; 0.0)^{17}$.
2. У всех исследованных наблюдателей с нормальным цветовым зрением (трихроматов) координата у ОЦ M_{phys} имеет в системе XYZ положительное значение, и это значение лежит, так же, как и координата цвета L_{phys} , на прямой $y=1-x$.

Для построения $(LMS)_{phys}$ необходимо определить координату цветности в КС XYZ основного цвета S_{phys} . Определить координаты цвета S_{phys} экспериментально с достаточной точностью на ЭУ не удалось. Поэтому область его возможных положений определялось по методике Н. Ньюберга в виде области, ограниченной треугольником. При положительном значении координаты у основного цвета M_{phys} – координатный треугольник цветовой системы трихромата должен охватывать диаграмму цветности XYZ не пересекая ее. Значение координаты у основного цвета S_{phys} не может быть меньше нуля, т.е. область ее значений снизу ограничивает алихна (в КС XYZ - ось x). Для исследования влияния положения основного цвета S_{phys} на удельные координаты цвета $(LMS)_{phys}$ в треугольнике, ограничивающем область его возможных координат, было выбрано 6 точек (рисунок 8).

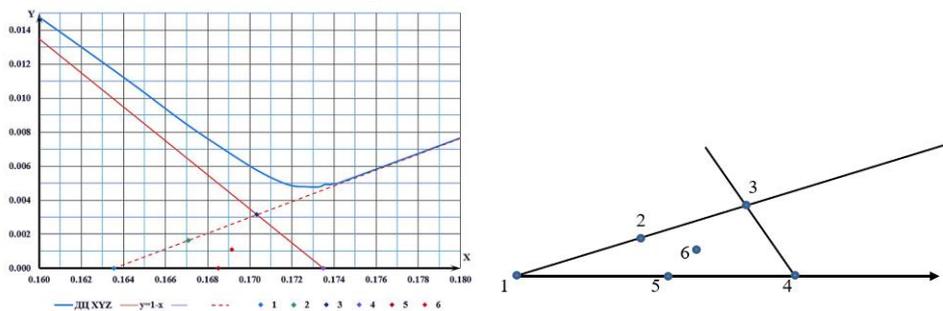


Рисунок 8 – Область допустимого расположения вершины S_{phys} координатного треугольника цветовой системы трихромата

Для каждой из 6 точек были рассчитаны координаты точек пересечения касательных к ДЦ XYZ , проходящих через координату цветности S_{phys} , с прямой $y=1-x$. Минимальную погрешность относительно средних по 6 точкам значений СЧР для $\bar{l}(\lambda)$ дают координаты основного цвета S_{phys} в точке 6.

¹⁷ Боос, Г. В. О координатах цветности основных цветов колориметрической системы КЗС/ Г.В. Боос, А.А. Григорьев // Светотехника. – 2016. – № 3. – С. 30–34.

С помощью ПО *CalcLMS_XYZ* и по полученным значениям координат цветности ОЦ (LMS)_{phys} были получены следующие параметры ФКС (LMS)_{phys} трихромата:

- функции сложения $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$, $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ (рисунок 9), треугольник ОЦ (рисунок 10) и диаграмма цветности $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$ (рисунок 11);
- матрицы перехода из (LMS)_{phys} в стандартные колориметрические системы *XYZ*, *RGB* 1931 г. и наоборот, а также координаты ее основных цветов в этих системах.

