

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

на правах рукописи



Рыбина Виктория Андреевна

**Равноконтрастное цветовое пространство на основе математической
модели порогового цветового зрения**

Специальность 2.4.11 – Светотехника

Диссертация на соискание ученой степени

Кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор Григорьев А.А.

Москва-2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ	10
1.1. Исследования порогов цветоразличения	10
1.2. Исследования надпороговых цветовых различий	19
1.3. Модель цветового восприятия.....	25
1.4. Физиологические колориметрические пространства	33
1.5. Пример физиологического равноконтрастного цветового пространства.....	39
1.6. Математическая модель порогового цветового зрения.....	42
2. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	51
2.1. Методика определения спектральных чувствительностей LMS	51
2.2. Исследование влияния погрешности задания исходных данных на результаты расчета LMS	59
2.3. Результаты экспериментального исследования энергетических перепадов яркости объект-фон	69
2.4. Разработка физиологической колориметрической системы $(LMS)_N$	72
2.5. Разработка физиологической колориметрической системы $(LMS)_{phys}$	73
2.6. Моделирование порогов цветоразличения	84
3. РАЗРАБОТКА РАВНОКОНТРАСТНОГО ПРОСТРАНСТВА	96
3.1. Вывод расчетных выражений	97
3.2. Проверка равноконтрастности цветового пространства M_Λ в разных точках диаграммы цветности	98
3.3. Проверка равноконтрастности цветового пространства M_Λ при изменении спектров излучений, создающих цветности эталона и объекта	101
3.4. Проверочный эксперимент.....	106
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	110
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	111
СОКРАЩЕНИЯ.....	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	119
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	128
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	131
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	132
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	133
ПРИЛОЖЕНИЕ 7	134
ПРИЛОЖЕНИЕ 8	135

ВВЕДЕНИЕ

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 показывает [1], что наиболее точными являются данные Д.Л. МакАдама [2] 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 идеального РЦП. 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 [3,4].
2. Разработать методику определения спектральных чувствительностей рецепторов (СЧР) для людей с нормальным цветовым зрением в условиях естественной адаптации ЗС [3,4].
3. Создать экспериментальную установку (ЭУ), реализующую разработанную методику, и провести серию экспериментальных исследований монохроматических порогов ЗС [5,6].
4. Определить параметры физиологической колориметрической системы (ФКС) трихроматов [5,6].

5. Провести математическое моделирование порогов цветоразличения [7,8].
6. Разработать равноконтрастный метод оценки меры отличий двух цветов [7,8].

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 [3,4].
2. Доказана некорректность привлечения в качестве наблюдателей дихроматов вместо трихроматов и использования экспериментальных результатов дихроматов для построения ФКС трихромата [3,4].
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 [5,6].
4. Получены параметры новой ФКС, которая полностью согласована со стандартными КС *XYZ* и *RGB* [3,4].
5. На основе ММПЦЗ создано физиологическое РЦП [7,8].

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 цветových 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.

Структура и объем работы.

Диссертация изложена на 136 страницах, имеет 76 иллюстраций и 12 таблиц, включает титульный лист, оглавление, введение, 3 основные главы результатов работы, выводы и заключение, список литературы (69 позиций) и 8 приложений.

Благодарности

Я выражаю свою благодарность моему научному руководителю – Григорьеву Андрею Андреевичу, чья научная мысль, глубочайшее знание своего научного направления, опыт исследовательской работы, личный пример и поддержка помогли мне преодолевать сомнения и вдохновляли к работе. Ваше пронизательное руководство и наставничество способствовали моему развитию, как преподавателя-исследователя, так и как личности. В процессе нашей с Вами работы был сформирован фундамент, с которым я смогу продолжить научный путь и академические исследования. Эта диссертация является свидетельством не только моих собственных усилий, но прежде всего – примером Вашего исключительного научного руководства.

Я выражаю признательность моему неизменному оппоненту – Будаку Владимиру Павловичу, чьи дельные советы, комментарии и конструктивная критика значительно улучшили качество этой диссертации и углубили мое понимание темы.

Спасибо моей альма-матер и всем, кто связан с кафедрой Светотехники НИУ МЭИ, за бесценные знания и опыт, которые я получила в ее стенах.

Сбалансировать профессиональные обязанности с научной деятельностью - непростая задача для аспиранта, и это стало возможным только благодаря пониманию и поддержке моего руководства во ВНИСИ. Хочу отдельно поблагодарить Бооса Валентина Гербертовича и Крылова Андрея Юрьевича за непосредственную помощь в создании экспериментальной установки.

Я благодарна моей подруге – Барцевой Александре Алексеевне, которая оказывала всестороннюю поддержку: давала мне возможность отвлечься, поддерживала мой позитивный настрой и могла выслушать меня всякий раз, когда

трудности академической нагрузки оказывалась тяжелой. Моменты нашего общения были так же важны, как и любой научный, практический совет.

Я выражаю искреннюю благодарность моему другу – Табырце Георгию Константиновичу, который не жалел своего свободного времени для помощи мне в экспериментальных исследованиях. Большая редкость – найти друга, который не только поддерживает начинания, но и охотно участвует в них.

Всем, кто внес свой вклад, как большой, так и малый, автор приносит свою благодарность!

1 АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

1.1. Исследования порогов цветоразличения

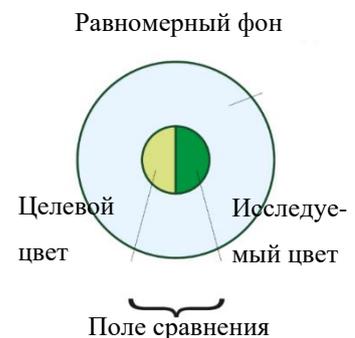
Первые исследования ЗС не носили характера исследования ее пороговых характеристик, а относились к попыткам количественно оценить восприятие цвета, ища «заметную разницу». Такой метод было легко реализовать, для него не требовалось специального оборудования, но он давал неустойчивые результаты по всем оцениваемым цветам. Пороговый метод, основанный на уравнивании цветов в разных точках диаграммы цветности (ДЦ), дает более точные результаты, но требует больших временных затрат.

Д.Л. МакАдам построил оригинальную ЭУ для проверки способности наблюдателя сопоставлять исследуемый цвет с фиксированным целевым цветом, регулируя отклонение цветности в разных направлениях ЦП при постоянной яркости полей сравнения [2].

Ученый выбрал 25 целевых точек, широко распределенных на ДЦ XYZ. Каждый целевой цвет и цвет поля сравнения можно было воспроизвести с помощью нескольких пар (от 5 до 11) фильтров.

На рисунке 1.1 представлена ЭУ, которая была разработана таким образом, чтобы обеспечить следующие параметры:

- Поле сравнения в виде диска диаметром в два градуса, разделенное на два полудиска;
- Равномерное фоновое поле в двадцать один градус с возможностью обеспечить заданные условия адаптации;
- Наблюдатель регулирует только один элемент управления для получения произвольной цветности излучения;



- Автоматически поддерживается постоянная яркость или яркость может быть изменена пропорционально, или можно изменять только яркость любого выбранного поля.
- Все визуальные стимулы создаются аддитивными смесями отфильтрованного излучения от калиброванного ИС;

Основными элементами ЭУ являлись: калиброванный ИС с цветными фильтрами (7 и 8, рисунок 1.1), набор призм и линз (в центре, рисунок 1.1.) и окуляр (слева, рисунок 1.1.).

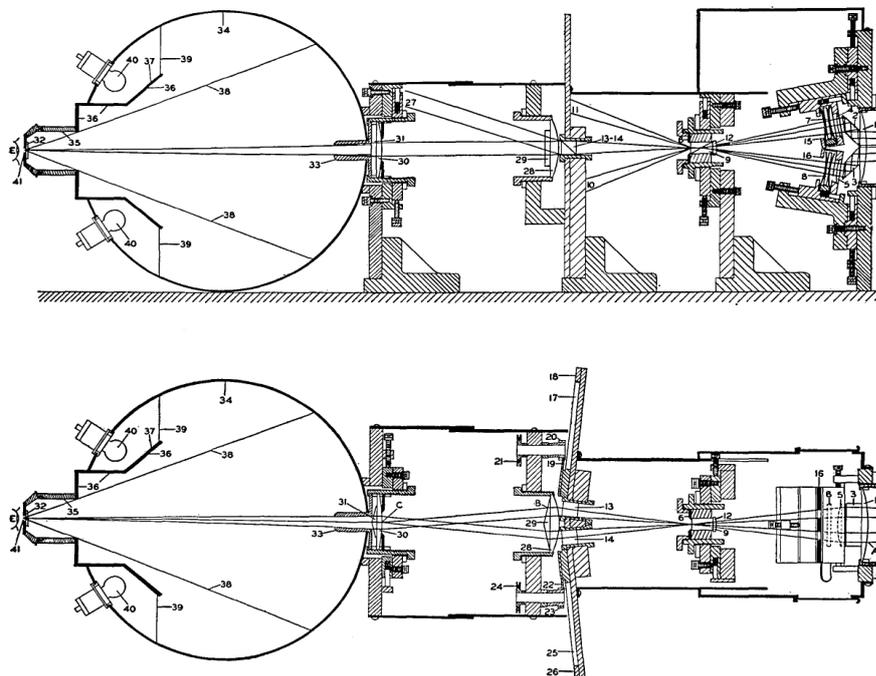


Рисунок 1.1 – Схемы ЭУ Д.Л. МакАдама: сверху вертикальное поперечное сечение ЭУ, а снизу горизонтальное поперечное сечение ЭУ

Во время проведения эксперимента наблюдатель через окуляр с искусственным зрачком видел тестовое поле на равномерном фоне. Тестовое поле состояло из двух частей: с одной стороны находился целевой цвет, а с другой – исследуемый. Исследуемый цвет создавался излучением, прошедшем несколько фильтров, которые наблюдатель мог регулировать, вращая лимб поляризационных фильтров. Лимб был соединен с призмой, и по мере вращения призмы, изменялась пропорция излучения от фильтров 7 и 8. Задача наблюдателей (в основном это был ассистент П.Г. Наттинг) состояла в выравнивании цвета двух полей. Когда П.Г. Наттинг добился того, что он считал совпадением, отмечалось положение шкалы

на лимбе (и, следовательно, призм). Измерения повторялись 50 раз для каждой из 5–11 пар фильтров, которые были способны обеспечить цветное совпадение с целевым цветом.

Как можно заметить опубликованные данные Д.Л. МакАдама были получены в основном с одним наблюдателем и при одной яркости адаптации 48 кд/м². Далее приводится ряд исследований, в которых сопоставлялись пороговые эллипсы, полученные разными наблюдателями, и проверялась достоверность самих *эллипсов МакАдама*.

В статье [9] автор предложил три “*золотые правила*” построения моделей в области колориметрии:

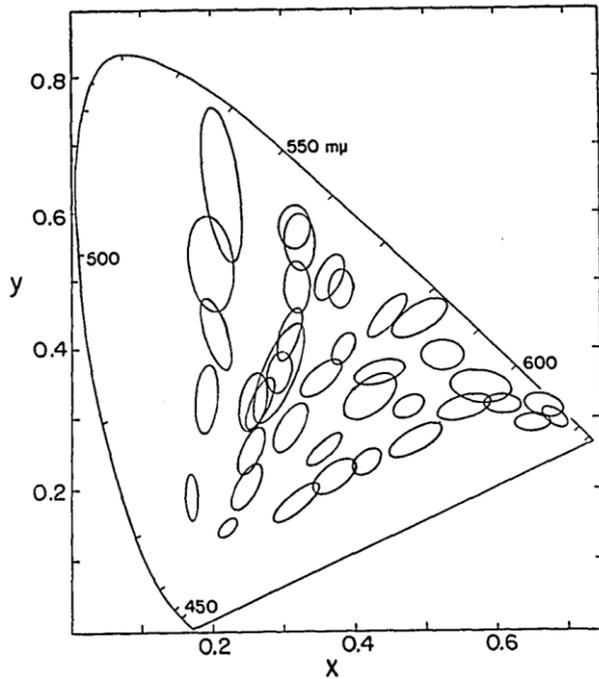
- учитывать неопределенность моделируемых данных;
- максимально упростить модель;
- сделать модель физиологически обоснованной, насколько это практически возможно.

На примере *эллипсов МакАдама* и последующих работ У.Р.Д. Брауна, А.Р. Робертсон напомнил, что всегда существует оговорка, что другие наблюдатели (или даже один и тот же наблюдатель, повторяющий наблюдения) могут дать несколько иные результаты.

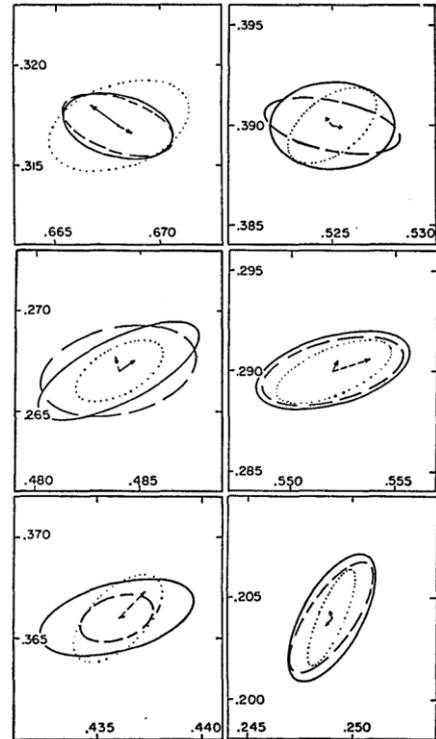
В работе [10] У.Р.Д. Браун провел эксперименты по сопоставлению цветов с помощью колориметра, собранного по стандартной схеме для предъявления двухградусного согласующего поля на темном фоне. Основным наблюдателем был он сам (*WRJB*), а проверяющим наблюдателем – Д.Л. МакАдам (*DLM*). На рисунке 1.2 слева приведены 36 пороговых эллипсов Брауна, а справа – сравнение результатов МакАдама и Брауна для целевых цветов с 14 по 19.

В следующей работе [11] колориметр был усовершенствован так, чтобы обеспечивать более широкое поле сравнения (в 10 градусов) и задавать уровень яркости равномерного фона, а целью исследования стало увеличение статистики по наблюдателям. Группа из двенадцати наблюдателей, выбранная для сопоставления цветов, была весьма неоднородной во всех аспектах, кроме

возраста: все наблюдатели были молодыми, до 30 лет. Наблюдателю разрешалось потратить столько времени, сколько он хотел, чтобы добиться совпадения цветов.



Пороговые эллипсы при постоянной яркости для *WRJB*, увеличенные в десять раз на ДЦ



Пороговые эллипсы с 14 по 19 точки целевого цвета для наблюдателей: *WRJB* (сплошная линия), *DLM* (пунктирная линия) и *PGN* (точки - П.Г. Наттинг)

Рисунок 1.2 – Результаты экспериментов У.Р.Д. Брауна

Рисунок 1.3 показывает эллипсы для каждого наблюдателя (слева – первое сопоставление цветов, а справа – семнадцатое). Пунктирный эллипс показывает средневзвешенное значение.

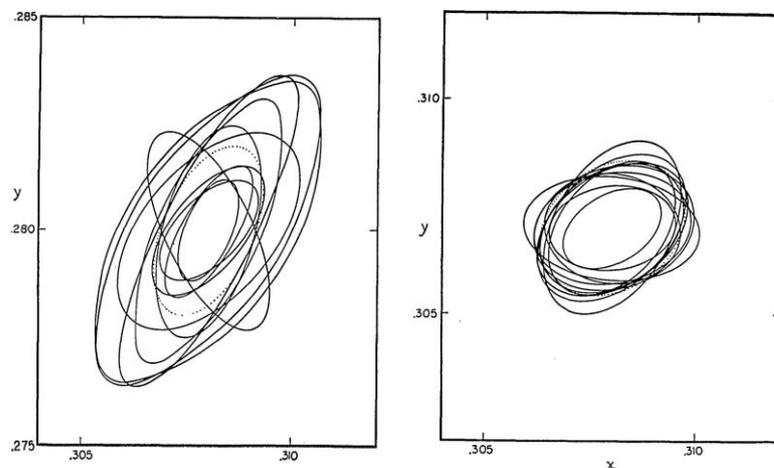


Рисунок 1.3 – Пороговые эллипсы двенадцати наблюдателей

Геометрически эллипсы определяются следующими параметрами: половина размера эллипса по оси (a); половина размера эллипса по оси (b); соотношение (a/b); и угол (θ) большой оси эллипса от горизонтальной оси. Эти параметры важны для описания формы, размера и ориентации эллипсов в ЦП и на ДЦ [12]. В таком случае выражение для цветового различия (ЦР) можно записать в форме:

$$\Delta E_i^2 = \Delta a_i^2 + 2 \cdot \Delta a_i \cdot \Delta b_i + \Delta b_i^2 \quad (1.1)$$

В дополнение к неопределенности между наблюдателями существует также неотъемлемая неопределенность в результатах одного наблюдателя из-за случайного характера совпадений. Г. Вышецки и Г.Х. Филдер [13] вывели формулы для стандартных отклонений параметров эллипса и обнаружили, что для основанных на 30 наблюдениях эллипсов стандартные неопределенности длины осей эллипса составили 13%.

Из последних исследований стоит рассмотреть проведенные в Лидском (*Leeds*) и Чжэцзянском (*ZJU*) университетах эксперименты по оценке ЦР, полностью согласованные между собой по методам исследования [12,14]. В обосновании актуальности работы авторы, помимо уже названных недостатков эллипсов *Макадама*, отметили:

- анализ данных был основан на стандартных отклонениях оценок сопоставления цветов;
- условия просмотра не соответствуют нормальному бинокулярному зрению;
- процесс выравнивания полей по цветности не был основан на ОЦ стандартной КС.

Цель экспериментов состояла в оценке различия внутри цветовых пар по разнице цветности. Для отображения стимулов на дисплее (рисунок 1.4) использовалось специально разработанное программное обеспечение (ПО).

Цветовые пары оценивались группой из 20 наблюдателей как на черном (для имитации ночного зрения), так и на нейтрально-сером фоне (который

соответствовал равномерному фону в эксперименте МакАдама, т.е. цветность стандартного источника С и яркость 24 кд/м²). Авторы использовали два разных уровня яркости для объектов: 48 кд/м²(яркость поля сравнения у МакАдама) и 18.5 кд/м²(уменьшенное значение для получения результатов, применимых для отображения на дисплеях). Экспериментальными цветовыми центрами были 18 центров из набора данных *MacAdam* и 8 нейтральных белых центров из стандарта *ANSI C78.377* [12,14].

В ходе экспериментов предъявлялись две пары стимулов. Эталонная и тестируемая пары были представлены в два ряда, но их расположение внутри этих рядов менялось случайным образом. Эталонная пара состояла из двух постоянных стимулов зеленого цвета, расположенных вблизи одного из центров МакАдама, т.е. фиксировалась как цветность, так и разница яркости ($\Delta L=6$ единиц).

Наблюдателей просили оценить цветовое различие каждой тестируемой пары цветности по сравнению со стандартной эталонной парой, которая была описана как имеющая цветовую разницу в *одну зрительную единицу*. Используя метод масштабирования отношений, наблюдатели оценивали, имела ли тестовая пара большую или меньшую разницу в цвете, чем эталонная пара, и присваивали отношение больше или меньше единицы соответственно (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Расположение эталонных и тестируемых пар на черном и сером фоне

Обработка результатов экспериментов проводилась с помощью показателя *STRESS*, который более подробно рассматривается в следующей главе. Среди промежуточных выводов авторы отметили:

- вариабельность самого наблюдателя составляет около половины вариабельности между наблюдателями;
- наблюдатели *ZJU* показали более стабильные результаты, чем наблюдатели из Лидса;
- наблюдатели работали более стабильно на черном фоне, чем на сером.

В этом исследовании цветовые различия были отображены в четырех ЦП: *CIELAB*, *CAM02-UCS*, ДЦ $u'v'$ и $xу$.

Коэффициенты эллипсов Δa_i , Δb_i , приведенные в выражении (1.1), оптимизировались до тех пор, пока не было получено минимальное расхождение значений *STRESS* между расчетной и воспринимаемой цветовой разницей. Уравнение было соответствующим образом адаптировано к значениям тестового показателя ЦР. Средние отношения между a и b приведены в таблице 1.1.

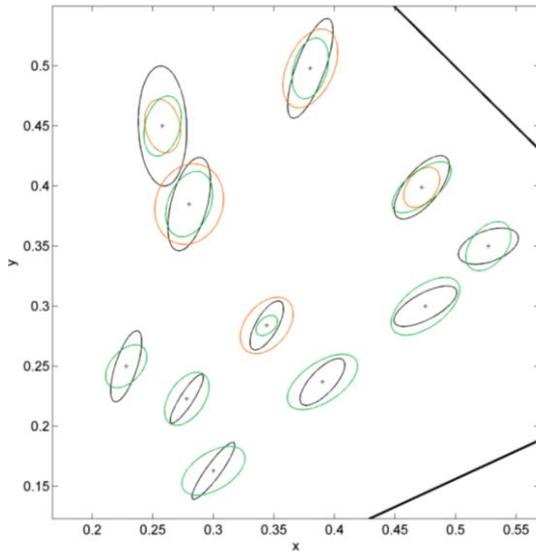
Таблица 1.1.

Среднее соотношение между большой и малой полуосями (a/b)

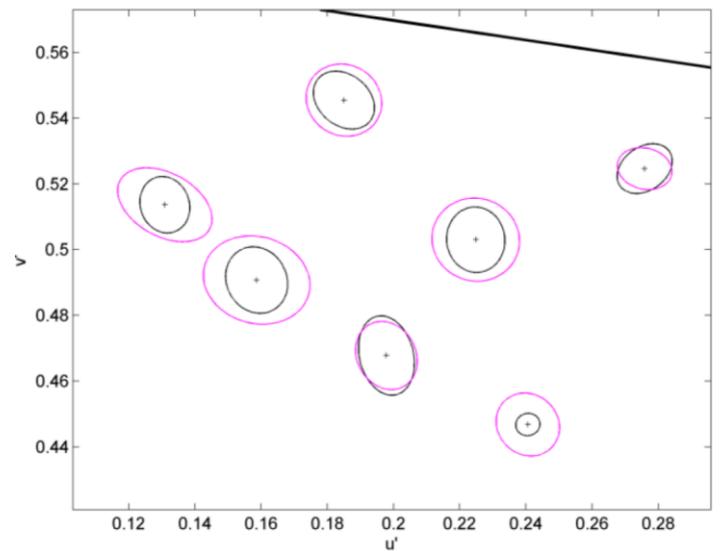
Среднее соотношение	<i>CIELAB</i>	$u'v'$	$xу$	<i>CAM02-UCS</i>
все точки (серый фон)	1.65	1.24	1.72	1.53
все точки (черный фон)	1.58	1.25	1.60	1.53
центры МакАдама (серый фон)	1.68	1.24	1.70	1.57
центры МакАдама (черный фон)	1.65	1.25	1.59	1.58
белые центры (серый фон)	1.58	1.24	1.77	1.47
белые центры (серый фон)	1.43	1.26	1.61	1.42

Для идеального цветового пространства соотношение (a/b) для всех эллипсов должно равняться единице, т.е. быть окружностью. Среднее соотношение для всех областей пространства представляет собой степень *локальной равноконтрастности* тестируемого ЦП. Как видно из таблицы, у ДЦ $u'v'$ значения ближе всего к единице.

Результаты построения экспериментальных эллипсов приведены на рисунке 1.5.



Экспериментальные эллипсы (эллипсы оранжевого цвета – для яркости 48 кд/м²; эллипсы зеленого цвета – для яркости 18,5 кд/м²) и эллипсы МакАдама



Экспериментальные эллипсы на ЦД $u'v'$ (эллипсы розового цвета – для яркости 48 кд/м²; эллипсы черного цвета – для яркости 18,5 кд/м²)

Рисунок 1.5 – Результаты построения экспериментальных эллипсов на ДЦ $u'v'$ и $xу$

По рисунку 1.5 видно, что новые данные, несмотря на попытку приблизить условия экспериментов к экспериментам Д.Л. МакАдама, плохо согласуются с его результатами.

Описанные эксперименты являются примером формирования набора данных ЦР.

Диаграмма цветности МКО (u',v') считается наиболее равноконтрастным цветовым пространством (РЦП), рекомендованным МКО для расчета параметров источников света [15].

На рисунке 1.6 показаны пятиступенчатые эллипсы МакАдама, построенные на диаграмме (u',v'), поверх которых нанесены круги радиусом 0.0055.

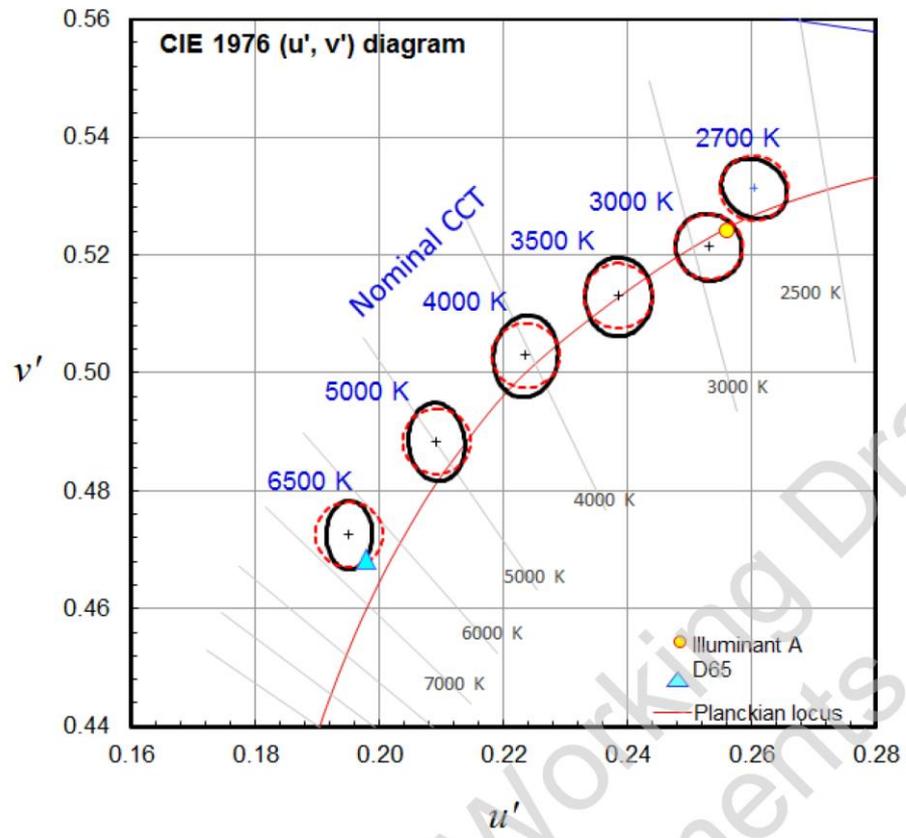


Рисунок 1.6 – Пятиступенчатые эллипсы МакАдама (сплошная черная линия), построенные на диаграмме u', v' , поверх которых нанесены круги радиусом 0.0055 (пунктирная красная линия)

Как показано, эти эллипсы и круги тесно перекрываются, что привело к идее использовать круги для замены эллипсов МакАдама в белой области на ДЦ (u', v').

Пятиступенчатые эллипсы МакАдама примерно эквивалентны кругам радиусом 0.0055 (u', v'). Число шагов n , умноженное на 0.0011, примерно соответствует радиусу круга на диаграмме (u', v').

Для удобства использования и согласованности с эллипсами МакАдама термин n -шаговая окружность $u'v'$ определяется как окружность на диаграмме (u', v') с радиусом n раз большим 0.0011. Для центральной точки (u_0, v_0) окружность $u'v'$ выражается уравнением:

$$(u' - u_0')^2 + (v' - v_0')^2 = (0.0011 \cdot n)^2 \quad (1.2)$$

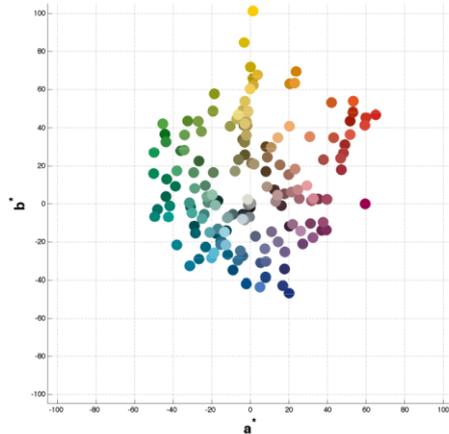
1.2. Исследования надпороговых цветовых различий

Приведенные в прошлой главе эксперименты по различению цветов – одни из множества, которые последовали за *эллипсами МакАдама* и были использованы при разработке и тестировании новых равноконтрастных цветовых пространств (РЦП) и формул ЦР.

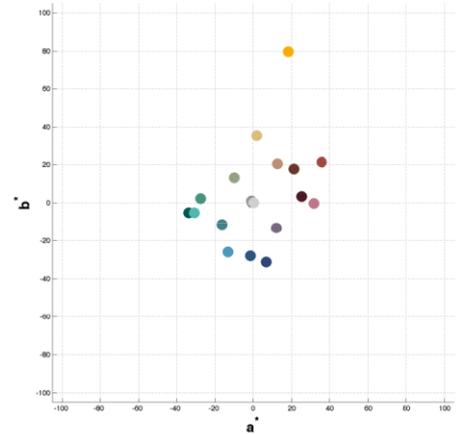
Основной целью любой формулы ЦР является достижение статистически непротиворечивой взаимосвязи между воспринимаемыми (ΔV) и вычисленными (ΔE) ЦР для любых двух цветовых стимулов в ЦП при любых условиях освещения и просмотра.

В процессе сравнения формул ЦР используются последние наборы данных визуальных ЦР *BFD-Perceptibility*, *RIT-DuPont* и *Witt* (рисунок 1.7), основанные на сверхпороговой цветовой разнице. Сверхпороговые данные получаются путем различения визуальной *разницы в цвете между двумя цветами* вместо определения *едва заметных различий в цвете*. Цветовые различия, представленные и сопоставленные наблюдателем, могут быть во много раз больше порогового значения.

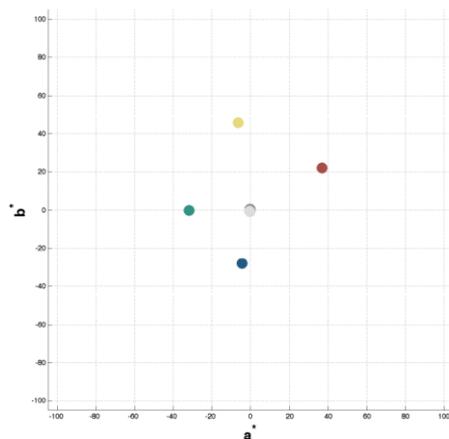
Основное требование к подобным наборам — большое количество цветовых пар, обеспечивающих хорошее и приблизительно равномерное покрытие всего цветового пространства [16]. Как видно по центрам цветов на рисунке 1.7, не всегда визуальные наборы равномерны и согласованы между собой.



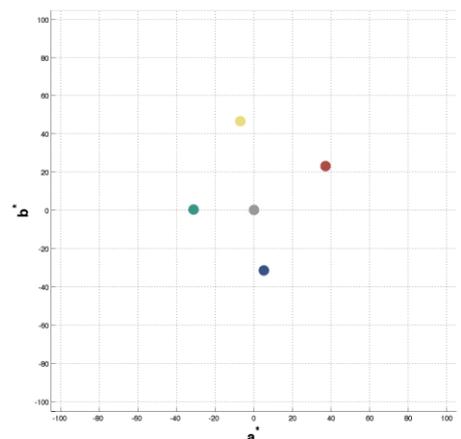
(a) BFD-P dataset



(b) RIT-DuPont dataset



(c) Leeds dataset



(d) Witt dataset

Рисунок 1.7. – Распределение цветных центров в пространстве CIELAB

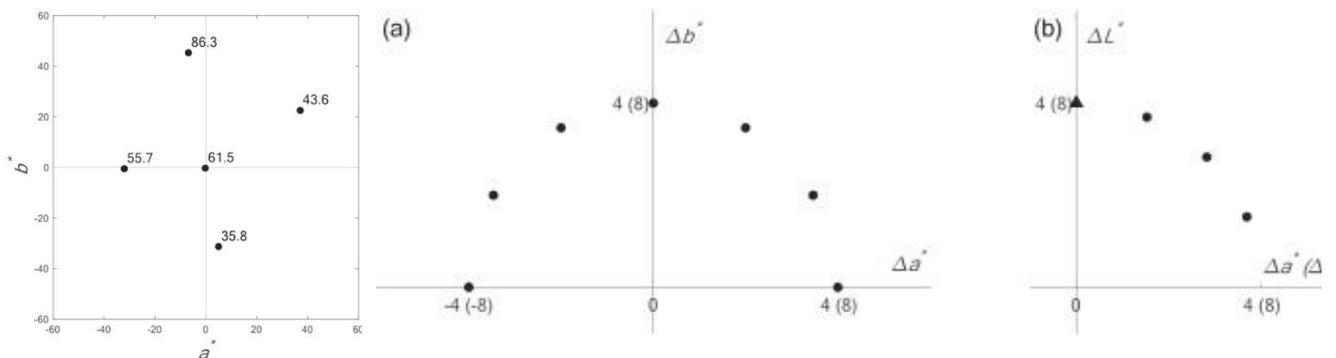
Далее приведено описание эксперимента [17] по наиболее надежному психофизическому методу оценки разницы в цвете – *методу серой шкалы* [18].

На рисунке 1.8 приведен интерфейс для эксперимента по *методу серой шкалы*. Разница в цвете красной тестовой пары оценивается по парам серой шкалы, показанным в верхней части дисплея.



Рисунок 1.8 – Дисплей, показывающий 5-ступенчатую шкалу серого (вверху), пару цветовых различий (в центре) и ползунок, позволяющий наблюдателю записать разницу в цветах (внизу)

На рисунке 1.9 показаны цветовые характеристики *CIELAB* каждого центра цвета при ИС *D65* и 10° *CMF MKO* 1964, их значения L^* , а также распределение пар выборок для каждого центра.



5 цветовых центров МКО. Число обозначает значение L^* каждого центра.

Распределение пар образцов в плоскостях $\Delta a^* \Delta b^*$ (а) и $\Delta L^* \Delta a^*$ (или Δb^*) (б) для величин цветового различия 4 и 8 единиц *CIELAB*

Рисунок 1.9 – Характеристики центров и образцов

Для каждой величины цветоразличия вокруг каждого центра цвета готовили 14 пар образцов, в том числе 1 пару только с разницей в светлоте, 6 пар со смешанной светлотой и хроматическими различиями и 7 пар только с хроматическими различиями. Цвета образцов распределялись равномерно от 0° до 180° в плоскости $\Delta a^* \Delta b^*$ и от 0° до 90° в плоскости $\Delta L^* \Delta a^*$ или плоскости $\Delta L^* \Delta b^*$ соответственно.

Наблюдателей просят найти пару оттенков серого, которая имела такую же разницу в цвете, как и пара образцов, а затем сообщить об оценке в виде значения GS , используя полосу прокрутки в нижней части экрана.

Образцы серой шкалы состоят из 9 образцов *ISO 105-A02* (от $GS-1$ до $GS-5$ с интервалом 0.5). В таблице 1.2 показаны значения Lab и $\Delta E^*_{ab,S}$ по стандарту *ISO CIELAB* для отдельных образцов от $GS-1$ до $GS-5$.

Таблица 1.2

Значения Lab и $\Delta E^*_{ab,S}$ по стандарту *ISO CIELAB* для отдельных образцов

Grey scale number (GS)	L	a	b	Grey scale pairs	$\Delta E^*_{ab,S}$
$GS-1$	40.0	-0.3	0.1	1(1-1)	0.0
$GS-2$	41.5	-0.2	-0.5	2(1-2)	1.5
$GS-3$	43.0	-0.4	0.2	3(1-3)	3.0
$GS-4$	46.0	-0.2	-0.4	4 (1-4)	6.0
$GS-5$	52.0	-0.2	-0.4	5 (1-5)	12.0

Уравнение (1.3) используется для масштабирования визуальных оценок в терминах значений шкалы серого (GS) до значений визуальной цветовой разницы (ΔV) и было получено путем минимизации ΔE^*_{ab} между измеренными цветовыми различиями соседних образцов серого и соответствующими числами шкалы серого (GS).

$$\Delta V = 0.1172\Delta GS^4 - 1.7394GS^3 + 9.6987GS^2 - 26GS + 31.807 \quad (1.3)$$

На рисунке 1.10 показано преобразование между шкалой серого (GS) и визуальной разницей (ΔV), которое определяется уравнением (1.3).

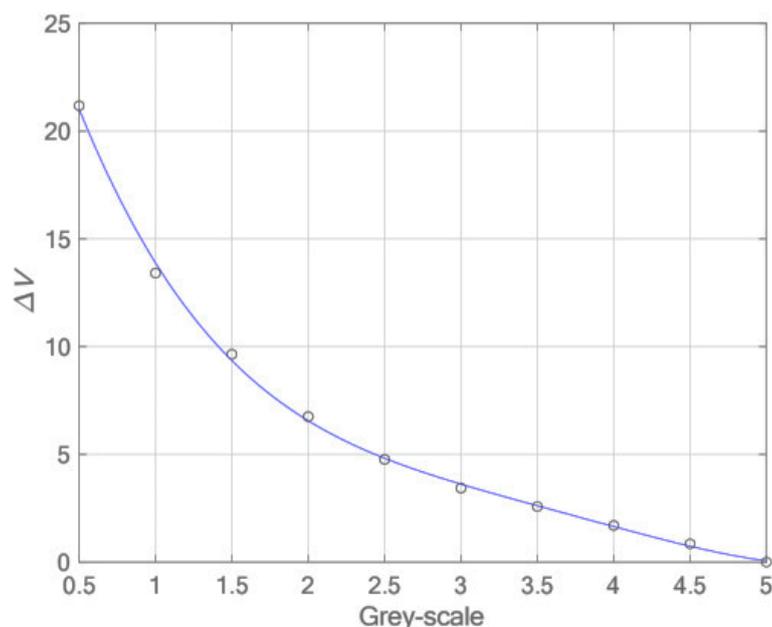


Рисунок 1.10 – Преобразование между шкалой серого (*Grey-scale*) и визуальной разницей (ΔV)

Полученный таким образом визуальный набор данных (ΔV) в дальнейшем используется для сравнения формул ЦР.

Алгоритм проведения подобных экспериментов схож, даже если устанавливаются разные условия наблюдения: угловые размеры объектов (2° , 4° , 10° и 20°), исходные величины цветового различия (4 и 8 единиц *CIELAB*) и включение или исключение линии разделения между двумя цветами в паре и т.д. [17,19].

Формула STRESS. В техническом отчете 1-55 ТК [20] даны рекомендации по проблеме того, как оценить эффективность формулы ЦР по отношению к заданному набору визуальных данных. Различные индексы, предложенные в литературе для этой цели, были обобщены, и в качестве полезного инструмента было рекомендовано использовать индекс *STRESS* [21].

Это статистический индекс, названный стандартизированной остаточной суммой квадратов (*STRESS*), который представляет собой метод многомерного масштабирования [21, 22]:

$$STRESS = 100 \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^N (F \cdot \Delta E_i - \Delta V_i)^2}{\sum_{i=1}^N \Delta V_i^2} \right)^{1/2}, \text{ где} \quad (1.4)$$

ΔE определяет прогнозируемое цветовое различие; ΔV определяет экспериментальное визуальное цветовое различие;

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta E_i \cdot \Delta V_i}{\sum_{i=1}^N \Delta E_i^2} \text{ — коэффициент масштабирования для приведения значений}$$

ΔV к той же шкале, что и ΔE , а N — количество пар образцов.

Результаты сравнения формул прогнозирования ЦР. МКО ТК 1-55 признало, что не может предложить новое ЦП с евклидовой формулой ЦР, которая работает статистически значимо лучше, чем *CIEDE2000* из большинства доступных в настоящее время визуальных наборов данных.

Однако, выделялись три цветовых пространства: *OSA-UCS*, *DIN99d* и *CAM02-UCS* в хронологическом порядке их публикаций.

По результатам работы нескольких ТК МКО и Международной организации по стандартизации был разработан и утвержден стандарт [23], где рекомендуется использовать формулы ЦР в РЦП:

1. *Oleari's OSA-UCS colour space*;
2. *DIN99o colour space*;
3. *CIECAM16-UCS colour space*.

Расчетные формулы ЦР и описания РЦП приведены в приложении 1.

Последнее из перечисленных пространств связано с моделью цветового восприятия (МЦВ), где, помимо значений самого стимула, учитываются данные об условиях просмотра: разные ИС, распределение яркости в поле зрения, данные о фоне и окружении.

1.3. Модель цветового восприятия

С 1980 года, с развитием компьютерной техники, появилась потребность в МЦВ, которую можно было бы использовать для обеспечения цветопередачи в разных средах, например, для управления цветом при минимизации погрешности воспроизведения изображений, наблюдаемых на экране дисплея цветным принтером.

В 1997 году ТК МКО 1-34 объединил лучшие характеристики всех доступных МЦВ в одну модель, которая стала известна как промежуточная модель *CIECAM97s*, а в 2004 году МКО рекомендовала МЦВ *CIECAM02* [24,25]. С тех пор она использовалась для таких приложений, как прогнозирование внешнего вида цвета, оценка ЦР [26], представление цвета в РЦП [27], управление цветом [28] и т.д. Позднее *CIECAM02* был расширен, чтобы обеспечить более равноконтрастное цветовое пространство, получившее название *CAM02-UCS* [27]. Однако, при обработке некоторых изображений возникали вычислительные сбои, и позже была предложена модификация *CAM02*, получившая название *CAM16* [29].

В общем случае линейка МЦВ предназначена для описания перцептивных аспектов цветового зрения человека, т.е. условий просмотра, при которых восприятие цвета не совпадает с соответствующими физическими измерениями источника стимула.

Для получения соответствия внешнего вида между двумя стимулами, наблюдаемыми в разных условиях просмотра, потребуется как прямой режим, так и обратный режим МЦВ. В прямом режиме в качестве входных данных используются трехцветные значения образца и параметры, определяющие условия просмотра, такие как тестовый источник, коэффициент яркости фона, условия окружающего освещения. В обратном режиме вводится набор визуальных коррелятов (светлота J , цветность C и угол оттенка h) и прогнозируются соответствующие трехстимульные значения образца при другом наборе условий освещения.

Прямой режим состоит из трех этапов (шаги приведены в Приложение 1):

1. Определение цвета сцены просмотра (шаг 0);
2. Визуальная адаптация (шаги 1–4);
3. Расчет визуальных коррелятов (шаги 5–10).

Этап визуальной адаптации отличен для разных моделей *САМ*. Однако, все преобразования хроматической адаптации (*CAT*) концептуально и математически уходят корнями к идеям Иоганнеса фон Криса (1902). Основная идея подхода фон Криса базируется на предположении, что уменьшение чувствительностей рецепторов ЗС пропорционально их сигналам на внешний раздражитель.

CAT-модели задействуют модифицированный вариант расчета смены хроматической адаптации, известный как «*Брэдфордское преобразование*». *Брэдфордская преобразование* — это фонкрисовский расчет плюс дополнительная степенная нелинейность по синему каналу и оптимизированные СЧР [30]. Как видно из рисунка 1.11, физиологическая достоверность модификации расчета оказывается под большим вопросом, поскольку в реакциях рецепторов появляются отрицательные значения.

Возникновение этого противоречия связано с тем, что в моделях *CAT*, путем эмпирического подбора линейных и нелинейных преобразований функций, пытаются добиться совпадения результатов расчетов хроматической адаптации с экспериментальными данными, с одной стороны, и в то же время получить для матриц перехода максимальное согласование с *XYZ*, что уводит от физиологической сущности процесса получения сигналов от рецепторов.

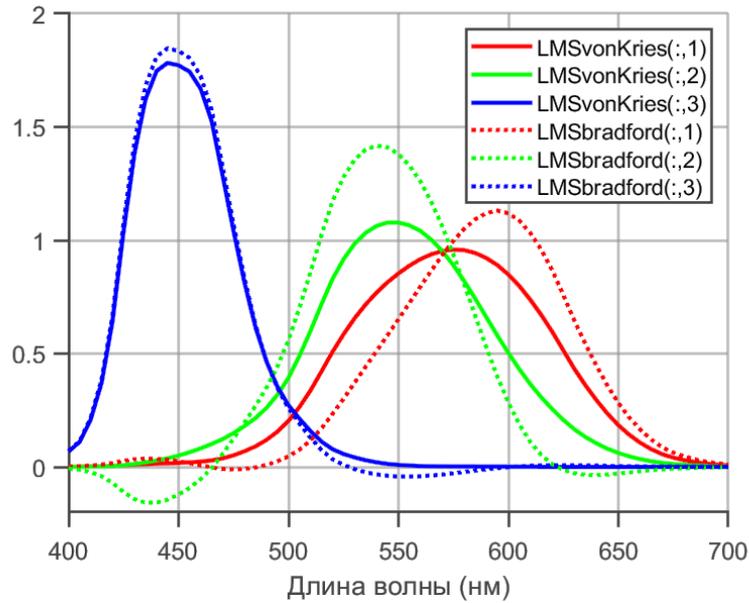


Рисунок 1.11 – Функции СЧР для адаптационных преобразований *vonKriest*, *Bradford*

Достоинством нового адаптационного преобразования **CAT16** авторы называют как раз неотрицательные СЧР [29]. Ниже приведены матрицы перехода от трехстимульных значений стимула *XYZ* в реакцию колбочек *LMS*, выражения 1.5 и 1.6.

$$\begin{bmatrix} L_{02} \\ M_{02} \\ S_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7328 & 0.4296 & -0.1624 \\ -0.7036 & 1.6975 & 0.0061 \\ 0.003 & 0.0136 & 0.9834 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

$$\begin{bmatrix} L_{16} \\ M_{16} \\ S_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.40129 & 0.65017 & -0.05146 \\ -0.25027 & 1.20441 & 0.04585 \\ -0.00208 & 0.04895 & 0.95313 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (1.6)$$

Для приложений визуализации соавторы **CIECAM16** предложили модель восприятия цвета **ZCAM** [31] с дополнительными выходными параметрами, в которой адаптационное преобразование описывается следующей матрицей:

$$\begin{bmatrix} L_z \\ M_z \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41479 & 0.57999 & 0.01465 \\ -0.20151 & 1.12065 & 0.05310 \\ -0.01660 & 0.26480 & 0.66848 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (1.7)$$

С точки зрения математических преобразований здесь все в порядке: для всех цветов в колориметрической системе (КС) LMS_i имеют положительные значения

(рисунок 1.12), поэтому подобные КС могут описывать цветовые преобразования, но они не соответствуют описанию КС с точки зрения физиологии.