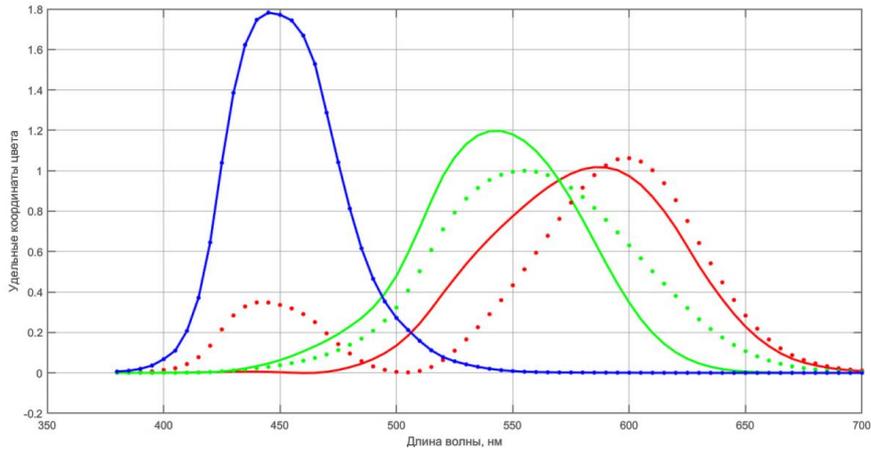


Рисунок 9 – Функции сложения (LMS)_{phys}

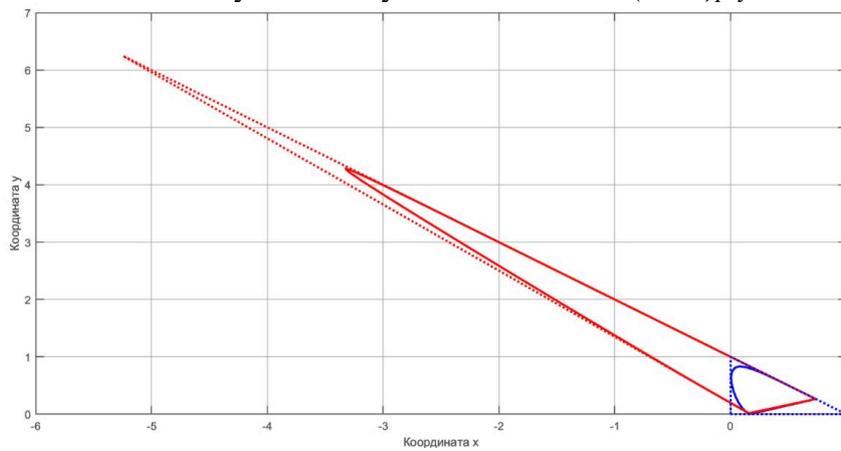


Рисунок 10 – Треугольник ОЦ (LMS)_{phys} в *XYZ*

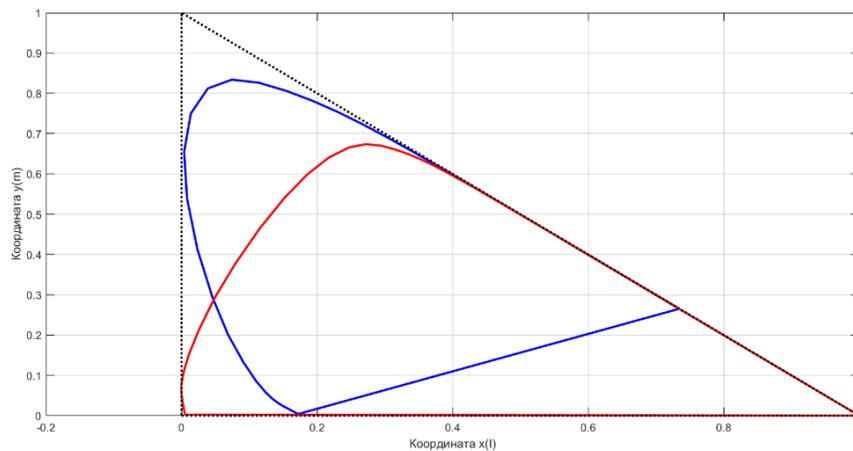


Рисунок 11 – Диаграмма цветности и locus (LMS)_{phys} и *XYZ*

Матрица для перехода из системы XYZ в $(LMS)_{phys}$:

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \\ \bar{m}_{phys}(\lambda) \\ \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.61165 & -0.50774 & 0 \\ 0.51372 & 1.40610 & 0 \\ -0.12537 & 0.10164 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Обратная матрица для перехода из системы XYZ в $(LMS)_{phys}$ имеет вид:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \\ \bar{m}_{phys}(\lambda) \\ \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1.25447 & 0.45299 & 0 \\ -0.45832 & 0.54569 & 0 \\ 0.20385 & 0.00132 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Аналогичным образом получены выражения для КС RGB :