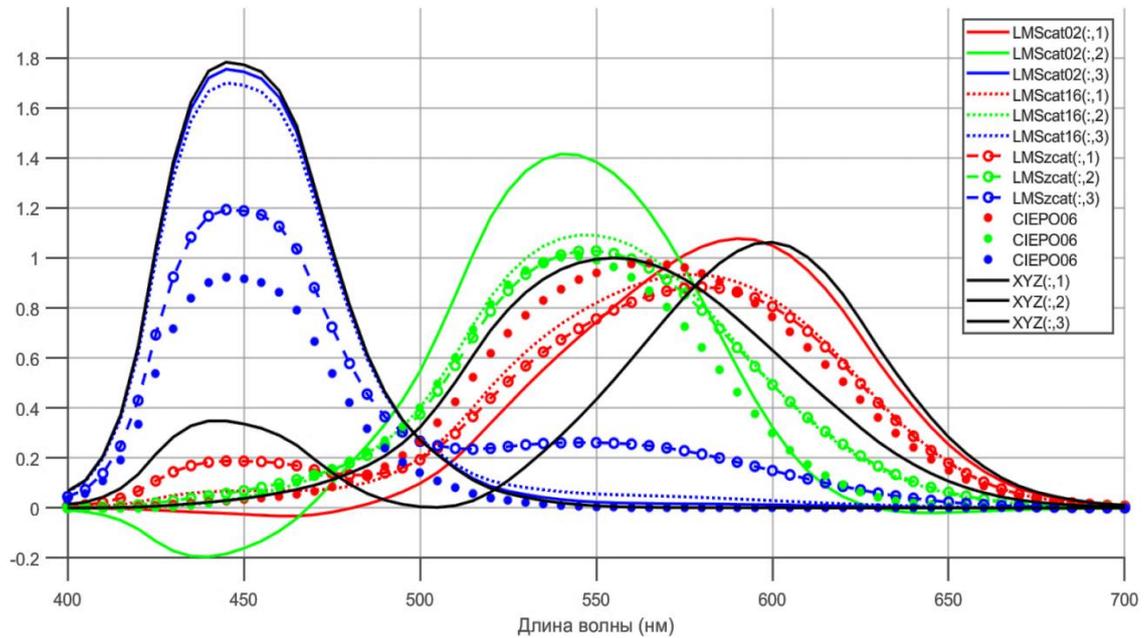


Рисунок 1.12 – Функции СЧР для адапционных преобразований CAT02, CAT16, ZCAT в сравнении с CIEPO06 (модель описана в следующей главе)

Необходимо, чтобы и сумма положительных координат цветов полученной системы LMS_i после преобразования в XYZ , также имела положительное значение координаты Y , поскольку только она оценивает суммарный уровень возбуждения рецепторов человека.

ПО расчета СЧР LMS и l, m по координатам цветности ОЦ КС. Было создано ПО, которое позволяет получить параметры КС, необходимые для ее использования в колориметрических расчетах. Алгоритм работы ПО:

1. Исходными данными являются количественное соотношение основных цветов (ОЦ) в исходной и новой КС: *матрица перехода координат цвета ОЦ из исходной КС в новую КС* или *координаты цветности ОЦ новой КС в исходной КС*, а также функции сложения (ФС) исходной КС.

Расчет *матрицы перехода для координат цвета, исходя из координат цветности ОЦ новой КС в исходную КС*, подробно описан на примере во второй главе диссертационной работы (выражения (2.6 – 2.13)).

2. При делении элементов строки *матрицы перехода для координат цвета* на сумму координат цвета и последующем ее транспонировании получается *матрица перехода для координат цветности ОЦ исходной КС (единичной диагональной матрицы), в новую КС*;
3. Расчет диаграммы цветности исходной КС;
4. Расчет координат цветности в новой КС путем умножения координат цветности в исходной КС на *матрицу перехода для координат цветности ОЦ из исходной КС в новую КС*;
5. Построение треугольников ОЦ и диаграмм цветности.

Графический интерфейс и описание элементов ПО представлены на рисунке 1.13.

На рисунках 1.14 – 1.16 приведены параметры КС (СЧР или удельные координаты цвета (УКЦ), треугольник ОЦ в x, y , ДЦ l, m) для МЦВ *СIECAM02*, *СIECAM16*, *ZCAM*, а в табличном виде результаты расчетов представлены в приложении 2.

На графике УКЦ точками обозначены кривые исходной КС, в данном случае *XYZ*, а сплошными линиями УКЦ новой КС.

Как видно для всех МЦВ при отображении треугольников ОЦ LMS_i и ДЦ l, m на ДЦ x, y , реальные цвета имеют отрицательные координаты цветности y , что соответствует отрицательному ощущению яркости. Это приемлемо для произвольной КС, но недопустимо для физиологической, в которой уровень реакции любого из рецепторов, как и ощущение яркости, не может быть отрицательным. Если же построить локус x, y на ДЦ l, m , то заметно значительное расхождение кривых.

Выбор ФС исходной КС

кцN_S/МПС_N Сумма Beta S

кцN_S или МПС_N для новой КС

Матрица перехода координат цветности ОЦ из исходной КС в новую КС или координаты цветности ОЦ новой КС в исходной КС

	x1N	y1N	z1N
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	x2N	y2N	z2N
Сумма Beta N	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	x3N	y3N	z3N
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Расчет

Выбор ФС исходной КС

кцN_S/МПС_N Сумма Beta S

кцN_S или МПС_N для новой КС

Матрица перехода координат цветности ОЦ из исходной КС в новую КС или координаты цветности ОЦ новой КС в исходной КС

	x1N	y1N	z1N
	0.834	0.174	-0.0071
	x2N	y2N	z2N
Сумма Beta N	2.39	-1.466	0.0805
<input type="text" value="1"/>	x3N	y3N	z3N
	0.125	-0.0075	0.8822

Расчет

Графический интерфейс программы

При нажатии кнопки "Выбор ФС исходной КС" появляется диалоговое окно с выбором функции сложения исходной КС;

Флажок "кцN_S/МПС_N" – позволяет переключаться между загрузкой матриц перехода для ОЦ КС или координат цветности ОЦ новой КС в исходной, а при нажатии кнопки "кцN_S или МПС_N для новой системы" появляется диалоговое окно с выбором файлов;

Кнопка "Расчет" запускает работу программы, по результатам которой данные записываются в отдельные файлы и выводятся в виде графиков.

Примеры представлены справа.

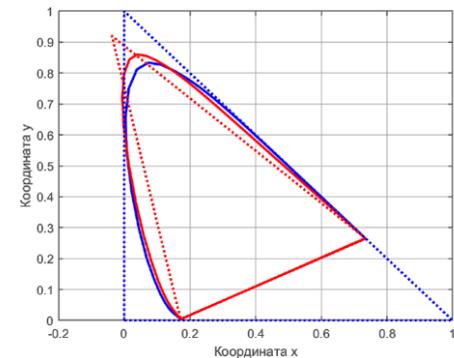
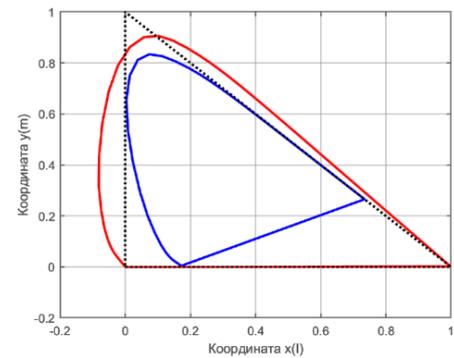
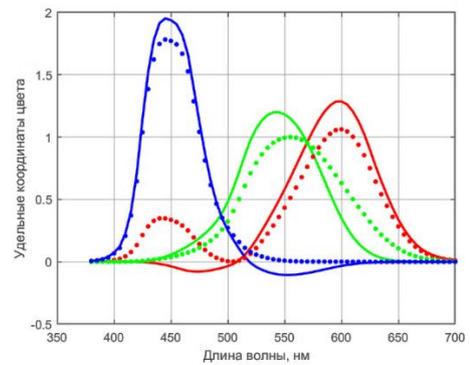
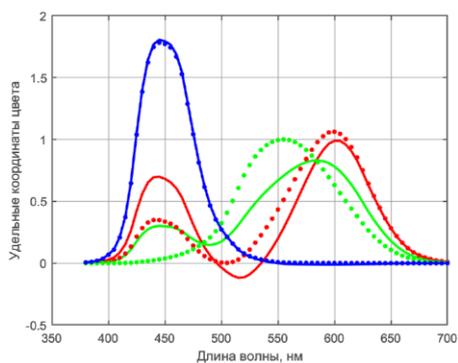
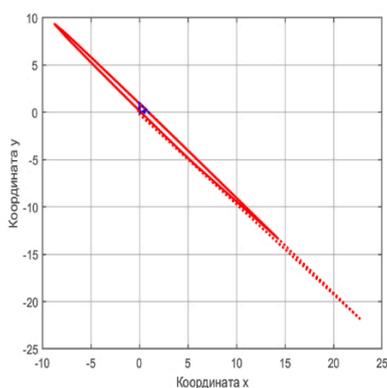
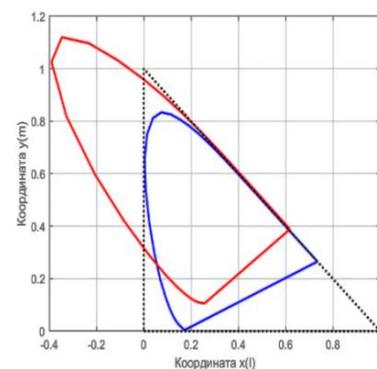
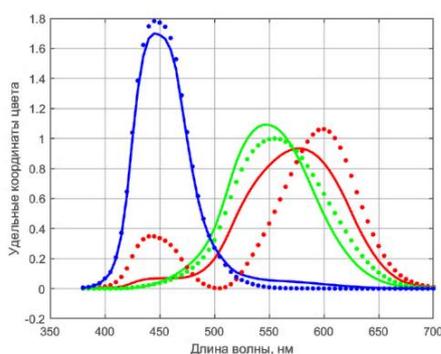


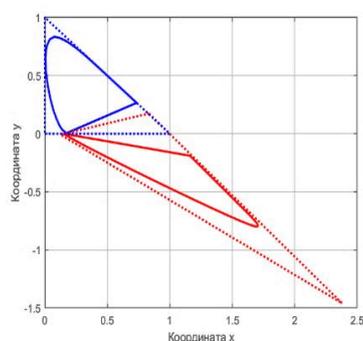
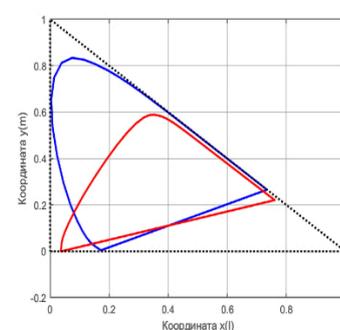
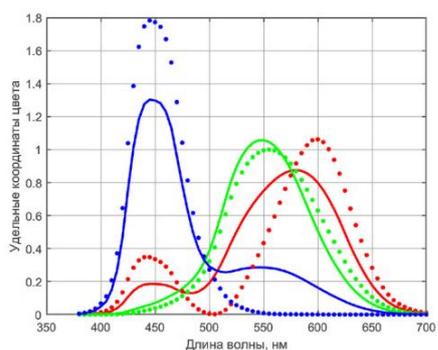
Рисунок 1.13 – Информация о разработанном ПО



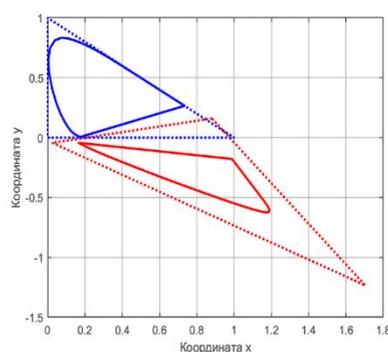
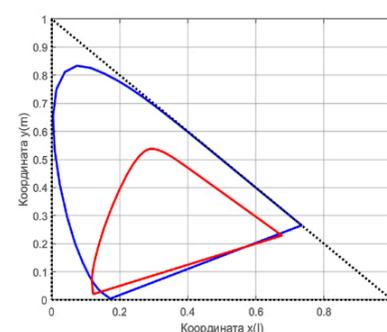
СЧР (УКЦ)

Треугольник ОЦ и ДЦ в x, y Локусы l, m и x, y Рисунок 1.14 – Результаты расчета параметров для МЦВ *CIECAM02*

СЧР (УКЦ)

Треугольник ОЦ и ДЦ в x, y Локусы l, m и x, y Рисунок 1.15 – Результаты расчета параметров для МЦВ *CIECAM16*

СЧР (УКЦ)

Треугольник ОЦ и ДЦ в x, y Локусы l, m и x, y Рисунок 1.16 – Результаты расчета параметров для МЦВ *ZCAM*

С физиологической точки зрения в адапционных преобразованиях следует использовать матрицы перехода между системами, полученные в процессе построения физиологической колориметрической системы (ФКС). Это отметили и

в ТК МКО 1-98, где выдвигалось предложение о создании с нуля физиологической САМ, которая была бы основана на входных данных *LMS* [32].

В качестве примера можно привести статью [33], в которой авторы рассмотрели построение МЦВ на основе идей о цветовом кодировании в зрительной системе.

Каждый этап получает входную информацию и производит преобразование, которое вводится на следующий этап с описанием его потенциальных физиологических механизмов и принципов работы. Например, входным сигналом для первого этапа является попадающий на сетчатку свет, а результатом пятого этапа - восприятие цвета поверхности. На рисунке 1.17 эти этапы показаны в виде блок-схем, а рядом приведены функции с рабочими оптимизированными параметрами.

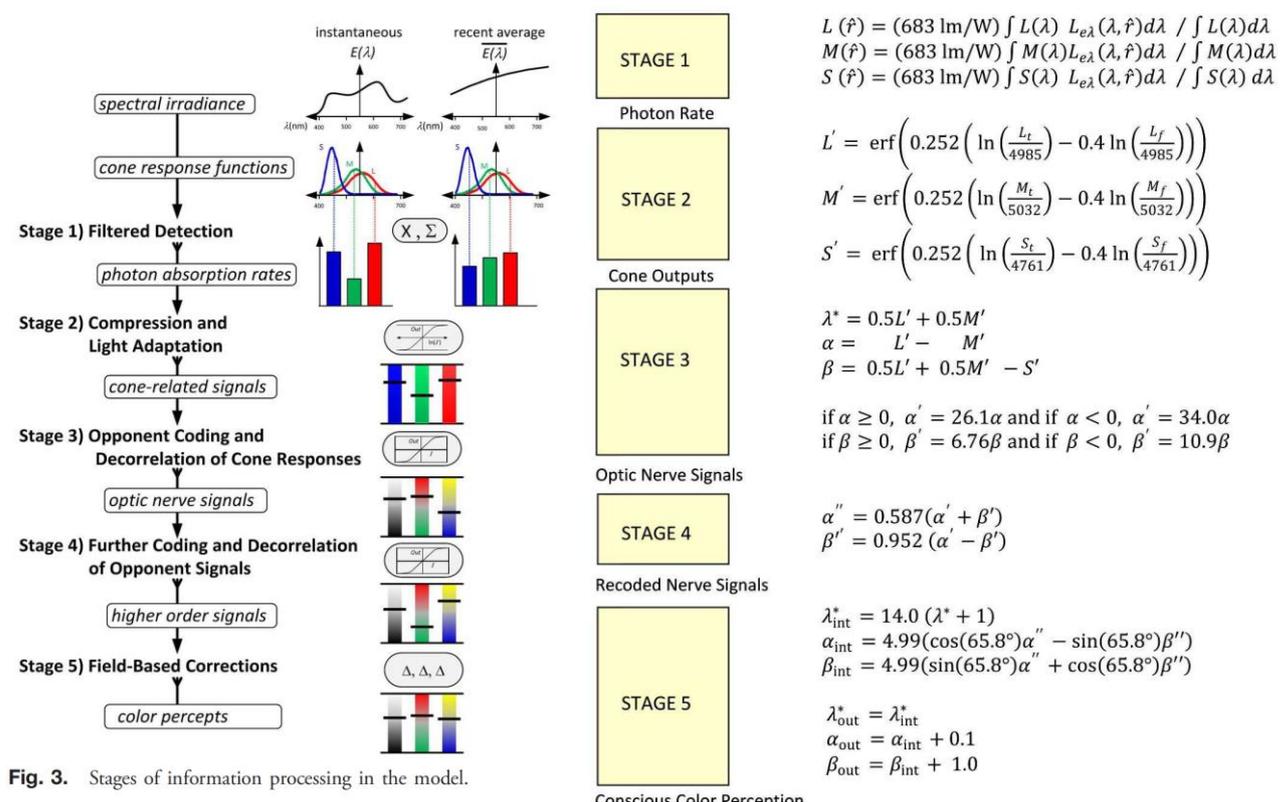


Рисунок 1.17 – Этапы физиологической МЦВ

Приведенные на рисунке выражения хоть и описывают наблюдаемые явления показателей внешнего вида цвета, но все же намеренно упрощены и приведены без подтверждения экспериментальными данными.

1.4. Физиологические колориметрические пространства

Физиологической, по предложению С.О. Майзеля, называется колориметрическая система, функции сложения которой совпадают со спектральными чувствительностями колбочек [34].

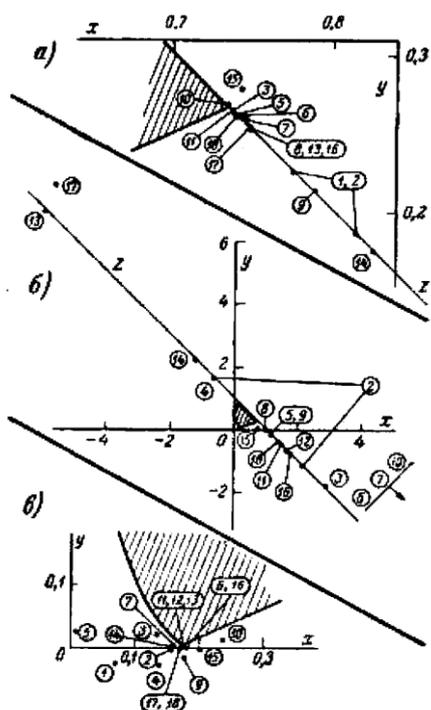


Рисунок 1.18 – Положения ОЦ ФКС на ДЦ МКО, полученные разными авторами (Таблица 1.3)

При определении ФКС *LMS* в исследовательских работах применялись методы, в которых использовались экспериментальные данные, полученные при установлении цветовых равенств трихроматами и дихроматами, цветовой адаптации, цветоразличения, а также некоторых других явлений (рисунок 1.18) [35]. Полученные вышеуказанными методами функции СЧР имеют существенные отличия.

Данные смещения цветов для трихроматов. Определение основных цветов *LMS* по данным смещения цветов

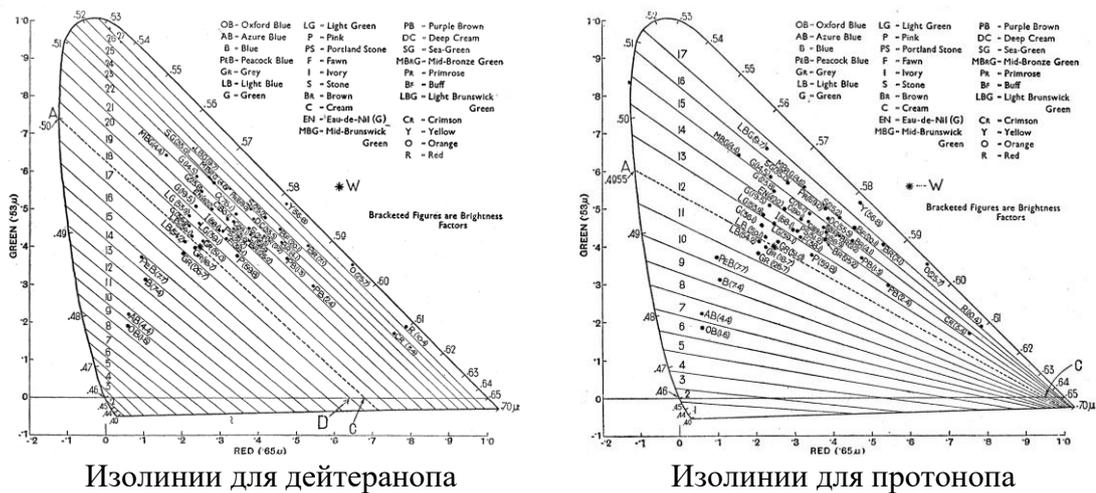
трихроматами можно сделать только при условии дополнительных предположений:

- максимумы СЧР находятся в разных областях спектра;
- СЧР не должны иметь отрицательных ветвей.

Условие отсутствия отрицательных ветвей СЧР было выдвинуто А. Кёнигом, Н.А Айвс дополнил эти условия положением, что яркостные коэффициенты основных цветов должны быть положительными. Опираясь на два условия Кёнига — Айвса, Н.Д. Ньюберг [36] вывел геометрическое условие для определения зоны возможных положений цвета (*S*) при известных цветах (*L*) и (*M*). Это так называемый «треугольник Ньюберга», образованный касательными к линии спектральных цветов из точек (*L*) и (*M*) и алихной.

Использование данных смешения цветов дихроматами. Предполагалось, что причиной дихроматизма является полное отсутствие одного из рецепторов, при этом у двух оставшихся нормально работающих рецепторов, спектральные чувствительности должны быть точно такие же, как у людей с нормальным цветовым зрением.

Д.Л. Максвелл ещё в 1860 году показал, что полюс пучка прямых, определяющих геометрические места точек цветностей, неразличимых дихроматами [36], совпадает с одной из вершин координатного треугольника ОЦ КС (рисунок 1.19). Эти координаты можно получить экспериментально и на их основании определить УКЦ дихроматов.



Изолинии для дейтеранопа

Изолинии для протанопа

Рисунок 1.19 – Примеры изолиний для дихроматов

Использование механизма цветовой адаптации. Колориметрически подход фон Криса означает изменение исходной цветности ФКС при неизменных ОЦ. Если это так, то для нахождения ОЦ достаточно определить четыре пары соответственных цветностей для двух состояний адаптации, что и пробовали исследователи. Однако, дальнейшие исследования цветовой адаптации показали, что в ней присутствует более сложный механизм, чем предполагался в этой простой гипотезе.

Ниже приведена таблица 1.3 с полученными различными авторами координатами цветности ОЦ физиологической системы.

Таблица 1.3

№	Авторы	К		З		С	
		x_k	y_k	x_z	y_z	x_c	y_c
1	А. Кениг и К.З. Дитеричи [37]	0.814	0.136	-0.636	1.636	0.069	-0.026
2	Х.А. Айвс [38]	0.814	0.136	-0.636	1.636	0.156	-0.02
3	Х.В. Уолтерс [39]	0.742	0.26	23.58	-21	-	-
4	Ф.Х.Г. Питт [40]	0.745	0.257	10.991	-9.74	0.16	0.004
5	В.С. Стайлс [41]	0.788	0.213	1.118	-0.115	0.175	-0.017
6	Х. Де Врис [42]	0.733	0.267	-	-	0.235	0.013
7	Г. Шекерс [43]	0.736	0.264	1.458	-0.456	0.174	0.002
8	Е.Н. Юстова [44]	0.748	0.252	1.65	-0.65	0.174	0.002
9	Л.К. Томсон и В.Д. Райт [45]	0.747	0.253	-5.94	6.91	0.175	0.0044
10	Т. Федоров [46]	0.825	0.175	-1.22	2.22	0.156	0.0005
11	В.Л. Бруэр [47]	0.742	0.277	0.753	0.020	0.2	-0.004
12	Д.Л. МакАдам [48]	0.747	0.253	1.75	-0.759	0.178	0
13	Х.Г. Сперлинг [49]	0.746	0.252	-5.66	7.713	0.17	0.002
14	А.К. Кустарев [35]	0.737	0.2653	1.43	-0.43	0.173	0.0045
	<i>LMS_{phys}</i>	0.7347	0.2653	-5.2457	6.2457	0.1692	0.0011

Как видно из таблицы 1.3, только часть исследователей (Л.К. Томсон и В.Д. Райт (поддержали идею Х.В. Уолтерса) и Х.Г. Сперлинг) учитывали, что точка зеленого ОЦ значительно удалена от локуса в положительную сторону координаты y . Это предположение выдвигалось вследствие проводимых в то время экспериментов (Л.К. Томсон и В.Д. Райт), где в качестве наблюдателей приглашались именно трихроматы, либо же было частью рабочих гипотез по адаптации результатов экспериментов с дихроматами к КС трихроматов (Х.Г. Сперлинг).

Предстоящий переход к колориметрии на основе физиологии зрения. В настоящее время технический комитет 1-98 МКО разрабатывает дорожную карту перехода к колориметрии, основанной на физиологии зрения, а точнее на *cone fundamentals*, которые недавно были добавлены в пересмотренный международный стандарт ISO/CIE 23539:2023 "Фотометрия" [50].

В 2006 году технический комитет 1-36 МКО опубликовал доклад [51] (далее называемый **CIEPO06**, аббревиатура *CIE 2006 physiological observer*) о выборе набора функций сложения [52] и оценках фундаментальных параметров колбочек [53] (*cone fundamentals*), под которыми авторы подразумевают функции

спектральной чувствительности рецепторов глаза, измеренные в плоскости роговицы для наблюдателя с нормальным цветовым зрением (рисунок 1.20).

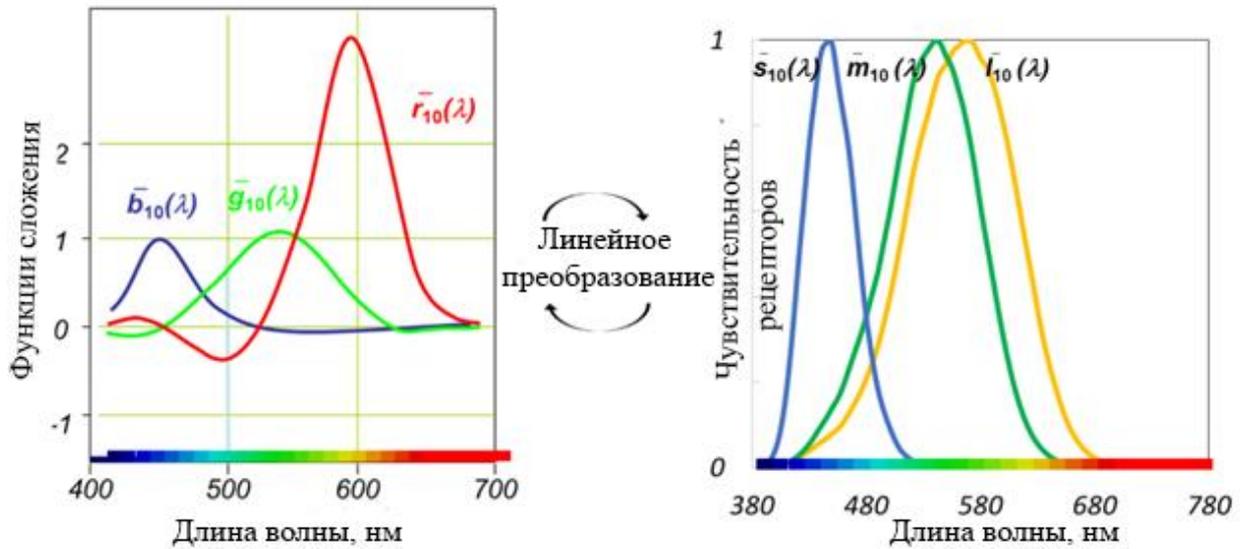


Рисунок 1.20 – Слева представлены ФС У.С. Стайлза и Д.М. Берча [52], а справа СЧР А. Стокмана и Л.Т.Шарпа [53]

Модель *CIER006* в значительной степени основана на работах А. Стокмана и Л.Т. Шарпа [53,54]. Экспериментальные исследования [54] проводились по методике, приводящей к изоляции одного из типов колбочек, с привлечением в качестве наблюдателей вместо трихроматов дихроматов на основе их отбора по тестам ДНК.

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 разным у трихроматов, обрабатывающих сигналы трех приемников, и дихроматов, у которых один приемник отсутствует, а цветовое и яркостное восприятие сохраняются [3].

Если линейное преобразование из КС *RGB* в *LMS* и обратно было представлено в основном докладе МКО, то матрицу перехода для координат цвета из КС *XYZ* в *LMS* авторы представили только спустя 10 лет [55]:

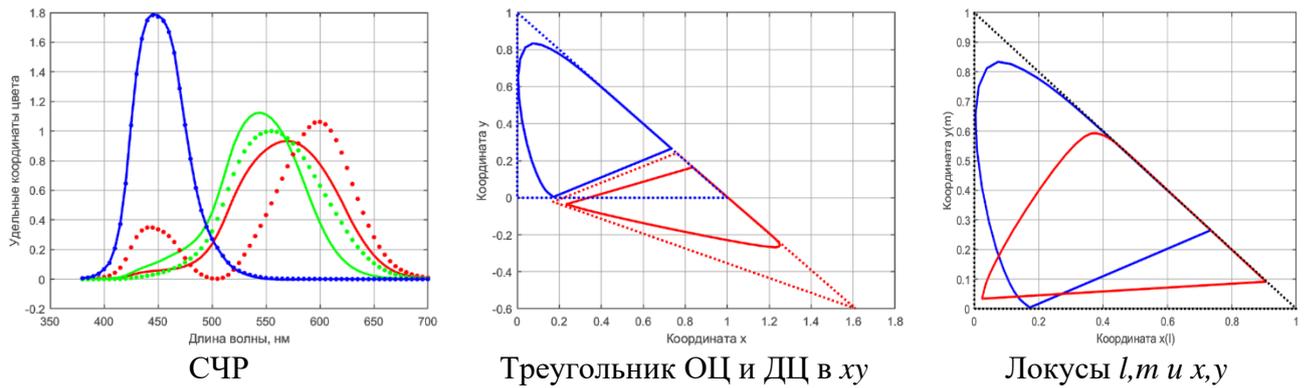
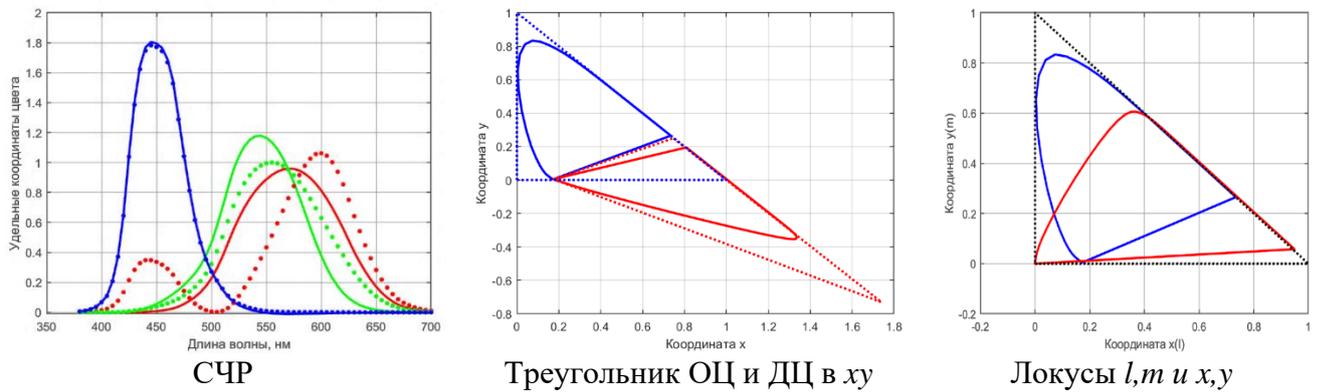
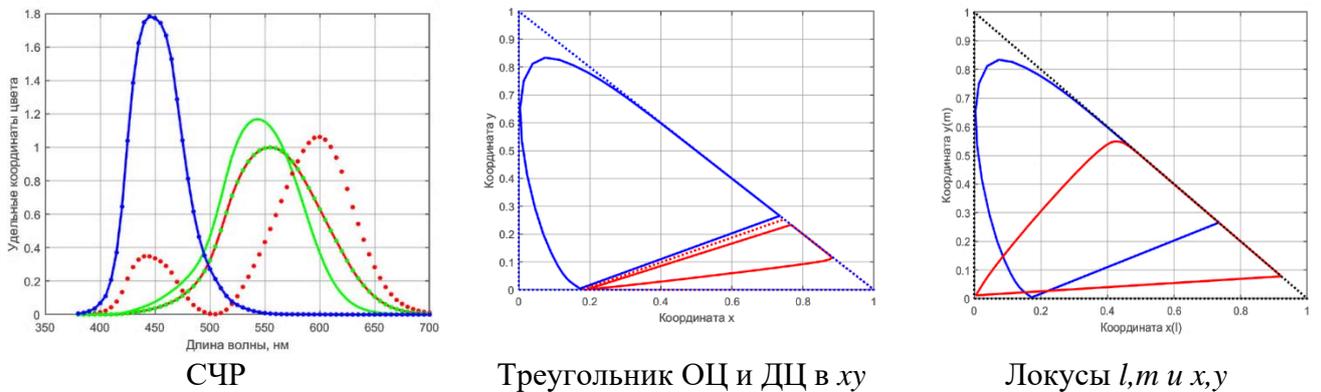
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.9473 & -1.4144 & 0.3647 \\ 0.6899 & 0.3483 & 0 \\ 0 & 0 & 1.9348 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

Для дальнейшего сравнения ФКС между собой, и чтобы избежать путаницы мы в данной работе будем использовать следующие обозначения:

- Модель **CIEPO06** или система **LMS** с функциями $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ называемыми *cone fundamentals*;
- Физиологическая колориметрическая система **(K3C)_{физ}** Н.Д. Ньюберга и Е.Н. Юстовой - **(LMS)_{NY}**, полученная при участии дихроматов [34];
- Физиологическая система 1946 г. **(LMS)_{DU}** Д. Джадда [56], полученная при участии дихроматов;
- Разрабатываемая в диссертационной работе система будет обозначаться **(LMS)_{phys}** с функциями сложения $\bar{l}_{phys}(\lambda), \bar{m}_{phys}(\lambda), \bar{s}_{phys}(\lambda)$ соответственно.

С использованием ПО, описанного в разделе МЦВ, были проведены расчеты параметров ФКС, представленные на рисунках 1.21 – 1.23 и в таблицах приложения 3.

Для локусов и треугольников ОЦ ФКС **LMS** и **(LMS)_{NY}** наблюдаются те же отрицательные значения координат цветности y , что и у МЦВ. Также можно заметить, что ФС, полученные разными методами с разным набором дихроматов, хорошо совпадают, что указывает на надежность полученных результатов, но это относится именно к дихроматам.

Рисунок 1.21 – Результаты расчета параметров для ФКС LMS Рисунок 1.22 – Результаты расчета параметров для ФКС $(LMS)_{NY}$ Рисунок 1.23 – Результаты расчета параметров для ФКС $(LMS)_{DU}$

В КС $(LMS)_{DU}$ автор предположил, что координаты цветности ОЦ не могут лежать ниже алихны, и поместил координаты m и s на саму алихну, при этом $\bar{l}(\lambda)$ в о.е. совпадает с $V(\lambda)$, таким образом треугольник получился с положительными (либо нулевыми) значениями y для всех ОЦ. Однако, данные преобразования противоречат экспериментам с дихроматами, на которых были основаны: расположение цветов L и S на алихне приводит к тому, что наблюдатели протонопы, в принципе, не должны видеть света, поскольку приемники L у них

отсутствуют. Стоит также отметить, что отображенная в ЦП XYZ ДЦ $(LMS)_{DU}$ не охватывает область реальных цветов, следовательно в ней все реальные цвета являются нереальными.

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. Как было показано ранее, желательно и модели восприятия цвета вместе с равноконтрастными цветовыми пространствами разрабатывать на основе физиологии зрения.

1.5. Пример физиологического равноконтрастного цветового пространства

В основу преобразования пространства $K3C$ в равноконтрастное положены следующие гипотезы [57]:

1. уровни возбуждения пропорциональны частоте импульсов токов действия рецепторов и нелинейно связаны с визируемой яркостью;
2. ощущение цвета пропорционально уровню возбуждения колбочек.

Для оценки ЦР была выдвинута гипотеза построения РЦП, основанная на методе пороговых приращений. Полагая, что уровни возбуждения колбочек пропорциональны частоте импульсов токов действия, а ощущение цвета — соотношению трех уровней возбуждения, были получены уравнения РЦП:

$$v_m = A_m \cdot \frac{m}{a_m \cdot m + m_a}, \text{ где} \quad (1.9)$$

v_m – частоты импульсов тока действия в волокнах зрительного нерва m -го рецептора; A_m – коэффициент, пропорциональный чувствительности m -го

рецептора; $m_a = \begin{pmatrix} K_a \\ Z_a \\ C_a \end{pmatrix}$ и $m = \begin{pmatrix} K \\ Z \\ C \end{pmatrix}$ – координаты цвета адаптации и объекта; a_m

– коэффициент, учитывающий нелинейность реакции рецептора.

ЦР в РЦП будет определяться расстоянием между двумя точками, характеризующими пару цветов:

$$\Delta S = \left(\sum_m \Delta v_m^2 \right)^{1/2}, \text{ где} \quad (1.10)$$

$\Delta v_m'$ – разность координат исследуемых цветов в равноконтрастном пространстве v_k, v_z, v_c .

Определение постоянных коэффициентов A_m и a_m , входящих в уравнение, может быть осуществлено, если решить систему шести уравнений с шестью неизвестными. Для составления такой системы необходимо для трех произвольно выбранных цветов выразить в системе v_k, v_z, v_c величины большой и малой осей пороговых эллипсов МакАдама и приравнять их к единице. В результате будет получена система шести уравнений с шестью неизвестными. В качестве основных были выбраны ОЦ ФКС $(LMS)_{NY}$. Для нормирования уравнений были использованы экспериментальные данные МакАдама по порогам цветоразличения для 25 цветов с угловым размером 2° на фоне, яркость которого в 2 раза меньше яркости исследуемого цвета, а цветность соответствует стандартному источнику дневного света С [57].

Решить уравнения оказалось возможным на основе детального анализа влияния каждого из неизвестных на величину порога в разных областях цветового графика методом последовательных приближений. В результате получены следующие относительные значения параметров $A_k: A_z: A_c=1:1:0.556$ и $a_k: a_z: a_c=1:1:5$.

На развертке цилиндрической поверхности, ось которой перпендикулярна координатной оси v_c , и наклонена к оси v_k примерно под углом — 45° , была построена кривая сечения тела цветовых ощущений для условий, соответствующих экспериментам МакАдама (яркость объекта в 2 раза выше яркости фона, цветность которого соответствует стандартному источнику С). В результате был получен

равноконтрастный график, на котором для удобства использования нанесена сетка равных значений координат цветности x и y в системе МКО (Рисунок 1.24).

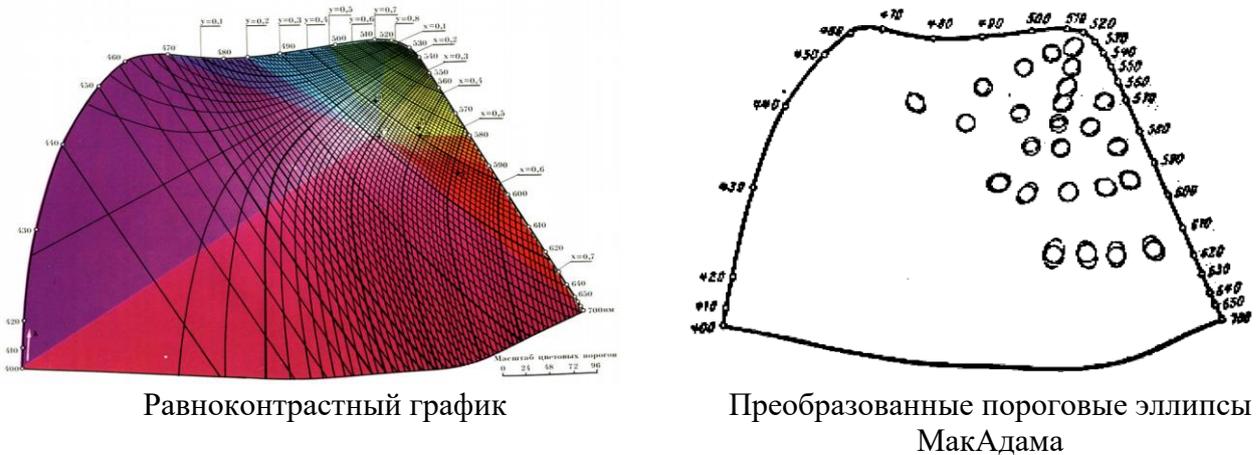


Рисунок 1.24 – Результаты сравнения ФКС

Пороговые эллипсы МакАдама на этом графике преобразовались в замкнутые кривые, изображенные на рисунке 1.24 пунктиром, и достаточно близкие к окружностям примерно одинакового диаметра.

Для выяснения, в какой мере новый график близок к действительно равноконтрастному, были вычислены СКО больших и малых осей от среднего диаметра окружности и сопоставлены с аналогичными вычислениями для разработанных ранее РЦП.

Размеры эллипсов и окружностей выражались в единицах соответствующих равноконтрастных систем и далее определялись СКО. В таблице 1.4 приведены результаты расчетов СКО, а также наибольшие разности длин осей эллипсов и диаметра окружности, отнесенные к диаметру.

Таблица 1.4.

Системы	$a, \%$	$\Delta a_{max}, \%$	$\Delta b_{max}, \%$
МКО	72	327	82
Фарнсворт (нелинейная)	48	108	72
Фарнсворт №38	46	107	60
Джадд	38	91	62
МакАдам	39	75	54
Болдырев и Мартынов	32	67	60
$vk, v3, v5$	24	61	49

Из приведенных данных видно, что СКО для нового графика значительно меньше, чем у других систем, и, следовательно, он в большей степени приближается к равноконтрастному. Этот же вывод может быть получен из анализа отклонений Δa_{max} и Δb_{max} . Так как постоянные параметры уравнения (1.9) определены из условия преобразования эллипсов Макадама в окружности одинакового диаметра, то в данном случае величина среднего квадратичного отклонения характеризует точность выбора ОЦ ФКС (1.9).

Если для линейных преобразований в принципе безразлично, в какой системе ОЦ дана исходная ДЦ, то при нелинейных трансформациях неправильный выбор ОЦ КС может стать также источником погрешностей при экстраполяции, необходимой для построения всего равноконтрастного пространства. Чем больше будут отличаться ОЦ КС от ОЦ ФКС, а следовательно, и ФС от СЧР, тем больше будет погрешность при преобразовании и при дальнейшей экстраполяции. Поэтому более перспективными являются построения равноконтрастной системы на базе преобразования ФКС [57].

1.6. Математическая модель порогового цветового зрения

Построение пространства ощущений с помощью метода пороговых приращений основано на экспериментальных исследованиях зависимости цветовых порогов и справедливо только для тех условий, в которых они производились. Отличие реальных условий наблюдения от условий проведения эксперимента (уровень яркости фона, спектр и цветность излучения, размеры и форма объектов, неравномерность распределения яркости по поверхности и т.д.) приводит к погрешностям, которые невозможно оценить заранее [57]. Для того, чтобы уйти от привязки к результатам конкретных экспериментов разрабатываются математические модели ЗС.

Существующие работы по цветовосприятию относятся к надпороговым условиям работы ЗС. Основной недостаток применения статистического подхода в надпороговых условиях, который используют авторы этих работ, в априорном

задании алгоритмов обработки сигналов датчиков (*MAP*, *MMSE*, *MLM*), которые для зрительной системы неизвестны, а авторы не знают способа их определения. Вероятность случайного определения правильного алгоритма путем перебора различных алгоритмов близка к нулю, поэтому такой подход малоперспективен. Кроме того, предлагаемые алгоритмы не апробированы даже в более простых пороговых условиях наблюдения, где статистический подход доказал свою высокую эффективность.

В математической статистике, при решении задачи выделения сигналов на фоне случайных помех, лучшим алгоритмом считается алгоритм «оптимального приемника». «Оптимальный приемник» — это приемник, алгоритм работы которого позволяет свести к минимуму вероятность возникновения ошибки при принятии решения. Естественно предположить, что в процессе эволюции характеристики зрительной системы человека достаточно близко приблизились к характеристикам оптимального приемника.

Для математического описания этого алгоритма используется функция отношения правдоподобия. При этом вовсе не предполагается, что где-то в мозгу человека происходит вычисление именно этой функции. Считается, что, за счет неизвестных пока нервных связей, мозг человека реализует алгоритм, близкий к алгоритму оптимального приемника. Функция отношения правдоподобия – это только удобный способ математического описания этого алгоритма.

Структурная схема математической модели ЗС, фиксирующей отличие исследуемого объекта S от прототипа S_p (как правило это равномерный фон), представлена на рисунке 1.25.

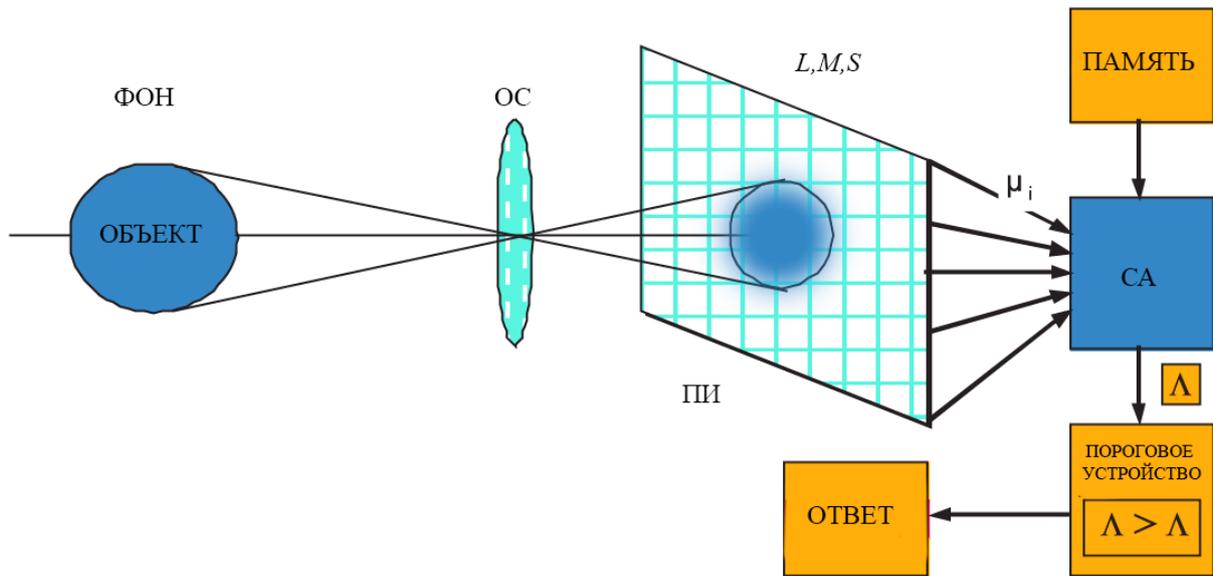


Рисунок 1.25 – Структурная схема модели зрительной системы человека: ОС – оптическая система, ПИ – мозаика приемников излучения, СА – система (устройство) анализа, ПУ – пороговое устройство

Излучение предметов собирается оптической системой глаза на мозаику приемников излучения, которые в математической модели эквивалентны светочувствительным элементам сетчатки - L , M и S колбочкам. Совокупность случайных сигналов мозаики приемников поступает в систему анализа (СА), содержащую в памяти априорную информацию об объекте (S) и фоне (S_p). СА вычисляет одномерную функцию отношения правдоподобия Λ , которая равна отношению вероятности возникновения в опыте по обнаружению случайной реализации Y (L, M, S - совокупности случайных сигналов μ_i) при условии наличия в поле зрения человека объекта ($P[Y/S_{ob}]$) к вероятности возникновения *той же реализации* Y при условии наличия в поле зрения человека прототипа (фона) ($P[Y/S_p]$).

$$\Lambda = \frac{p}{q} \frac{P[Y/S_{ob}]}{P[Y/S_p]}, \text{ где} \quad (1.11)$$

p , q – априорные вероятности наличия и отсутствия объекта, $p + q = 1$.