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \\ \bar{m}_{phys}(\lambda) \\ \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 2.19529 & 0 & 0 \\ 3.43363 & 5.57074 & 0.05649 \\ 0.02108 & 0.07926 & 5.59351 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{l}_{phys}(\lambda) \\ \bar{m}_{phys}(\lambda) \\ \bar{s}_{phys}(\lambda) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.45552 & -0.50774 & 0 \\ -0.28079 & 0.17954 & -0.00181 \\ 0.00226 & -0.00254 & 0.17880 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Полученная физиологическая система $(LMS)_{phys}$ достаточно хорошо коррелирует с ранее предлагаемыми (без достаточного обоснования) ФКС, в которых выбраны положительные значения координаты y_m для основного цвета M . Более существенно отличие полученных результатов $(LMS)_{phys}$ от КС LMS . Максимум $\bar{l}(\lambda)$ приходится на длину волны 565 нм, в то время как в $\bar{l}_{phys}(\lambda)$ он расположен на длине волны 585 нм, т.е. смещен на 20 нм в красную область спектра [1]. Следует отметить, что для исследованных в работе трихроматов значение усредненного значения максимума $\bar{l}(\lambda)$ лежит в районе 600 нм. Для источников света, основная доля излучения которых приходится на красную область спектра, такой сдвиг приведет к существенной разнице рассчитанных в разных КС параметров.

Для расчета яркостных коэффициентов $(LMS)_{phys}$ была создана программа на основе функции *Matlab pinv(A)*, минимизирующая при полученных ранее относительных значениях $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$, $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ методом «наименьших квадратов» функцию $\{\beta_l \cdot \bar{l}_{phys}(\lambda) + \beta_m \cdot \bar{m}_{phys}(\lambda) + \beta_s \cdot \bar{s}_{phys}(\lambda) - V(\lambda)\}$ во всем видимом диапазоне спектра.

Результаты расчетов яркостных коэффициентов β системы $(LMS)_{phys}$ приведены в таблице 1, расчет проводился для диапазона длин волн от 380 до 700 нм.

Таблица 1

β_l	β_m	β_s	Σ
0.452988	0.545691	0.00132085	1

Отличие полученной относительной спектральной световой эффективности $V(\lambda)$ от стандартного фотометрического наблюдателя МКО не превышает седьмого знака после запятой.

Если поделить выражение (1) на пороговый перепад яркости по Х. Блэкуэллу, то выражение будет описывать отклонение в числах порогов [7].

В разработанном ПО *MainXYZ* моделировалось наблюдение объекта и фона различной цветности и одинаковой яркости. Нужная цветность и яркость излучения были получены комбинацией энергетических яркостей трех монохроматических источников. Расчеты проводились для разных «троек» источников. Пороговые зависимости для координат цвета рассчитывались в системе наблюдателя $(LMS)_{phys}$, а затем полученные координаты цвета с помощью матрицы перехода переводились в систему XYZ , после чего рассчитывались пороговые координаты цветности в этой КС.

На рисунке 12 представлены увеличенные в 10 раз пороговые кривые, полученные при разных монохроматических длинах волн.

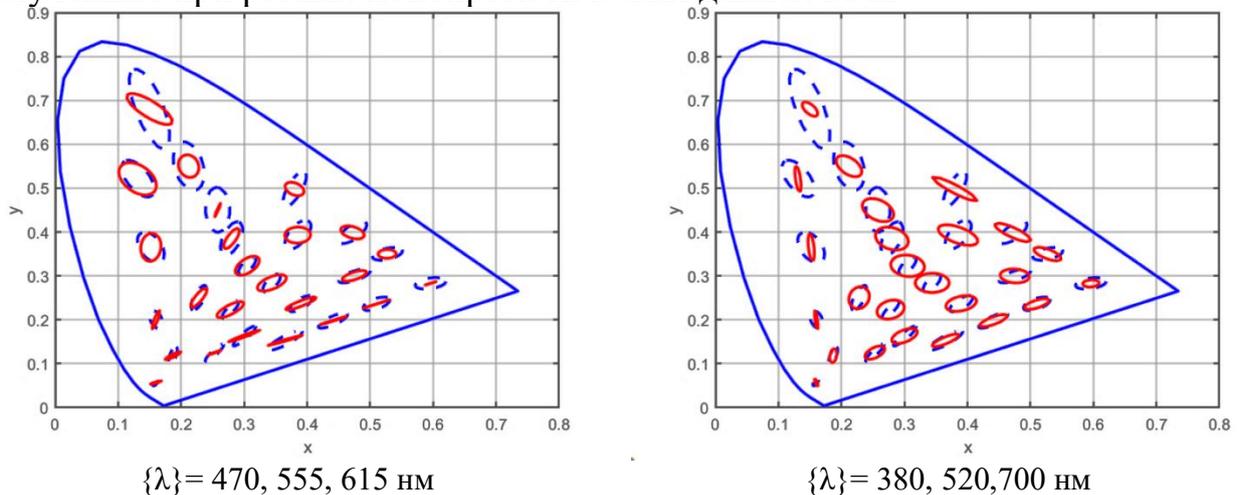


Рисунок 12 – Влияние спектрального состава излучений на цветовые пороги

Для исследования влияния немонохроматических спектров на пороги по цветности (рисунок 13) было создано ПО *MainStartCP*, позволяющее рассчитывать эти пороги для источников различного спектрального состава.