Согласно алгоритму «оптимального приемника», решение о наличии объекта в поле зрения должно приниматься в соответствии с решающим правилом:

$$\Lambda \geq \Lambda_{th} \quad (1.12)$$

При этом различные критерии характеризуются лишь различными численными значениями Λ_{th} .

Для μ_i (случайного числа импульсов тока действия в волокнах зрительного нерва), подчиняющихся закону распределения Пуассона, при независимых приемниках излучения несложно получить:

$$\ln(\Lambda) = \sum_{i=1}^N \mu_i \ln \left(\frac{x_{obi}}{x_{pi}} \right) - \sum_{i=1}^N (x_{obi} - x_{pi}), \text{ где} \quad (1.13)$$

x_{obi} – математическое ожидание сигналов приемника с номером i , при условии присутствия в поле зрения наблюдателя объекта; x_{pi} – математическое ожидание сигналов приемника с номером i , при условии присутствия в поле зрения наблюдателя прототипа; N – число приемников излучения в мозаике приемников.

При этом функция плотности вероятности $\ln \Lambda$ определяется функцией плотности вероятности нормального закона распределения:

$$f[\ln(\Lambda)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Lambda^2}} \exp \left\{ - \left[\frac{(\ln(\Lambda) - m_\Lambda)^2}{2\sigma_\Lambda^2} \right] \right\}, \text{ где} \quad (1.14)$$

m_Λ и σ_Λ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение $\ln(\Lambda)$, которые для независимых приемников излучения определяются выражениями:

$$m_\Lambda = \sum_{i=1}^N x_{obi} \ln \left(\frac{x_{obi}}{x_{pi}} \right) - \sum_{i=1}^N (x_{obi} - x_{pi}) \quad (1.15)$$

$$\sigma_\Lambda^2 = \sum_{i=1}^N x_{obi} \ln^2 \left(\frac{x_{obi}}{x_{pi}} \right) \quad (1.16)$$

Под независимыми приемниками излучения понимаются либо отдельные приемники, либо группы приемников, подключенные через промежуточные нейроны к одному волокну зрительного нерва.

С учетом монотонности функции натурального логарифма правило принятия решения $\Lambda \geq \Lambda_{th}$ эквивалентно правилу $\ln(\Lambda) \geq \ln(\Lambda_{th})$. С учетом этого, для вероятности обнаружения отличия объекта от прототипа, несложно получить выражение:

$$P_{ob} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\Lambda} \ln \Lambda_{th}} \int_{\ln \Lambda_{th}}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z - m_{\Lambda})^2}{2\sigma_{\Lambda}^2}\right) dz, \quad (1.17)$$

или

$$P_{ob} = \Phi(y),$$

где

$$y = \frac{m_{\Lambda} - \ln \Lambda_{th}}{2\sigma_{\Lambda}}, \quad (1.18)$$

$$\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^y \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \text{ – интеграл вероятности.}$$

В пороговых условиях ($P_{ob}=0.5$) аргумент интеграла вероятности равен нулю, поэтому для этой вероятности обнаружения выполняется основное соотношение ММПЦЗ:

$$m_{\Lambda} = \ln \Lambda_{th}. \quad (1.19)$$

Дальнейшее построение модели идет в направлении определения m_{Λ} с учетом нелинейности рецепторов, для области Вебера-Фехнера [34,58-62].

Ниже приведено основное выражение для расчета перепада энергетической яркости монохроматического объекта, обеспечивающего пороговое обнаружение отличия цвета объекта от цвета фона [58]:

$$L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\int_{380}^{780} L_{\text{elb}}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda \right)^2 + C_3 \left(\int_{380}^{780} L_{\text{elb}}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda \right)^2 + \left(\int_{380}^{780} L_{\text{elb}}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda \right)^2}}, \text{ где (1.20)}$$

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

Данное выражение описывает обнаружение монохроматического объекта на фоне с непрерывным спектром $L_{\text{elb}}(\lambda)$ и содержит 11 неизвестных, из которых три: L, M, S – это функции длины волны. После проведения серии экспериментов образуется система уравнений, решить которую можно только если число неизвестных меньше числа уравнений. Это условие не выполняется, ведь каждая новая экспериментальная точка добавляет еще 3 неизвестных значений L, M, S .

Для того чтобы решить систему уравнений, можно априорно задавать вид L, M, S функций, что позволит фиксировать число неизвестных в уравнениях и сделать их число независимым от числа уравнений. Как известно [36], $\bar{m}(\lambda)$ – это четная функции с одним максимумом, а $\bar{l}(\lambda)$ и $\bar{s}(\lambda)$ – это несимметричные функции с одним максимумом. Если аппроксимировать функции $\bar{m}(\lambda)$ – одной квадратичной экспонентой, а $\bar{l}(\lambda)$ и $\bar{s}(\lambda)$ суммами из двух квадратичных экспонент с разными параметрами в коротковолновой и длинноволновой областях спектра, то погрешность аппроксимации всех известных экспериментальных зависимостей LMS не превышает 1% [3,5], что много меньше естественного разброса характеристик наблюдателей в 15-25%:

$$\begin{aligned}\bar{l}(\lambda) &= f_l(\lambda) \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{lm})}{\sigma_l} \right]^2 \right\} + (1 - f_l(\lambda)) \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{lm})}{C_l \sigma_l} \right]^2 \right\}, \\ \bar{m}(\lambda) &= \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{mm})}{\sigma_m} \right]^2 \right\}, \\ \bar{s}(\lambda) &= f_s(\lambda) \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{sm})}{\sigma_s} \right]^2 \right\} + (1 - f_s(\lambda)) \exp \left\{ - \left[\frac{(\lambda - \lambda_{sm})}{C_s \sigma_s} \right]^2 \right\},\end{aligned}\quad , \text{ где } (1.21)$$

$\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ – длина волны, на которой функция принимает максимальное значение; $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ – параметры, определяющие полуширину функций; $f_l(\lambda)$ и $f_s(\lambda)$ – функции, равные единице, если $\lambda < \lambda_{lm}$ или $\lambda < \lambda_{sm}$, соответственно, и нулю в противоположном случае.

Можно обойтись и без априорного задания функции СЧР. В работе [63] было приведено дополнение выражения (1.20), которое позволяет сократить число неизвестных. Суть нового подхода к определению $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ в следующем: при замене излучения фона с непрерывным спектром излучением нескольких монохроматических источников с длинами волн наблюдаемых объектов, уравнение (1.20) примет вид:

$$L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda)}{\sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{l}(\lambda_i)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda)}{\sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{m}(\lambda_i)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda)}{\sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{s}(\lambda_i)} \right)^2}}, \quad \text{ где } (1.22)$$

$\sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{m}(\lambda_i)$ – составляющие яркости приёмника L ; аналогично для M и S ;

N – число монохроматических излучений, создающих фон.

Необходимое количество линейно независимых цветных фонов, образованных из комбинаций монохроматических излучений можно определить согласно таблице 1.5.

Комбинации монохроматических излучений, образующих цветной фон

Количество добавляемых излучений	Возможные комбинации						
	1	λ_1					
2	λ_1	λ_2	$\lambda_1 + \lambda_2$				
3	λ_1	λ_2	λ_3	$\lambda_1 + \lambda_2$	$\lambda_3 + \lambda_2$	$\lambda_1 + \lambda_3$	$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$

Из таблицы 1.5 видно, что при использовании в качестве фона одного монохроматического источника, мы получаем одно уравнение с тремя неизвестными, которое не имеет однозначного решения.

При использовании двух монохроматических источников получаем шесть уравнений с шестью неизвестными значениями $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$. Учитывая, что в системе уравнений присутствуют еще неизвестные C_1 , C_2 и C_3 , система уравнений в этом случае, также не имеет однозначного решения.

Решить систему уравнений, состоящих из N уравнений (1.20), возможно при использовании в качестве фона излучений на трех (или более) длинах волн. При трех длинах волн число неизвестных в уравнении (1.20) равно 12, а число цветных фонов образованных разной комбинаций трех длин волн – 21 (по 7 для каждой длины волны).

Так, для монохроматического объекта с длиной волны излучения λ_1 образуется следующая система уравнений:

$$L_{eo1}^{th.dif}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_1) \cdot \bar{l}(\lambda_1)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_1) \cdot \bar{m}(\lambda_1)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_1) \cdot \bar{s}(\lambda_1)} \right)^2}}$$

$$L_{eo2}^{th.dif}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_2) \bar{l}(\lambda_2)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_2) \bar{m}(\lambda_2)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_2) \bar{s}(\lambda_2)} \right)^2}}$$

$$L_{\text{eo3}}^{\text{th.dif}}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_3)\bar{l}(\lambda_3)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_3)\bar{m}(\lambda_3)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_3)\bar{s}(\lambda_3)} \right)^2}} \quad (1.22)$$

$$L_{\text{eo4}}^{\text{th.dif}}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{l}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{l}(\lambda_2)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{m}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{m}(\lambda_2)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{s}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{s}(\lambda_2)} \right)^2}}$$

$$L_{\text{eo5}}^{\text{th.dif}}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{l}(\lambda_1) + L(\lambda_3)\bar{l}(\lambda_3)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{m}(\lambda_1) + L(\lambda_3)\bar{m}(\lambda_3)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{s}(\lambda_1) + L(\lambda_3)\bar{s}(\lambda_3)} \right)^2}}$$

$$L_{\text{eo6}}^{\text{th.dif}}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_2)\bar{l}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{l}(\lambda_3)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_2)\bar{m}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{m}(\lambda_3)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_2)\bar{s}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{s}(\lambda_3)} \right)^2}}$$

$$L_{\text{eo7}}^{\text{th.dif}}(\lambda_1) = \frac{C_1}{\sqrt{C_2 \left(\frac{\bar{l}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{l}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{l}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{l}(\lambda_3)} \right)^2 + C_3 \left(\frac{\bar{m}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{m}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{m}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{m}(\lambda_3)} \right)^2 + \left(\frac{\bar{s}(\lambda_1)}{L(\lambda_1)\bar{s}(\lambda_1) + L(\lambda_2)\bar{s}(\lambda_2) + L(\lambda_3)\bar{s}(\lambda_3)} \right)^2}}$$

Поскольку на этих фонах можно также наблюдать монохроматические цветные объекты с длинами волн λ_2 и λ_3 , то для каждой из них образуется по 7 аналогичных уравнений. Таким образом, такую систему уравнений можно решить методом «наименьших квадратов».

Методика по обнаружению монохроматического объекта на белом фоне благодаря меньшим временным затратам на эксперимент рекомендуется для набора статистики, а методика по обнаружению объекта на цветных фонах – для оценки погрешностей получаемых экспериментальных результатов.

2. РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Методика определения спектральных чувствительностей LMS

Методика определения спектральных чувствительностей LMS для трихромата состоит из двух этапов: получение экспериментальных значений $L_{eo}^{th.dif}(\lambda)$ и решение обратной задачи по поиску $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ с использованием выражения (1.20) [3,5]. Преимуществом данной методики является минимизация количество измерений для получения конечного результата. В каждой экспериментальной точке необходимо проводить только два измерения (яркости объекта и фона) вместо пяти при методике уравнивания цветностей. Это приводит к уменьшению итоговой погрешности.

Для реализации *первой части* разработанной методики была создана установка, которая позволяет проводить эксперименты по определению $L_{eo}^{th.dif}(\lambda)$ методом минимальных изменений.

На рисунке 2.1 приведены структурная схема и разные ракурсы $3d$ -модели экспериментальной установки, которая расположена в УИК ВНИСИ. Фотография собранной ЭУ представлена на рисунке 2.2.

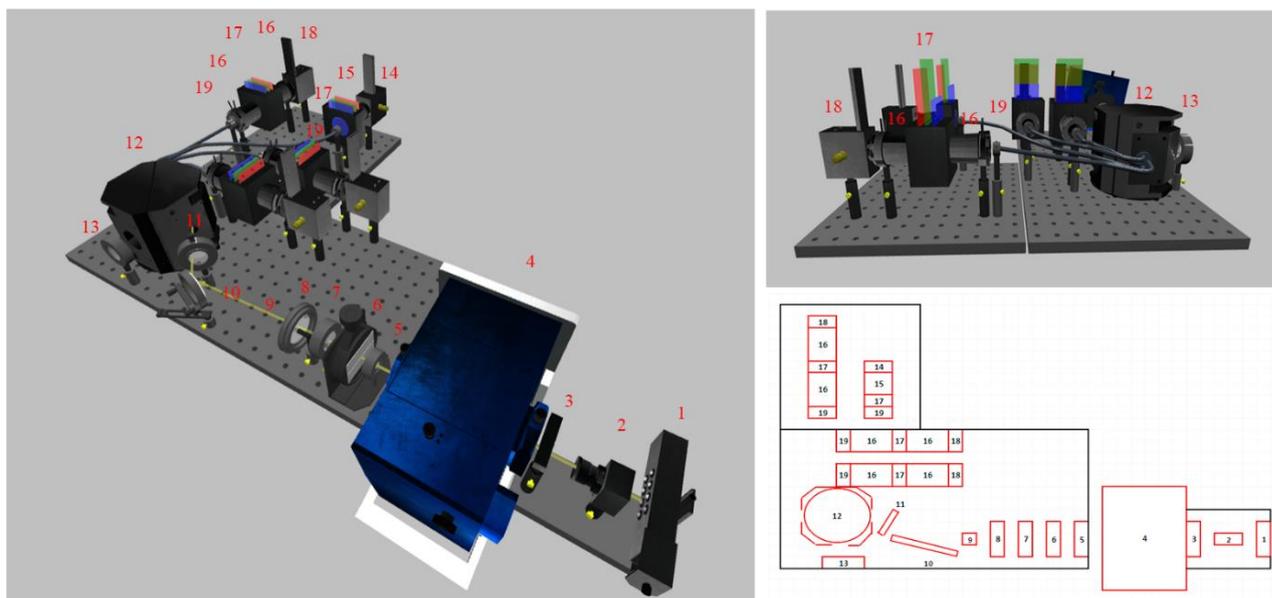


Рисунок 2.1 – Структурная схема и $3d$ -модель ЭУ

Установка состоит из следующих узлов (в скобках указаны номера позиций на рисунке 2.1):

- 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**).

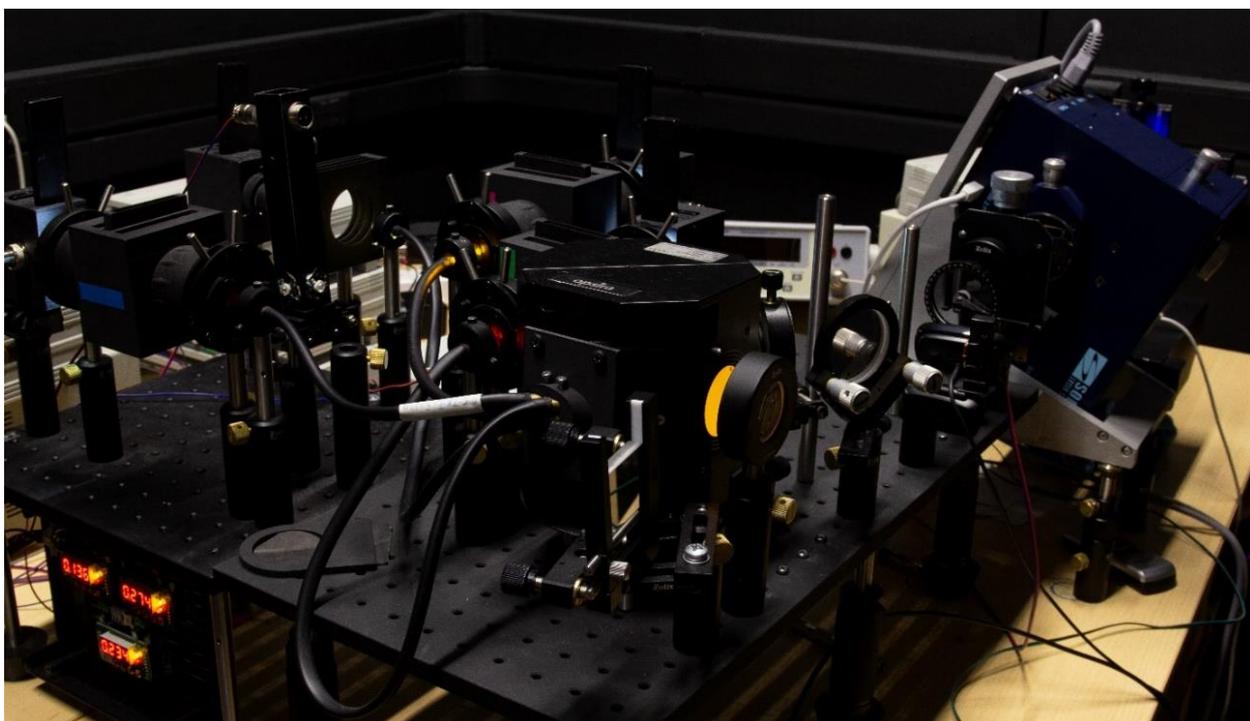


Рисунок 2.2 – Фотография собранной установки

В качестве ИС в канале объекта выбраны 6 цветных светодиодов мощностью по 5 Вт каждый, спектры излучения которых изображены на рисунке 2.3г. Изображение ИС с помощью конденсора (**2**) строится на входной щели двойного монохроматора *MSA-130* (**4**), выделяющего из спектра ИС необходимый диапазон длин волн. До достижения входной щели излучение проходит электромеханический затвор (**3**), который вместе с ориентирующими маркерами

уменьшают дисперсию ответов наблюдателей, связанную с поиском объекта в поле зрения и во время его наблюдения.

На выходе из монохроматора находится оптическая система (5-11), которая представляет собой последовательно расположенный и отъюстированный набор следующих оптических элементов: конденсор для освещения тест объекта (5), тест объект (6), коллиматорный объектив (7), фильтр для плавной регулировки яркости канала объекта (8), камера с ИК подсветкой для считывания в темноте шкалы фильтра (9), зеркало (10), объектив (11), создающий изображение двухградусного монохроматического объекта на стенке интегрирующей сферы.

Излучение в канале фона создается белым светодиодом, спектральная характеристика которого представлена на рисунке 2.3в. Поток от светодиода (14) собирается объективом (15), проходит цветной светофильтр (17) и собирается на входном торце осветительного волоконно-оптического жгута (ВОЖ) типа О-С (19), который передает излучение канала фона в фотометрическую сферу (12).

Изменение спектрального состава фонового излучения с монохроматическими источниками обеспечивает схема, в которой интерференционные фильтры (17) установлены в параллельном пучке лучей между двумя встречно работающими объективами (16). В качестве ИС используются те же светодиоды, что и в канале формирования объекта, излучение которых после прохождения объективов с фильтрами собирается на входном торце ВОЖ типа О-С (19).

Более полное описание экспериментальной установки и подробные характеристики элементов приведены в приложении 4, а на рисунке 2.3 представлены основные градуировки элементов ЭУ.

Градуировка канала объекта проводилась с помощью фотодиода, откалиброванного во ВГУП ВНИИОФИ по абсолютной токовой чувствительности в диапазоне 300-1100 нм. Для контроля световой яркости на выходе окуляра (13) использовался яркомер *Konica Minolta LS-110*.

Сначала на выбранных длинах волн измерялся ток фотодиода на выходе излучения из монохроматора, затем, полагая линейную зависимость между излучением на входе и выходе оптической схемы, яркомером измерялась яркость объекта на стенке фотометрической сферы.

С помощью механизма перемещения (1) было найдено положение светодиодов, при котором излучение, попадающее на входную щель монохроматора, имеет максимальное значение, и через окуляр наблюдается наибольшая равномерность изображения объекта. Входной ток светодиодов поддерживался постоянным и составлял, в зависимости от необходимой мощности излучения в канале, 500 мА, 600 мА или 700 мА соответственно.

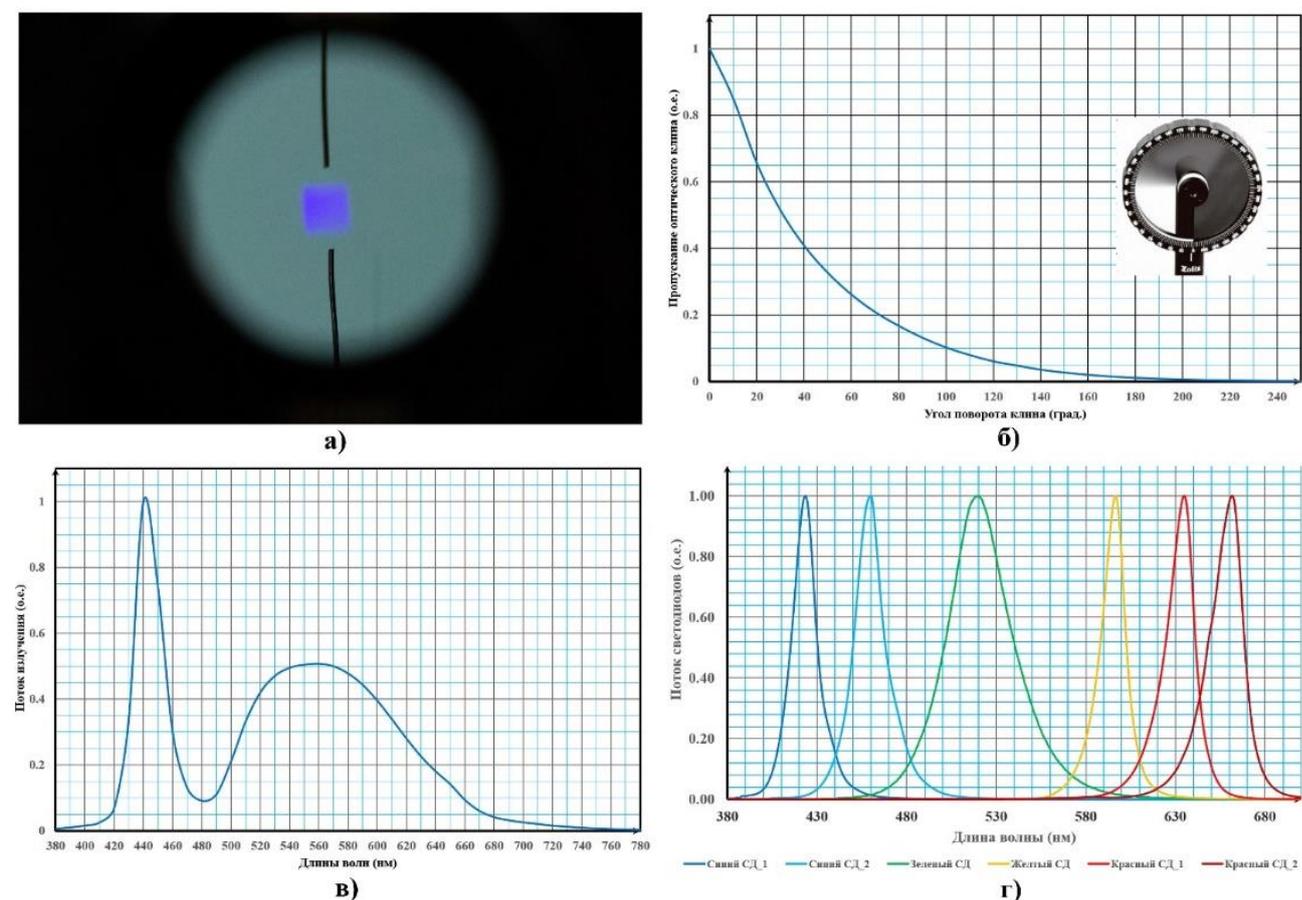


Рисунок 2.3 – Параметры элементов экспериментальной установки: **а)** Вид изображения через окуляр (13) установки; **б)** Зависимость коэффициента пропускания оптического диска от угла поворота относительно оси; **в)** Спектр излучения белого светодиода канала фона; **г)** Спектры излучения цветных светодиодов канала объекта

Результаты градуировки канала формирования изображения объекта при использовании всех 6 светодиодов, представлены в таблице 2.1.

Градуировка канала формирования изображения объекта

Длина волны	$V(\lambda)$	Поддаваемый на СД ток, мА	Ток ФД на выходе МХ, А	L_v , кд/м ²	L_e , Вт/м ² ср	Поддаваемый на СД ток, мА	Ток ФД на выходе МХ, А	L_v , кд/м ²	L_e , Вт/м ² ср	Поддаваемый на СД ток, мА	Ток ФД на выходе МХ, А	L_v , кд/м ²	L_e , Вт/м ² ср
435	0.0173	500	8.6E-07	0.041	0.00347	600	9.9E-07	0.048	0.00406	700	1.2E-06	0.056	0.00474
465	0.0755		2.0E-06	0.323	0.00626		2.3E-06	0.363	0.00704		2.5E-06	0.400	0.00776
525	0.7860		1.5E-06	3.228	0.00601		1.7E-06	3.543	0.00660		1.8E-06	3.800	0.00708
585	0.8135		5.7E-07	1.030	0.00185		6.1E-07	1.108	0.00199		6.2E-07	1.142	0.00206
630	0.2650		3.9E-06	2.030	0.01122		4.3E-06	2.250	0.01243		4.6E-06	2.390	0.01320
660	0.0610		3.0E-06	0.412	0.00989		3.5E-06	0.481	0.01155		4.0E-06	0.542	0.01301

Расчет перепада энергетической яркости монохроматического объекта на разных длинах волн производился с помощью градуировочного коэффициента:

$$I_{eo}^{th.dif}(\lambda) = \frac{\gamma(\lambda)}{\gamma(\lambda_g)} \cdot \frac{\Phi_{eo}(\lambda)}{\Phi_{eo}(\lambda_g)} \cdot \frac{\tau(\lambda)}{\tau(\lambda_g)} \cdot \frac{L_v^{th.dif}(\lambda_g)}{683V(\lambda_g)}, \text{ где} \quad (2.1)$$

λ_g – длина волны излучения, на которой проводилась градуировка; $\gamma(\lambda)$ и $\gamma(\lambda_g)$ – коэффициенты многократных отражений интегрирующей сферы; $\tau(\lambda)$ и $\tau(\lambda_g)$ – пропускание нейтрального поглощающего фильтра на данной длине волны; $\Phi_{eo}(\lambda)$ и $\Phi_{eo}(\lambda_g)$ – относительное спектральное распределение энергетического потока на данных длинах волн.

Проведение экспериментальных исследований. Для выявления отсутствия отклонений в цветовом зрении наблюдатель проходил проверку по цветовым таблицам Рабкина Е.Б. [63], затем обучался работе на ЭУ и проводил исследования по обнаружению монохроматических объектов на цветном фоне методом едва заметного различия.

Вначале эксперимента проводилась темновая адаптация в течение пятнадцати минут, а затем на яркость, равную 11 кд/м², в течение трех минут. Такие

времена были выбраны по критерию стабильности получаемых результатов при проведении многочисленных предварительных экспериментов.

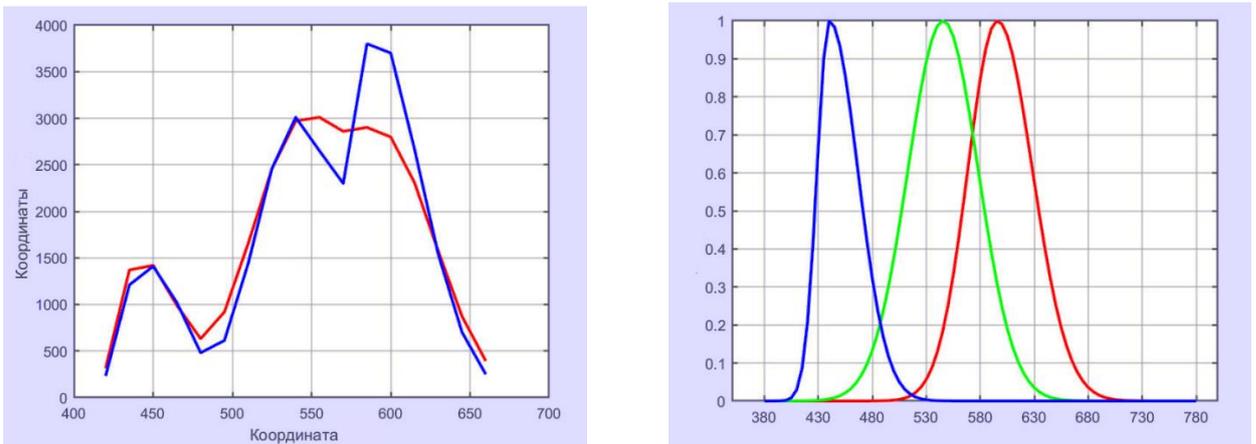
После этого на каждой из установленных длин волн предъявлялась ситуация «на появление» объекта с начальным положением оптического клина (8), соответствующим наименьшему пропусканию излучения, и фиксацией его положения при обнаружении объекта.

Все результаты оформлялись протоколом на листе программы *Excel*, пример которого приведен в приложении 5, в нем же проводился расчет перепада энергетической яркости монохроматического объекта $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ по выражению (2.1). С увеличением числа измерений рассчитывалось СКО $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$. Набор статистики заканчивался, когда относительное СКО (σ_L) становилось меньше 7%.

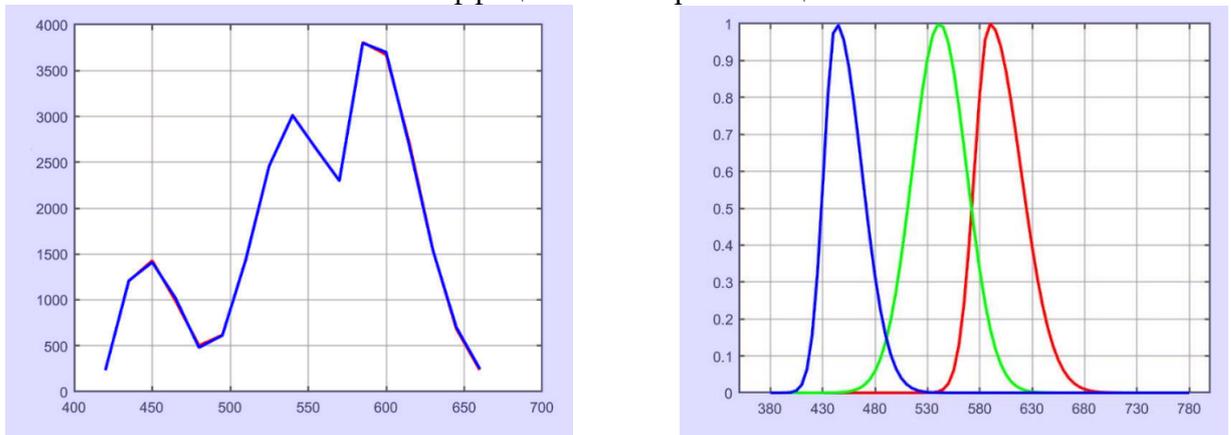
Обработка экспериментальных результатов. Для реализации *второй* части методики - определения $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ путем решения системы уравнений (1.20), было разработано программное обеспечение, реализующее метод «наименьших квадратов» с помощью алгоритма «плавающей сетки».

В качестве «невязки» для решения системы уравнений используется сумма квадратов разностей между экспериментально полученными значениями $L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ и значениями, рассчитанными по формуле (1.20) для тех же длин волн. При выбранном начальном значении параметров, первоначально заданном шаге по первому коэффициенту аппроксимации, вычисляется «невязка» при трех значениях этого коэффициента: несмещенном, со смещением на шаг и со смещением на минус шаг. Затем запоминается минимальное значение СКО, после чего коэффициент аппроксимации возвращается в начальное положение, и программа переходит к следующему коэффициенту аппроксимации. После прохождения всех коэффициентов узел сетки перемещается в точку, соответствующую минимальному из всех минимальных значений СКО. Таким образом, шаг сетки происходит по тому коэффициенту, который лучше остальных уменьшает СКО (имеет наименьшую остаточную сумму).

Пример результатов расчета приведен на рисунке 2.4.



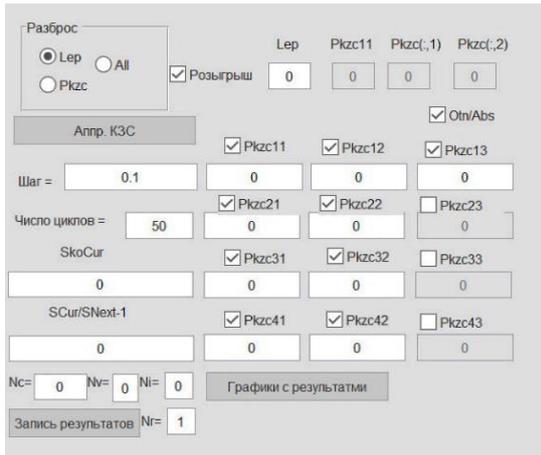
Результаты расчета слева - $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ (красный график) и экспериментальные данные (синий график) и справа - расчетные значения $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ при начальных оценках коэффициентов аппроксимации



Результаты расчета слева - $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ (красный график) и экспериментальные данные (синий график, заслоняет красный) и справа - расчетные значения $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$ в конце аппроксимации

Рисунок 2.4 – Результаты расчета

На рисунке 2.5 представлены: графический интерфейс ПО с описанием работы элементов и алгоритм работы в виде блок-схемы.



Графический интерфейс программы:

Кнопка "Аппр. КЗС" запускает работу программы аппроксимации и выводит диалоговое окно с выбором файлов;

Окно *SkoCur* - показывает текущее значение остаточной суммы разности квадратов исходного и расчетного $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$;

Окно *SCur/SNext-1* - показывает отличие от единицы двух последовательных значений СКО;

Окно *Nc* - показывает текущее значение номера цикла расчета;

Окно *Nv* - показывает текущее значение внутреннего цикла по уменьшению исходного шага;

Окно *Ni* - показывает текущее значение внешнего цикла по уменьшению исходного шага.

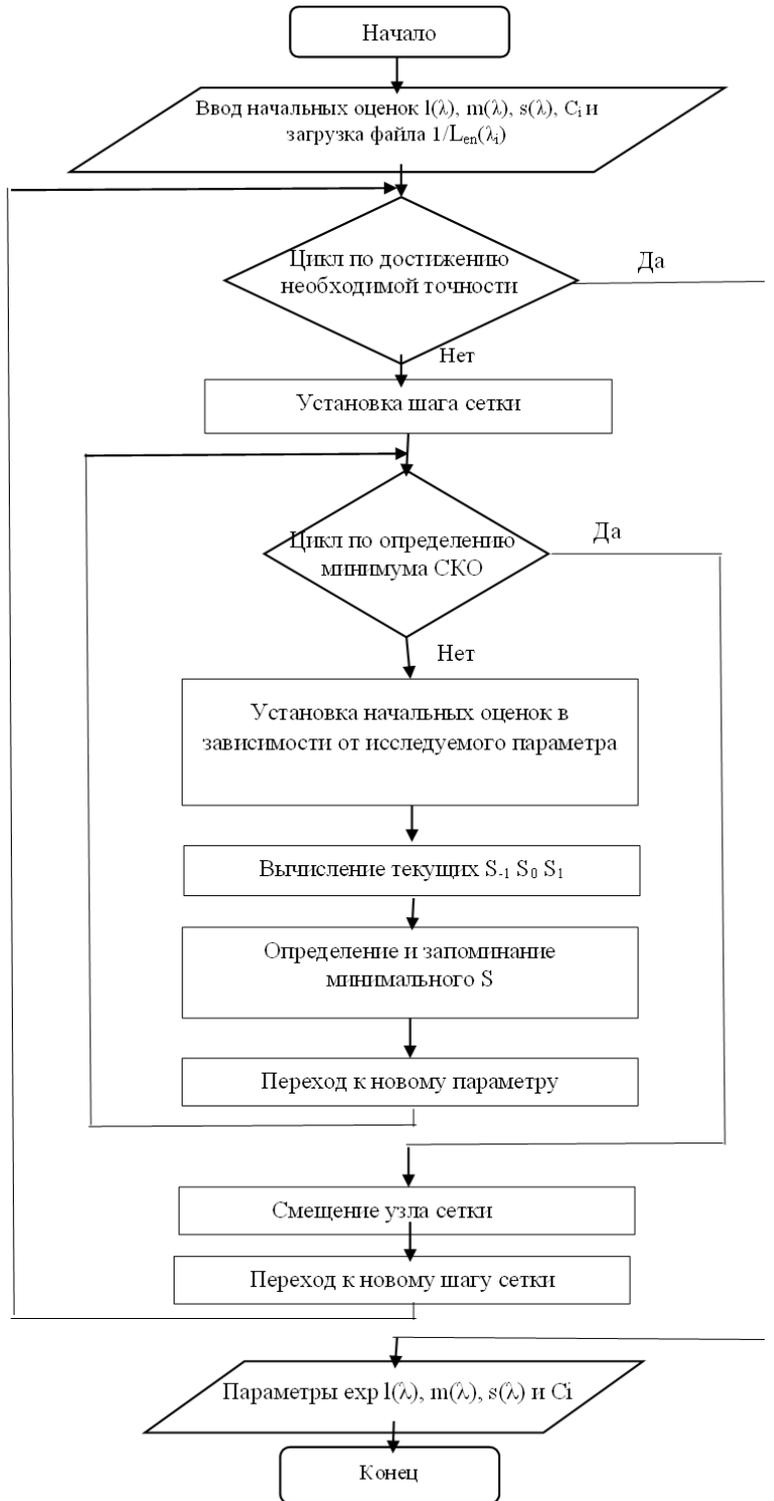


Рисунок 2.5 – Информация о разработанном ПО

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

$$f_{\text{int}}^l(\sigma_L) = \frac{\int_{380}^{780} |\bar{l}(\lambda) - \bar{l}_c(\lambda)| d\lambda}{\int_{380}^{780} \bar{l}(\lambda) d\lambda}, \text{ где} \quad (2.2)$$

$\bar{l}_c(\lambda)$ 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 $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$.

Функции $f_{\text{int}}^m(\sigma_L)$ и $f_{\text{int}}^s(\sigma_L)$ для $\bar{m}(\lambda)$ и $\bar{s}(\lambda)$ вычисляются по аналогичным выражениям.

2.2. Исследование влияния погрешности задания исходных данных на результаты расчета *LMS*

Параметры *LMS* связаны с измеряемыми в эксперименте значениями яркости сложными интегро-дифференциальными зависимостями, поэтому получить аналитическое выражение для погрешности получаемых параметров не представляется возможным. В этом случае оценку погрешности можно получить методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Поскольку погрешности измерений носят случайный характер, то, проводя многовариантные расчеты со случайными значениями параметров, можно оценить их влияние на конечный результат.

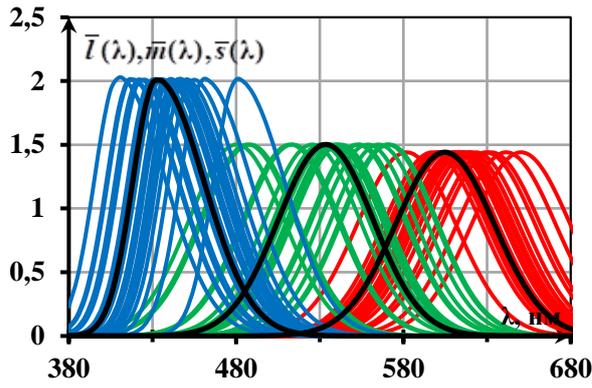
Как было сформулировано выше, методика измерений состоит из двух этапов, поэтому, помимо определения погрешности самой ЭУ, необходимо определить допустимые отклонения начальных оценок и подгружаемых экспериментальных данных, обеспечивающих сходимость метода «наименьших квадратов» к истинным значениям с допустимой погрешностью. Программная реализация метода Монте-Карло была создана в среде *Guide Matlab* и представлена на рисунке 2.5.

Блок ключей управления «Разброс» позволяет проводить расчеты при разбросе по нормальному закону распределения значений $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ (Lep) и до 12 параметров аппроксимации $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ (Pkc11 ÷ Pkc 43). Значения СКО разброса параметров $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda) - \lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}, \sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ и $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i) - \sigma_L$ вводятся в окна редактирования (Lep) блока «Розыгрыш» и окнах рядом с ним. Дополнительное окно « Otn/Abs » позволяет вести расчеты с использованием остаточной суммы квадратов разностей в абсолютных и относительных единицах.

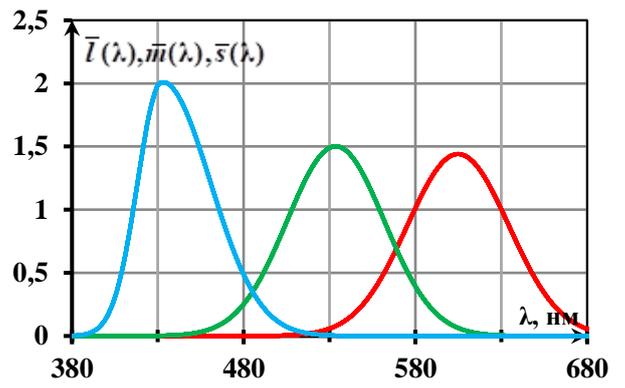
Были проведены исследования погрешностей определения параметров $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ и $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ при случайном разбросе тестовых оценок параметров $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$.

Для проведения исследования разброс значений начальных оценок параметров экспонент проводился по нормальному закону распределения с различными СКО относительно их тестовых значений (рисунки 2.6 – 2.10). В качестве тестовых значений $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ задавались данные из статьи [58]. После этого решалась система уравнений (1.20) и определялись расчетные $\bar{l}_c(\lambda), \bar{m}_c(\lambda), \bar{s}_c(\lambda)$, определяемые выражениями (1.20). Затем рассчитывались отклонения $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ и $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ относительно их истинных (тестовых) значений, а также интегральный критерий отличия кривых (2.2).

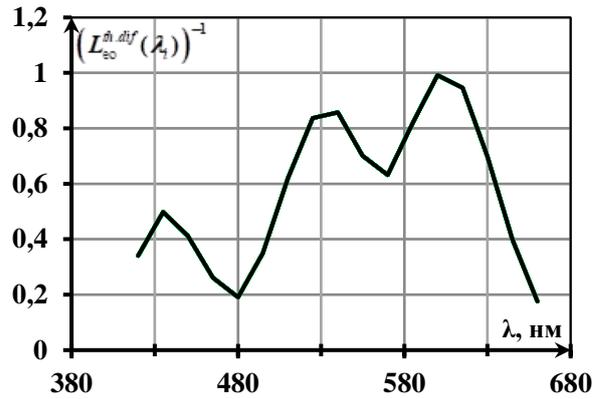
Как показывают результаты расчета, при СКО равном 4% метод «наименьших квадратов» сходится для всех случайных смещений $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ относительно значений, для которых была рассчитана исходная зависимость $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ (рисунке 2.6в), поэтому зависимость $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$, полученная в ходе решения (рисунок 2.6г), совпадает с исходной. При увеличении смещения начинают возникать ошибки аппроксимации, связанные с наличием локальных минимумов остаточной суммы квадратов разностей расчетной и исходной $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$.



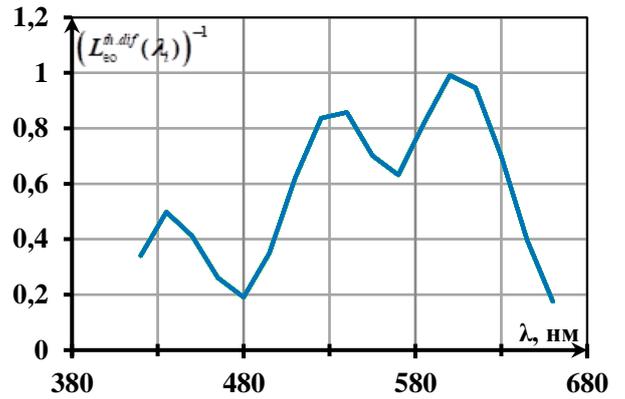
а) реализации УКЦ с различными $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$



б) полученные в результате решения УКЦ



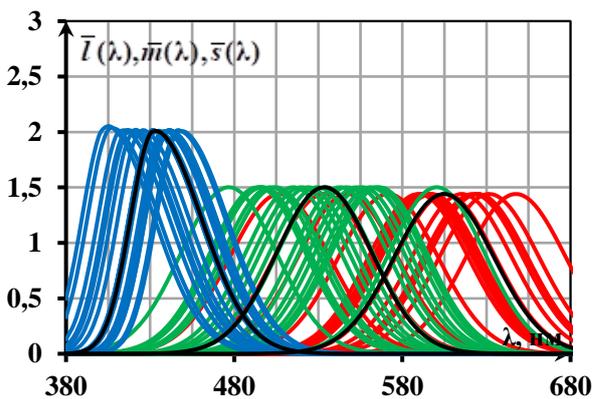
в) исходная $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$, соответствующая исходным УКЦ



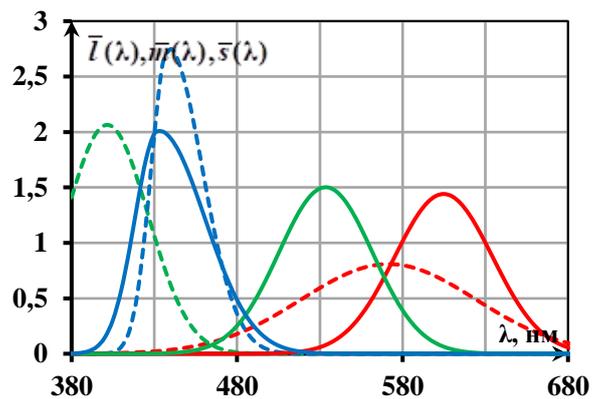
г) $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$, соответствующая концу решения

Рисунок 2.6 – Расчеты УКЦ с СКО разброса начальных оценок λ_m равным 4%

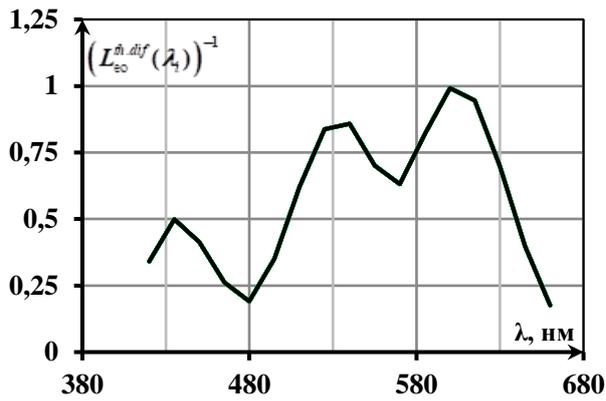
На рисунке 2.7 приведены результаты моделирования нахождения $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ при СКО равном 5%.



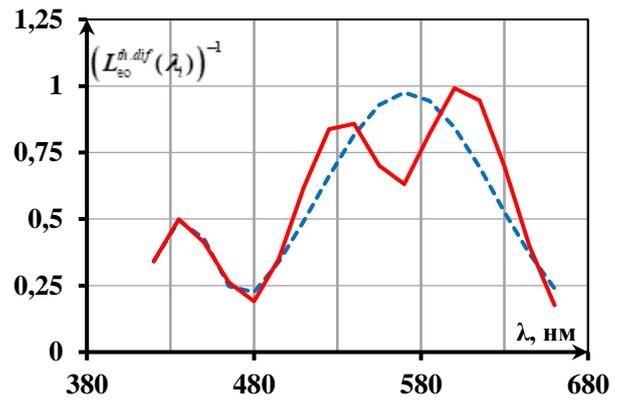
а) реализации УКЦ с различными $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$



б) полученные в результате решения УКЦ



в) исходная $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$, соответствующая исходным УКЦ

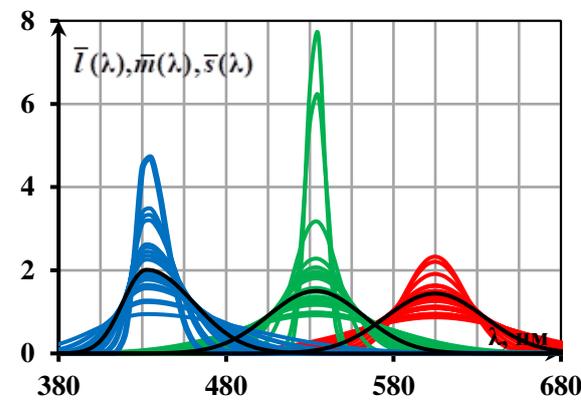


г) $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$, соответствующая концу решения

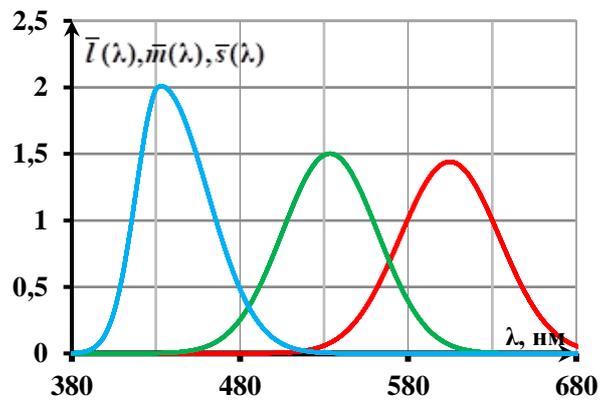
Рисунок 2.7 – Расчеты УКЦ с СКО разброса начальных оценок λ_m равным 5%

Как показывают приведенные результаты, при СКО разброса начальных оценок λ_m равным 5% метод «наименьших квадратов» начинает давать сбои в одном случае из 20.

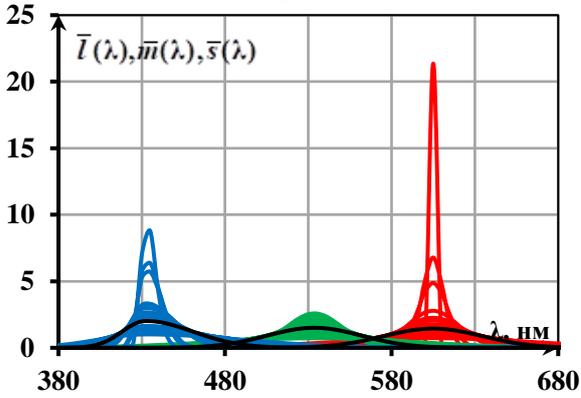
Результаты исследования устойчивости алгоритма решения системы уравнений (1.20) при неточном задании $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ приведены на рисунке 2.8.



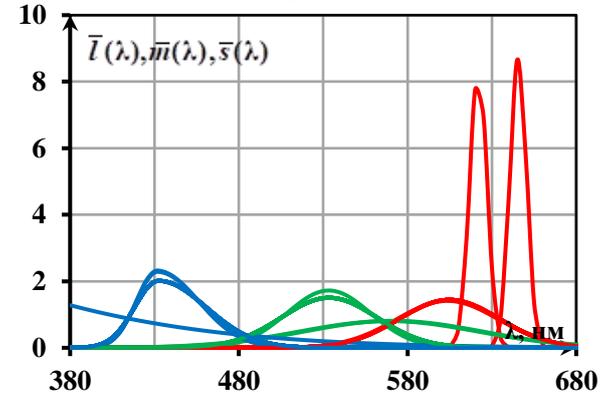
а) исходные УКЦ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 40\%$



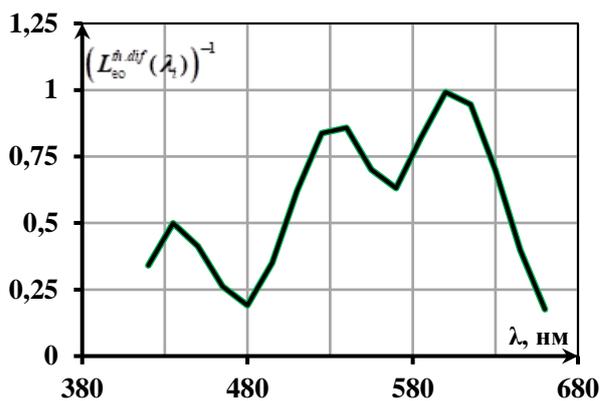
б) расчетные УКЦ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 40\%$



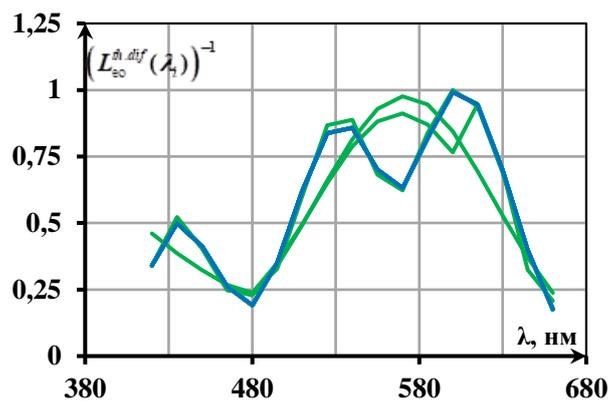
в) исходные УКЦ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 50\%$



г) расчетные УКЦ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 50\%$



д) исходные $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 50\%$



е) расчетные $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$ при СКО $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s = 50\%$

Рисунок 2.8 – Расчеты УКЦ и $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$ с разными СКО разброса начальных оценок $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$

Полученные результаты показали, что неточность задания начальных оценок до 40% практически не влияет на погрешность получаемых значений параметров аппроксимации, т.к. в этих случаях (рисунок 2.8а) решение всегда сходится к истинным значениям (рисунок 2.8б). Дальнейшее увеличение неточности начальных оценок приводит к появлению ложных решений (рисунки 2.8в – 2.8е).

Более подробные результаты расчетов влияния отклонений параметров УКЦ от истинных значений приведены на диаграммах рисунков 2.12 – 2.13.

К принципиально неустранимым погрешностям определения параметров УКЦ относится погрешность экспериментального определения $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$, которая характеризуется относительным СКО - σ_L . Поскольку σ_L убывает обратно пропорционально \sqrt{N} , то необходимо определить ее допустимое значение, что позволит определить необходимое число измерений порогового значения $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ в каждой экспериментальной точке.

На рисунках 2.9 – 2.10 приведены результаты расчетов УКЦ при двух значениях σ_L . В этих расчетах начальные оценки $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ и $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ совпадали с тестовыми значениями, а значения $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ разбрасывались относительно тестовых значений по нормальному закону распределения с СКО равной $\sigma_L \cdot L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$.

Расчеты показали, что погрешность определения параметров УКЦ резко возрастает при $\sigma_L > 30\%$, однако, уже при $\sigma_L = 10\%$ она достигает 15%, что вдвое превышает погрешности поддержания фотометрических параметров ЭУ и не является оптимальным при проведении экспериментов.

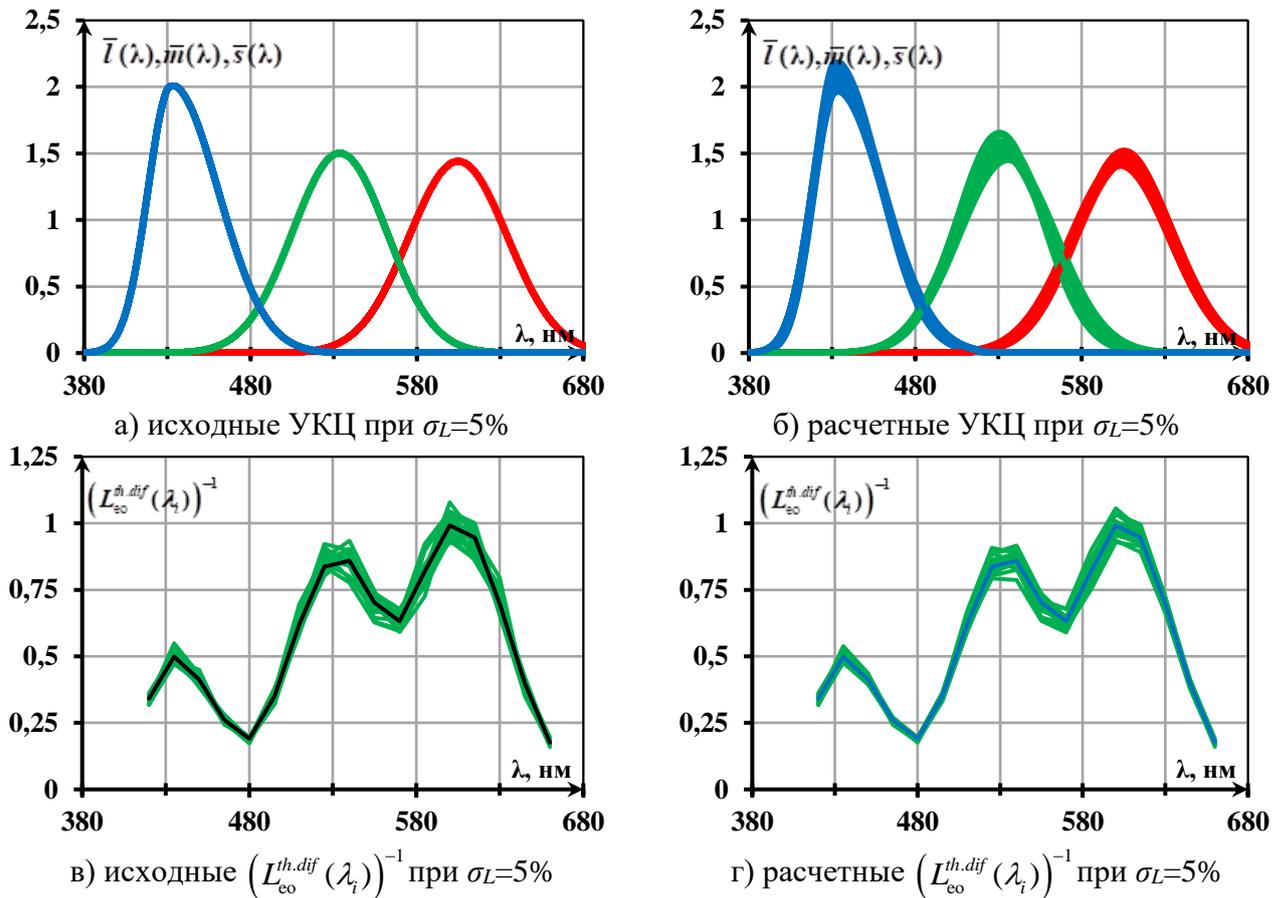
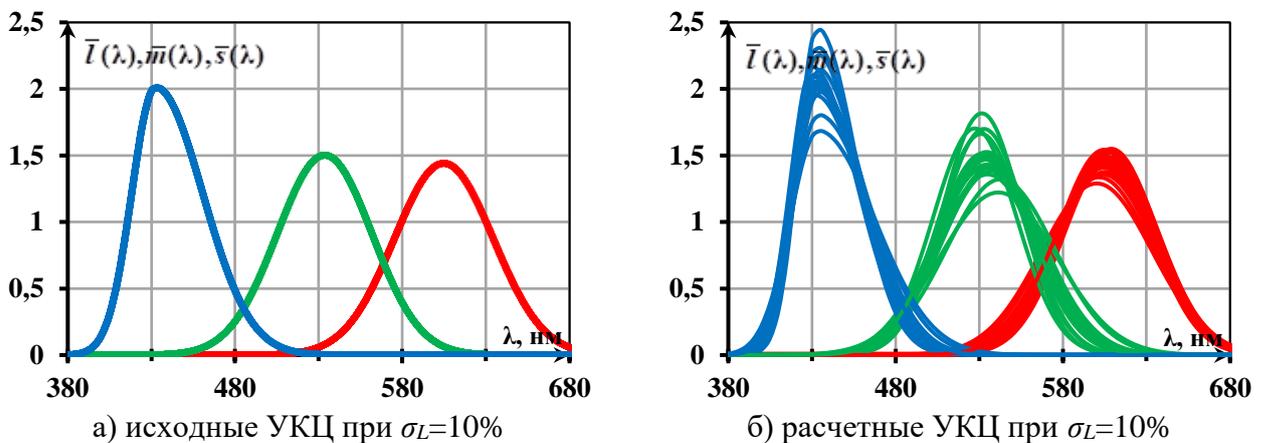
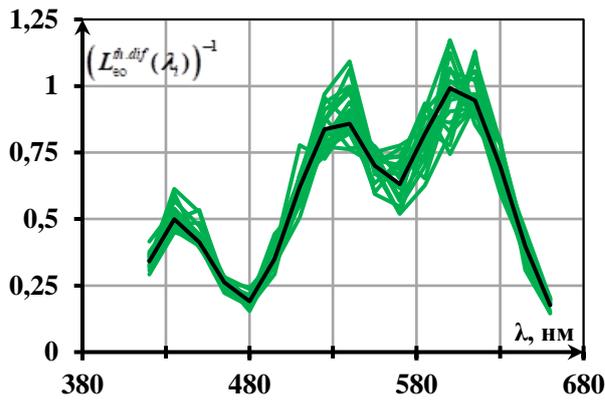
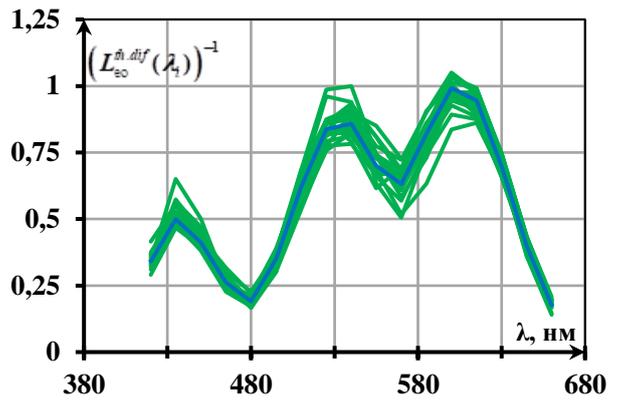


Рисунок 2.9 – Результаты расчетов УКЦ и $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ при значениях $\sigma_L = 5\%$





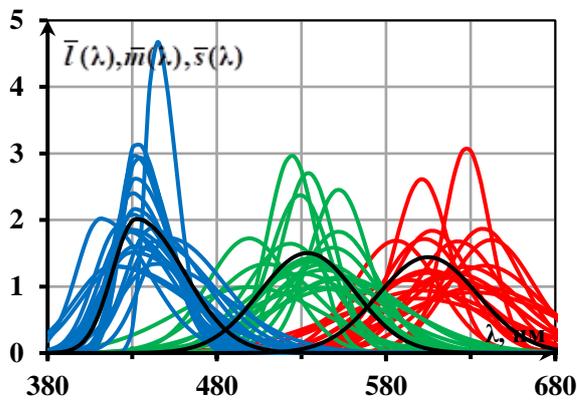
в) исходные $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ при $\sigma_L=10\%$



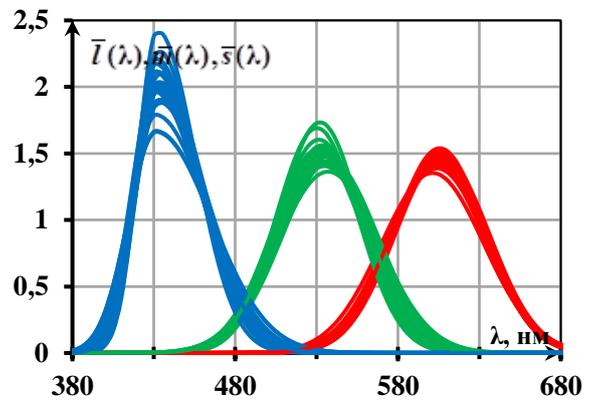
г) расчетные $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ при $\sigma_L=10\%$

Рисунок 2.10 – Результаты расчетов УКЦ и $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ при значениях $\sigma_L = 10\%$

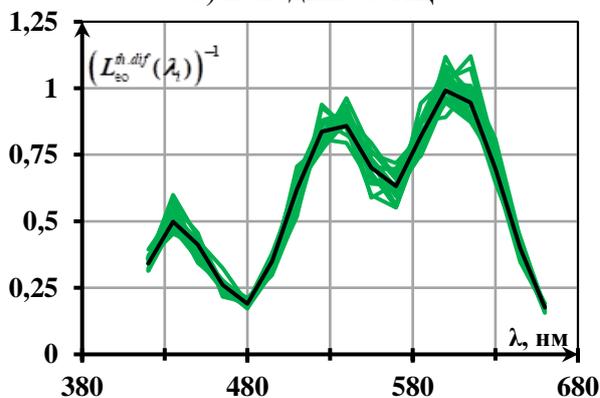
При совместном воздействии всех факторов: погрешности измерения $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ и неточности задания начальных оценок $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ и $\sigma_b, \sigma_m, \sigma_s$, область устойчивой работы программы решения системы уравнений (1.20) может измениться. На рисунке 2.11 приведены результаты расчета УКЦ с СКО $\sigma_b, \sigma_m, \sigma_s = 30\%$, СКО $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm} = 3\%$ и $\sigma_L = 7.5\%$.



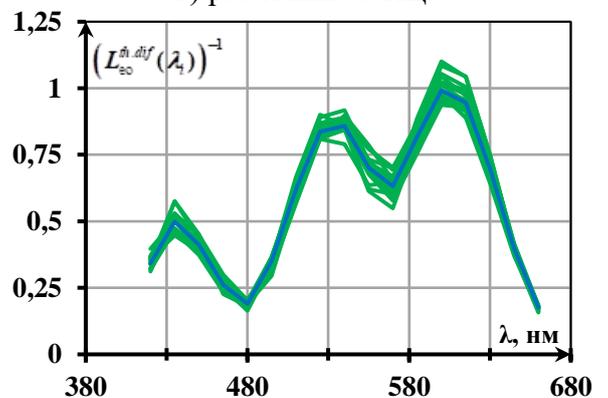
а) исходные УКЦ



б) расчетные УКЦ



в) исходные $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$



г) расчетные $(L_{\text{co}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$

Рисунок 2.11 – Результаты расчетов УКЦ с СКО $\sigma_b, \sigma_m, \sigma_s = 30\%$, СКО $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm} = 3\%$ и $\sigma_L = 7.5\%$

Учитывая, что воздействие неточности начальных оценок параметров УКЦ и погрешности определения $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ могут носить разнонаправленный характер, отличие полученных УКЦ от тестовых функций целесообразно оценивать с помощью ИКО, определяемого выражением (2.2). Поскольку значение интегрального критерия пропорционально площади отличия эталонных и рассчитанных УКЦ (рисунок 2.14а), то это значение коррелирует с влиянием на зависимости $\bar{l}_c(\lambda), \bar{m}_c(\lambda), \bar{s}_c(\lambda)$ смещения $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}, \sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ и $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ относительно тестовых значений.

Многовариантные расчеты (более 500) с решением системы уравнений (1.20) при использовании тестовых $\bar{l}_c(\lambda), \bar{m}_c(\lambda), \bar{s}_c(\lambda)$ позволяют сделать следующие **выводы** по методике использования разработанного ПО:

1. Отличие начальных оценок параметров $\lambda_{lm}, \lambda_{mm}, \lambda_{sm}$ от полученных в ходе решения системы уравнений (1.20) не должно превышать 4%, т.е. 15 – 30 нм на краях видимого диапазона спектра;
2. Отличие начальных оценок параметров $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ от полученных в ходе решения системы уравнений (1.20) не должно превышать 40%, т.е. 20 нм для σ_s и 30 нм для σ_l, σ_m .

Если при решении системы (1.20) отличия начальных оценок и полученного решения выходят за границы указанных интервалов, то полученное решение берется в качестве новых начальных оценок и решение системы (1.20) повторяется.

Как показывают многовариантные расчеты, примеры которых приведены на рисунках 2.6, 2.8а, 2.8б, все 20 решений в каждой серии расчетов после разброса начальных параметров $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ и $\sigma_l, \sigma_m, \sigma_s$ совпадают, значит сходимость метода «наименьших квадратов» в этих случаях не хуже 95%.

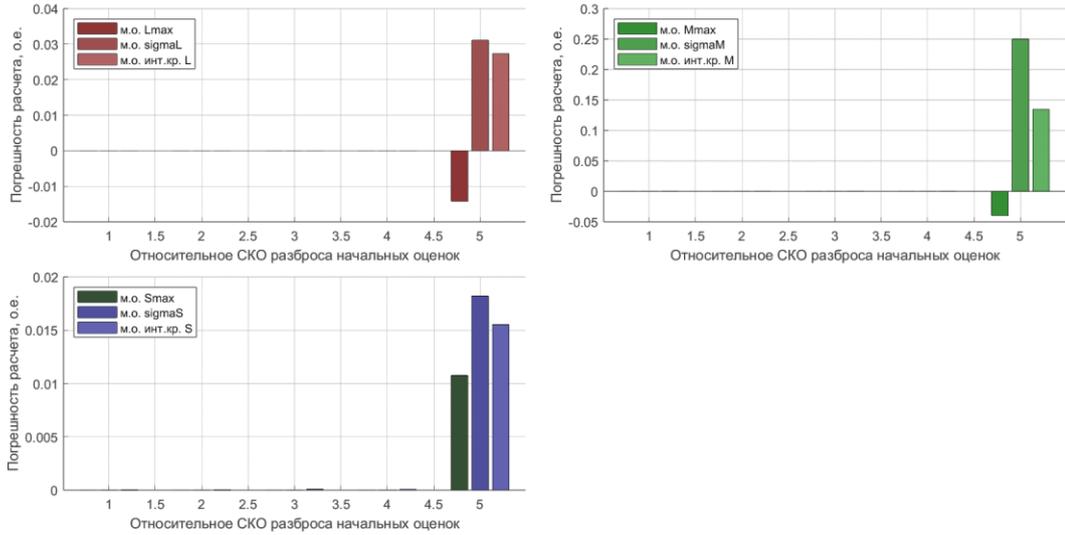


Рисунок 2.12 – Зависимость ошибки аппроксимации от разброса начальных оценок λ_{lm} , λ_{sm}

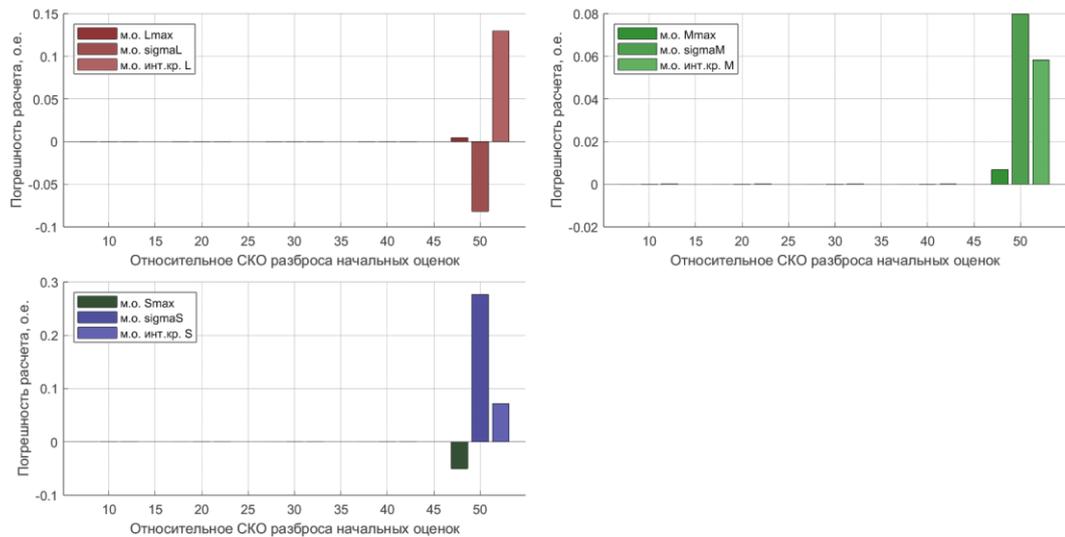
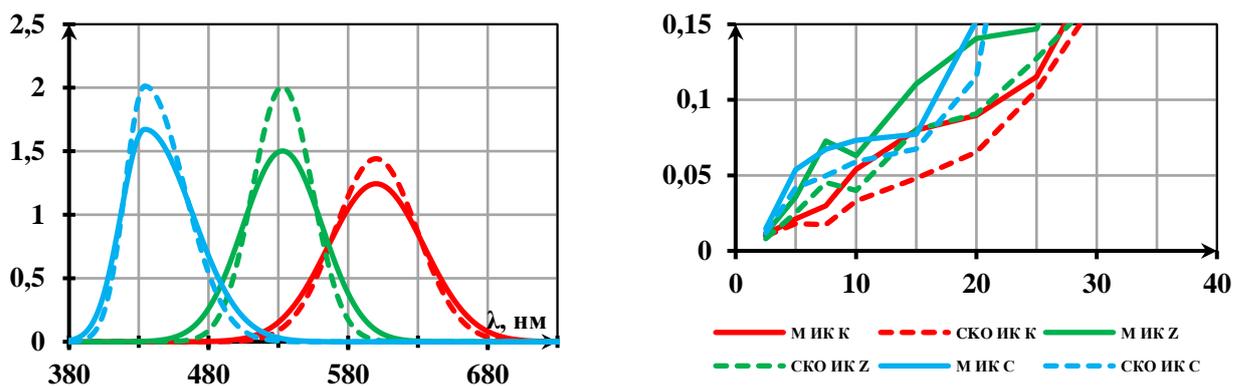


Рисунок 2.13 – Зависимость ошибки аппроксимации от разброса начальных оценок σ_l , σ_s

Как отмечалось ранее, при появлении погрешности в исходных значениях $L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i)$ параметры и зависимости $\bar{l}_c(\lambda)$, $\bar{m}_c(\lambda)$, $\bar{s}_c(\lambda)$, определяются неточно. На рисунке 2.14б приведена зависимость интегрального критерия ошибки от величины σ_L .



а) К расчету интегрального критерия ошибки б) Зависимость интегрального критерия от σ_L

Рисунок 2.14 – Влияние σ_L на интегральный критерий ошибки

Согласно материалам, приведенным в [56], природный (естественный) разброс характеристик зрительной системы по множеству наблюдателей составляет 15 – 25%. 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 $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ можно получить из уравнения:

$$0.1 = \sqrt{(\delta_{\text{ЭУ}})^2 + (\sigma_L)^2}, \text{ где} \quad (2.3)$$

$\delta_{\text{ЭУ}} = 0.071$ – относительная погрешность градуировки ЭУ и поддержания неизменными ее фотометрических характеристик, определяемая классами точности измерительных приборов и временной стабильностью характеристик светодиодных источников, использованных в ЭУ.

$$\left. \begin{aligned} 0.1 &= \sqrt{(0.071)^2 + (\sigma_L)^2} \\ \sigma_L &= 0.07 = 7\% \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Как уже отмечалось, данный результат может быть получен путем увеличения числа N многократных измерений $L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$, поскольку эта составляющая погрешности убывает обратно пропорционально \sqrt{N} .

2.3. Результаты экспериментального исследования энергетических перепадов яркости объект-фон

Измерение $L_{\text{ео}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i)$ проводилось по методике, описанной в разделе 2.1.

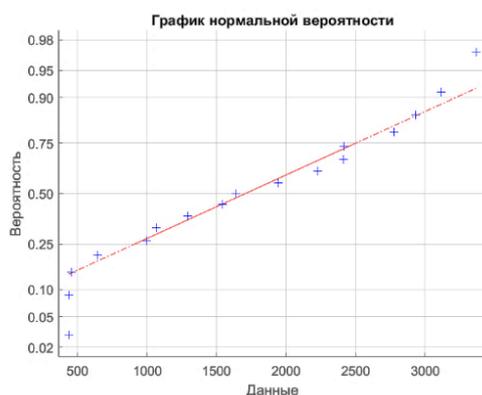


Рисунок 2.15 – Пример оценки нормальности распределения

Полученные экспериментальные результаты были проверены по критерию согласия Пирсона на принадлежность полученных значений к нормальному закону распределения (рисунок 2.15).

Сами результаты представлены в таблице 2.2 и на рисунке 2.16.

Таблица 2.2

Экспериментальные зависимости $(L_{\text{ео}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$ для 10 трихроматов

λ нм	Н1	Н2	Н3	Н4	Н5	Н6	Н7	Н8	Н9	Н10	СКО/ $(L_{\text{ео}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$	$(L_{\text{ео}}^{\text{th.dif}}(\lambda))^{-1}$
420	238	318	217	194	272	455	193	220	190	159	0.3520	246
435	703	881	1258	1808	1750	1293	707	1489	1171	1108	0.3201	1217
450	823	1105	1292	2386	2119	1543	661	1794	1517	1334	0.3708	1457
465	519	998	1004	1357	1893	996	487	1244	1126	1058	0.3759	1068
480	495	797	548	673	911	438	300	641	635	578	0.2901	602
495	1139	912	702	526	778	644	685	960	689	756	0.2286	779
510	1900	1551	1582	1084	1368	1637	1628	1887	1964	1549	0.1638	1615
525	2799	2442	2765	1975	2303	2415	2739	3056	3100	2265	0.1408	2586
540	3691	3126	3088	2159	3218	3114	4084	4141	3683	3640	0.1719	3394
555	3792	2920	2669	1983	3293	3367	4303	4143	3836	3361	0.2097	3367
570	3473	2275	2591	1679	2405	2411	4110	3232	3328	3094	0.2491	2860
585	3328	2051	3357	1982	2009	2227	4232	1672	2889	4029	0.3310	2777
600	2961	2413	2842	2487	2160	2934	3428	966	2959	3767	0.2852	2692
615	2186	1752	2485	2242	1829	2776	1512	865	2336	2775	0.2874	2076
630	1094	1648	1933	1979	1617	1943	609	503	1092	1852	0.3934	1427
645	388	1233	1047	1075	1088	1066	174	368	362	832	0.5177	763
660	104	981	550	614	672	437	26	171	80	307	0.7902	394

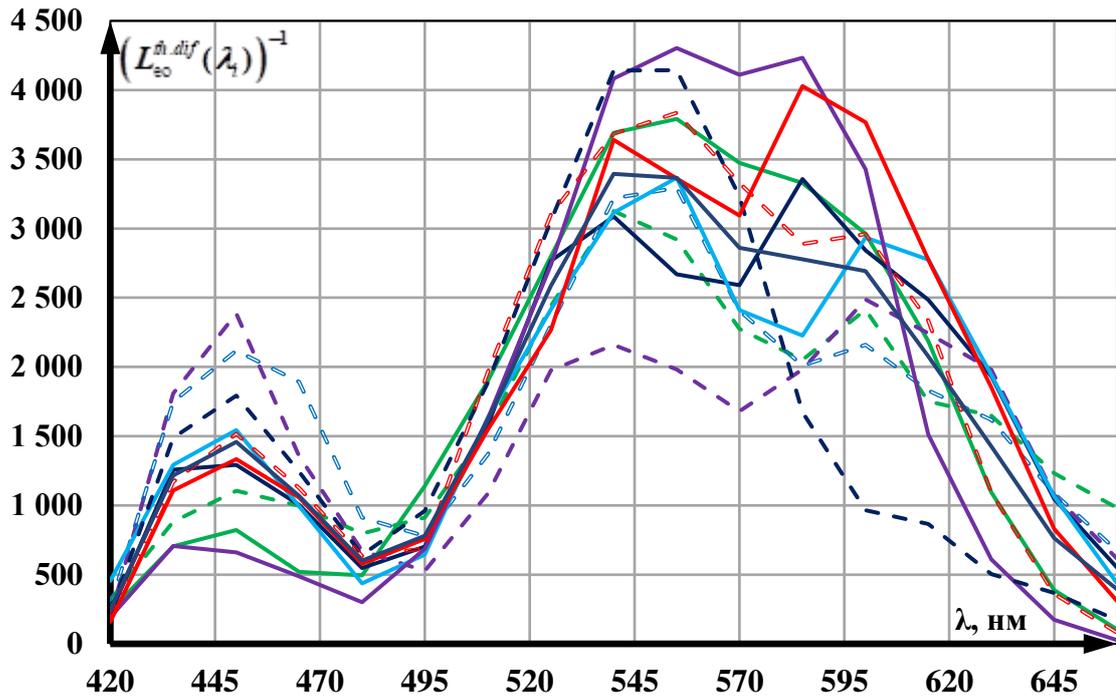


Рисунок 2.16 – Экспериментальные зависимости $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda_i))^{-1}$ для 10 трихроматов

В таблице 2.3 приведены полученные значения коэффициентов аппроксимации для всех 10 наблюдателей и их значения для средней $(L_{eo}^{th.dif}(\lambda))^{-1}$, а на рисунке 2.17 построены СЧР этих наблюдателей в относительных единицах.

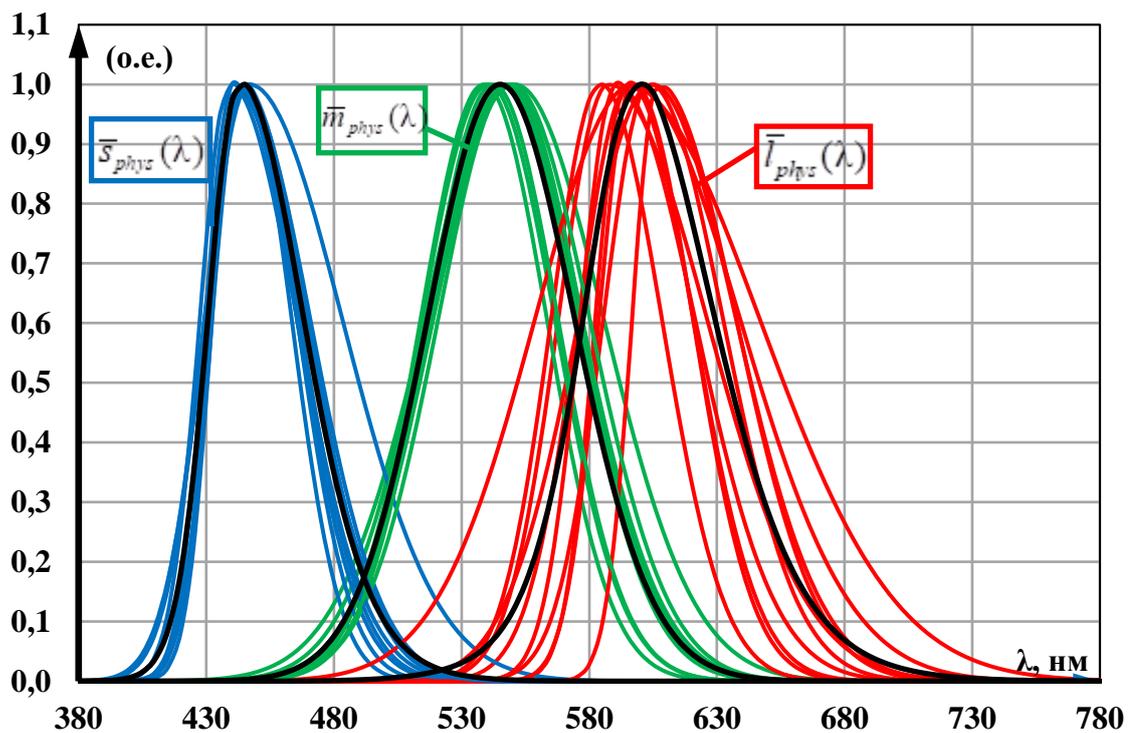


Рисунок 2.17 – СЧР 10 наблюдателей и усредненные значения (черные линии)

Значения коэффициентов аппроксимации для 10 наблюдателей

№ Набл./Параметр	λ_m	λ_{mm}	λ_{sm}	σ_l	σ_m	σ_s	C_1	C_2
1	595.8	550.7	444.9	28.4	49.5	22.0	1.24	1.19
2	594.1	546.2	446.6	16.6	43.6	23.7	4.50	2.19
3	587.5	538.7	440.2	27.8	35.0	14.7	1.97	2.72
4	604.5	540.4	442.1	40.4	36.9	14.0	1.16	2.37
5	596.8	547.9	443.3	18.3	41.4	15.9	3.27	2.43
6	603.6	546.4	445.2	25.7	40.5	22.6	1.59	1.28
7	584.4	549.0	439.0	27.3	39.9	16.4	1.25	2.30
8	606.8	546.3	442.5	14.2	41.4	15.4	3.07	2.21
9	597.5	542.3	444.0	54.8	36.1	16.5	0.60	2.21
10	590.5	549.5	442.4	20.0	43.3	15.1	2.19	2.51
Усредненное значение	593.84	548.03	443.11	23.53	43.14	17.11	2.01	2.11

В приложении 5 приведены значения погрешности аппроксимации, а на рисунке 2.18 для всех исследованных наблюдателей дано визуальное представление сводной статистики для выборки данных.

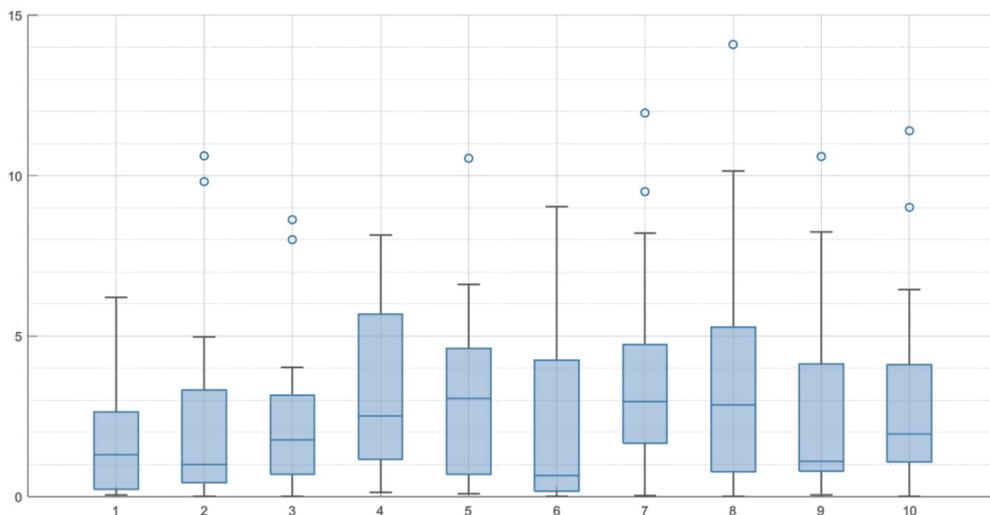
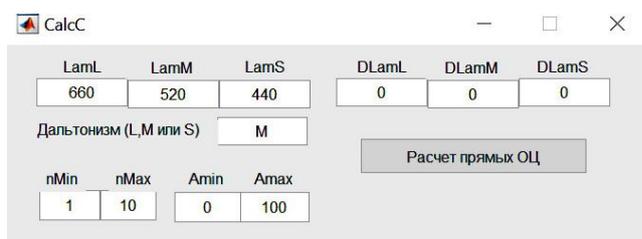


Рисунок 2.18 – График содержит следующую информацию: медиану, нижний и верхний квартили (границы прямоугольников), выбросы (отмечены кругами), а также минимальные и максимальные значения

Средняя погрешность аппроксимации экспериментально полученных значений $(L_{\text{eo}}^{\text{th.dif}}(\lambda_i))^{-1}$ не превышает 6%, следовательно погрешность определения $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ меньше 10%.

2.4. Разработка физиологической колориметрической системы $(LMS)_N$

После определения средних спектральных зависимостей $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$, значения которых в относительных единицах приведены на рисунке 2.19 черным цветом, необходимо установить их корреляцию со стандартом МКО – колориметрическими системами **RGB** и **XYZ** 1931 года.



Графический интерфейс программы

Окна «LamL», «LamM», «LamS» - длины волн, на которых берутся СЧР при расчете прямых, дающих цветности, неразличимые «дихроматами» при отключении одного из рецепторов

Рисунок 2.19 – Графический интерфейс ПО расчета координат цвета в КС **XYZ** по заданным $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, $\bar{s}(\lambda)$

Алгоритм ПО, которое моделировало искусственных «дихроматов» с использованием СЧР трихроматов, основан на упомянутом в первом разделе уравнивании цветов дихроматами. Пример работы ПО приведен на рисунке 2.20. Задавая нулевую чувствительность одного из рецепторов, возможно получить соответствующие координаты цветности ОЦ. Для всех 10 исследованных наблюдателей и для усредненного наблюдателя были рассчитаны эти координаты в системе **XYZ** (рисунок 2.21а).

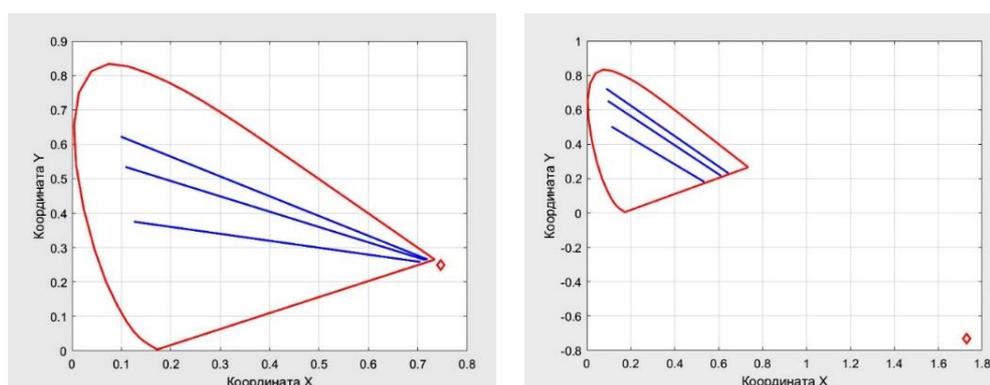


Рисунок 2.20 – Координаты цветности неразличимые а) «протанопами» и б) «дейтеранопами»

Как и следовало ожидать, поскольку форма кривых исследованных наблюдателей не совпадает со средними кривыми наблюдателей, по которым была построена система **XYZ**, то их треугольники ОЦ пересекают ДЦ **XYZ**. 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 [3]. Треугольники ОЦ после такой обработки представлены на рисунке 2.21б.

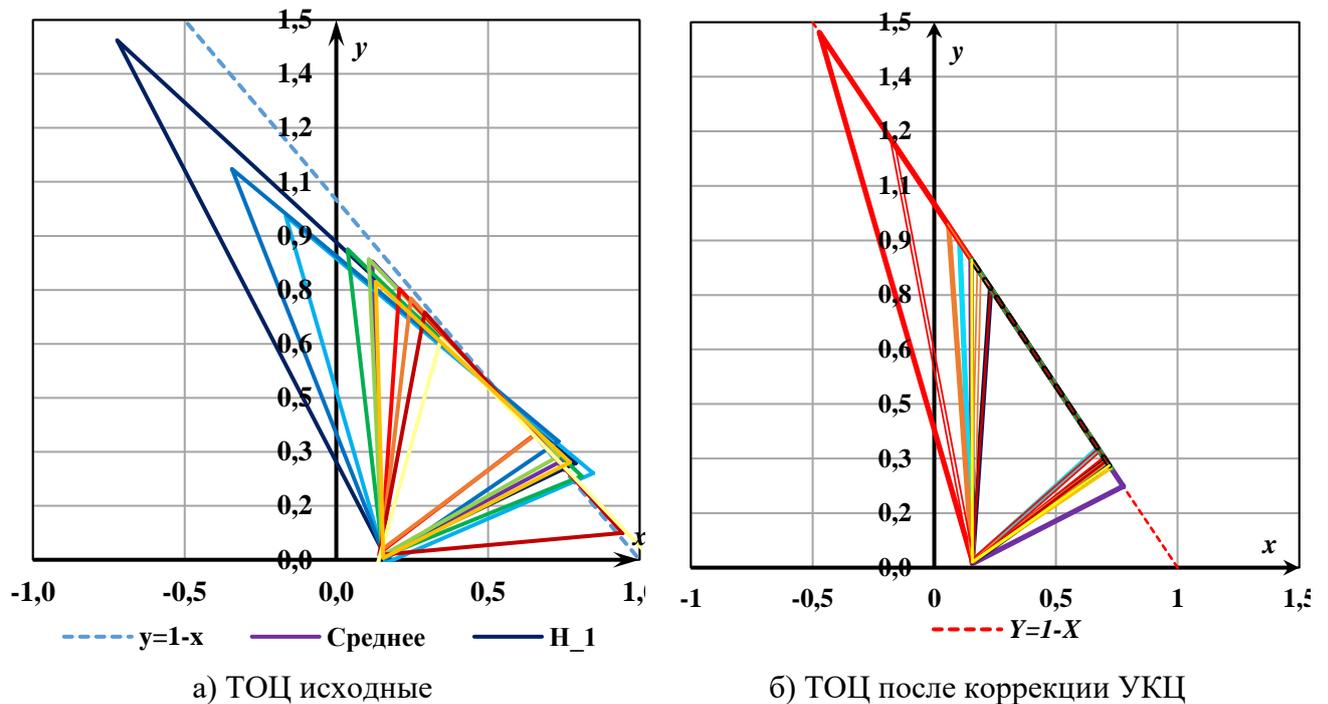


Рисунок 2.21 – Треугольники ОЦ для всех наблюдателей

Полученные результаты показывают, что хотя полученные $\bar{l}(\lambda), \bar{m}(\lambda), \bar{s}(\lambda)$ и близки к аналогичным функциям наблюдателей Д. Гилда и В.Д. Райта, но они ожидаемо не совпадают с ними. Однако, полученные на предыдущих этапах работы результаты позволяют разработать КС $(LMS)_{phys}$ с хорошей точностью согласованную с КС RGB и XYZ .