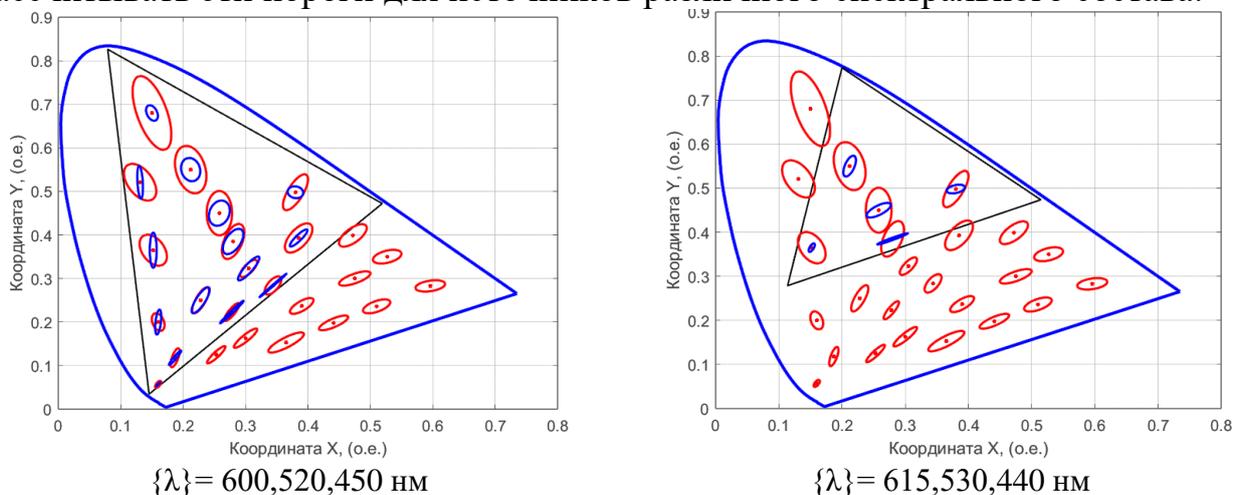


Рисунок 13 – Влияние различного спектрального состава излучений на цветовые пороги

Как и в ЭУ МакАдама, ПО моделирует пропускание спектра исходного источника через полосовой фильтр с П-образной функцией пропускания. Причиной отличия пороговых зависимостей на ДЦ от равновеликих окружностей является разный характер зависимостей координат цветности (дробно-линейная зависимость) и порогов по цветности (сумма квадратов отношений) от координат цвета. В процессе исследования подтвердилась независимость порогов от яркости фона, а также влияние спектрального пропускания фильтров на форму и ориентацию пороговых эллипсов в цветовых пространствах $(LMS)_{phys}$ и XYZ .

В третьей главе вывели выражения для физиологического РЦП. Для эвклидовой декартовой системы координат M_Λ :

$$M_l^2 + M_m^2 = (\sqrt{n})^2, \text{ где} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} M_l &= \sqrt{\frac{m_l}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s}\right)}} \\ M_m &= \sqrt{\frac{m_m}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s}\right)}} \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

m_l, m_m, m_s – математическое ожидание натурального логарифма частных отношений правдоподобия ($\Lambda_l, \Lambda_m, \Lambda_s$) в пороговых условиях, а $\ln \Lambda_{th}$ – натуральный логарифм порогового отношения правдоподобия.

Мерой цветового отличия (выраженной числом цветовых порогов) эталонного и исследуемого излучений в предлагаемом РЦП является квадрат расстояния от начала координат (точка яркости и цветности эталона) до точки с координатами M_l, M_m , равное $n = M_l^2 + M_m^2$.

Для проверки равноконтрастности разработанного РЦП были проведены расчеты пороговых отличий цветности в условиях соответствующим экспериментам МакАдама для двух КС - $(LMS)_{phys}$ и M_Λ (рисунок 14) ПО *MainStartCP* было дополнено расчетом M_Λ .