2.5. Разработка физиологической колориметрической системы $(LMS)_{phys}$

Сформулируем выводы, следующие из анализа литературных данных и проведенных расчетно-экспериментальных исследований предыдущих этапов работы, которые позволяют разработать $(LMS)_{phys}$:

1. Координаты цветности основного цвета L_{phys} в системе XYZ равны (0.7347; 0.2653; 0.0) [64,65].
2. У всех исследованных наблюдателей с нормальным цветовым зрением (трихроматов) координата y 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 определялась по методике Н. Ньюберга в виде области, ограниченной треугольником. При положительном значении координаты y основного цвета M_{phys} – координатный треугольник цветовой системы трихромата должен охватывать диаграмму цветности XYZ , не пересекая ее. Значение координаты y основного цвета S_{phys} не может быть меньше нуля, т.е. область ее значений снизу ограничивает алихна, т.е., в КС XYZ - ось x .

Максимальное значение координаты x для S_{phys} определится точкой пересечения прямой $K1$ с осью x . При этом $K1$ — это прямая параллельная прямой $y=1-x$, касательная к ДЦ в коротковолновой области спектра.

Третья сторона треугольника – это прямая $K2$, проведенная из точки с координатами S_{phys} в направлении основного цвета L_{phys} . Поскольку эта прямая так же не должна пересекать диаграмму цветности, а цвет L_{phys} расположен на линии пурпурных цветов, то прямая $K2$ – это продолжение линии чистых пурпурных цветов.

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 2.22).

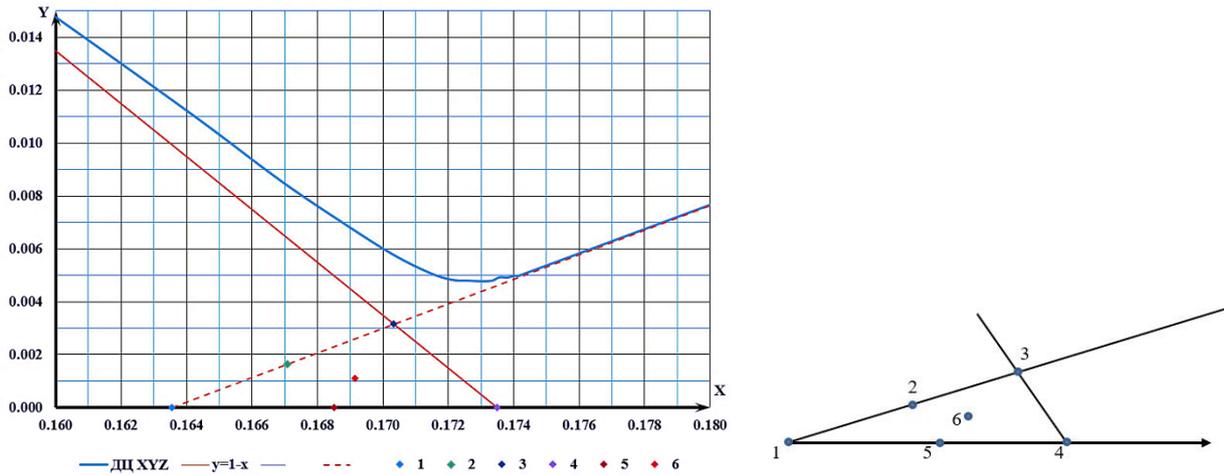


Рисунок 2.22 – Область допустимого расположения вершины S_{phys} координатного треугольника цветовой системы трихромата

Точки 1, 3 и 4 расположены в вершинах треугольника, точки 2 и 5 – на середине сторон и точка 6 – в его геометрическом центре. Для каждой из 6 точек были рассчитаны координаты точек пересечения касательных к ДЦ XYZ , проходящих через координату цветности S_{phys} , с прямой $y=1-x$.

В таблице 2.4 указаны варианты координат ОЦ и погрешности расчета УКЦ $(LMS)_{phys}$ для 6 расчетных точек, а на рисунке 2.23 СЧР, которые соответствуют этим координатам ОЦ.

Таблица 2.4

Варианты координат основных цветов $(LMS)_{phys}$ и погрешности расчета УКЦ $(LMS)_{phys}$ для 6 расчетных точек

	Точка 1				Точка 2			
	x	y	z	Интегральный критерий ошибки	x	y	z	Интегральный критерий ошибки
l_{phys}	0.73467	0.26534	0	5.40534E-02	0.73467	0.26534	0	1.28343E-02
m_{phys}	-1.76890	2.76890	0	3.98826E-03	-3.63202	4.63202	0	3.98742E-03
S_{phys}	0.16333	0	0.83667	5.48923E-17	0.16687	0.00164	0.83148	5.48923E-17
	Точка 3				Точка 4			
	x	y	z	Интегральный критерий ошибки	x	y	z	Интегральный критерий ошибки
l_{phys}	0.73467	0.26534	0	3.62201E-02	0.73467	0.26534	0	3.62201E-02
m_{phys}	-1037	1038	0	3.82943E-03	-1037	1038	0	8.94896E-03
S_{phys}	0.17041	0.00323	0.82636	5.48923E-17	0.17364	0	0.82636	5.48923E-17
	Точка 5				Точка 6			
	x	y	z	Интегральный критерий ошибки	x	y	z	Интегральный критерий ошибки
l_{phys}	0.73467	0.26533	0	1.05706E-02	0.73470	0.26530	0	4.97491E-03
m_{phys}	-3.82945	4.82945	0	2.50246E-03	-5.24573	6.24571	0.00002	3.53680E-04
S_{phys}	0.16852	0.000000	0.83148	5.48923E-17	0.16915	0.00110	0.82976	5.48923E-17

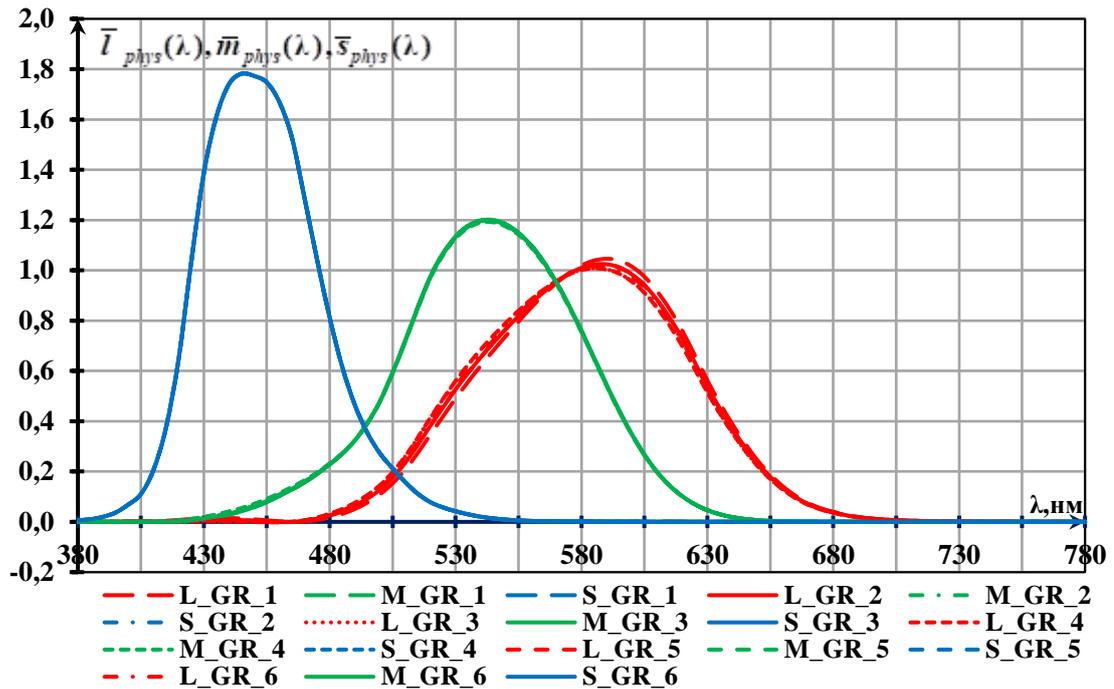


Рисунок 2.23 – СЧР для 6 положений ОЦ S_{phys}

Как видно из приведенных данных несмотря на то, что положение точки ОЦ S_{phys} меняется, функции $\bar{m}_{phys}(\lambda)$, $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ остаются практически неизменными. Наибольшим изменениям подвергаются кривые $\bar{l}_{phys}(\lambda)$. Минимальную погрешность относительно средних по 6 точкам значений УКЦ для $\bar{l}(\lambda)$ дают координаты основного цвета S_{phys} в точке 6. Это позволяет принять в качестве функций сложения $(LMS)_{phys}$ кривые, представленные на рисунке 2.24, а в качестве координат ОЦ $(LMS)_{phys}$ – координаты, полученные при расчетах для точки 6 (Таблица 2.5).

Таблица 2.5

Координаты цветности ОЦ ФКС трихромата $(LMS)_{phys}$ в КС XYZ

	x	y	z
l_{phys}	0.73470	0.26530	0
m_{phys}	-5.24573	6.24571	0.00002
s_{phys}	0.16915	0.00110	0.82976

Таблица 2.5 была дополнена координатами цветности ОЦ $(LMS)_{phys}$ в стандартных колориметрических системах МКО (Таблица 2.6).

Координаты цветности ОЦ $(LMS)_{phys}$ в стандартных колориметрических системах МКО и ОЦ стандартных колориметрических систем МКО в $(LMS)_{phys}$

XYZ в $(LMS)_{phys}$					RGB в $(LMS)_{phys}$				
	l_{phys}	m_{phys}	s_{phys}	Σ		l_{phys}	m_{phys}	s_{phys}	Σ
x	5.88646	-4.88646	0.00001	1	r	1	0	0	1
y	0.26759	0.73241	0	1	g	0.378952	0.614814	0.006234	1
z	-0.12841	0.10412	1.02429	1	b	0.003703	0.013920	0.982378	1
Σ	6.02563	-4.04993	1.02430		Σ	1.382655	0.628734	0.988612	
$(LMS)_{phys}$ в XYZ					$(LMS)_{phys}$ в RGB				
	x	y	z	Σ		r	g	b	Σ
l_{phys}	0.73470	0.26530	0	1	l_{phys}	1	0	0	1
m_{phys}	-5.24573	6.24571	0.00002	1	m_{phys}	2.724278	-1.741868	0.017590	1
s_{phys}	0.16915	0.00110	0.82976	1	s_{phys}	0.012670	-0.014250	1.001580	1
Σ	-4.34188	6.51211	0.82977		Σ	3.736948	-1.756118	1.019170	

С помощью разработанной программы и по полученным значениям координат цветности ОЦ $(LMS)_{phys}$, можно получить следующие параметры ФКС $(LMS)_{phys}$ трихромата:

- функции сложения $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$, $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ (рисунок 2.24 и таблица в приложении 8), координаты цветности (приложение 8), треугольник ОЦ (рисунок 2.25) и диаграмму цветности $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$ (рисунок 2.26);
- матрицы перехода из $(LMS)_{phys}$ в стандартные колориметрические системы XYZ , RGB 1931 г. и наоборот, а также координаты ее основных цветов в этих системах.

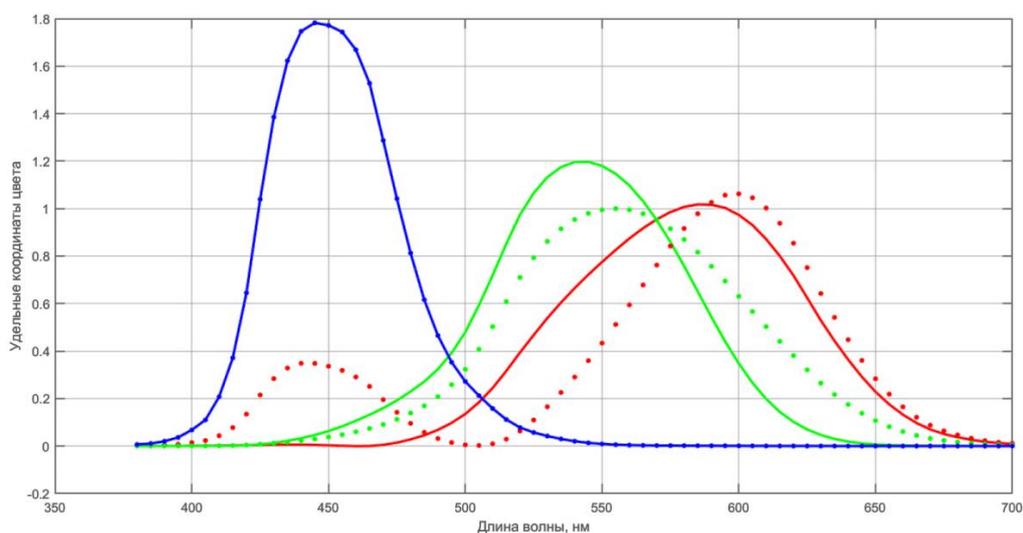
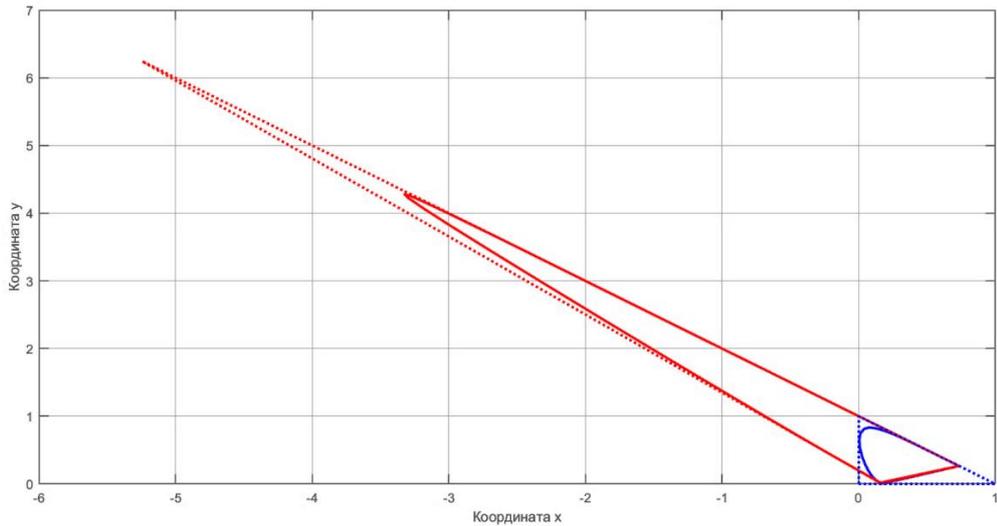
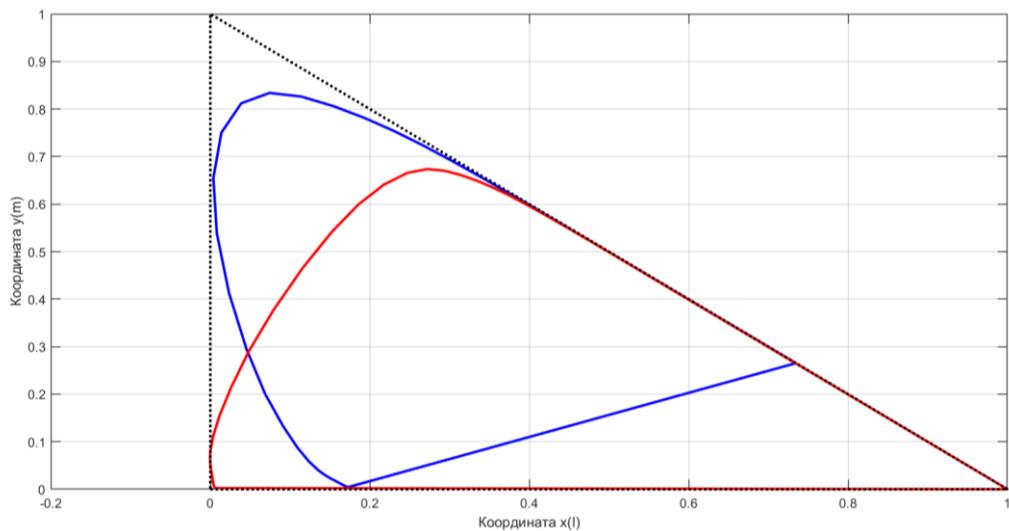


Рисунок 2.24 – Функции сложения $(LMS)_{phys}$

Рисунок 2.25– Треугольник ОЦ $(LMS)_{phys}$ в XYZ Рисунок 2.26 – Диаграмма цветности и locus $(LMS)_{phys}$ и XYZ

Ниже дан пример определения матрицы перехода для координат цвета между КС $(LMS)_{phys}$ и XYZ .

Составим систему уравнения для координат цветности ОЦ:

$$\begin{cases} l_{phys} = 0.73470 \cdot x + 0.26530 \cdot y + 0 \cdot z \\ m_{phys} = -5.24573 \cdot x + 6.24571 \cdot y + 0.00002 \cdot z \\ s_{phys} = 0.16915 \cdot x + 0.00110 \cdot y + 0.82976 \cdot z \end{cases} \quad (2.5)$$

Исходя из равенства цветностей белых цветов равноэнергетического излучения в исходной и стандартной системе, запишем новую систему уравнений, в которой координаты цвета ОЦ выражены через координаты цветности и суммы координат ОЦ:

$$\begin{cases} 0.73470 \cdot \sigma_x - 5.24573 \cdot \sigma_y + 0.16915 \cdot \sigma_z = 1/G \\ 0.26530 \cdot \sigma_x + 6.24571 \cdot \sigma_y + 0.00110 \cdot \sigma_z = 1/G, \text{ где} \\ 0 \cdot \sigma_x + 0.00002 \cdot \sigma_y + 0.82976 \cdot \sigma_z = 1/G \end{cases} \quad (2.6)$$

σ_x . σ_y . σ_z – суммы координат ОЦ при переходе в стандартную систему МКО;
 G – количественное соотношение белых цветов исходной и новой системы, в данном случае:

$$G = \frac{\beta_{Lphys} + \beta_{Mphys} + \beta_{Sphys}}{\beta_x + \beta_y + \beta_z} = 1 \quad (2.7)$$

Определитель системы уравнений (2.6) будет равен:

$$d = \begin{vmatrix} 0.73470 & -5.24573 & 0.16915 \\ 0.26530 & 6.24571 & 0.00110 \\ 0 & 0.00002 & 0.82976 \end{vmatrix} = 4.9623 \quad (2.8)$$

Неизвестные уравнения (2.6) σ_x , σ_y , σ_z определяются из следующих соотношений:

$$\sigma_x = \frac{1}{d \cdot G} \begin{pmatrix} 1 & -5.24573 & 0.16915 \\ 1 & 6.24571 & 0.00110 \\ 1 & 0.00002 & 0.82976 \end{pmatrix} = \frac{8.4729}{4.9623} = 1.70745$$

$$\sigma_y = \frac{1}{d \cdot G} \begin{pmatrix} 0.73470 & 1 & 0.16915 \\ 0.26530 & 1 & 0.00110 \\ 0 & 1 & 0.82976 \end{pmatrix} = \frac{0.4336}{4.9623} = 0.08737 \text{ и} \quad (2.9)$$

$$\sigma_z = \frac{1}{d \cdot G} \begin{pmatrix} 0.73470 & -5.24573 & 1 \\ 0.26530 & 6.24571 & 1 \\ 0 & 0.00002 & 1 \end{pmatrix} = \frac{5.9804}{4.9623} = 1.20517.$$

Умножением координат цветности ОЦ на сумму координат соответствующего ОЦ получаем матрицу перехода для удельных координат цвета:

$$\begin{cases} L_{phys} = 1.25447 \cdot X + 0.45300 \cdot Y + 0 \cdot Z \\ M_{phys} = -0.45832 \cdot X + 0.54569 \cdot Y + 0 \cdot Z \\ S_{phys} = 0.20385 \cdot X + 0.00133 \cdot Y + 1 \cdot Z \end{cases} \quad (2.10)$$

Определитель системы уравнений (2.10) имеет вид:

$$d_1 = \begin{vmatrix} X_l & Y_l & Z_l \\ X_m & Y_m & Z_m \\ X_s & Y_s & Z_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1.25447 & -0.45832 & 0.20385 \\ 0.45300 & 0.54569 & 0.00133 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0.89216 \quad (2.11)$$

Система уравнений, позволяющая рассчитывать координаты цвета произвольного излучения в системе $(LMS)_{phys}$ при известных координатах в XYZ :

$$\begin{cases} L_{phys} = a_{11} \cdot X + a_{12} \cdot Y + a_{13} \cdot Z \\ M_{phys} = a_{21} \cdot X + a_{22} \cdot Y + a_{23} \cdot Z, \\ S_{phys} = a_{31} \cdot X + a_{32} \cdot Y + a_{33} \cdot Z \end{cases} \quad (2.12)$$

где

$$\begin{cases} a_{11} = \frac{1}{d_1} \cdot (Y_m Z_s - Y_s Z_m) = 0.61165 \\ a_{21} = \frac{1}{d_1} \cdot (Y_s Z_l - Y_l Z_s) = 0.51372 \\ a_{31} = \frac{1}{d_1} \cdot (Y_l Z_m - Y_m Z_l) = -0.12537 \\ a_{12} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_s Z_m - X_m Z_s) = -0.50774 \\ a_{22} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_l Z_s - X_s Z_l) = 1.40610 \\ a_{32} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_m Z_l - X_l Z_m) = 0.10164 \\ a_{13} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_m Y_s - X_s Y_m) = 0 \\ a_{23} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_s Y_l - X_l Y_s) = 0 \\ a_{33} = \frac{1}{d_1} \cdot (X_l Y_m - X_m Y_l) = 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

Получаем:

$$\begin{cases} L_{phys} = 0.61165 \cdot X - 0.50774 \cdot Y + 0 \cdot Z \\ M_{phys} = 0.51372 \cdot X + 1.40610 \cdot Y + 0 \cdot Z \\ S_{phys} = -0.12537 \cdot X + 0.10164 \cdot Y + 1 \cdot Z \end{cases} \quad (2.14)$$

С учетом (2.13), для удельных координат цвета можно записать:

$$(\bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda)) = (\bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda)) \cdot \begin{pmatrix} 0.61165 & -0.50774 & 0 \\ 0.51372 & 1.40610 & 0 \\ -0.12537 & 0.10164 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

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

$$(\bar{x}(\lambda) \bar{y}(\lambda) \bar{z}(\lambda)) = (\bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda)) \cdot \begin{pmatrix} 1.25447 & 0.45299 & 0 \\ -0.45832 & 0.54569 & 0 \\ 0.20385 & 0.00132 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.16)$$

Аналогичным образом получены выражения (2.15) – (2.17) для КС **RGB** при $G = 5.65$:

$$(\bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda)) = (\bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda)) \cdot \begin{pmatrix} 2.19529 & 0 & 0 \\ 3.43363 & 5.57074 & 0.05649 \\ 0.02108 & 0.07926 & 5.59351 \end{pmatrix}, \quad (2.17)$$

$$(\bar{r}(\lambda) \bar{g}(\lambda) \bar{b}(\lambda)) = (\bar{l}_{phys}(\lambda) \bar{m}_{phys}(\lambda) \bar{s}_{phys}(\lambda)) \cdot \begin{pmatrix} 0.45552 & -0.50774 & 0 \\ -0.28079 & 0.17954 & -0.00181 \\ 0.00226 & -0.00254 & 0.17880 \end{pmatrix}. \quad (2.18)$$

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 (Л. К. Томсон, Х.Г. Сперлинг).

Однако, треугольники ОЦ в этих системах пересекают диаграмму цветности **XYZ**, что приводит к появлению небольших отрицательных значений УКЦ (рисунок 2.27).

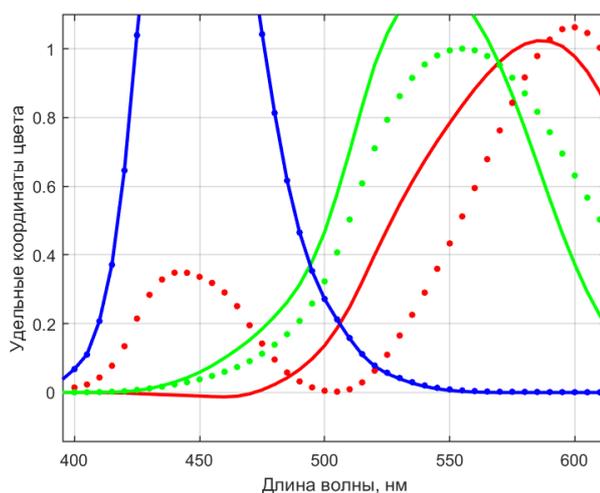


Рисунок 2.27 – ФС в УКЦ Томсона с положительными y_m

Более существенно отличие полученных результатов $(LMS)_{phys}$ от КС **LMS**. На рисунке 2.28 приведено сравнение кривых $\bar{l}(\lambda)$ и $\bar{l}_{phys}(\lambda)$ в КС **LMS** и $(LMS)_{phys}$ соответственно.

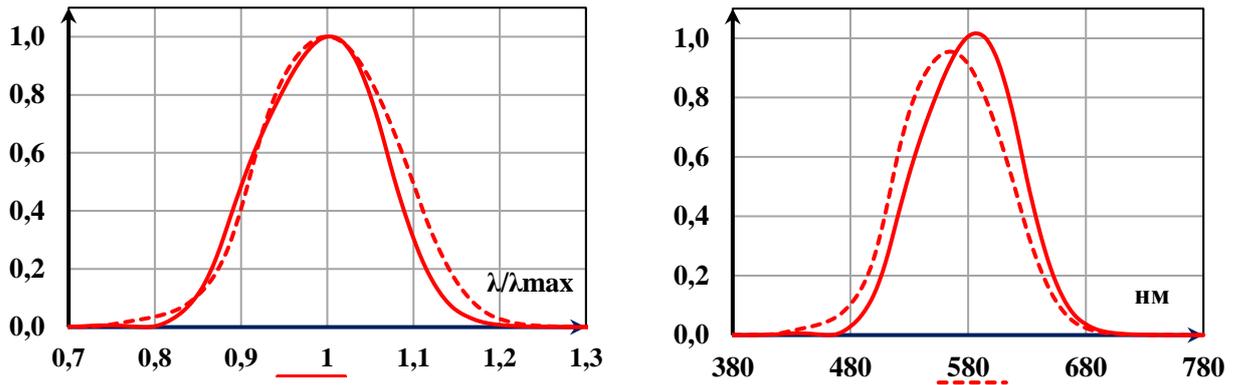


Рисунок 2.28 – Зависимости СЧР $\bar{l}_{phys}(\lambda/\lambda_{max})$ и $\bar{l}(\lambda/\lambda_{max})$ в относительных единицах (слева) и зависимости в абсолютных единицах (справа)

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 [3]. Следует отметить, что для исследованных в работе 10 трихроматов значение усредненного значения максимума $\bar{l}(\lambda)$ лежит в районе 600 нм.

Для ИС, основная доля излучения которых приходится на красную область спектра, такой сдвиг приведет к существенной разнице рассчитанных в разных КС параметров.

Определение яркостных коэффициентов КС. Согласно [36] яркостные коэффициенты $(LMS)_{phys}$ определяются из уравнения:

$$V(\lambda) = \beta_l \cdot \bar{l}_{phys}(\lambda) + \beta_m \cdot \bar{m}_{phys}(\lambda) + \beta_s \cdot \bar{s}_{phys}(\lambda). \quad (2.19)$$

Согласно уравнению (2.19), максимальные значения $\bar{l}_{phys}(\lambda)$, $\bar{m}_{phys}(\lambda)$, $\bar{s}_{phys}(\lambda)$ не влияют на величину цветовых порогов, поэтому не определяются при решении системы уравнений (2.19). Их максимальные значения определяются из условия попадания координаты цветности равноэнергетического источника (источник типа «Е») в центр диаграммы цветности:

$$\int_{380}^{780} L_{e\lambda}^E V(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} L_{e\lambda}^E \beta_l \bar{l}_{phys}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda}^E \beta_m \bar{m}_{phys}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda}^E \beta_s \bar{s}_{phys}(\lambda) d\lambda$$

$$\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda = \beta_l \int_{380}^{780} \bar{l}_{phys}(\lambda) d\lambda + \beta_m \int_{380}^{780} \bar{m}_{phys}(\lambda) d\lambda + \beta_s \int_{380}^{780} \bar{s}_{phys}(\lambda) d\lambda \rightarrow \quad , \text{ где} \quad (2.20)$$

$$\int_{380}^{780} \bar{l}_{phys}(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{m}_{phys}(\lambda) d\lambda = \int_{380}^{780} \bar{s}_{phys}(\lambda) d\lambda = \frac{\int_{380}^{780} V(\lambda) d\lambda}{\beta_l + \beta_m + \beta_s}$$

$L_{e\lambda}^E$ – независящая от длины волны спектральная плотность энергетической яркости источника типа «Е».

Поскольку в уравнение (2.19) входят три неизвестных, то добавление третьего уравнения делает систему замкнутой:

$$\beta_l + \beta_m + \beta_s = 1 . \quad (2.21)$$

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. На рисунке 2.29 представлены графический интерфейс и описание его элементов, а также пример расчета.

Результаты расчетов яркостных коэффициентов β системы $(LMS)_{phys}$ приведены в таблице 2.7, расчет проводился для диапазона длин волн от 380 до 700 нм.

Таблица 2.7

β_l	β_m	β_s	Σ
0.452988	0.545691	0.00132085	1

Отличие относительной спектральной световой эффективности $V(\lambda)$, полученной с этими яркостными коэффициентами и ФС от стандартного фотометрического наблюдателя МКО не превышает седьмого знака после запятой.

Расчет яркостных коэффициентов

LamMin	LamMax	
380	700	
Beta L	Beta M	Beta S
0	0	0
Сумма Beta		
0		

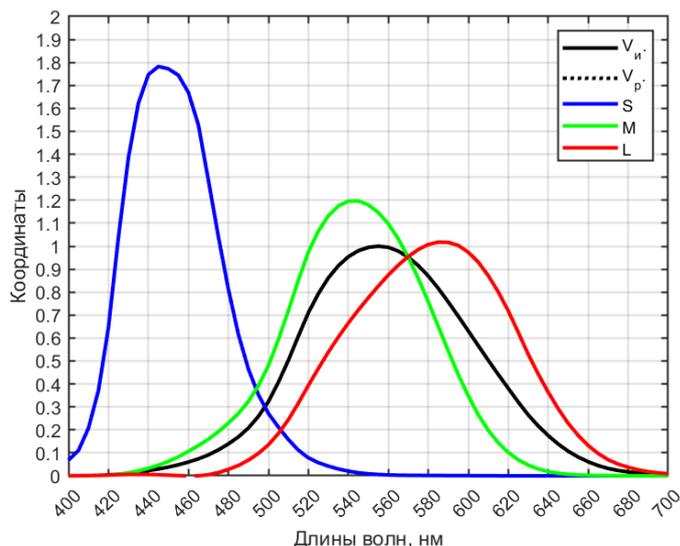


Рисунок 2.29 – Информация о разработанном ПО

На момент написания диссертационной работы МКО призывает специалистов участвовать в работе исследовательского форума 05 в попытке внедрить $V_F(\lambda)$, согласованную с *cone fundamentals* и непротиворечащую существующей $V(\lambda)$ [66].

2.6. Моделирование порогов цветоразличения

Моделирование цветовых порогов с использованием ФКС (LMS)_{phys} и монохроматических ИС. Если поделить выражение (1.20) на пороговый перепад яркости по Х. Блэкуэллу, то выражение будет описывать отклонение в числах порогов [67].

В разработанной программе моделировалось наблюдение объекта и фона различной цветности и одинаковой яркости. Нужная цветность и яркость излучения были получены комбинацией энергетических яркостей трех

Графический интерфейс программы

Кнопка "Расчет яркостных коэффициентов" запускает работу программы и появляется диалоговое окно с выбором файлов;

Окно *LamMin* – позволяет указать начало диапазона длин волн;

Окно *LamMax* – позволяет указать конец диапазона длин волн;

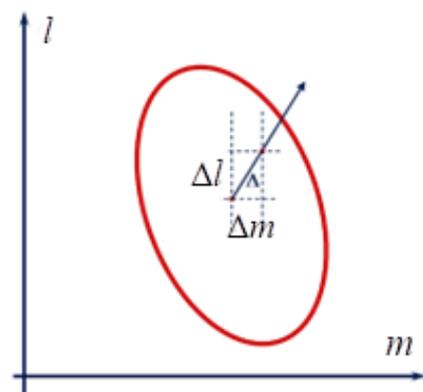
Окна *Beta L*, *Beta M*, *Beta S*, *Сумма Beta* – показывают итоговое значение коэффициентов яркости и их суммы.

монохроматических источников. Расчеты проводились для разных «троек» источников.

Пороговые зависимости для координат цвета рассчитывались в системе наблюдателя $(LMS)_{phys}$, затем полученные координаты цвета с помощью соответствующей матрицы перехода переводились в систему XYZ , после чего рассчитывались пороговые координаты цветности в этой системе координат.

Алгоритм работы программы, следующий:

1. Выбрав опорные источники, направление в пространстве, координаты цветности и яркость фона, рассчитываются координаты цветности l_i и m_i . Решается система из 3-х уравнений, определяющая энергетические яркости трех выбранных источников, обеспечивающие выбранные координаты цветности и яркость объекта и фона;
2. Рассчитывается m_Δ ;
3. Изменение цветности l_i и m_i в выбранном направлении на один шаг до тех пор, пока m_Δ не сравняется с $\ln\Lambda_{th}$.



На рисунке 2.30 приведены графический интерфейс ПО с описанием элементов и блок-схема, которая отображает приведенный выше алгоритм расчета.

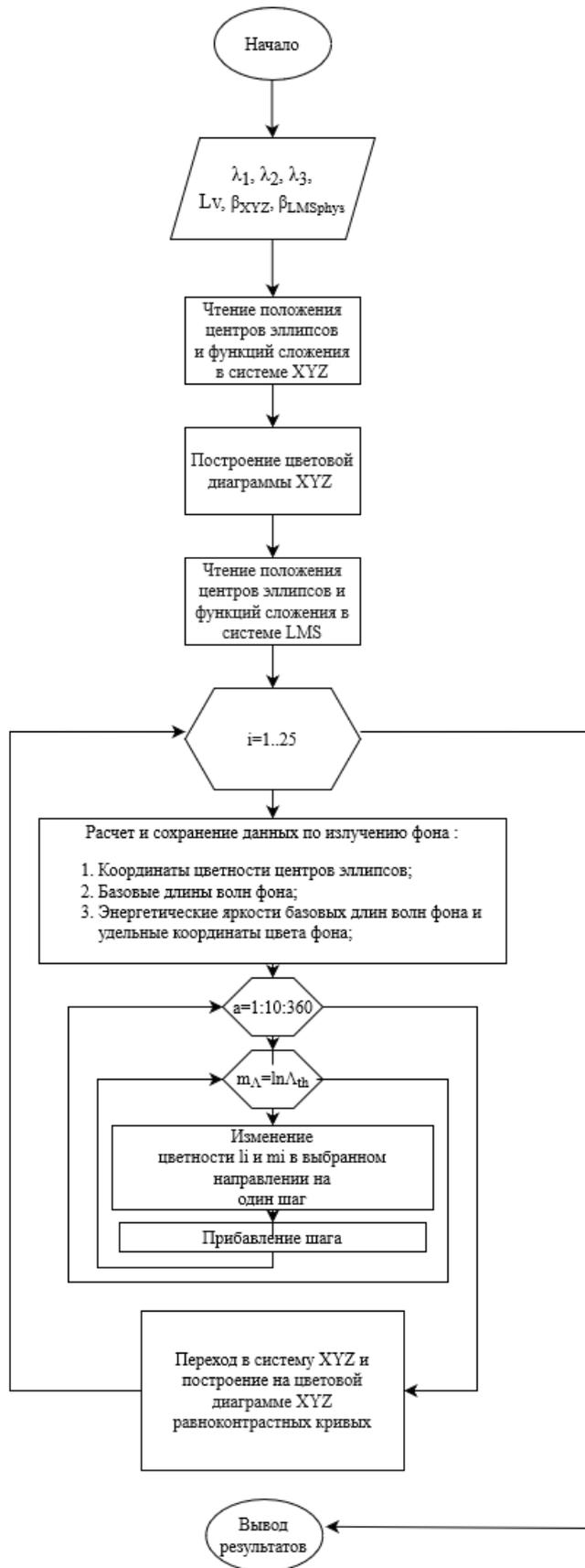
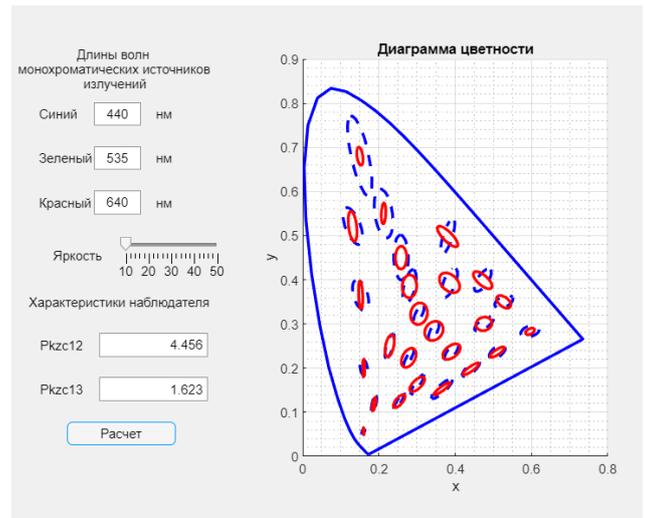


Рисунок 2.30 – Информация о разработанном ПО

На рисунке 2.31 представлены пороговые кривые, полученные при постоянстве яркости и с помощью ФКС $(LMS)_{phys}$ для разных монохроматических



Графический интерфейс программы

$Pkzc12$ – это C_3 в выражении (1.20).

$Pkzc13$ – это C_2 в выражении (1.20).

Работа с ПО начинается с подготовки исходных данных. Проводится исследование влияния спектрального состава излучения, характеристик наблюдателя и величины яркости фона на пороги цветоразличения. Все эти параметры задаются в редактируемых окнах с помощью слайдера и в диалоговом окне выбора файла при запуске программы.

длин волн. Размеры полученных пороговых отличий на всех рисунках увеличены в 10 раз.

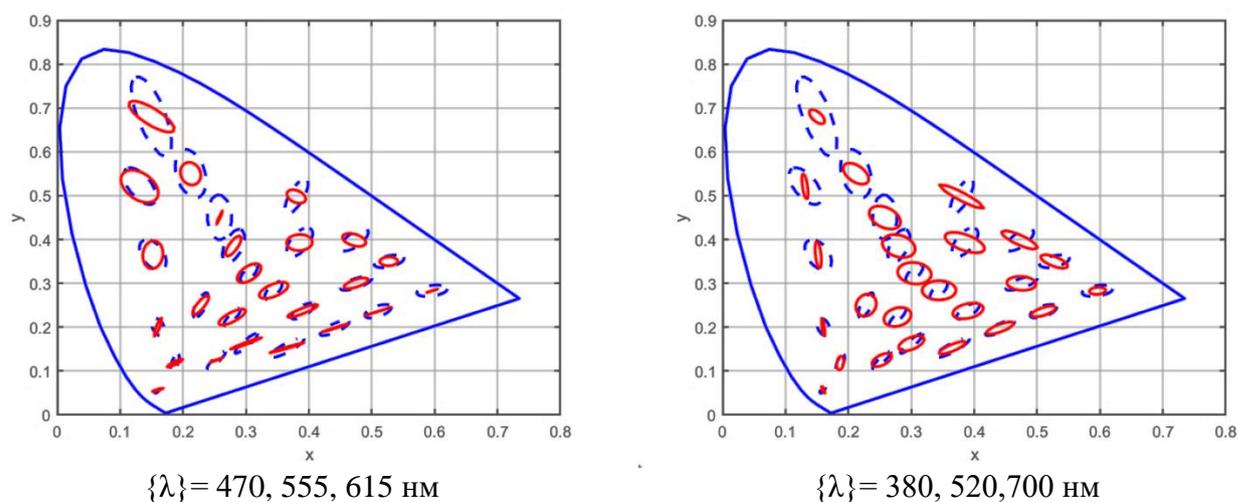


Рисунок 2.31 – Влияние спектрального состава излучений на цветовые пороги

Можно заметить, что пороговые кривые (по форме близкие к эллипсам) зависят не только от координат цветности, но и от спектрального состава тех излучений, которые создают эти цветности. При этом с изменением спектра излучения изменяется не только размер эллипсов, но и их ориентация в цветовом пространстве.

На рисунке 2.32 представлены пороговые кривые, полученные при постоянстве монохроматических длин волн ($\{\lambda\} = 470, 555, 615 \text{ нм}$), также с помощью ФКС $(LMS)_{phys}$, но для разных яркостей (объекта и фона).

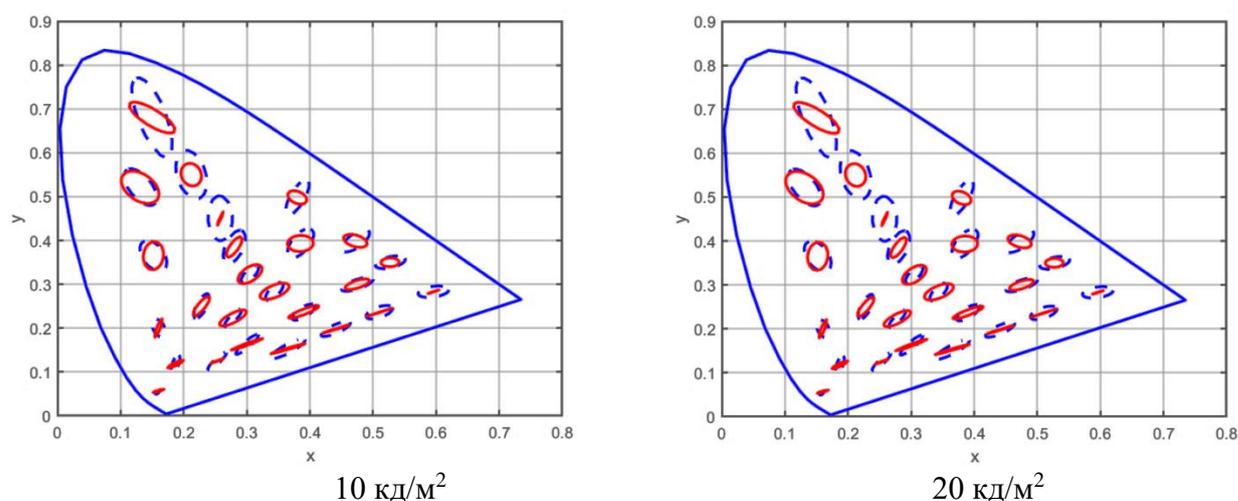


Рисунок 2.32 – Влияние изменения яркости на цветовые пороги

Как видно из графиков 2.32, зависимость цветных порогов от яркости отсутствует, что соответствует теории оптимального приемника.

Полученные результаты показывают, что при определении пороговых цветных отличий необходимо учитывать не только цветность объекта и фона, но и спектры ИС, которые их создают.

Причина возникновения этого явления заключается в том, что m_λ , зависящее от спектра объекта и фона, определяется зависимостью (2.22), т.е. суммой квадратов отношений интегралов, определяющих цвет изучения [68], а координаты цветности и их разность определяются другой, дробно-линейной зависимостью от этих же интегралов (2.23).

$$m_\lambda = 2\omega \left\{ C_{1l} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1m} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{1s} \left(\frac{\int_{380}^{780} \Delta L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda} \right)^2 \right\}, \quad (2.22)$$

$$\Delta l = \frac{\int_{380}^{780} L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda o}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda} - \frac{\int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{l}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{m}(\lambda) d\lambda + \int_{380}^{780} L_{e\lambda b}(\lambda) \bar{s}(\lambda) d\lambda}. \quad (2.23)$$

Аналогичное выражение можно получить для Δm , Δs .

В ФКС $(LMS)_{phys}$ ориентация пороговых эллипсов представлена на ДЦ рисунка 2.33.

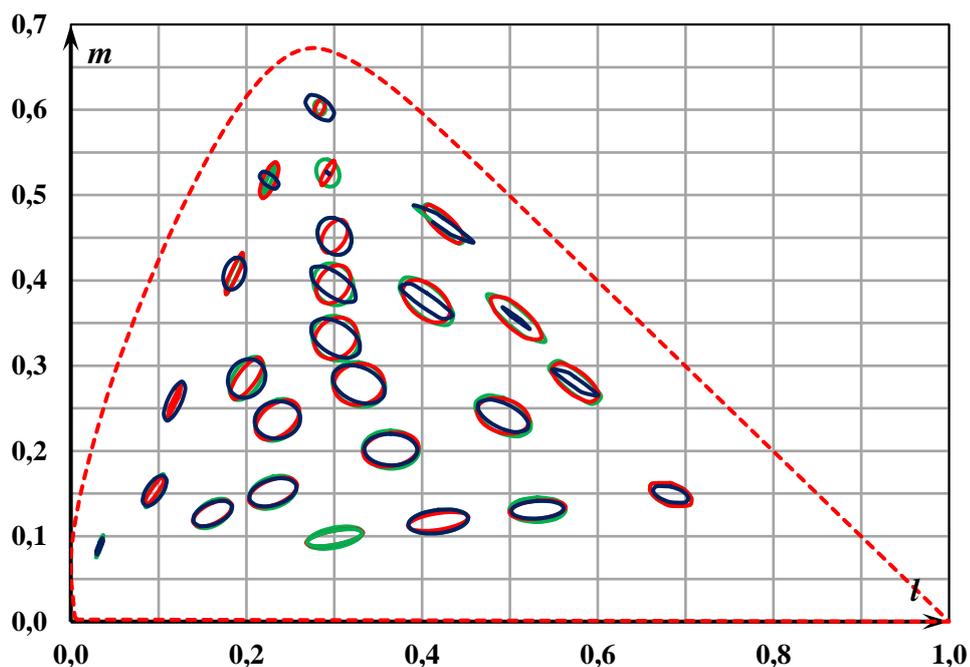


Рисунок 2.33 – Расчетные цветовые пороги в ФКС $(LMS)_{phys}$

На рисунке 2.33 приведены результаты и для других «троек» монохроматических источников, которые согласуются с ранее полученными выводами.

Моделирование цветовых порогов с использованием ФКС $(LMS)_{phys}$ и ИС со сплошным спектром. В экспериментальной установке Д. Л. МакАдама использовались фильтры Раттен, которые в настоящее время производятся фирмой Кодак. К сожалению, не все фильтры, использованные в установке, выпускаются в настоящее время и представлены в каталогах Кодак.

Для выяснения влияния кривых СЧР наблюдателя на форму и ориентацию пороговых эллипсов были проведены расчеты для двух точек на диаграмме цветности, представленные в статье Д. Л. МакАдама на *Fig. 28* и *Fig. 31*. Спектры пропускания некоторых фильтров Раттен и фильтров в ЭУ МакАдама представлены на рисунке 2.34 – 2.35. При этом использованы обозначения фильтров, приведенные в статье Д. Л. МакАдама [2].

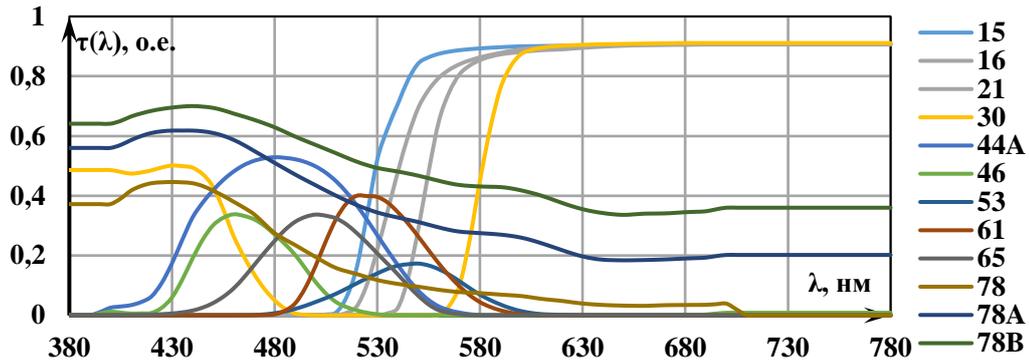


Рисунок 2.34 – Спектры фильтров Раттен

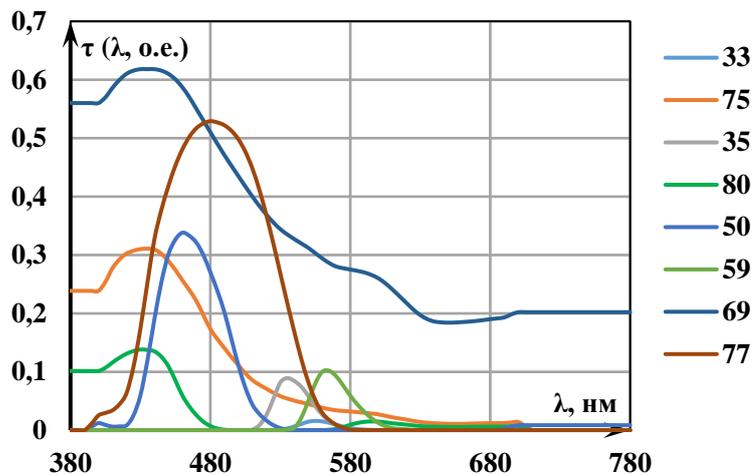
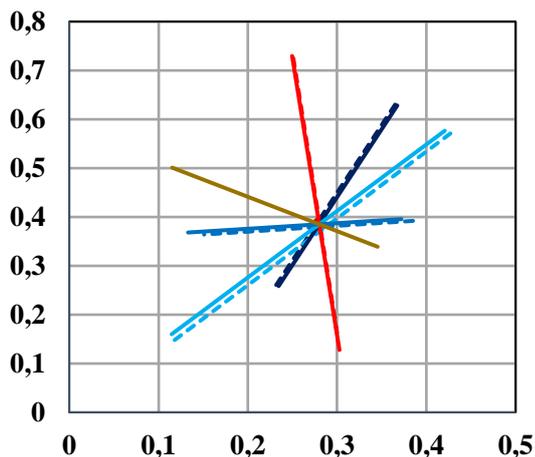


Рисунок 2.35 – Спектры фильтров ЭУ Макадама



Следует отметить, что прямые, соединяющие приведенные в статье [2] координаты цветности пар фильтров часто не пересекаются в одной точке (рисунок слева), однако эти смещения практически не влияют на конечный результат, т.к. они малы по сравнению с расстояниями до центров соседних эллипсов.

На рисунках 2.36 – 2.37 приведены результаты расчетов пороговых эллипсов, которые показывают, что различия в спектральной чувствительности наблюдателей (стандартный колориметрический наблюдатель МКО и П.Г Наттинг) влияют как на размеры, так и на ориентацию пороговых эллипсов в цветовом пространстве.

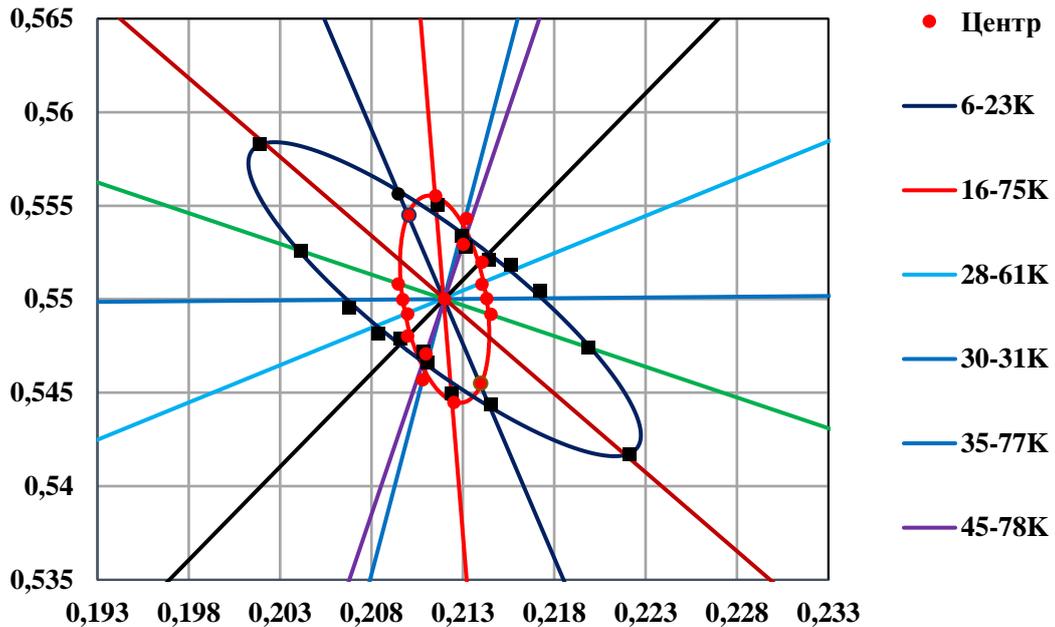


Рисунок 2.36 – Эллипсы для Fig.28 МакАдама

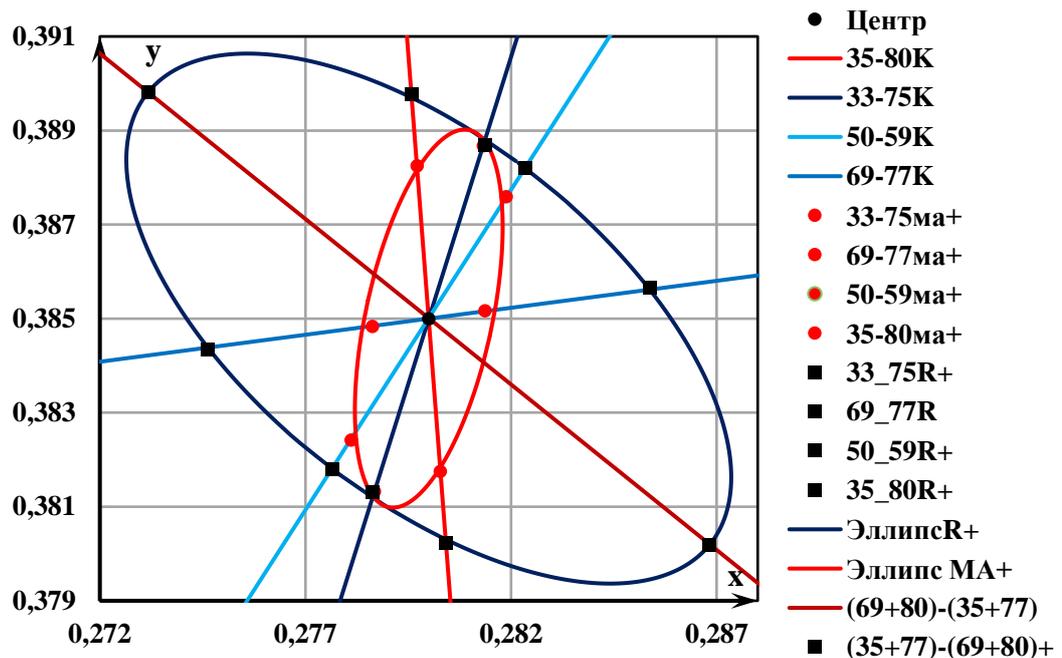
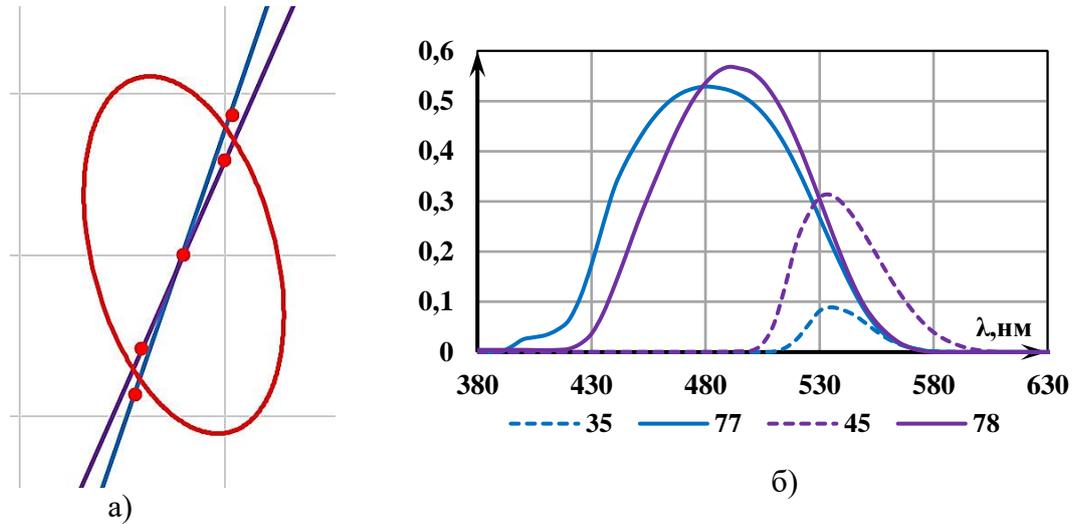


Рисунок 2.37 – Эллипсы для Fig.31 МакАдама

Ряд экспериментальных точек, полученных Д. Л. МакАдамом, подтверждает расчетные зависимости, приведенные на рисунке 2.31.

На рисунке 2.38 приведены экспериментальные пороги Д. Л. МакАдама при исследовании по двум близким в цветовом пространстве направлениям с источниками, имеющими разные спектры. Как видно из графика, при совпадающих

цветностях фона, пороги источников с разными спектрами значительно различаются между собой.



Рисунке 2.38 – а) Пороги для пар фильтров 35-77 (голубой цвет) и 45-78 (фиолетовый цвет), б) Спектры источника излучения, прошедшего фильтры

Для более подробного исследования влияния немонахроматических спектров на пороги по цветности было создано ПО, позволяющее рассчитывать эти пороги для источников различного спектрального состава.

Как и в ЭУ МакАдама, ПО моделирует пропускание спектра исходного источника через полосовой фильтр с П-образной функцией пропускания. Графический интерфейс программы вместе с описанием работы элементов представлены на рисунке 2.39.

На рисунке 2.40 представлены этапы работы с ПО. На первом этапе программа последовательно с заданным шагом $\Delta\lambda_{\text{ам}}$ расширяет диапазон пропускания каждого полосового фильтра от доминирующей длины волны до достижения границ видимого диапазона, т.е. полного пропускания излучения от источника. Процесс увеличения пропускания фильтров фиксируется на ДЦ в виде координат цветности прошедшего фильтр излучения, образующих непрерывную кривую. Затем пользователь может указать точки на этих кривых, тем самым выбрав координаты цветности вершин треугольника ОЦ. ПО автоматически определит центры эллипсов, попадающие в выбранную треугольную область.

Алгоритм расчета пороговых эллипсов в КС $(LMS)_{phys}$ и XYZ аналогичен алгоритму, представленному на рисунке 2.30.

Наиболее интересные результаты представлены на рисунках 2.41 – 2.42, когда пользователем для одной и той же области локуса выбирались разные координаты цветности ОЦ, что приводило к изменению ориентации пороговых эллипсов: они поворачивались в направлении линий, соединяющих вершины ОЦ.

Выбор координат ОЦ			Треугольник ОЦ		Эллипсы в XYZ
<input checked="" type="checkbox"/> Тист	2848		Шаг DLam	Яркость	Запись результатов
Lam домин.		Шаг фильтра	фона		
571	520	470	5	47.7	<input type="checkbox"/> Вывод точек МА
Расчет эллипсов в LMS и XYZ			Число точек	Масштаб элл.	
C1	C2	C3	на эллипсе	на графиках	
9134	1.625	4.456	24	10	

В окнах "Тист", "Lam домин.", "Шаг DLam фильтра", "Яркость фона", "C1, C2, C3", "Число точек на эллипсе", "Масштаб элл. на графиках" задаются следующие параметры расчета: доминирующие длины волн фильтров и их полуширины пропускания, яркость фона, коррелированная цветовая температура ИС, константы выражения (1.20) и каким образом отображать эллипсы, масштаб и количество расчетных точек.

Графический интерфейс программы

Кнопка "Выбор координат ОЦ" позволяет на локусе отметить вершины треугольника ОЦ;

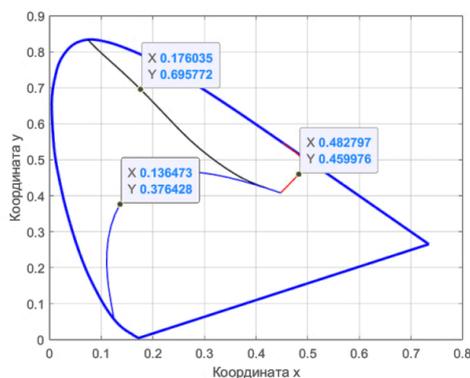
Кнопка "Треугольник ОЦ" строит стороны треугольника;

Кнопка "Эллипсы в XYZ" отображает центры эллипсов, попавшие в область треугольника;

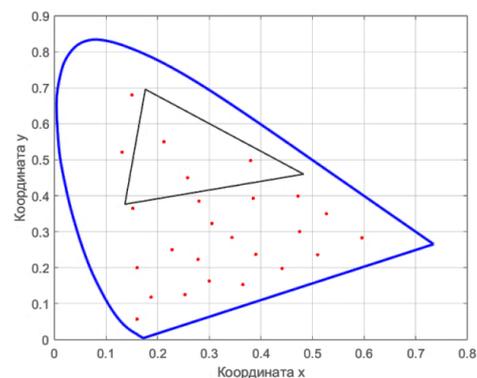
Кнопка "Расчет эллипсов в LMS и XYZ" рассчитывает пороговые эллипсы в заданных КС.

Кнопка "Запись результатов" выводит результаты и записывает их текстовые файлы;

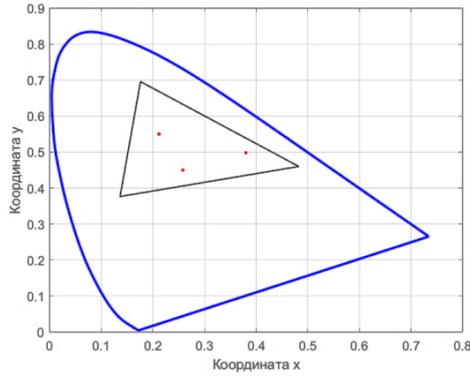
Рисунок 2.39 – Информация о разработанном ПО



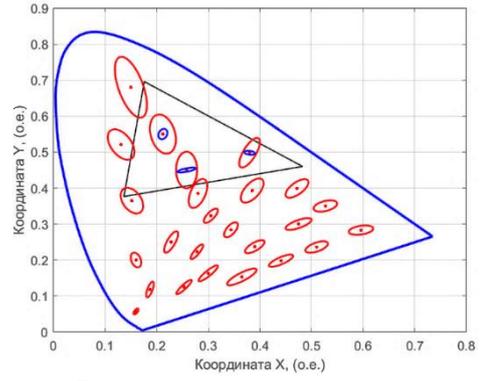
а) Выбор координат ОЦ



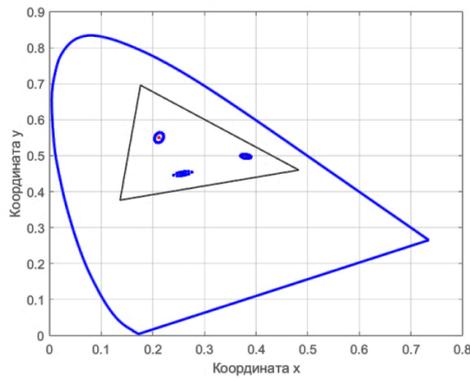
б) Треугольник ОЦ в XYZ



в) Эллипсы в XYZ



з) Режим записи результатов



д) Расчет эллипсов в XYZ и LMS

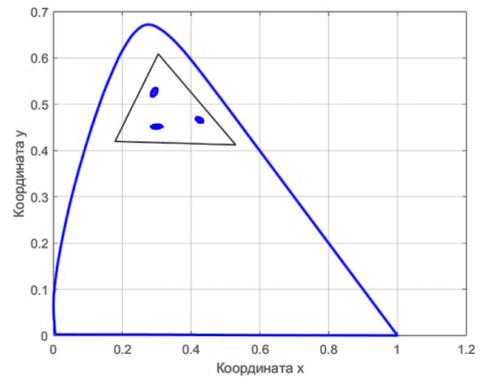
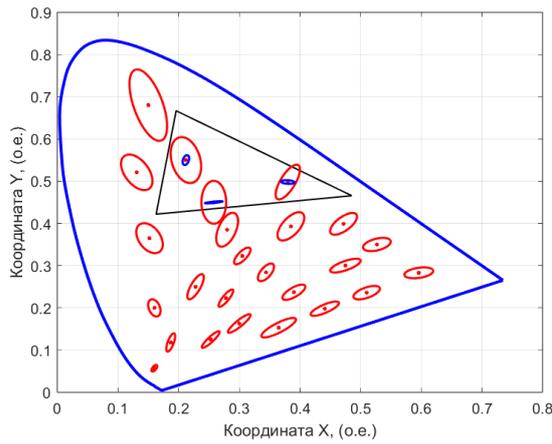
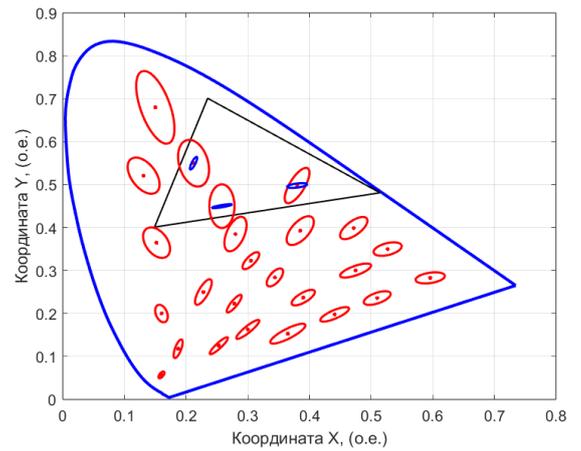


Рисунок 2.40 – Этапы работы с ПО



$\{\lambda\} = 570,520,470$ нм



$\{\lambda\} = 580,530,470$ нм

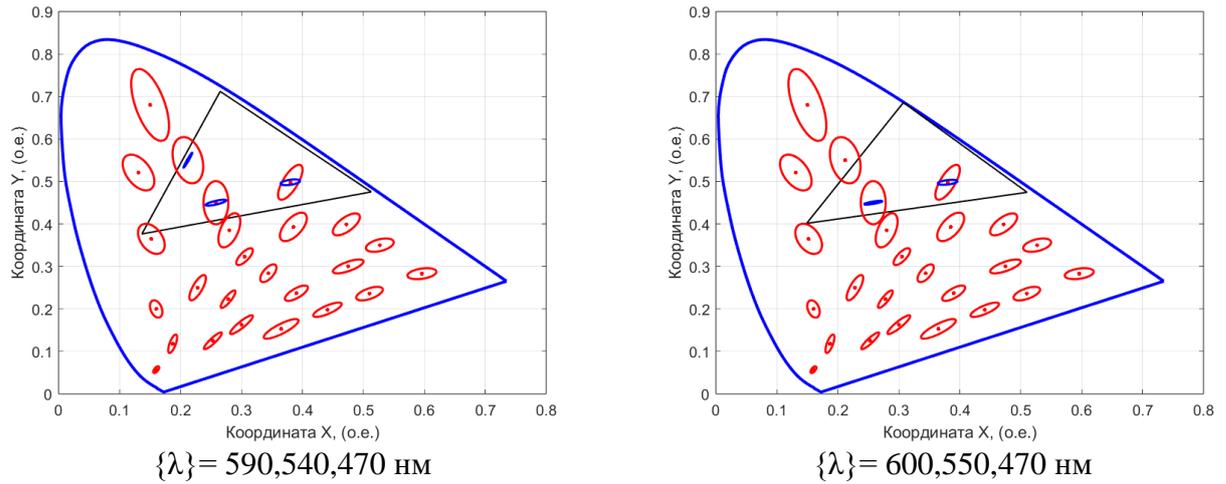


Рисунок 2.41 – Область эллипсов с небольшим изменением длин волн фильтров

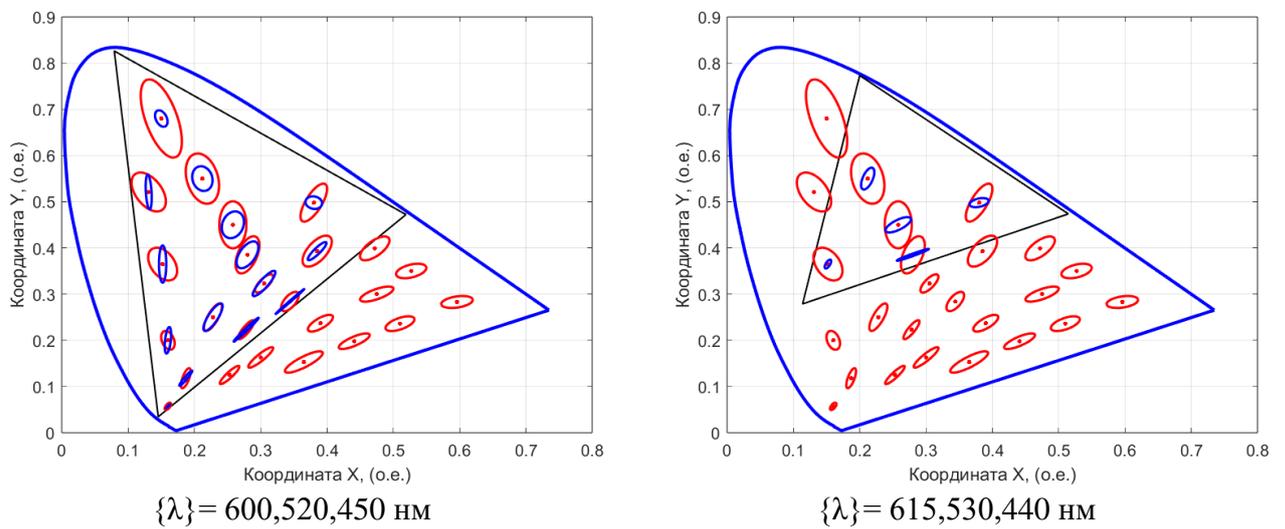


Рисунок 2.42 – Более крупная область эллипсов

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 .

3. РАЗРАБОТКА РАВНОКОНТРАСТНОГО ПРОСТРАНСТВА

Проведенные в предыдущих разделах исследования порогов по цветности показали:

1. На пороги влияет зависимость относительной СЧР от длины волны;
2. В области Вебера-Фехнера пороги по цветности (как и яркостные пороги) не зависят от яркости адаптации;
3. На величину, форму и ориентацию пороговых эллипсов влияет не только их расположение на диаграмме цветности, но и спектр излучения, создающего эту цветность;
4. Причиной отличия пороговых зависимостей на диаграмме цветности от равновеликих окружностей является разный характер зависимостей координат цветности (дробно-линейная зависимость) и порогов по цветности (сумма квадратов отношений) от координат цвета.

Эти результаты доказывают невозможность построения РЦП для всего цветового пространства, когда значения координат цветности изменяются в широких пределах. Даже добившись равноконтрастности в одной области ДЦ мы не сможем ее получить в удаленной области ДЦ по причинам, отмеченным в пункте 4.

Выход из создавшегося положения подсказывает теория оптимального приемника. Согласно ММПЦЗ, на вероятность обнаружения и m_λ влияет, прежде всего, отличие значения реакций приемников при наблюдении объекта и фона. Именно оно определяет функцию отношения правдоподобия, вычисляемую по выражению (1.20), которое в области Вебера-Фехнера не зависит от абсолютных значений координат цвета.

Поскольку в пороговых условиях $m_\lambda^n = \ln(\Lambda_{th})$, то:

$$m_\lambda^n = m_l^n + m_m^n + m_s^n = \ln(\Lambda_{th}), \text{ где} \quad (3.1)$$

m_l^n, m_m^n, m_s^n – 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.

Сопоставляя (3.1) с выражением для модуля вектора цвета в цветовом колориметрическом пространстве ($\Phi = l + m + s$), можно представить m_Λ как вектор в пространстве M_Λ с координатами (m_l, m_m, m_s) . Поскольку в аффинном пространстве определены только координаты точек и «свободные вектора», то для установления отличий (в частности расстояний) между разными векторами необходимо ввести метрику пространства, т.е. на базе аффинного пространства создать векторное.

Привычным для светотехников является эвклидово пространство с декартовой системой координат, метрику которого необходимо определить.

3.1. Вывод расчетных выражений

Для надпороговых условий можно записать:

$$m_l + m_m + m_s = n \ln \Lambda_{th}, \text{ где} \quad (3.2)$$

n - число пороговых значений $\ln \Lambda_{th}$ в $\ln \Lambda$.

$$\begin{aligned} \frac{m_l}{\ln \Lambda_{th}} + \frac{m_m}{\ln \Lambda_{th}} + \frac{m_s}{\ln \Lambda_{th}} &= n, \\ \frac{m_l}{\ln \Lambda_{th}} + \frac{m_m}{\ln \Lambda_{th}} &= n \left(1 - \frac{m_s}{n \ln \Lambda_{th}} \right), \\ \frac{m_l}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{n \ln \Lambda_{th}} \right)} + \frac{m_m}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{n \ln \Lambda_{th}} \right)} &= n. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Повторно используем в (3.3) выражение (3.2):

$$\frac{\frac{m_l}{\ln \Lambda_{th}}}{\left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s} \right)} + \frac{\frac{m_m}{\ln \Lambda_{th}}}{\left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s} \right)} = n \quad (3.4)$$

Для эвклидовой декартовой системы координат M_Λ , из (3.4) получим соотношение:

$$M_l^2 + M_m^2 = (\sqrt{n})^2, \quad (3.5)$$

где

$$\left. \begin{aligned} M_l &= \sqrt{\frac{m_l}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s} \right)}} \\ M_m &= \sqrt{\frac{m_m}{\ln \Lambda_{th} \left(1 - \frac{m_s}{m_l + m_m + m_s} \right)}} \end{aligned} \right\}. \quad (3.6)$$

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

3.2. Проверка равноконтрастности цветового пространства M_Λ в разных точках диаграммы цветности

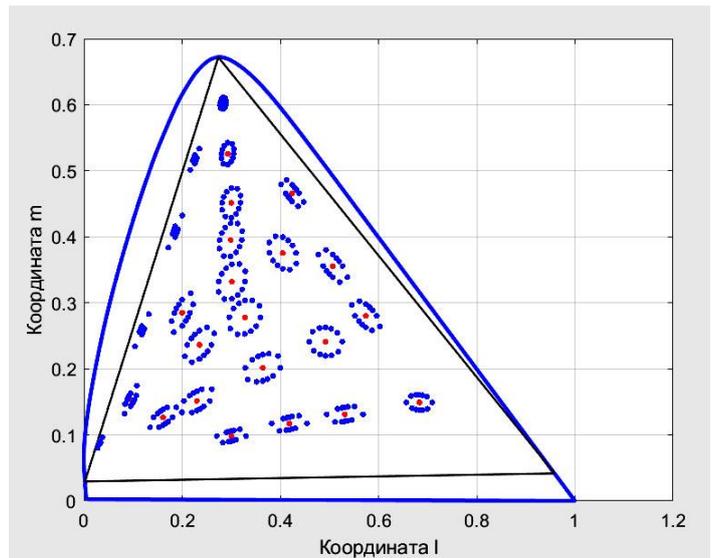
Для проверки равноконтрастности разработанного цветового пространства были проведены расчеты пороговых отличий цветности в условиях, соответствующим экспериментам МакАдама для двух КС - $(LMS)_{phys}$ и M_Λ . ПО из раздела 2.6 было дополнено расчетом M_Λ .

На рисунке 3.1 приведены исходные данные и пороговые эллипсы МакАдама, рассчитанные в системе $(LMS)_{phys}$ при использовании в качестве ОЦ трех монохроматических источников длинами волн 700 нм, 520 нм и 420 нм.

Как видно из приведенных графиков, 12 пороговых точек каждого эллипса не попадают на окружностях одного радиуса. Иная ситуация возникает при расчете в КС M_Λ .



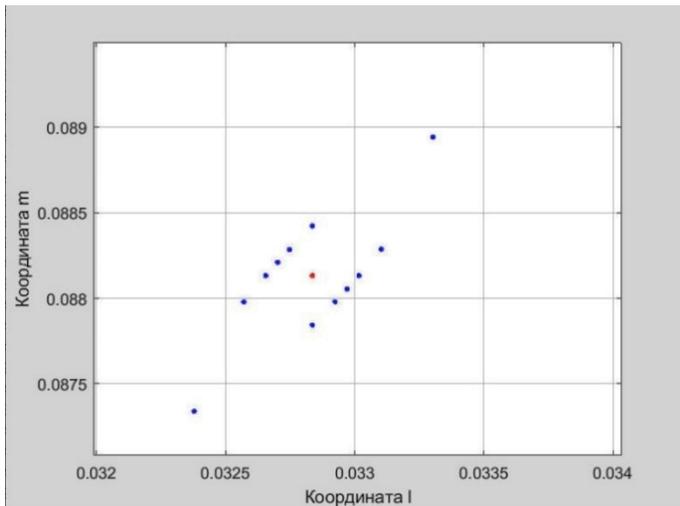
а)



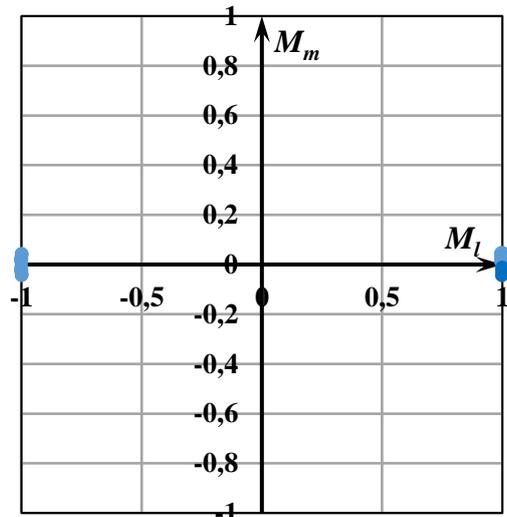
б)

Рисунок 3.1 – Исходные данные для расчета а) и пороговые эллипсы в $(LMS)_{phys}$ для монохроматических ОЦ с длинами волн 700 нм, 520 нм и 420 нм

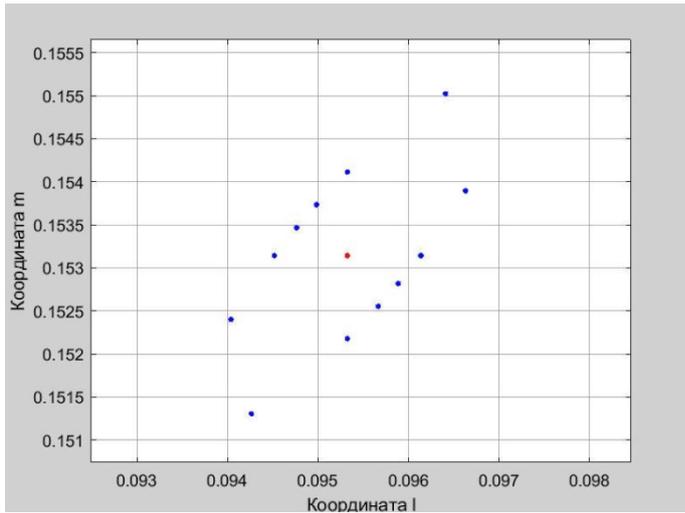
На рисунках 3.2 – 3.3 приведены вид пороговых эллипсов в $(LMS)_{phys}$ и результаты расчета в M_Λ с последовательным добавлением их на график M_Λ .



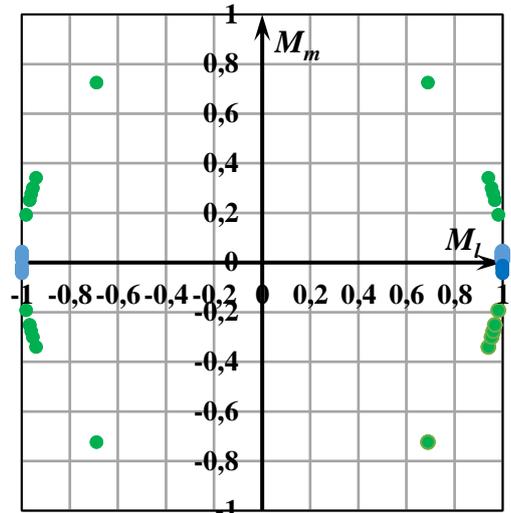
Эллипс 1 в $(LMS)_{phys}$



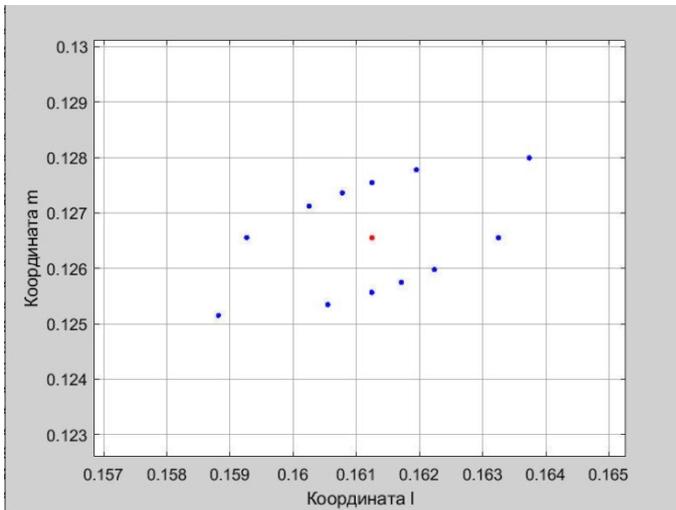
Эллипс 1 в M_Λ



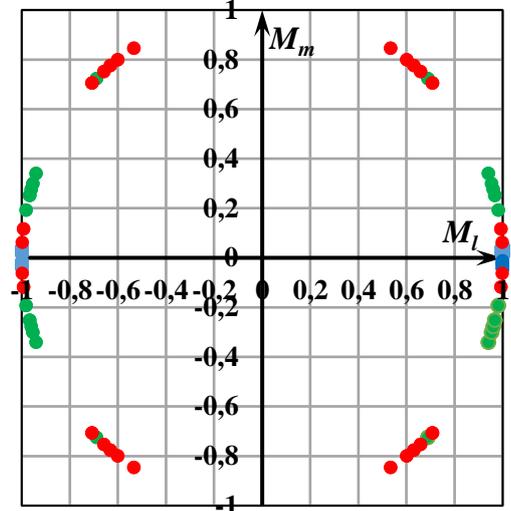
Эллипс 2 в $(LMS)_{phys}$



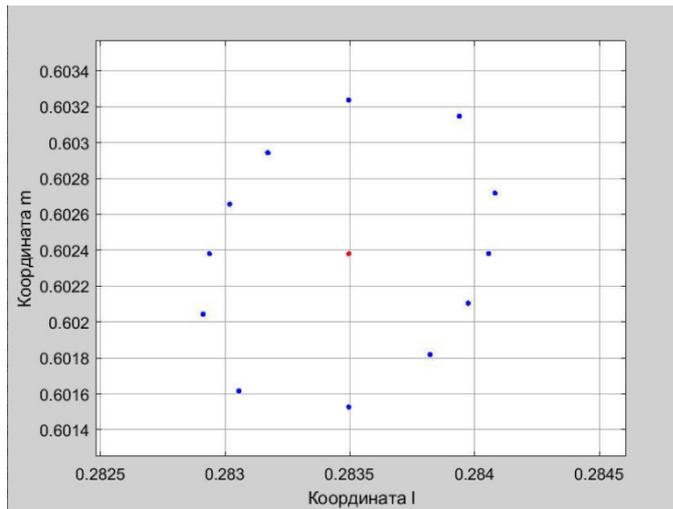
Эллипсы 1,2 в M_L



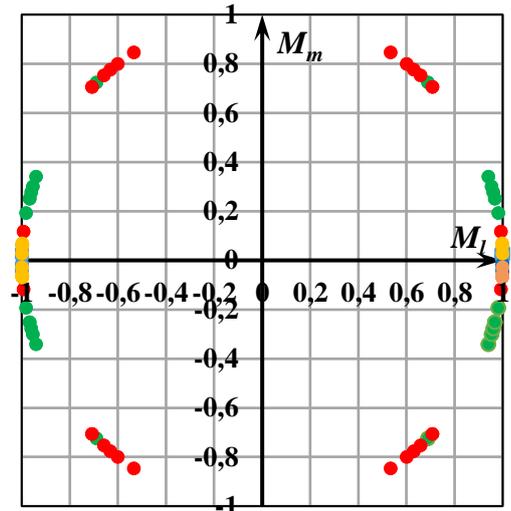
Эллипс 3 в $(LMS)_{phys}$



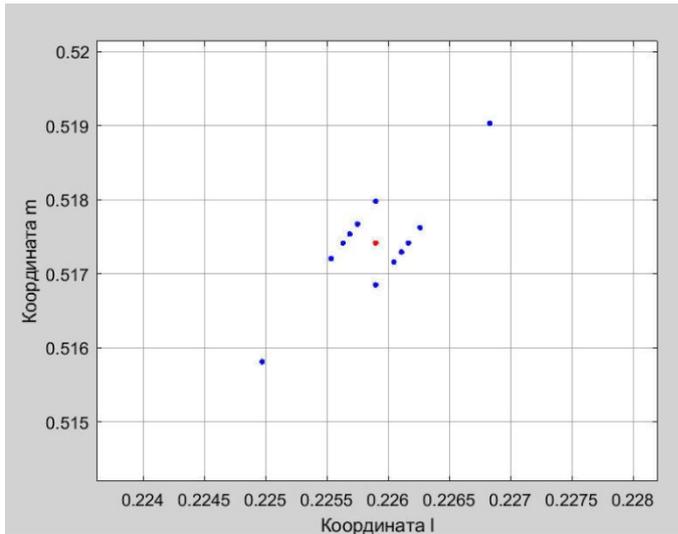
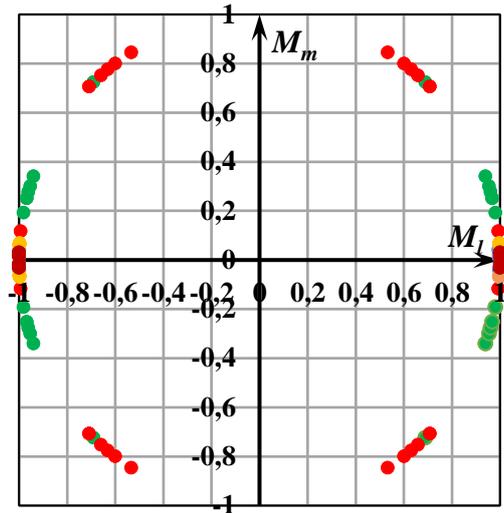
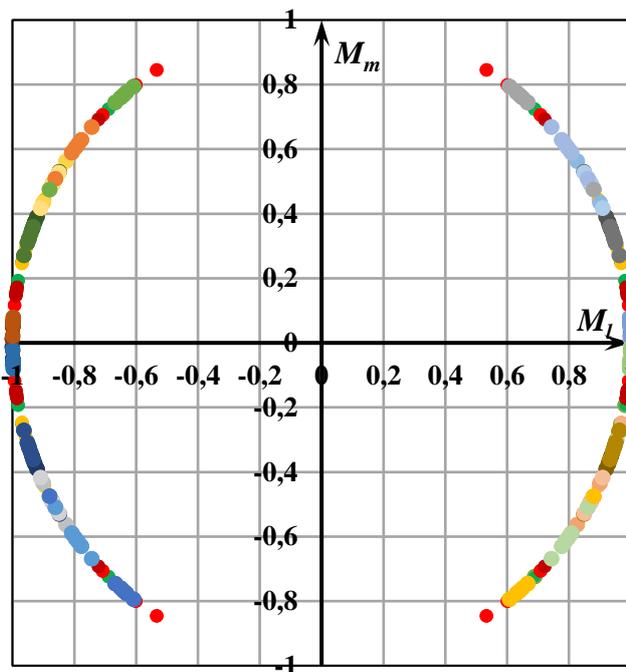
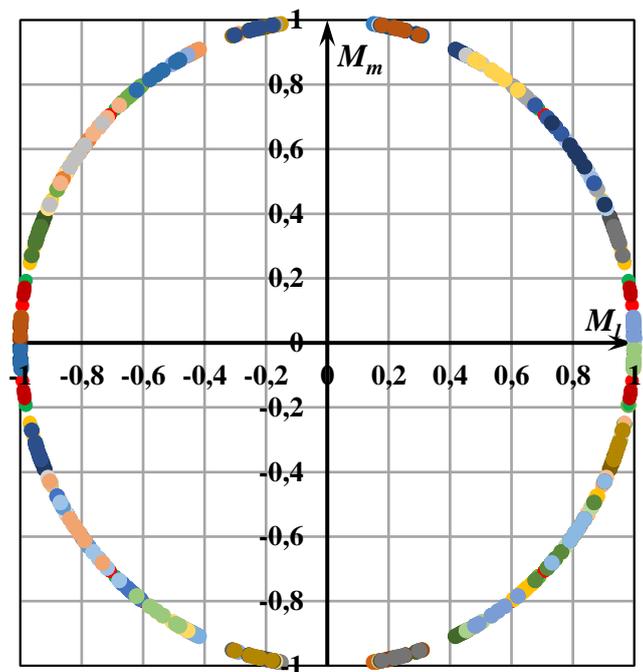
Эллипсы 1,2,3 в M_L



Эллипс 4 в $(LMS)_{phys}$



Эллипсы 1,2,3,4 в M_L

Эллипс 5 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 1,2,3,4 в M_L Рисунок 3.2 – Пороговые зависимости в $(LMS)_{phys}$ и их отображение в M_L Эллипсы 1-15 в M_L Эллипсы 1-25 в M_L Рисунок 3.3 – Пороговые зависимости в $(LMS)_{phys}$ и их отображение в M_L

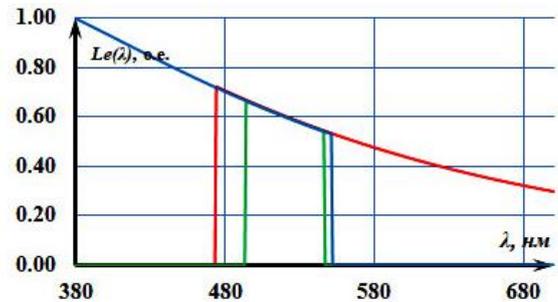
3.3. Проверка равноконтрастности цветового пространства M_L при изменении спектров излучений, создающих цветности эталона и объекта

Для проверки равноконтрастности M_L при изменении спектров ОЦ, создающих одну и ту же цветность эталонного объекта (координат центров

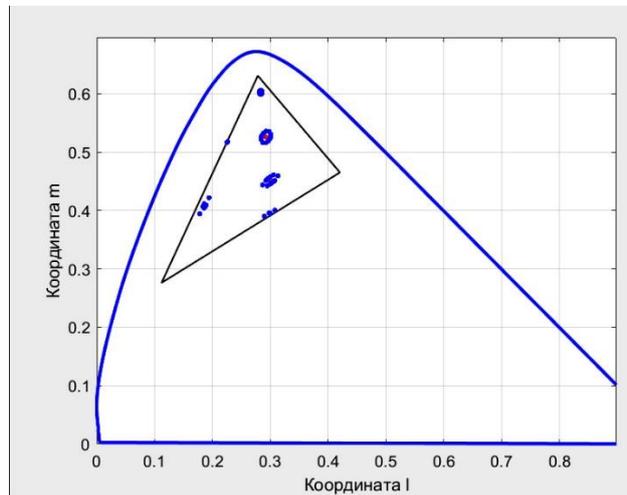
эллипсов), были проведены расчеты для монохроматических и не монохроматических ОЦ при вариации положений центров эллипсов на диаграмме цветности. Исходные данные и спектры ОЦ в относительных единицах представлены на рисунке 3.4.



а)



б)



с) пороговые зависимости в $(LMS)_{phys}$ для не монохроматических спектров ОЦ

Рисунок 3.4 – Исходные данные а), с) и спектры ОЦ в относительных единицах б)

На рисунках 3.3 – 3.6 приведены пороговые эллипсы для монохроматических (синие маркеры) ОЦ с системе $(LMS)_{phys}$, а также их представление в системе M_λ и те же эллипсы для немонохроматических ОЦ (красные маркеры).