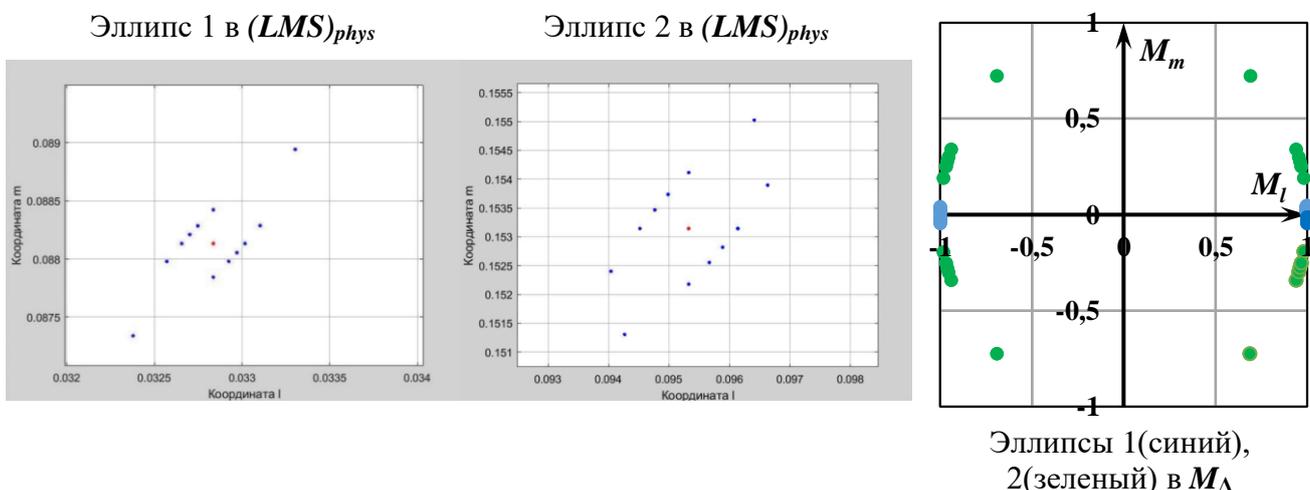


Рисунок 14 – Результаты расчетной проверки равноконтрастности РЦП

Для проверки равноконтрастности M_Λ при изменении спектров ОЦ, создающих одну и ту же цветность эталонного объекта (координат центров эллипсов) были проведены расчеты для монохроматических и не монохроматических ОЦ при вариации положений центров эллипсов на диаграмме цветности (рисунок 15).

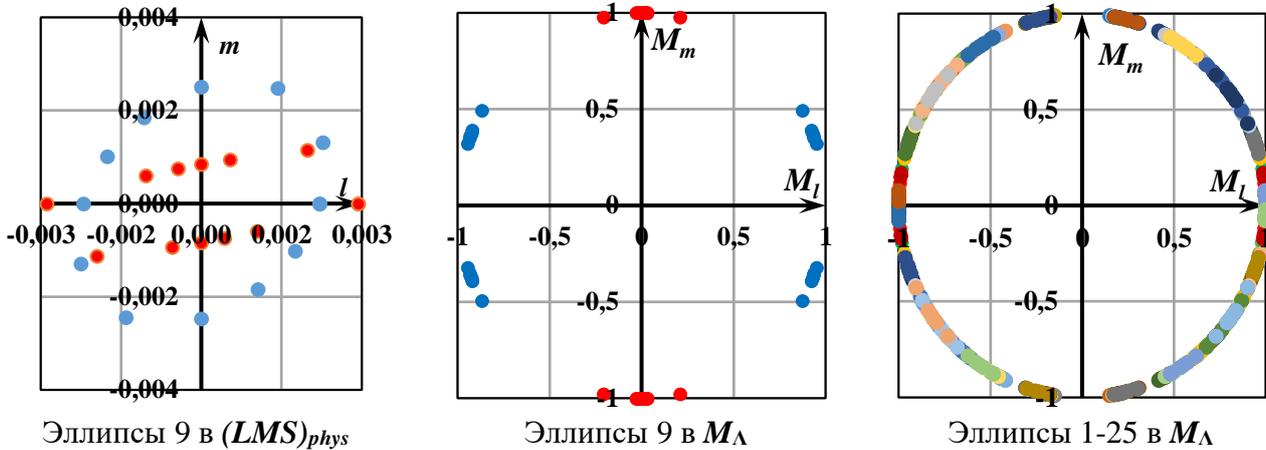


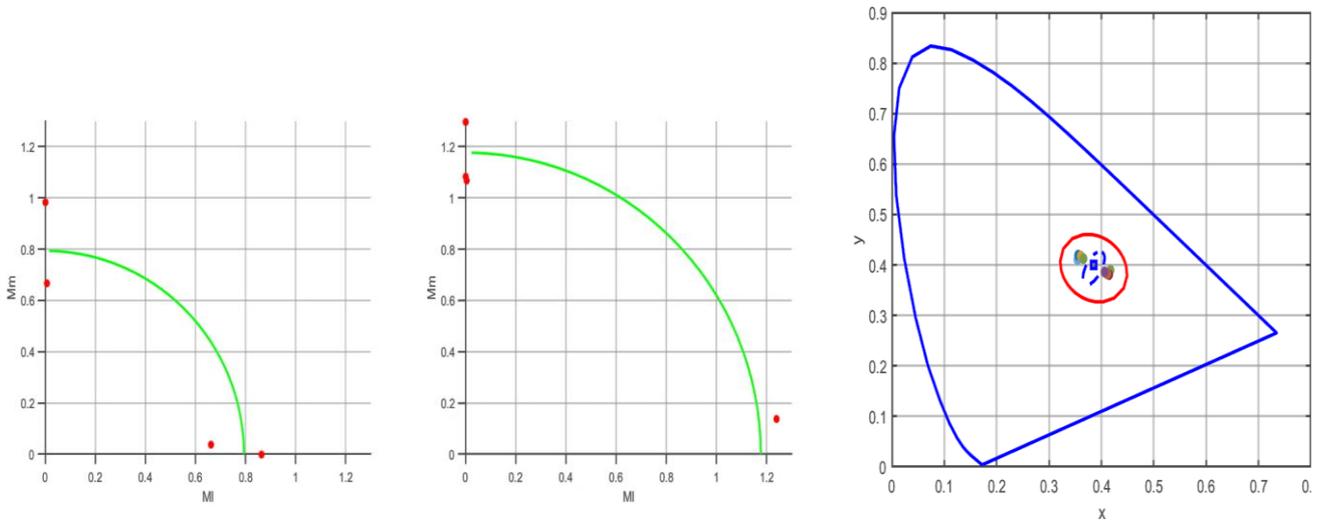
Рисунок 15 – Пороговые эллипсы для монохроматических (синие маркеры) и немонохроматических (красные маркеры) ОЦ в системах $(LMS)_{phys}$ и M_Λ

Полученные результаты показывают, что все точки пороговых эллипсов преобразуются в точки на одной окружности единичного радиуса независимо от расположения их центров на диаграмме цветности и независимо от спектров излучений, создающих цветности эталона и объекта. Разным цветностям излучений и разным спектрам источников света соответствует различное расположение пороговых точек эллипсов на этой единичной окружности. Соотношение между M_l и M_m в разных точках РЦП меняется, но величина порога (для пороговых условий $n=1$) остается постоянной.

Было проведено экспериментальное исследование, целью которого являлось сопоставление его результатов (рисунок 16) с проводимыми ранее расчетными исследованиями. На ЭУ в каналы для изменения спектрального состава фонового излучения устанавливались интерференционные фильтры $\lambda = 470, 555, 615$ нм. Уровни энергетических фоновых яркостей в каналах устанавливались так, чтобы координаты цветности суммарного излучения фона совпадали с координатами цветности центров эллипсов МакАдама в КС XYZ , а итоговая яркость L_v обеспечивала работу в области Вебера-Фехнера. В качестве метода определения цветовых порогов использовался метод минимальных изменений на появление объекта, длины волн монохроматического излучения которого изменялись от 435 нм до 660 нм. Радиусы окружностей при обработке результатов проводились, исходя из минимизации СКО, полученному для среднего значения чувствительности исследуемых наблюдателей в области Вебера - Фехнера.

Экспериментальные точки ожидаемо находятся ближе к центру эллипса, поскольку при проведении эксперимента в условиях неравенства яркости объекта и фона вклад изменения цветности при пороговом обнаружении будет меньше, чем при моделировании эксперимента с яркостью объекта равной

яркости фона. Следует отметить, что ориентация в пространстве расчетных и экспериментальных эллипсов совпадает.