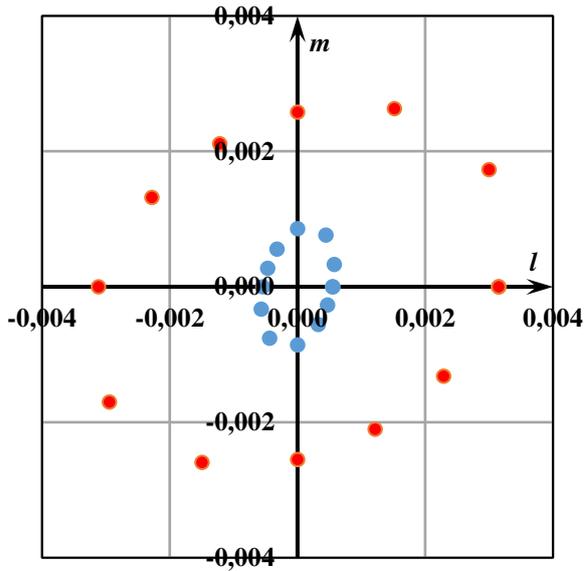
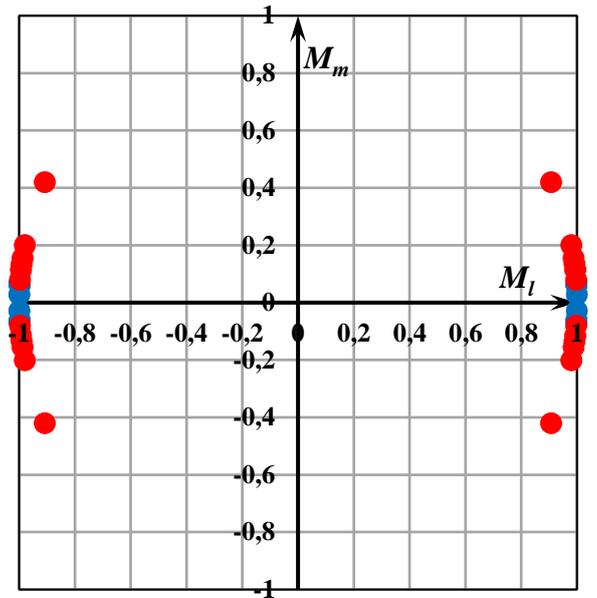
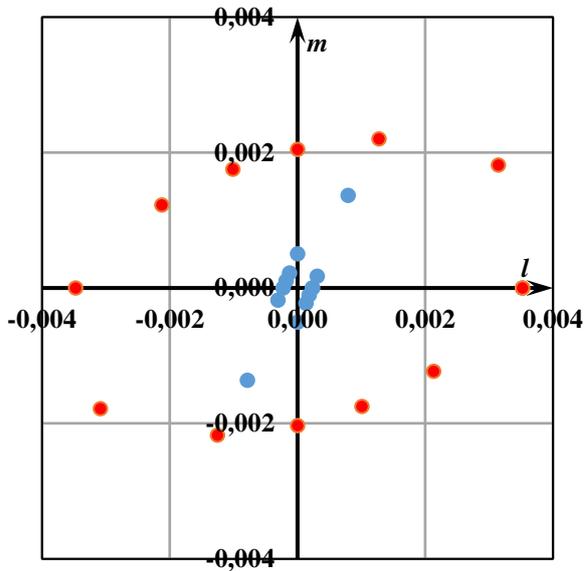
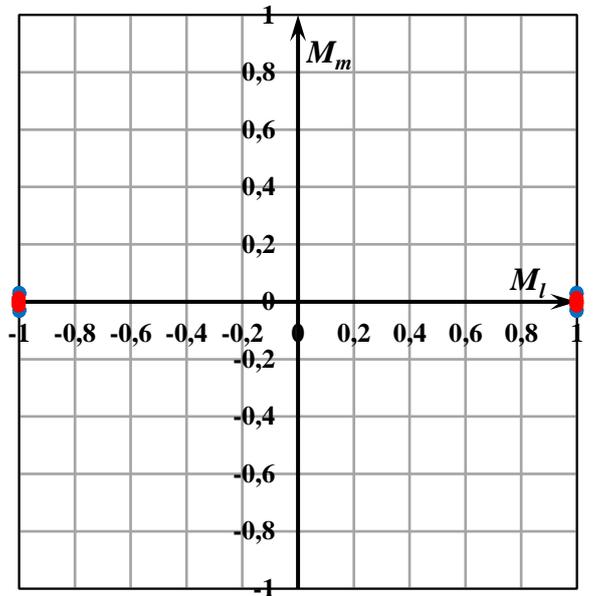
Эллипсы 4 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 4 в M_Λ Эллипсы 5 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 5 в M_Λ

Рисунок 3.4 – Пороговые эллипсы для монохроматических (синие маркеры) ОЦ с системе $(LMS)_{phys}$, а также их представление в системе M_Λ для некохроматических ОЦ (красные маркеры)

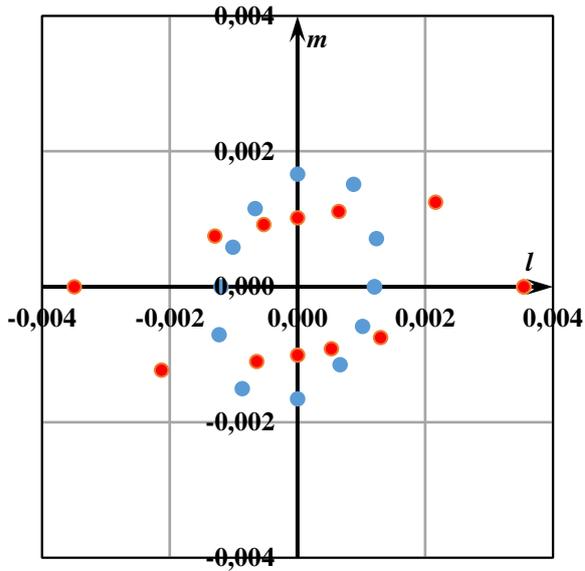
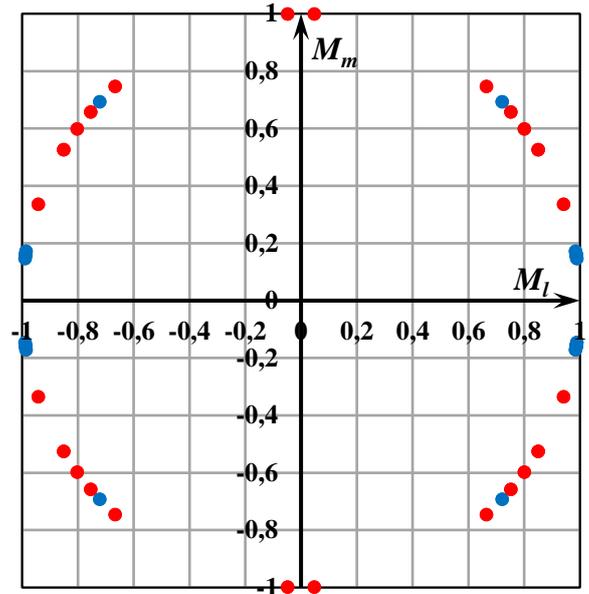
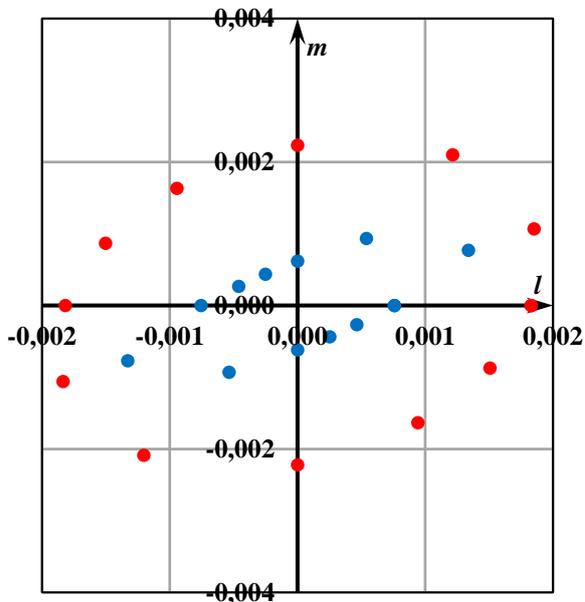
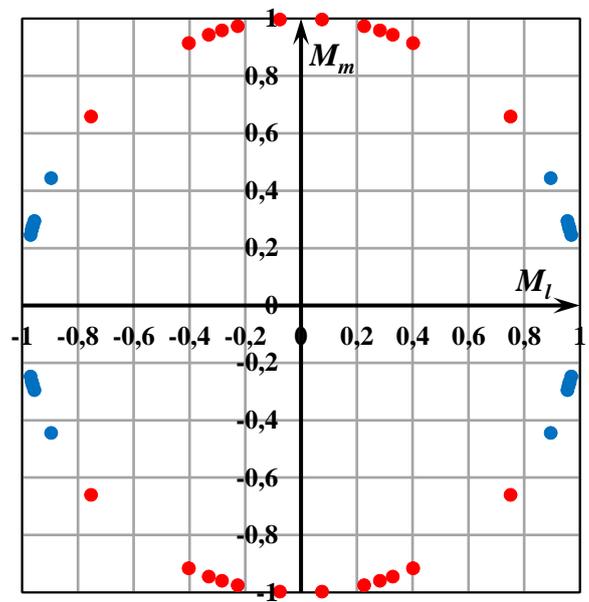
Эллипсы 6 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 6 в M_L Эллипсы 7 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 7 в M_L

Рисунок 3.5 – Пороговые эллипсы для монохроматических (синие маркеры) ОЦ с системе $(LMS)_{phys}$, а также их представление в системе M_L для немонахроматических ОЦ (красные маркеры)

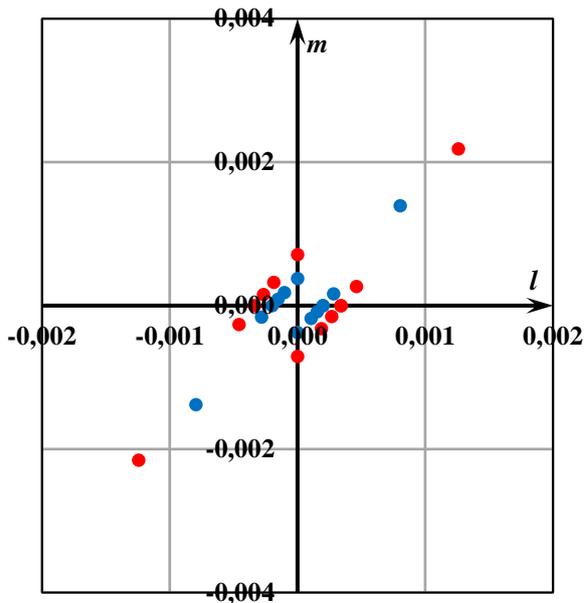
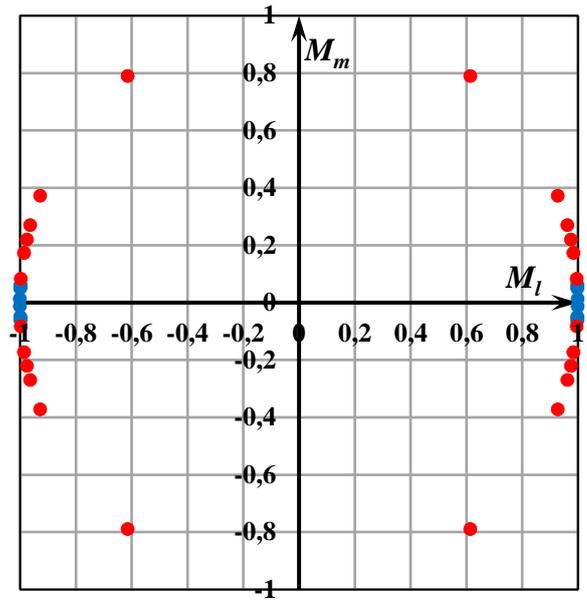
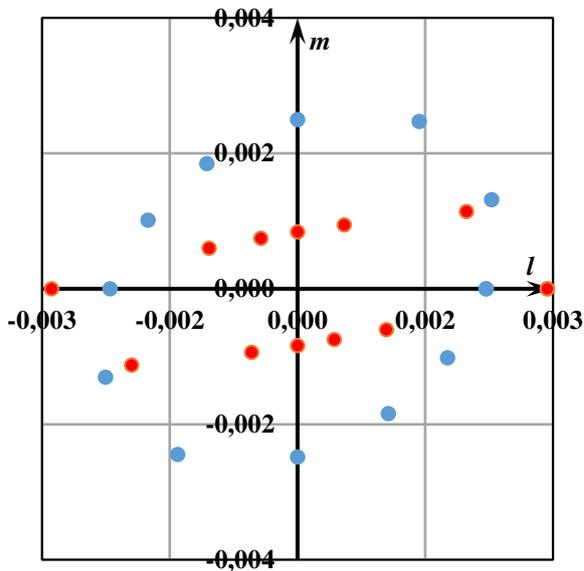
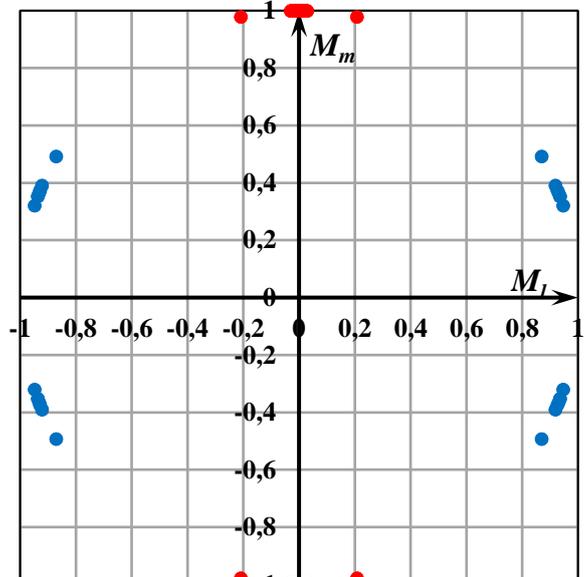
Эллипсы 8 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 8 в M_L Эллипсы 9 в $(LMS)_{phys}$ Эллипсы 9 в M_L

Рисунок 3.6 – Пороговые эллипсы для монохроматических (синие маркеры) ОЦ с системе $(LMS)_{phys}$, а также их представление в системе M_L для немонахроматических ОЦ (красные маркеры)

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. Если для какого-либо объекта вычисленное значение $\ln \Lambda = m_l + m_m + m_s$ будет больше или меньше $\ln \Lambda_{th}$, то его координаты не попадут на окружность единичного радиуса. Предлагаемое равноконтрастное пространство отличается от известных тем, что оно отражает не цвета объекта и фона, а отличие этих цветов, выраженное числом порогов.

Следует особо отметить, что данные выводы верны только для базовой колориметрии (согласно Э. Шрегингеру - *Basic Colorimetry*), которая определяет закономерности уравнивания цветов. В этих условиях не происходит переадаптации ЗС и влиянием рецепторов друг на друга можно пренебречь. Вопросы восприятия цветов, сильно отличающихся друг от друга, когда пороги в точках цветности объекта и эталона сильно отличаются, относятся к *Advanced Colorimetry* (в русскоязычных источниках – расширенная колориметрия, высшая колориметрия, высшая метрика цвета), и эти вопросы нуждаются в дальнейшем исследовании.

3.4. Проверочный эксперимент

Целью экспериментального исследования являлось сопоставление его результатов с проводимыми ранее расчетными исследованиями. В эксперименте принимали участие два предварительно тренированных наблюдателя с ранее полученными СЧР. 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 также использовался метод минимальных изменений на появление объекта, длины волн монохроматического излучения которого изменялись от 435 нм до 660 нм.

Поскольку в созданной установке яркости каналов объекта и фона складываются, то повторить на ней эксперименты МакАдама с яркостью объекта равной яркости фона невозможно.

На рисунке 3.7 нанесены экспериментальные пороговые точки для фонового излучения, совпадающего по цветности с центрами 14 и 17 эллипсов МакАдама. Радиусы окружностей проводились, исходя из минимизации СКО, полученному для среднего значения чувствительности исследуемых наблюдателей в области Вебера - Фехнера. Экспериментальные точки не выходят за границы доверительных интервалов $[0.32, 1.26]$ и $[0.83, 1.52]$, соответственно.

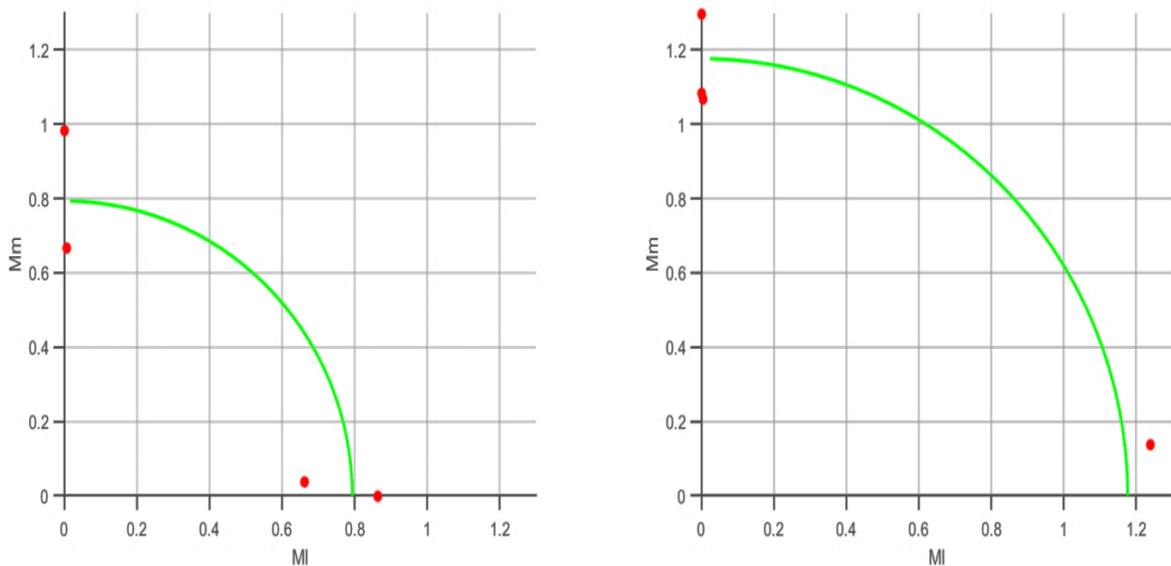


Рисунок 3.7 – Экспериментальные пороговые точки для 14 (слева) и для 17 (справа) эллипсов МакАдама в координатах Ml и Mm

На диаграмме цветности (Рисунок 3.8) синим цветом приведен 14 эллипс МакАдама, увеличенный в 10 раз, красным цветом – расчетная пороговая кривая наблюдателя, а точками отмечены результаты порогового эксперимента.

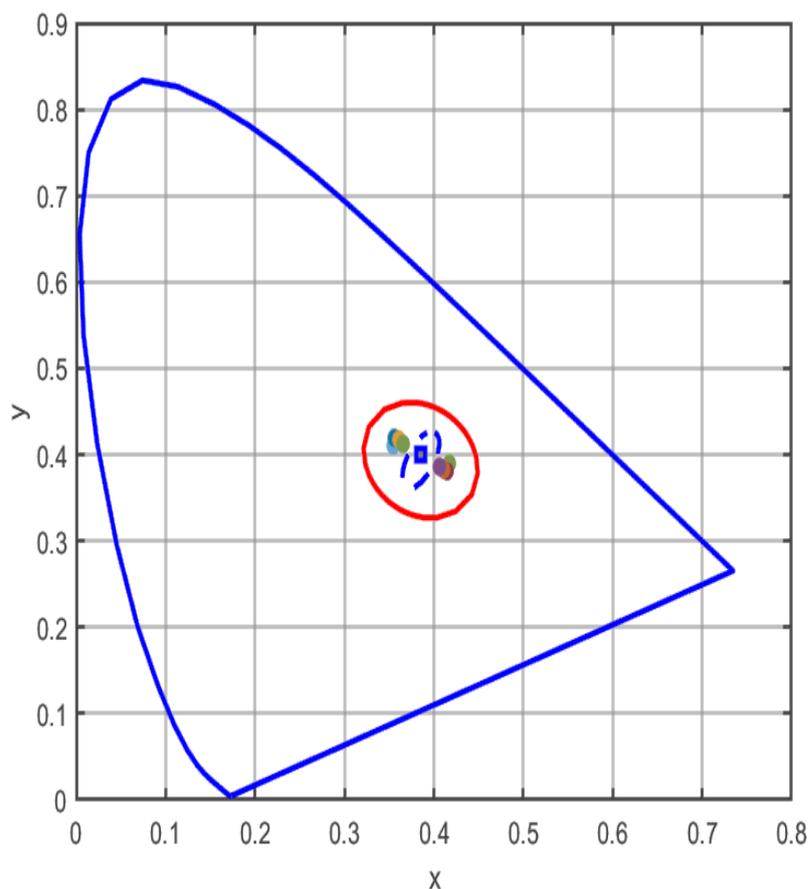


Рисунок 3.8 – Синяя линия – 14 эллипс Макадам, красная линия - расчетные цветовые пороги наблюдателя, обозначение маркером – экспериментальные цветовые пороги наблюдателя

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.

На рисунке 3.9 представлены результаты по пороговому обнаружению объекта на сплошном белом фоне для другого наблюдателя.

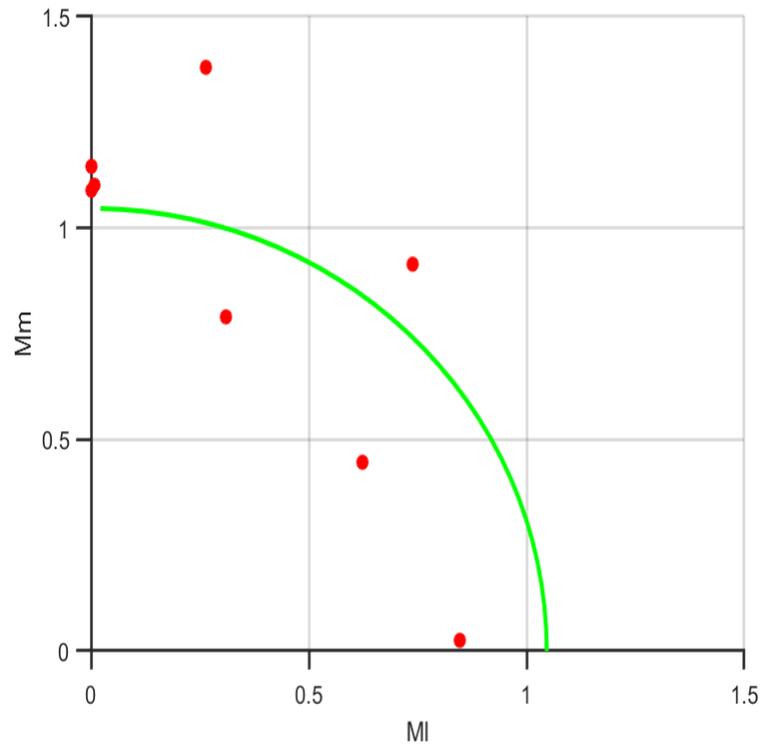


Рисунок 3.9 – Экспериментальные пороговые точки при проведении эксперимента на сплошном белом фоне в координатах M_l и M_m

Относительно предыдущего эксперимента можно наблюдать более разнесенные в пространстве точки, однако они все еще принадлежат доверительному интервалу $[0.41, 1.7]$.

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 по сравнению с LMS .

Моделирование цветных 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 цветных порогов при вариации условий наблюдения; расчетные исследования с использованием новой

ФКС (LMS)_{phys}; расчетные исследования с использованием новой РЦП M_{Δ} . Планируется продолжать развитие ММПЦЗ в области опознавания объектов и исследовать возможности ее применения к надпороговым условиям наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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).
3. 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.
4. 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).
5. 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.
6. 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).
7. Григорьев, А.А. Определение цветовых порогов на основе статистического подхода / А.А. Григорьев, В.А. Рыбина // Светотехника. – 2023. – № 1. – С. 65–67.

8. 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).
9. Robertson, A.R. Uncertainty. Simplicity and Reasonableness – Three Golden Rules of Modelling // *AIC 2007 – Color Science for Industry*. – 2007. – pp. 5–9.
10. 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)
11. 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).
12. 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).
13. Wyszecki, G. New Color-Matching Ellipses / G. Wyszecki, G.H. Fielder // *Journal of the Optical Society of America*. – 1971. – pp. 1135–1152. DOI: [10.1364/JOSA.61.001135](https://doi.org/10.1364/JOSA.61.001135).
14. 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.
15. CIE TN 001:2014. Chromaticity Difference Specification for Light Sources. // Vienna, CIE Central Bureau – 2014.
16. Raj Pant, D. Line Element and Variational Methods for Color Difference Metrics // Thesis for: PhD, URL: <https://www.theses.fr/2012STET4014.pdf> (дата обращения: 09.02.2023).
17. Xu, Q. Testing uniform colour spaces using colour differences of wide colour gamut / Q. Xu, B. Zhao, G. Cui, M.R. Luo // *Optics Express*. – 2021. –29(5). – pp. 7778-7793. DOI: [10.1364/OE.413985](https://doi.org/10.1364/OE.413985).
18. ISO 105-A02:1993. Textiles. Tests for colour fastness. Part A02: Grey scale for assessing change in colour. // ISO Geneva – 1993.

19. Xu, Q. Parametric effects in color-difference evaluation / Q. Xu, K. Shi, and M.R. Luo // *Optics Express*. – 2022. – 30(18). – pp. 33302-33319. DOI: [10.1364/OE.462628](https://doi.org/10.1364/OE.462628).
20. CIE 217:2016. Recommended Method for Evaluating the Performance of Colour-Difference Formulae // Vienna, CIE Central Bureau – 2016.
21. 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).
22. Melgosa, M. Notes on the application of the standardized residual sum of squares index for the assessment of intra- and inter-observer variability in color-difference experiments / M. Melgosa, P.A. García, L. Gómez-Robledo, R. Shamey, D. Hinks, G. Cui, M.R. Luo // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2011. – 28(5). – pp. 949–953. DOI: [10.1364/josaa.28.000949](https://doi.org/10.1364/josaa.28.000949).
23. 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.
24. CIE TC8-01. A color appearance model for color management systems // Vienna, CIE Central Bureau – 2004.
25. Fairchild, M.D. Color appearance models // John Wiley & Sons. – 2013. – p. 450. – ISBN:9781119967033. DOI: [10.1002/9781118653128](https://doi.org/10.1002/9781118653128)
26. Li, C. Colour-differences evaluation using colour appearance models / C. Li, M.R. Luo, G. Cui // *Color and Imaging Conference*. – 2003. – pp. 127–131. DOI: [10.2352/CIC.2003.11.1.art00022](https://doi.org/10.2352/CIC.2003.11.1.art00022).
27. Luo, M.R. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model / M.R. Luo, G. Cui, C. Li. // *Color Res. Appl.* – 2006. – 31(4). – pp. 320–330. DOI: [10.1002/col.20227](https://doi.org/10.1002/col.20227).
28. J. Morovič. Color gamut mapping // John Wiley & Sons. – 2008. – p. 320. – ISBN: 978-0470030325. DOI: [10.1002/9780470758922](https://doi.org/10.1002/9780470758922).

29. Li, C. Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS / C. Li, Z. Li, Z. Wang, Y. Xu, M.R. Luo, G. Cui, M. Melgosa, M.H. Brill, M. Pointer // *Color Res. Appl.* – 2017. – 42(6). – pp. 703–718. DOI: [10.1002/col.22131](https://doi.org/10.1002/col.22131).
30. Süsstrunk, S. Computing Chromatic Adaptation // Официальный сайт EPFL, URL: <https://www.epfl.ch/labs/ivrl/research/previous/page-65575-en-html/> (дата обращения: 28.04.2023).
31. Safdar, M. ZCAM, a colour appearance model based on a high dynamic range uniform colour space / M. Safdar, J.Y. Hardeberg, M.R. Luo // *Optics Express.* – 2021. – Vol. 29. – Issue 4. – pp. 6036-6052. DOI: [10.1364/OE.413659](https://doi.org/10.1364/OE.413659).
32. 1-98: A Roadmap Toward Basing CIE Colorimetry on Cone Fundamentals // Официальный сайт CIE, URL: <https://cie.co.at/technicalcommittees/roadmap-toward-basing-cie-colorimetry-cone-fundamentals> (дата обращения: 01.06.2022).
33. Smet, K.A.G. A simple principled approach for modeling and understanding uniform color metrics / K.A.G. Smet, M.A. Webster, L.A. Whitehead // *Journal of the Optical Society of America A.* – 2016. – 33(3). – pp. 319–331. DOI: [10.1364/JOSAA.33.00A319](https://doi.org/10.1364/JOSAA.33.00A319).
34. Боос, Г.В. Цвет и цветовые расчеты: учебное пособие по курсам "Основы светотехники" и "Моделирование и оценка цветоцветовой среды" для студентов обучающихся по направлению "Электроника и наноэлектроника" / Г.В. Боос, А.А. Григорьев, В.Ю. Снетков // М-во образования и науки Рос. Федерации. Нац. исслед. ун-т "МЭИ". - Москва: Издательский дом МЭИ. 2016. - 39 с.: ил. ; 20 см. - Библиогр.: с. 39. – ISBN 978-5-7046-1702-0.
35. Кустарев, А.К. Об основных цветах физиологической цветовой системы // *Светотехника.* – 1965. – № 6. – С. 5–11.
36. Мешков, В.В. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев // М.: Энергоатомиздат. – 2-е изд., перераб. и доп. – 1989. – 432 с.
37. König, A. Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farben Systemen und ihre Intensitäts-Verthielung im Spectrum / A. König, C.Z. Dieterici // *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.* – 1893. – 4. – pp. 241—347.

38. Ives, H.A. precision artificial eye // *Phys. Rev.* – 1915. – 6(5). – pp. 334. DOI: [10.1103/PhysRev.6.334](https://doi.org/10.1103/PhysRev.6.334).
39. Walters, H.V. Some Experiments on the Trichromatic Theory of Vision // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* – 1942. – 131(862). – pp. 27–50. DOI: [10.1098/rspb.1942.0016](https://doi.org/10.1098/rspb.1942.0016).
40. Pitt, F.H.G. The Nature of Normal Trichromatic and Dichromatic Vision // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* – 1944. – 132(866). – pp. 101–117. DOI: [10.1098/rspb.1944.0006](https://doi.org/10.1098/rspb.1944.0006).
41. Stiles, W.S. Separation of the “Blue” and “Green” Mechanisms of Foveal Vision by Measurements of Increment Thresholds // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences.* – 1946. – 133(873). – pp. 418–434. DOI: [10.1098/rspb.1946.0022](https://doi.org/10.1098/rspb.1946.0022).
42. De Vries, H. On the Basic Sensation Curves of the Three-Color Theory // *Journal of the Optical Society of America.* – 1946. – 36(3). – pp. 121–127. DOI: [10.1364/josa.36.000121](https://doi.org/10.1364/josa.36.000121).
43. Szekeres, G. A New Determination of the Young-Helmholtz Primaries. *Journal of the Optical Society of America.* – 1948. – 38(4). – pp. 350–363. DOI: [10.1364/josa.38.000350](https://doi.org/10.1364/josa.38.000350).
44. Юстова, Е.Н. Спектральная чувствительность приемников глаза // *ДАН СССР.* – 1950. – Т. 74. – № 6.
45. Thomson, L. The Convergence of the Tritanopic Confusion Loci and the Derivation of the Fundamental Response Functions / L.C. Thomson, W.D. Wright // *Journal of the Optical Society of America.* – 1953. – 43(10). – pp. 890–894. DOI: [10.1364/josa.43.000890](https://doi.org/10.1364/josa.43.000890).
46. Федоров, Н.Т. Одновременный цветовой контраст / Н.Т. Федоров, М.А. Юрьев, В.В. Складчевич // *Проблемы физиологической оптики.* – 1953. – т. 8.
47. Brewer, W.L. Fundamental Response Functions and Binocular Color Matching // *Journal of the Optical Society of America.* – 1954. – 44(3). – pp. 207–212. DOI: [10.1364/josa.44.000207](https://doi.org/10.1364/josa.44.000207).

48. MacAdam, D.L. Chromatic Adaptation // Journal of the Optical Society of America. – 1956. – 46(7). – pp. 500–513. DOI: [10.1364/josa.46.000500](https://doi.org/10.1364/josa.46.000500).
49. Sperling, H.G. Case of Congenital Tritanopia with Implications for a Trichromatic Model of Color Reception // Journal of the Optical Society of America. – 1960. – 50(2). – pp. 156–163. DOI: [10.1364/josa.50.000156](https://doi.org/10.1364/josa.50.000156).
50. A Roadmap Toward Basing CIE Colorimetry on Cone Fundamentals // Официальный сайт CIE, URL: <https://cie.co.at/technicalcommittees/roadmap-toward-basing-cie-colorimetry-cone-fundamentals> (дата обращения: 01.06.2022).
51. CIE 170-1:2006. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes - Part 1 // Vienna, CIE Central Bureau – 2006.
52. 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).
53. 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).
54. 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).
55. 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).
56. Джадд Д. Цвет в науке и технике. / Д. Джадд, Г. Вышецки // М. Мир. – 1978 – 592 с. илл.
57. Матвеев А.Б. Проблемы построения равноконтрастного пространства // Светотехника. – 1964. – №12. – С. 1–6.
58. 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.

- 59.Будак, В. П. Основы светотехники: учебник по курсу "Основы светотехники" по направлению подготовки бакалавров 11.03.04. Электроника и наноэлектроника НИУ "МЭИ"/ В.П. Будак, А.А. Григорьев, П.А. Смирнов, В.Ю. Снетков // М: Издательство МЭИ, 2023. – 532 с. – ISBN 978-5-7046-2807-7.
- 60.Рыбина, В.А. Статистический метод определения спектральной чувствительности КЗС-рецепторов / В.А. Рыбина, А.А. Григорьев, Г.В. Боос // Первый всероссийский конгресс по цвету. – М.: ООО издательство «Согласие». – 2019. – С. 59–60.
- 61.Рыбина, В.А. Методы расчета удельных координат цвета в колориметрической системе КЗС / В.А. Рыбина, А.А. Григорьев, И.П. Шестопалова // Международная выставка декоративного и технического освещения. электротехники и автоматизации зданий: сборник докладов научно-технической конференции. – М: Издательство МЭИ. – 2018. – С. 101–105.
- 62.Боос, Г.В. Исследование монохроматических порогов цветового зрения трихромата / Г.В. Боос, А.А. Григорьев, В.А. Рыбина, И.Т. Николаева // Доклады XXVII Всероссийской научно-технической конференции "Инновационная светотехника России": сборник докладов. – М.: Издательство МЭИ. – 2021. С. 13–17.
- 63.Рабкин, Е. Б. Полихроматические таблицы для исследования цветоощущения – М.: Медицина. – 1971. – 174 с.
- 64.Боос, Г.В. О координатах цветности основных цветов колориметрической системы КЗС/ Г.В. Боос, А.А. Григорьев // Светотехника. – 2016. – № 3. – С. 30–34.
- 65.Рыбина, В.А. Сравнение колориметрической системы КЗС дихромата и колориметрической системы КЗС человека с нормальным цветовым зрением / В.А. Рыбина, А.А. Григорьев, Г.В. Боос // Международная научная конференция Российского общества цвета – М.: СмолГУ. – 2020. С. 75–76.
- 66.Implementation of CIE 2006 Cone Fundamentals in Photometric and Colorimetric Measurements // Официальный сайт CIE, URL: <https://cie.co.at/researchforum/rf-05> (дата обращения: 11.06.2023).

67. 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.
68. Боос, Г.В. Определение вероятности обнаружения цветных объектов на цветных фонах на основе статистической модели порогового цветового зрения человека // Светотехника. – 2017. – № 6. – С. 27–31.
69. Hunt, R.W.G. Measuring Colour. Fourth Edition / R.W.G. Hunt, M.R. Pointer // Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology. – 2011. – 469 p. DOI: [10.1002/9781119975595](https://doi.org/10.1002/9781119975595).

СОКРАЩЕНИЯ

- cone fundamentals* – фундаментальные параметры колбочек;
- ВОЖ – волоконно-оптический жгут;
- ДЦ – диаграмма цветности;
- ЗС – зрительная система;
- ИКО – интегральный критерий ошибки;
- ИС или ИИ – источник света или источник излучения;
- КАТ (англ. *CAT*) – преобразования хроматической адаптации
- КС – колориметрическая система;
- МКО (фр. *CIE*) – Международная комиссия по освещению;
- ММПЦЗ – математическая модель порогового цветового зрения;
- МО – математическое ожидание;
- МЦВ (англ. *SAM*) – модель цветового восприятия;
- ОЦ – основные цвета;
- ПО – программное обеспечение;
- РЦП (англ. *UCS*) – равноконтрастное цветовое пространство;
- СКО – среднеквадратическое отклонение;
- СЧР – спектральные чувствительности рецепторов;
- ТК – технический комитет;

УКЦ – удельные координаты цвета;

ФКС – физиологическая колориметрическая система;

ФС (англ. *CMF*) – функции сложения;

ЦП – цветовое пространство;

ЦР (англ. *CD*) – цветовое различие;

ЭУ – экспериментальная установка.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Oleari's OSA-UCS colour space

Цветовое пространство *OSA-UCS* было впервые опубликовано в 1947 году Американским оптическим обществом (*OSA*) и получило дальнейшее развитие в последующие годы. Модель основана на характеристике цветов с использованием около 500 точек решетки правильной ромбоэдрической формы в евклидовом пространстве. Это может быть проиллюстрировано кубом, каждый из восьми углов которого срезан симметрично. Использовался стандартный наблюдатель МКО 10° и стандартный источник света *D65* [69].

Это цветовое пространство основано на трех перпендикулярных координатах: L_{OSA} , J (ось желтый/синий) и G (ось зеленый/красный).

Для *OSA-UCS* светлота L_{OSA} значение 0 соответствует нейтральному фону с отражающей способностью 30%.

При почти нулевых значениях G положительные значения J указывают на желтоватые или коричневатые цвета, а отрицательные значения J - на синие цвета. Предполагая близкие к нулю значения для J , положительные значения G указывают на зеленый цвет, а отрицательные значения G - на фиолетовый.

В этом документе применяется концепция Олеари о логарифмическом сжатии цветности и освещенности, приводящая к ΔE_E , с использованием новых координат J и G .

Для преобразования координат цвета X, Y, Z или координат цветности x, y , соответственно, в систему *OSA-UCS*, предложенную Олеари, применяются следующие формулы (П.1)-(П.3):

Пусть (Y_{10}, x_{10}, y_{10}) и (L_{OSA}, J, G) - цветовая спецификация в двух местах. Единица измерения расстояния в пространстве *OSA-UCS* равна приблизительно 10 *JND*, при условии, что это пространство соответствует евклидовой метрике.

$$L_{OSA} = \left\{ 5.9 \left[\left(Y_0^{1/3} - \frac{2}{3} \right) + 0.042(Y_0 - 30)^{1/30} \right] - 14.4 \right\} \frac{1}{\sqrt{2}}, \text{ где} \quad (\text{П.1.1})$$

$$Y_0 = Y_{10} \left(4.493 \cdot x_{10}^2 + 4.303 \cdot y_{10}^2 - 4.276x_{10}y_{10} - 1.374x_{10} - 2.564y_{10} + 1.8103 \right).$$

Светлота L_{OSA} не имеет простого аналитического преобразования из пространства $OSA-UCS$ в трехстимульное пространство.

Координаты J и G , которые соответствуют эмпирическим j и g системы $OSA-UCS$, получены путем последовательности линейных преобразований и логарифмического сжатия – см. формулу (П.1.2) и формулу (П.1.3):

$$\begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.6597 & 0.4492 & -0.1089 \\ -0.3053 & 1.2126 & 0.0927 \\ -0.0374 & 0.4795 & 0.5579 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_{10} \\ Y_{10} \\ Z_{10} \end{pmatrix} \quad (\text{П.1.2})$$

$$\begin{pmatrix} J \\ G \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_J & 0 \\ 0 & S_G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\sin \alpha & \cos \alpha \\ \sin \beta & -\cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ln \frac{A/B}{A_n/B_n} \\ \ln \frac{B/C}{B_n/C_n} \end{pmatrix} = \quad (\text{П.1.3})$$

$$= \begin{pmatrix} 2(0.5735L_{OSA} + 7.089) & 0 \\ 0 & 2(0.764L_{OSA} + 9.2521) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0.1792 & 0.9837 \\ 0.9482 & -0.3175 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ln \frac{A/B}{0.9366} \\ \ln \frac{B/C}{0.9807} \end{pmatrix}.$$

S_G и S_J - подходящие коэффициенты нормировочного масштаба, а α и β - углы между опорными осями основных функций цветовой контрастности и направлениями параллельных линий с постоянными g и j соответственно. A_n , B_n и C_n являются значениями A , B и C в соответствии с формулой (П.2) для нейтрального стандартного источника D65.

Углы цветности и оттенка получаются в пространстве $OSA-UCS$ из координат J и G , как в $CIELAB$ из a^* и b^* в соответствии с формулой (П.1.4):

$$C_{OSA} = \sqrt{J^2 + G^2} \quad (\text{П.1.4})$$

$$h_{OSA} = \arctan\left(\frac{J}{-G}\right) \text{deg}.$$

Исходя из цветового пространства, предложенного Олеари (см. П.1), была предложена формула разности цветов ΔE_{GP} . Далее, на основе логарифмического сжатия координат $OSA-UCS$ в цветовом пространстве Олеари, были предложены новые координаты L_E , J_E , G_E , определяющие новое цветовое пространство с помощью евклидовой формулы цветового различия, названной ΔE_E .

Основываясь на исходных координатах C_{OSA} и L_{OSA} , определения этой формулы и пространства $OSA-UCS$ со сжатыми логарифмами цветности и светлоты воспроизводятся формулой (П.1.5) до (П.1.9):

$$\Delta E_E = \sqrt{(\Delta L_E)^2 + (\Delta J_E)^2 + (\Delta G_E)^2}, \quad (\text{П.1.5})$$

$$L_E = \left(\frac{1}{b_L}\right) \ln \left[1 + \frac{b_L}{a_L} (10L_{OSA}) \right], \text{ где} \quad (\text{П.1.6})$$

$$a_L = 2.89 \text{ и } b_L = 0.015$$

$$G_E = -C_E \cos(h) \quad (\text{П.1.7})$$

$$J_E = C_E \sin(h)$$

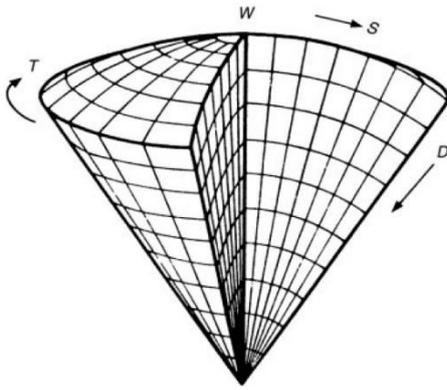
$$C_E = \left(\frac{1}{b_C} \right) \ln \left[1 + \frac{b_C}{a_C} (10C_{OSA}) \right] \quad (\text{П.1.8})$$

$$h = \arctan \left(-\frac{J}{G} \right) \text{deg}$$

$$a_C = 1.256 \text{ и } b_C = 0.050$$

$$C_{OSA} = \sqrt{J^2 + G^2} . \quad (\text{П.1.9})$$

DIN99o colour space



Формула *DIN99o* была результатом корректировки параметров хорошо зарекомендовавшего себя цветового пространства *CIELAB*. Цель состояла в том, чтобы привести результаты цветовых различий в соответствие с *CIEDE2000*, сохранив при этом свойства цветового пространства. Векторы больше не имеют значения в формуле *CIEDE2000*, следовательно цветовое пространство, основанное на формуле *CIEDE2000*, отсутствует [68].

Отправной точкой для определения цветовых координат L_{99o} , a_{99o} , b_{99o} , C_{99o} , h_{99o} формулы *DIN99o* является определение цветовых координат L^* , a^* , b^* в соответствии со стандартом *ISO/CIE 11664-4*.