а) Экспериментальные пороговые точки для 14 (слева) и для 17 (справа) эллипсов Макадама в координатах M_l и M_m

б) Синяя линия – 14 эллипс Макадам, красная линия - расчетные цветовые пороги наблюдателя, обозначение маркером – экспериментальные цветовые пороги наблюдателя

Рисунок 16 – Результаты проверочного эксперимента

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе ММПЦЗ разработана методика определения СЧР трихромата в условиях нормальной цветовой адаптации, для реализации которой создана экспериментальная установка и сопутствующее ПО для обработки результатов. Показано, что погрешность определения СРЧ по разработанной методике не превышает 10%.

При разработке ФКС $(LMS)_{phys}$, согласованной с XYZ использованы новые, полученные в работе СЧР трихроматов. Сравнение рекомендованной МКО КС LMS с $(LMS)_{phys}$ выявило сдвиг максимума спектральной чувствительности L колбочек в $(LMS)_{phys}$ на 20 нм в красную область спектра. Экспериментальное исследование СЧР десяти трихроматов показало, что усредненный максимум чувствительности их колбочек находится около 600 нм, т.е. сдвинут на 35 нм в красную область спектра.

Моделирование цветовых порогов показало, что эти пороги в системе $(LMS)_{phys}$ и в системе XYZ зависят от цветности излучения и направления изменения цветности в цветовом пространстве (т.е. эти системы даже в пороговых условиях не равноконтрастны).

Существенным преимуществом предлагаемого РЦП M_Λ является то, что вывод выражений для его координат основан на ММПЦЗ, а не получен традиционным методом путем подбора коэффициентов в нелинейных преобразованиях стандартных КС. После введения координат M_l и M_m - цветовое пространство становится равноконтрастным и не зависит от цветности и спектрального состава излучений, которые в нем отображаются.

В дальнейшем разработка темы может идти по направлению как расчетной, так и экспериментальной работы на установке: продолжение исследований СЧР трихроматов разных возрастов и пола; экспериментальное определение разброса $V(\lambda)$ наблюдателей; экспериментальные исследования цветовых порогов при вариации условий наблюдения; расчетные исследования с использованием новой ФКС $(LMS)_{phys}$; расчетные исследования с использованием новой РЦП M_{λ} . Планируется продолжать развитие ММПЦЗ в области опознавания объектов и исследовать возможности ее применения к надпороговым условиям наблюдения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Боос, Г.В. Исследование монохроматических порогов цветового зрения и определение удельных координат цвета трихромата / Г.В. Боос, А.А. Григорьев, В.А. Рыбина // Светотехника. – 2022. – № 2. – С. 28–38.
2. [Scopus] Boos, G. V. Research into Monochromatic Colour Vision Thresholds and Determination of the Trichromatic Colour-Matching Coefficients / G.V. Boos, A.A. Grigoryev, V.A. Rybina // Light & Engineering Journal. – 2022. – Vol. 30. – # 2. – pp. 89–19. DOI: [10.33383/2021-106](https://doi.org/10.33383/2021-106).
3. Боос, Г.В. Установка для экспериментальных исследований монохроматических порогов зрительной системы человека. / Г.В. Боос, А.А. Григорьев, В.А. Рыбина // Светотехника. – 2021. – № 4. – С. 5–11.
4. [Scopus] Boos, G. V. The Experimental Research Installation for the Determination of Monochromatic Thresholds of Human Visual System Vision / G.V. Boos, A.A. Grigoryev, V.A. Rybina // Light & Engineering Journal. – 2021. – Vol. 29. – # 6. – pp. 34–42. DOI: [10.33383/2020-059](https://doi.org/10.33383/2020-059).
5. Григорьев, А.А. Определение цветовых порогов на основе статистического подхода / А.А. Григорьев, В.А. Рыбина // Светотехника. – 2023. – № 1. – С. 65–67.
6. [Scopus] Grigoryev, A.A. Colour Thresholds Definition Based on the Statistical Approach / A.A. Grigoryev, V.A. Rybina // Light & Engineering Journal. – 2022. – Vol. 30. – # 4. – pp. 14–17. DOI: [10.33383/2022-041](https://doi.org/10.33383/2022-041).
7. Боос, Г.В. Поправка на "случайный успех" при проведении экспериментов по методу постоянных стимулов / Г.В. Боос, А.А. Григорьев, В.А. Рыбина // Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ. – М.: Издательство: Национальный исследовательский университет "МЭИ". – 2019. – № 6. – С. 71-76.