Цветовые координаты L_{99o} , a_{99o} , b_{99o} , C_{99o} , h_{99o} определяются в соответствии с формулами (П.1.10)-(П.1.23):

$$\text{DIN 99o светлота:} \quad L_{99o} = 303.67 \ln(1.0 + 0.0039L^*) / k_E \quad (\text{П.1.10})$$

$$\text{Вспомогательная переменная для красного:} \quad e_o = a^* \cdot \cos 26^\circ + b^* \cdot \sin 26^\circ \quad (\text{П.1.11})$$

$$\text{Вспомогательная переменная для желтизны:} \quad f_o = -0.83 \cdot a^* \cdot \cos 26^\circ + 0.83 \cdot b^* \cdot \sin 26^\circ \quad (\text{П.1.12})$$

$$\text{Вспомогательная переменная для цветности:} \quad G_o = (e_o^2 + f_o^2)^{0.5} \quad (\text{П.1.13})$$

Вспомогательная переменная для определения угла оттенка:

$$h_{e_o f_o} = \arctan \left(\frac{f_o}{e_o} \right) \quad \text{для } e_o > 0 \text{ и } f_o \geq 0 \quad (\text{П.1.14})$$

$$h_{e_o f_o} = \pi/2 \quad \text{для } e_o = 0 \text{ и } f_o > 0 \quad (\text{П.1.15})$$

$$h_{e_{ofo}} = \pi + \arctan(f_o/e_o) \quad \text{для } e_o < 0 \quad (\text{П.1.16})$$

$$h_{e_{ofo}} = 3\pi/2 \quad \text{для } e_o = 0 \text{ и } f_o < 0 \quad (\text{П.1.17})$$

$$h_{e_{ofo}} = 2\pi + \arctan(f_o/e_o) \quad \text{для } e_o > 0 \text{ и } f_o < 0 \quad (\text{П.1.18})$$

$$h_{e_{ofo}} = 0 \quad \text{для } e_o = 0 \text{ и } f_o = 0. \quad (\text{П.1.19})$$

$$\text{DIN 99o угол оттенка в градусах: } h_{e_{ofo}} = 0 \quad h_{e_{ofo}} = 0 \quad (\text{П.1.20})$$

$$h_{e_{ofo}} = 0 \quad h_{e_{ofo}} = 0$$

$$\text{DIN 99o цветность: } C_{99o} = \ln(1.0 + 0.075 \cdot G_o) / (0.0043 \cdot 5 \cdot k_{CH} \cdot k_E) \quad (\text{П.1.21})$$

$$\text{DIN 99o зелено-красное соотношение: } a_{99o} = C_{99o} \cdot \cos(h_{99o}) \quad (\text{П.1.22})$$

$$\text{DIN 99o сине-желтое соотношение: } b_{99o} = C_{99o} \cdot \sin(h_{99o}) \quad (\text{П.1.23})$$

Если заданы цветовые координаты L_{99o} , a_{99o} , b_{99o} или L_{99o} , C_{99o} , h_{99o} , цветовые координаты L^* , a^* , b^* , C^* и h могут быть рассчитаны в соответствии с *ISO/CIE 11664-4*:

$$\text{DIN 99o цветность: } C_{99o} = \left((a_{99o})^2 + (b_{99o})^2 \right)^{0.5} \quad (\text{П.1.24})$$

DIN 99o угол оттенка в градусах:

$$h_{99o} = 180^\circ \arctan(b_{99o}/a_{99o}) / \pi \quad \text{для } a_{99o} > 0 \text{ и } b_{99o} \geq 0 \quad (\text{П.1.25})$$

$$h_{99o} = 90^\circ \quad \text{для } a_{99o} = 0 \text{ и } b_{99o} > 0 \quad (\text{П.1.26})$$

$$h_{99o} = 180^\circ + 180^\circ \arctan(b_{99o}/a_{99o}) / \pi \quad \text{для } a_{99o} < 0 \quad (\text{П.1.27})$$

$$h_{99o} = 270^\circ \quad \text{для } a_{99o} = 0 \text{ и } b_{99o} < 0 \quad (\text{П.1.28})$$

$$h_{99o} = 360^\circ + 180^\circ \arctan(b_{99o}/a_{99o}) / \pi \quad \text{для } a_{99o} > 0 \text{ и } b_{99o} < 0 \quad (\text{П.1.29})$$

$$h_{99o} = 0^\circ \quad \text{для } a_{99o} = 0 \text{ и } b_{99o} = 0. \quad (\text{П.1.30})$$

$$\text{Вспомогательная переменная: } h_{e_{ofo}} = (h_{99o} - 26^\circ) \pi / 180^\circ \quad (\text{П.1.31})$$

$$\text{DIN 99o цветность: } G_o = [\exp(0.043) \cdot 5 \cdot C_{99o} \cdot k_{CH} \cdot k_E - 1.0] / 0.075 \quad (\text{П.1.32})$$

$$\text{DIN 99o зелено-красное соотношение: } e_o = G_o \cdot \cos(h_{e_{ofo}}) \quad (\text{П.1.33})$$

$$\text{DIN 99o сине-желтое соотношение: } f_o = G_o \cdot \sin(h_{e_{ofo}}) \quad (\text{П.1.34})$$

$$\text{CIELAB зелено-красное соотношение: } a^* = e_o \cdot \cos(26^\circ) - (f_o / 0.83) \cdot \sin(26^\circ) \quad (\text{П.1.35})$$

$$\text{CIELAB сине-желтое соотношение: } b^* = e_o \cdot \sin(26^\circ) - (f_o / 0.83) \cdot \cos(26^\circ) \quad (\text{П.1.36})$$

$$\text{CIELAB цветность: } C^* = \left[(a^*)^2 + (b^*)^2 \right] \quad (\text{П.1.37})$$

$$\text{CIELAB светлота: } L^* = [\exp(L_{99o} \cdot k_E) / 303.67 - 1] / 0.003 \quad (\text{П.1.38})$$

Разница в цвете ΔE_{99o} рассчитывается в соответствии с формулой *DIN99o*, как указано в формуле:

$$\text{DIN 99o цветовая разница: } \Delta E_{99o} = \left[(\Delta L_{99o})^2 + (\Delta a_{99o})^2 + (\Delta b_{99o})^2 \right]^{0.5} \quad (\text{П.1.39})$$

$$\text{DIN 99o светлотная разница: } \Delta L_{99o} = \left[L_{99o,P} - L_{99o,B} \right] \quad (\text{П.1.40})$$

$$\text{DIN 99o красно-зеленая разница: } \Delta a_{99o} = \left[a_{99o,P} - a_{99o,B} \right] \quad (\text{П.1.41})$$

$$\text{DIN 99o желто-синяя разница: } \Delta b_{99o} = \left[b_{99o,P} - b_{99o,B} \right] \quad (\text{П.1.42})$$

Аналогично разделению разницы в цвете на различия в освещенности, цветности и оттенке в соответствии с *ISO/CIE 11664-4*, для формулы *DIN99o* применяется следующее в случае, если $C_{99o,P} > 0$ и $C_{99o,B} > 0$:

Разница в цвете *DIN 99o* в соответствии с формулой (П.1.43):

$$\Delta E_{99o} = \left[(\Delta L_{99o})^2 + (\Delta C_{99o})^2 + (\Delta H_{99o})^2 \right]^{0.5} \quad (\text{П.1.43})$$

Разница в цветности *DIN 99o* в соответствии с формулой (П.1.44):

$$\Delta C_{99o} = \left[C_{99o,P} - C_{99o,B} \right] \quad (\text{П.1.44})$$

Разница оттенков *DIN 99o* в соответствии с формулой (П.1.45):

$$\Delta H_{99o} = \left[2C_{99o,B}C_{99o,P} - a_{99o,B}a_{99o,P} - b_{99o,B}b_{99o,P} \right]^{0.5} \quad (\text{П.1.45})$$

CIECAM16-UCS colour space

Модели восприятия цвета в основном используются для прогнозирования внешнего вида цвета в различных условиях просмотра, таких как ИС, яркость, фон и окружающие условия.

В 2016 году было обнаружено, что в определенных случаях могут возникать вычислительные сбои, например, при обработке изображений в приложениях кросс-медийной цветопередачи. Итак, *CIECAM02* был изменен и стал *CAM16*. Его равноконтрастное цветовое пространство *CAM02-UCS* и хроматическая адаптация *CAT02* также были изменены и теперь стали *CAM16-UCS* и *CAT16*, соответственно.

Начиная с СIE 1931 года, координаты *X*, *Y* и *Z* вместе с четырьмя параметрами для определения условий просмотра: источник света (*X_w*, *Y_w* и *Z_w*), адаптируемая яркость (*L_a*), коэффициент яркости фона (*Y_b*), окружающее пространство, модель *CAM16* определяет светлоту *J*, цветность *C*, состав оттенка *H*, угол оттенка *h*, цветность *M*, насыщенность *s* и яркость *Q*. Соответствующее цветовое пространство *CAM16-UCS* основано на свойствах *J* для светлоты, *M* для цветности и *h* для угла оттенка.

При вычислении цветовых различий часто используются координаты X , Y и Z 1964 года.

CIECAM16-UCS был разработан Ли и др. [29] на основе ортогональных коррелятов внешнего вида J' , M' и h' , которые представляют светлота, цветность и угол оттенка соответственно. Они рассчитываются с использованием модели **CIECAM16**. РЦП на основе **CIECAM16** определяется формулой (П.1.46) к формуле (П.1.50):

$$J' = \frac{17J}{1 + 0.007J} \quad (\text{П.1.46})$$

$$M' = \ln(1 + 0.0228M) / 0.0228 \quad (\text{П.1.47})$$

$$a' = M' \cdot \cos(h) \quad (\text{П.1.48})$$

$$b' = M' \cdot \sin(h) \quad (\text{П.1.49})$$

$$h' = h \quad (\text{П.1.50})$$

Координаты J' , a' и b' определяют приблизительно РЦП, связанное с моделью **CIECAM16**, сокращенно **CIECAM16-UCS**. Цветовую разницу между двумя образцами можно вычислить как евклидово расстояние между ними в **CIECAM16-UCS** – см. формулу (П.1.51):

$$\Delta E' = \left[(\Delta J')^2 + (\Delta a')^2 + (\Delta b')^2 \right]^{0.5}, \text{ где} \quad (\text{П.1.51})$$

J' , a' и b' представляют собой разности J , a и b между парой образцов, соответственно.

Чтобы улучшить математические прогнозы наборов визуальных цветоразностных данных, для $\Delta E_{\text{CIECAM16-UCS}}$ добавлена степенная функция – см. формулу (П.1.52):

$$\Delta E_{\text{CIECAM16-UCS}} = 1.41(\Delta E')^{0.63} \quad (\text{П.1.52})$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Матрица перехода координат цвета ОЦ из *XYZ* в *CIECAM02*:

$$\begin{bmatrix} L_{02} \\ M_{02} \\ S_{02} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.09695 & 0.45436 & -0.00926 \\ -0.27942 & 0.47353 & -0.00533 \\ 0.18247 & 0.07211 & 1.01459 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.2.1})$$

Таблица П.2.1
Координаты цветности ОЦ *CIECAM02* в *XYZ*

<i>CIECAM02</i> в <i>XYZ</i>			
	l_{02}	m_{02}	s_{02}
x	22.758	-21.851	0.093
y	0.201	0.793	0.006
z	-0.196	0.007	1.189

Матрица перехода координат цвета ОЦ из *XYZ* в *CIECAM16*:

$$\begin{bmatrix} L_{16} \\ M_{16} \\ S_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.40074 & -0.25106 & -0.00209 \\ 0.65051 & 1.20524 & 0.04893 \\ -0.05125 & 0.04582 & 0.95317 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.2.2})$$

Таблица П.2.2
Координаты цветности ОЦ *CIECAM02* в *XYZ*

<i>CIECAM16</i> в <i>XYZ</i>			
	l_{16}	m_{16}	s_{16}
x	0.83400	0.17400	-0.00710
y	2.39000	-1.46600	0.08050
z	0.12500	-0.00750	0.88220

Матрица перехода координат цвета ОЦ из *XYZ* в *ZCAM*:

$$\begin{bmatrix} L_z \\ M_z \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41480 & -0.22012 & -0.01660 \\ 0.57990 & 1.12070 & 0.26480 \\ 0.01470 & 0.05310 & 0.66850 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.2.3})$$

Таблица П.2.3
Функции сложения и координаты цветности КС *CIECAM02*, *CIECAM16*, *ZCAM*

nm	<i>CIECAM02</i>					<i>CIECAM16</i>					<i>ZCAM</i>				
	Функции сложения			Координаты цветности		Функции сложения			Координаты цветности		Функции сложения			Координаты цветности	
	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$
380	0.00267	0.00111	0.00653	0.25882	0.10726	0.00024	0.00000	0.00615	0.03804	-0.00014	0.00068	0.00009	0.00469	0.12432	0.01635
385	0.00436	0.00181	0.01068	0.25875	0.10724	0.00040	0.00000	0.01005	0.03799	-0.00008	0.00111	0.00015	0.00767	0.12425	0.01641
390	0.00828	0.00343	0.02030	0.25863	0.10716	0.00075	0.00000	0.01911	0.03781	-0.00010	0.00210	0.00028	0.01458	0.12408	0.01639
395	0.01494	0.00619	0.03667	0.25847	0.10710	0.00135	0.00000	0.03451	0.03768	0.00000	0.00380	0.00051	0.02633	0.12391	0.01650
400	0.02797	0.01158	0.06871	0.25835	0.10699	0.00251	-0.00001	0.06466	0.03744	-0.00010	0.00710	0.00094	0.04933	0.12369	0.01639
405	0.04537	0.01879	0.11159	0.25815	0.10690	0.00406	0.00000	0.10502	0.03723	-0.00001	0.01150	0.00154	0.08013	0.12346	0.01648
410	0.08523	0.03530	0.21002	0.25786	0.10679	0.00759	0.00004	0.19765	0.03699	0.00018	0.02160	0.00293	0.15081	0.12317	0.01670
415	0.15230	0.06308	0.37599	0.25754	0.10667	0.01350	0.00015	0.35385	0.03673	0.00041	0.03856	0.00532	0.26999	0.12286	0.01694
420	0.26409	0.10951	0.65375	0.25706	0.10659	0.02337	0.00066	0.61528	0.03655	0.00104	0.06692	0.00963	0.46952	0.12255	0.01764
425	0.42315	0.17597	1.05218	0.25625	0.10656	0.03756	0.00249	0.99030	0.03646	0.00241	0.10758	0.01686	0.75594	0.12220	0.01915
430	0.56102	0.23440	1.40313	0.25518	0.10662	0.05030	0.00619	1.32068	0.03653	0.00450	0.14351	0.02525	1.00865	0.12188	0.02145
435	0.65179	0.27427	1.64351	0.25366	0.10674	0.05942	0.01219	1.54709	0.03671	0.00753	0.16830	0.03433	1.18245	0.12151	0.02479
440	0.69441	0.29512	1.76920	0.25171	0.10698	0.06499	0.02033	1.66564	0.03712	0.01161	0.18178	0.04392	1.27437	0.12118	0.02928
445	0.69875	0.30080	1.80523	0.24913	0.10725	0.06751	0.03021	1.69984	0.03755	0.01681	0.18611	0.05394	1.30226	0.12067	0.03497
450	0.68154	0.29854	1.79465	0.24562	0.10759	0.06863	0.04259	1.69027	0.03809	0.02364	0.18580	0.06573	1.29719	0.11997	0.04244
455	0.65443	0.29330	1.76634	0.24113	0.10807	0.06955	0.05775	1.66410	0.03883	0.03224	0.18394	0.07996	1.27997	0.11914	0.05179
460	0.60681	0.28091	1.69054	0.23536	0.10895	0.07002	0.07579	1.59335	0.04026	0.04358	0.17828	0.09633	1.22932	0.11854	0.06405
465	0.53363	0.25928	1.54768	0.22799	0.11077	0.07038	0.09604	1.45962	0.04328	0.05907	0.16790	0.11397	1.13116	0.11882	0.08066
470	0.42384	0.22470	1.30413	0.21705	0.11507	0.07148	0.11960	1.23138	0.05025	0.08408	0.15130	0.13352	0.96175	0.12137	0.10711
475	0.31453	0.19302	1.05519	0.20127	0.12351	0.07679	0.14777	0.99832	0.06280	0.12084	0.13826	0.15753	0.78975	0.12736	0.14512
480	0.21441	0.16791	0.82319	0.17786	0.13928	0.08710	0.18079	0.78148	0.08300	0.17229	0.13101	0.18656	0.63127	0.13807	0.19662
485	0.12870	0.15093	0.62375	0.14246	0.16708	0.10177	0.21773	0.59550	0.11123	0.23796	0.13005	0.21988	0.49722	0.15352	0.25956
490	0.06187	0.14659	0.47056	0.09112	0.21589	0.12431	0.26399	0.45350	0.14767	0.31360	0.13944	0.26296	0.39874	0.17405	0.32824
495	0.00833	0.15461	0.35694	0.01603	0.29739	0.15601	0.32417	0.34938	0.18806	0.39078	0.15975	0.32017	0.33208	0.19674	0.39430
500	-0.03525	0.17479	0.27420	-0.08519	0.42246	0.19814	0.40053	0.27505	0.22678	0.45842	0.19154	0.39358	0.29157	0.21848	0.44894
505	-0.07244	0.20927	0.21321	-0.20694	0.59785	0.25503	0.50002	0.22228	0.26095	0.51162	0.23807	0.48990	0.27243	0.23798	0.48970
510	-0.10148	0.25382	0.15774	-0.32727	0.81856	0.32283	0.61115	0.17538	0.29100	0.55091	0.29510	0.59775	0.26050	0.25586	0.51828
515	-0.11764	0.30928	0.10982	-0.39025	1.02595	0.40158	0.73084	0.13617	0.31656	0.57611	0.36300	0.71422	0.25662	0.27215	0.53546
520	-0.11471	0.37059	0.07502	-0.34664	1.11993	0.48321	0.84342	0.10919	0.33654	0.58742	0.43503	0.82410	0.26101	0.28618	0.54212

525	-0.09097	0.42953	0.05284	-0.23241	1.09740	0.55697	0.93111	0.09315	0.35224	0.58885	0.50157	0.91001	0.26889	0.29847	0.54152
530	-0.05162	0.48642	0.03665	-0.10950	1.03176	0.62490	0.99930	0.08201	0.36625	0.58568	0.56384	0.97711	0.27675	0.31020	0.53755
535	-0.00255	0.53793	0.02331	-0.00456	0.96284	0.68406	1.04731	0.07273	0.37917	0.58052	0.61878	1.02463	0.28194	0.32139	0.53218
540	0.05569	0.58516	0.01282	0.08520	0.89519	0.73592	1.07782	0.06542	0.39162	0.57357	0.66770	1.05518	0.28512	0.33252	0.52549
545	0.12310	0.62860	0.00504	0.16267	0.83067	0.78115	1.09181	0.05998	0.40413	0.56484	0.71119	1.06971	0.28643	0.34402	0.51743
550	0.19906	0.66871	-0.00044	0.22951	0.77100	0.82048	1.09074	0.05611	0.41705	0.55443	0.74985	1.06964	0.28594	0.35615	0.50804
555	0.28332	0.70660	-0.00424	0.28744	0.71686	0.85541	1.07695	0.05334	0.43079	0.54235	0.78500	1.05727	0.28378	0.36923	0.49729
560	0.37482	0.74156	-0.00685	0.33782	0.66835	0.88530	1.05014	0.05116	0.44564	0.52861	0.81599	1.03226	0.27950	0.38350	0.48514
565	0.47123	0.77183	-0.00871	0.38176	0.62529	0.90831	1.00926	0.04908	0.46186	0.51319	0.84103	0.99356	0.27240	0.39916	0.47155
570	0.57036	0.79722	-0.01000	0.42013	0.58724	0.92458	0.95615	0.04698	0.47963	0.49600	0.86013	0.94294	0.26273	0.41637	0.45645
575	0.66873	0.81640	-0.01086	0.45360	0.55376	0.93301	0.89184	0.04474	0.49904	0.47703	0.87214	0.88136	0.25048	0.43520	0.43980
580	0.76234	0.82842	-0.01145	0.48270	0.52455	0.93306	0.81859	0.04222	0.52014	0.45633	0.87638	0.81096	0.23592	0.45567	0.42166
585	0.84564	0.83128	-0.01199	0.50791	0.49929	0.92311	0.73821	0.03923	0.54283	0.43410	0.87113	0.73347	0.21910	0.47767	0.40219
590	0.91448	0.82485	-0.01242	0.52955	0.47765	0.90366	0.65475	0.03594	0.56679	0.41067	0.85666	0.65275	0.20089	0.50088	0.38166
595	0.96516	0.80925	-0.01248	0.54778	0.45930	0.87545	0.57227	0.03274	0.59134	0.38655	0.83347	0.57276	0.18232	0.52467	0.36055
600	0.98901	0.78148	-0.01239	0.56255	0.44450	0.83610	0.49387	0.02941	0.61506	0.36330	0.79902	0.49639	0.16362	0.54764	0.34022
605	0.98871	0.74352	-0.01210	0.57479	0.43225	0.78769	0.42065	0.02611	0.63809	0.34076	0.75531	0.42476	0.14523	0.56992	0.32050
610	0.95932	0.69375	-0.01162	0.58443	0.42265	0.72897	0.35454	0.02284	0.65890	0.32046	0.70098	0.35970	0.12739	0.59002	0.30276
615	0.90614	0.63531	-0.01080	0.59200	0.41506	0.66305	0.29617	0.01985	0.67723	0.30250	0.63910	0.30189	0.11063	0.60773	0.28707
620	0.83086	0.56866	-0.00975	0.59784	0.40917	0.59025	0.24469	0.01703	0.69281	0.28720	0.57001	0.25052	0.09472	0.62279	0.27372
625	0.73457	0.49342	-0.00857	0.60240	0.40463	0.50993	0.19824	0.01423	0.70588	0.27442	0.49319	0.20379	0.07919	0.63541	0.26256
630	0.63064	0.41737	-0.00731	0.60598	0.40105	0.42982	0.15811	0.01167	0.71685	0.26369	0.41623	0.16314	0.06495	0.64600	0.25320
635	0.53381	0.34898	-0.00615	0.60893	0.39808	0.35832	0.12549	0.00951	0.72635	0.25437	0.34735	0.12993	0.05289	0.65517	0.24507
640	0.44243	0.28638	-0.00506	0.61131	0.39569	0.29333	0.09847	0.00764	0.73435	0.24651	0.28460	0.10227	0.04245	0.66290	0.23821
645	0.35717	0.22938	-0.00407	0.61319	0.39380	0.23449	0.07598	0.00602	0.74091	0.24008	0.22766	0.07913	0.03339	0.66923	0.23260
650	0.28109	0.17948	-0.00320	0.61457	0.39241	0.18321	0.05778	0.00464	0.74586	0.23524	0.17797	0.06030	0.02577	0.67401	0.22838
655	0.21710	0.13801	-0.00246	0.61563	0.39135	0.14072	0.04344	0.00353	0.74973	0.23144	0.13675	0.04541	0.01961	0.67774	0.22507
660	0.16384	0.10381	-0.00185	0.61641	0.39056	0.10576	0.03212	0.00264	0.75265	0.22857	0.10281	0.03362	0.01463	0.68056	0.22257
665	0.12049	0.07618	-0.00136	0.61693	0.39003	0.07757	0.02330	0.00193	0.75458	0.22667	0.07542	0.02441	0.01068	0.68243	0.22091
670	0.08693	0.05486	-0.00098	0.61734	0.38962	0.05584	0.01662	0.00138	0.75616	0.22512	0.05430	0.01743	0.00766	0.68395	0.21956
675	0.06328	0.03988	-0.00071	0.61768	0.38928	0.04058	0.01199	0.00100	0.75742	0.22387	0.03946	0.01258	0.00555	0.68517	0.21847
680	0.04655	0.02930	-0.00052	0.61800	0.38896	0.02980	0.00875	0.00073	0.75865	0.22267	0.02899	0.00918	0.00406	0.68635	0.21742
685	0.03276	0.02059	-0.00037	0.61828	0.38867	0.02094	0.00611	0.00051	0.75976	0.22158	0.02037	0.00641	0.00285	0.68742	0.21647
690	0.02261	0.01420	-0.00025	0.61844	0.38851	0.01444	0.00420	0.00035	0.76037	0.22098	0.01404	0.00441	0.00196	0.68801	0.21595
695	0.01578	0.00991	-0.00018	0.61853	0.38841	0.01007	0.00292	0.00025	0.76072	0.22063	0.00980	0.00307	0.00137	0.68835	0.21565
700	0.01131	0.00710	-0.00013	0.61858	0.38837	0.00722	0.00209	0.00018	0.76089	0.22046	0.00702	0.00220	0.00098	0.68852	0.21550

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Матрица перехода координат цвета ОЦ из XYZ в LMS :

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.28057 & -0.41217 & 0.00437 \\ 0.75603 & 1.29617 & -0.00840 \\ -0.03660 & 0.11600 & 1.00403 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.3.1})$$

Таблица П.3.1
Координаты цветности ОЦ LMS в XYZ

LMS в XYZ			
	l	m	s
x	0.75962	0.24167	-0.00129
y	1.61013	-0.59812	-0.01202
z	0.17043	-0.02202	0.85159

Матрица перехода координат цвета ОЦ из XYZ в $(LMS)_{NY}$:

$$\begin{bmatrix} L_{NY} \\ M_{NY} \\ S_{NY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.31644 & -0.45884 & 0.00032 \\ 0.75523 & 1.36994 & -0.01311 \\ -0.07166 & 0.08890 & 1.01279 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.3.2})$$

Таблица П.3.2
Координаты цветности ОЦ $(LMS)_{NY}$ в XYZ

$(LMS)_{NY}$ в XYZ			
	l_{NY}	m_{NY}	s_{NY}
x	0.747	0.25	0.003
y	1.74	-0.73	-0.01
z	0.174	0.005	0.821

Матрица перехода координат цвета ОЦ из XYZ в $(LMS)_{DU}$:

$$\begin{bmatrix} L_{DU} \\ M_{DU} \\ S_{DU} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.46039 & 0 \\ 1 & 1.35933 & 0 \\ 0 & 0.10106 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{П.3.3})$$

Таблица П.3.3
Координаты цветности ОЦ $(LMS)_{DU}$ в XYZ

$(LMS)_{DU}$ в XYZ			
	l_{DU}	m_{DU}	s_{DU}
x	0.747	0.253	0
y	1	0	0
z	0.180	0	0.820

Таблица П.3.4
Функции сложения и координаты цветности КС $(LMS)_{NY}$, $(LMS)_{DU}$, LMS

nm	$(LMS)_{NY}$					$(LMS)_{DU}$					LMS				
	Функции сложения			Координаты цветности		Функции сложения			Координаты цветности		Функции сложения			Координаты цветности	
	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$	$\bar{l}(\lambda)$	$\bar{m}(\lambda)$	$\bar{s}(\lambda)$	$l(\lambda)$	$m(\lambda)$
380	0.00000	0.00000	0.00653	0.00002	-0.00013	0.00004	0.00008	0.00645	0.00594	0.01143	0.00018	0.00023	0.00648	0.02571	0.03408
385	0.00000	0.00000	0.01068	-0.00002	-0.00004	0.00006	0.00012	0.01055	0.00596	0.01153	0.00029	0.00039	0.01060	0.02568	0.03416
390	0.00000	0.00000	0.02031	-0.00018	0.00000	0.00012	0.00024	0.02005	0.00588	0.01156	0.00055	0.00073	0.02015	0.02554	0.03419
395	-0.00001	0.00001	0.03667	-0.00028	0.00017	0.00022	0.00043	0.03621	0.00589	0.01173	0.00098	0.00133	0.03639	0.02545	0.03433
400	-0.00004	0.00001	0.06872	-0.00051	0.00012	0.00040	0.00081	0.06785	0.00573	0.01169	0.00183	0.00249	0.06818	0.02525	0.03429
405	-0.00008	0.00003	0.11161	-0.00068	0.00030	0.00064	0.00133	0.11020	0.00571	0.01186	0.00296	0.00405	0.11074	0.02511	0.03443
410	-0.00018	0.00013	0.21005	-0.00086	0.00063	0.00121	0.00257	0.20740	0.00573	0.01219	0.00553	0.00769	0.20842	0.02495	0.03471
415	-0.00040	0.00038	0.37605	-0.00106	0.00100	0.00218	0.00475	0.37130	0.00576	0.01255	0.00984	0.01390	0.37312	0.02479	0.03503
420	-0.00072	0.00122	0.65385	-0.00110	0.00186	0.00400	0.00882	0.64560	0.00608	0.01339	0.01710	0.02469	0.64876	0.02476	0.03575
425	-0.00099	0.00383	1.05231	-0.00094	0.00363	0.00730	0.01605	1.03905	0.00687	0.01511	0.02774	0.04147	1.04411	0.02492	0.03725
430	-0.00070	0.00881	1.40326	-0.00050	0.00624	0.01160	0.02509	1.38560	0.00816	0.01764	0.03770	0.05875	1.39233	0.02533	0.03946
435	0.00036	0.01662	1.64360	0.00022	0.01001	0.01684	0.03567	1.62296	0.01005	0.02129	0.04549	0.07470	1.63079	0.02598	0.04266
440	0.00238	0.02702	1.76922	0.00132	0.01502	0.02300	0.04748	1.74706	0.01265	0.02612	0.05116	0.08892	1.75543	0.02699	0.04691
445	0.00490	0.03960	1.80512	0.00265	0.02141	0.02980	0.06042	1.78260	0.01591	0.03226	0.05493	0.10195	1.79105	0.02820	0.05234
450	0.00809	0.05534	1.79439	0.00435	0.02979	0.03800	0.07596	1.77211	0.02015	0.04028	0.05819	0.11625	1.78040	0.02977	0.05947
455	0.01211	0.07458	1.76588	0.00654	0.04026	0.04800	0.09478	1.74410	0.02544	0.05023	0.06187	0.13318	1.75212	0.03177	0.06840
460	0.01771	0.09716	1.68986	0.00981	0.05384	0.06000	0.11637	1.66920	0.03251	0.06305	0.06585	0.15154	1.67669	0.03477	0.08001
465	0.02576	0.12187	1.54676	0.01520	0.07193	0.07390	0.13928	1.52810	0.04244	0.07999	0.07039	0.16955	1.53473	0.03966	0.09554
470	0.03825	0.14947	1.30298	0.02566	0.10027	0.09098	0.16386	1.28764	0.05898	0.10623	0.07646	0.18677	1.29292	0.04914	0.12002
475	0.05534	0.18168	1.05380	0.04287	0.14075	0.11260	0.19293	1.04190	0.08357	0.14319	0.08686	0.20824	1.04577	0.06478	0.15530
480	0.07700	0.21884	0.82156	0.06891	0.19585	0.13902	0.22710	0.81295	0.11791	0.19261	0.10218	0.23508	0.81548	0.08864	0.20393
485	0.10204	0.26012	0.62188	0.10369	0.26434	0.16930	0.26573	0.61620	0.16105	0.25278	0.12170	0.26704	0.61751	0.12094	0.26538

490	0.13389	0.31164	0.46841	0.14650	0.34098	0.20802	0.31504	0.46518	0.21050	0.31879	0.14922	0.31040	0.46545	0.16131	0.33554
495	0.17463	0.37893	0.35443	0.19233	0.41732	0.25860	0.38046	0.35330	0.26059	0.38339	0.18670	0.37011	0.35262	0.20530	0.40697
500	0.22600	0.46442	0.27125	0.23501	0.48294	0.32300	0.46430	0.27200	0.30492	0.43831	0.23562	0.44820	0.27040	0.24692	0.46970
505	0.29315	0.57575	0.20968	0.27179	0.53380	0.40730	0.57400	0.21230	0.34124	0.48090	0.30083	0.55157	0.20974	0.28323	0.51930
510	0.37149	0.69887	0.15363	0.30350	0.57098	0.50300	0.69545	0.15820	0.37077	0.51262	0.37710	0.66649	0.15465	0.31471	0.55622
515	0.46053	0.82977	0.10516	0.33002	0.59462	0.60820	0.82463	0.11170	0.39378	0.53390	0.46390	0.78930	0.10717	0.34101	0.58021
520	0.55062	0.95058	0.06996	0.35046	0.60502	0.71000	0.94390	0.07825	0.40989	0.54493	0.55167	0.90328	0.07288	0.36108	0.59122
525	0.62963	1.04143	0.04762	0.36634	0.60595	0.79320	1.03355	0.05725	0.42102	0.54859	0.62834	0.98959	0.05130	0.37643	0.59284
530	0.70036	1.10870	0.03145	0.38052	0.60239	0.86200	1.09981	0.04216	0.43015	0.54881	0.69659	1.05398	0.03581	0.38995	0.59001
535	0.76022	1.15236	0.01830	0.39372	0.59681	0.91485	1.14266	0.02984	0.43828	0.54742	0.75390	1.09622	0.02326	0.40243	0.58515
540	0.81093	1.17548	0.00815	0.40657	0.58935	0.95400	1.16515	0.02030	0.44591	0.54460	0.80199	1.11921	0.01364	0.41450	0.57845
545	0.85321	1.17910	0.00083	0.41965	0.57994	0.98030	1.16830	0.01340	0.45342	0.54038	0.84157	1.12393	0.00679	0.42670	0.56986
550	0.88795	1.16491	-0.00404	0.43340	0.56858	0.99495	1.15379	0.00875	0.46116	0.53478	0.87351	1.11199	0.00232	0.43943	0.55940
555	0.91685	1.13550	-0.00712	0.44829	0.55520	1.00000	1.12417	0.00575	0.46950	0.52780	0.89949	1.08579	-0.00039	0.45317	0.54703
560	0.93929	1.09065	-0.00890	0.46476	0.53965	0.99500	1.07922	0.00390	0.47880	0.51933	0.91891	1.04511	-0.00184	0.46831	0.53263
565	0.95354	1.02959	-0.00983	0.48322	0.52176	0.97860	1.01819	0.00275	0.48941	0.50921	0.93009	0.98913	-0.00249	0.48525	0.51605
570	0.95998	0.95469	-0.01011	0.50404	0.50126	0.95200	0.94343	0.00210	0.50170	0.49719	0.93349	0.92008	-0.00256	0.50431	0.49707
575	0.95780	0.86763	-0.00991	0.52756	0.47789	0.91540	0.85663	0.00180	0.51606	0.48293	0.92839	0.83947	-0.00220	0.52580	0.47544
580	0.94688	0.77156	-0.00944	0.55406	0.45147	0.87000	0.76093	0.00165	0.53290	0.46609	0.91478	0.75019	-0.00165	0.54997	0.45102
585	0.92606	0.66939	-0.00897	0.58372	0.42193	0.81630	0.65922	0.00140	0.55270	0.44635	0.89167	0.65487	-0.00117	0.57699	0.42377
590	0.89639	0.56624	-0.00848	0.61644	0.38940	0.75700	0.55663	0.00110	0.57579	0.42338	0.86023	0.55832	-0.00077	0.60675	0.39380
595	0.85911	0.46720	-0.00776	0.65156	0.35433	0.69490	0.45821	0.00100	0.60211	0.39702	0.82181	0.46528	-0.00021	0.63861	0.36156
600	0.81261	0.37712	-0.00712	0.68713	0.31889	0.63100	0.36879	0.00080	0.63063	0.36857	0.77505	0.38017	0.00015	0.67083	0.32904
605	0.75889	0.29677	-0.00649	0.72332	0.28286	0.56680	0.28915	0.00060	0.66173	0.33757	0.72186	0.30377	0.00041	0.70354	0.29606
610	0.69711	0.22908	-0.00593	0.75752	0.24893	0.50300	0.22219	0.00034	0.69329	0.30625	0.66157	0.23877	0.00050	0.73440	0.26505
615	0.63013	0.17387	-0.00524	0.78889	0.21767	0.44120	0.16773	0.00024	0.72426	0.27534	0.59684	0.18511	0.00064	0.76265	0.23654
620	0.55811	0.12991	-0.00453	0.81656	0.19007	0.38100	0.12454	0.00019	0.75336	0.24626	0.52778	0.14168	0.00073	0.78751	0.21141
625	0.48019	0.09499	-0.00387	0.84050	0.16626	0.32100	0.09042	0.00010	0.78004	0.21972	0.45350	0.10637	0.00069	0.80901	0.18976
630	0.40341	0.06828	-0.00322	0.86112	0.14575	0.26500	0.06447	0.00005	0.80419	0.19566	0.38059	0.07871	0.00063	0.82749	0.17114
635	0.33536	0.04864	-0.00264	0.87939	0.12753	0.21700	0.04549	0.00003	0.82659	0.17329	0.31610	0.05792	0.00058	0.84385	0.15461
640	0.27390	0.03423	-0.00213	0.89510	0.11186	0.17500	0.03168	0.00002	0.84665	0.15325	0.25797	0.04222	0.00051	0.85791	0.14040
645	0.21854	0.02378	-0.00169	0.90819	0.09881	0.13820	0.02175	0.00001	0.86395	0.13598	0.20571	0.03042	0.00043	0.86961	0.12859
650	0.17052	0.01650	-0.00131	0.91820	0.08886	0.10700	0.01493	0.00000	0.87757	0.12243	0.16044	0.02184	0.00034	0.87855	0.11959
655	0.13083	0.01144	-0.00100	0.92610	0.08097	0.08160	0.01023	0.00000	0.88856	0.11144	0.12305	0.01563	0.00027	0.88560	0.11245
660	0.09825	0.00790	-0.00075	0.93210	0.07499	0.06100	0.00700	0.00000	0.89705	0.10295	0.09238	0.01110	0.00021	0.89095	0.10704
665	0.07202	0.00546	-0.00055	0.93611	0.07098	0.04458	0.00480	0.00000	0.90280	0.09720	0.06771	0.00783	0.00016	0.89453	0.10342
670	0.05182	0.00374	-0.00039	0.93938	0.06771	0.03200	0.00326	0.00000	0.90753	0.09247	0.04872	0.00545	0.00011	0.89745	0.10047
675	0.03765	0.00260	-0.00028	0.94203	0.06507	0.02320	0.00226	0.00000	0.91139	0.08861	0.03538	0.00386	0.00008	0.89981	0.09808
680	0.02764	0.00183	-0.00021	0.94459	0.06251	0.01700	0.00158	0.00000	0.91515	0.08485	0.02597	0.00276	0.00006	0.90209	0.09577
685	0.01941	0.00123	-0.00015	0.94692	0.06019	0.01192	0.00106	0.00000	0.91859	0.08141	0.01824	0.00189	0.00004	0.90417	0.09367
690	0.01338	0.00083	-0.00010	0.94819	0.05892	0.00821	0.00071	0.00000	0.92048	0.07952	0.01258	0.00129	0.00003	0.90530	0.09252
695	0.00933	0.00057	-0.00007	0.94894	0.05817	0.00572	0.00049	0.00000	0.92159	0.07841	0.00877	0.00089	0.00002	0.90597	0.09184
700	0.00669	0.00041	-0.00005	0.94930	0.05781	0.00410	0.00035	0.00000	0.92213	0.07787	0.00629	0.00064	0.00002	0.90629	0.09152

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П.4 Элементы ЭУ и их характеристики

№	Название	Описание	Назначение
1	Осветитель (6 цветных светодиодов фирмы CREE)	мощность 5 Вт	ИС, формирующий объект
2	Плита OTSB36 -1	алюминиевая оптическая плита, размеры 300x600 мм	основа, на которой установлены оптические элементы
	Объектив YUCON NVMT	относительное отверстие 1:1, фокусное расстояние 37 мм	строит изображение излучающей площадки светодиода
3	Электромеханический затвор		уменьшает дисперсию ответов наблюдателей, связанную с поиском объекта в поле зрения
4	Двойной монохроматор MSA-130 (фирмы TOPAG Lasertechnik GmbH)	с дифракционными решетками 600 штр/мм	работает в режиме вычитания дисперсии и позволяет выделить $\Delta\lambda=10$ нм
5	14ATL15.5-15	ахроматический триплет, фокусное расстояние 15.5 мм, диаметр 15 мм	конденсор для освещения тест-объекта
6	Оптическая щель входная скрещенная (SXM-1 фирмы SOLAR Laser Systems)		тест-объект, формирующий размеры наблюдаемого объекта (2° на выходе окуляра (16))
7	LOADL15-50	ахроматический дуплет, фокусное расстояние 50 мм, диаметр 15 мм	коллиматорный объектив освещает оптический клин
8	Оптический клин OMMB-NDFC50 (фирмы Специальные системы)	держатель с регулируемым нейтральным поглощающим фильтром	плавно регулирует яркость объекта
9	ИК-осветитель с телекамерой		обеспечивают считывание шкалы оптического клина.
10	LOADL15-50	ахроматический дуплет, фокусное расстояние 50 мм, диаметр 15 мм	строят изображение объекта на стенке фотометрической сферы
11	Алюминиевое зеркало	диаметр 50,8, защита t8 мм	
12	Фотометрическая сфера UKU120 (фирмы Opsira)	диаметр 120 мм	
13	Объектив Yukon NVMT	относительное отверстие 1:2, фокусное расстояние 42 мм	окуляр, через который наблюдатель смотрит на стенку интегрирующей сферы с изображением объекта на фоне
14,18	Осветитель (белый светодиод)	мощность 5 Вт с Тц 4800 К	ИС, формирующий фон
15	Объектив YUCON NVMT	относительное отверстие 1:1.4, фокусное расстояние 50 мм	собирает поток от светодиода на входном торце ВОЖ
16	Объектив YUCON NVMT	относительное отверстие 1:1.4, фокусное расстояние 50 мм	2 встречно работающие объективы формируют параллельный пучок лучей
17	Интерференционный фильтр или цветное стекло		устанавливается при необходимости изменить спектральный состав фона
19	Жгут волоконно-оптический	типа О-С, диаметр 5 мм, длина 250 мм	передает излучение канала фона в фотометрическую сферу
Вспомогательные детали			
x	Набор 34 интерференционных фильтров 380-780 нм		

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Таблица П.5 Пример таблицы для обработки данных

Наблюдатель 9, Синий канал, 11 кд/м2, порог на появление															
Длина волны	Выходной ток МХ	Приходной ток, мА	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее	Lep	1/Lep
420			225	225	230	230	230	224	228	226	220	230	227	0.00154	648
435	9E-07	506	228	230	228	230	232	228	230	226	230	228	229	0.00050	2018
450			232	236	236	234	235	235	232	234	236	232	234	0.00063	1579
465	2E-06	440	240	240	242	240	244	242	238	240	240	244	241	0.00067	1495
480			175	177	177	175	175	172	171	174	175	175	175	0.00070	1431
495			190	190	190	196	194	198	195	188	186	190	192	0.00179	558
510			240	236	246	242	240	244	236	238	240	242	240	0.00057	1741
525	2E-06	506	250	254	254	255	254	250	252	254	250	255	253	0.00046	2168
540			240	244	240	244	240	242	240	244	238	240	241	0.00036	2797
555			215	218	218	214	212	216	216	210	215	217	215	0.00029	3391
570			142	146	144	142	145	148	144	145	145	144	145	0.00028	3634
585			232	228	235	230	235	232	230	228	232	230	231	0.00028	3579
600			198	205	200	195	195	207	205	200	205	198	201	0.00034	2940
615			220	218	224	222	224	220	220	224	222	218	221	0.00053	1896
630	4E-06	513	250	250	248	252	250	246	252	248	250	250	250	0.00095	1054
645			194	190	190	190	190	192	194	190	192	190	191	0.00126	792
660	3E-06	553	180	180	180	178	180	182	180	174	180	182	180	0.00399	251

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица П. 6.1

%	Мат. Ожидание LmaxL	СКО LmaxL	Мат. Ожидание SigmaL	СКО SigmaL	Мат. Ожидание Инт.КР.L	СКО Инт.КР.L
2.5	-0.00036	0.00094	0.00518	0.01484	0.01078	0.00981
5	-0.00002	0.00152	-0.00269	0.02924	0.02113	0.01804
7,5	0.00048	0.00337	-0.00030	0.03719	0.02979	0.01743
10	0.00121	0.00322	-0.02234	0.06239	0.05396	0.03296
15	0.00225	0.00584	-0.04391	0.08387	0.07999	0.04809
20	0.00057	0.00881	0.00719	0.12192	0.08973	0.06544
25	0.00538	0.01047	-0.03388	0.14879	0.11524	0.10637
30	0.00271	0.01891	-0.03216	0.24834	0.18896	0.16658

Таблица П. 6.2

%	Мат. Ожидание LmaxM	СКО LmaxM	Мат. Ожидание SigmaM	СКО SigmaM	Мат. Ожидание Инт.КР.M	СКО Инт.КР.M
2.5	-0.00043	0.00115	-0.006296	0.013500	0.01152	0.00801
5	-0.00065	0.00220	-0.007030	0.046358	0.03554	0.02526
7,5	0.00096	0.00465	0.026966	0.090355	0.07281	0.04533
10	0.00034	0.00408	-0.014588	0.077508	0.06301	0.04008
15	0.00192	0.00963	0.037822	0.150813	0.11057	0.08025
20	0.00099	0.01156	0.016441	0.180162	0.14063	0.09078
25	0.00457	0.01499	0.021827	0.227092	0.14688	0.12717
30	-0.00266	0.01837	-0.144590	0.216481	0.23934	0.16851

Таблица П. 6.3

%	Мат. Ожидание LmaxS	СКО LmaxS	Мат. Ожидание SigmaS	СКО SigmaS	Мат. Ожидание Инт.КР.S	СКО Инт.КР.S
2.5	0.00008	0.00055	-0.003320	0.019796	0.014649	0.011889
5	-0.00010	0.00183	0.027973	0.069525	0.053679	0.041737
7,5	0.00026	0.00195	-0.027012	0.081307	0.067321	0.049636
10	0.00022	0.00445	0.011725	0.103120	0.073106	0.059070
15	0.00163	0.00364	0.007177	0.111429	0.077237	0.067433
20	-0.00161	0.01309	-0.033707	0.215088	0.152336	0.115300
25	-0.05998	0.22369	0.476959	1.302717	0.269234	0.335548
30	-0.02116	0.06822	0.138631	0.597648	0.238825	0.268206

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Таблица П.7

λ н м	Н1		η анр. ,%	Н2		η анр. ,%	Н3		η анр. ,%	Н4		η анр. ,%	Н5		η анр. ,%	Н6		η анр. ,%	Н7		η анр. ,%	Н8		η анр. ,%	Н9		η анр. ,%	Н10		η анр. ,%	η ср %	η max %
	эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.		эк с.	ап р.			
420	238	238	0.05	318	318	0.018	217	217	0.033	194	194	0.128	272	272	0.095	455	455	0.012	193	193	0.034	220	220	0.004	190	190	0.047	159	159	0.132	0.055	0.13
435	703	701	0.32	881	880	0.092	1258	1252	0.492	1808	1831	1.247	1750	1762	0.722	1293	1293	0.057	707	702	0.715	1489	1490	0.052	1168	1168	0.267	1108	1123	1.282	0.524	1.28
450	823	830	0.94	1105	1112	0.630	1292	1333	3.179	2386	2237	6.247	2119	2246	6.001	1543	1545	0.116	661	685	3.668	1794	1806	0.691	1517	1529	0.823	1334	1368	2.582	2.488	6.25
465	519	514	1.02	998	990	0.841	1004	963	4.031	1357	1468	8.145	1893	1694	10.540	996	996	0.046	481	466	4.378	1294	1227	1.351	1126	1129	0.274	1058	1000	5.426	3.604	10.5
480	495	513	3.64	797	800	0.445	888	888	1.759	673	656	2.510	911	971	6.613	438	437	0.183	300	309	2.962	641	648	0.994	625	627	1.394	578	594	2.802	2.330	6.6
495	1139	1068	6.212	912	908	0.429	702	697	0.761	526	522	0.831	778	745	4.292	644	670	4.078	685	670	2.197	960	921	4.078	689	735	6.766	756	743	1.771	3.142	6.8
510	1900	1929	1.550	1551	1571	1.286	1582	1608	1.637	1084	1126	3.927	1314	1410	3.055	1637	1489	9.033	1628	1600	1.728	1887	1947	3.211	1956	1714	10.595	1549	1514	2.286	3.831	10.6
525	2799	2900	3.590	2442	2441	0.022	2765	2697	2.457	1975	1866	5.507	2303	2395	3.978	2415	2530	4.760	2739	2898	5.813	3025	3256	5.511	3100	3123	0.755	2265	2523	11.395	4.379	11.4
540	3691	3626	1.757	3126	3027	3.172	3088	3143	1.787	2159	2230	3.269	3218	3140	2.443	3167	3284	4.908	4084	3966	2.877	4141	4108	0.797	3683	3987	8.247	3640	3312	9.013	3.827	9.0
555	3792	3788	0.081	2920	2964	1.502	2669	2659	0.369	1983	1979	0.189	3293	3164	3.915	3367	3205	4.811	4303	4240	1.483	4143	4025	2.862	3836	3796	1.034	3361	3426	1.922	1.817	4.8
570	3473	3475	0.047	2275	2305	1.280	2591	2591	0.000	1679	1665	0.863	2405	2464	2.453	2411	2445	1.414	4110	4248	3.352	3232	3033	6.153	3328	3165	4.902	3094	3095	0.004	2.047	6.2
585	3328	3318	0.293	2051	2071	0.990	3357	3251	3.152	1982	2014	1.578	2009	2006	0.136	2227	2213	0.630	4232	4178	1.265	1672	1759	5.206	2889	2992	3.592	4029	4029	0.020	1.686	5.2
600	2961	3014	1.777	2413	2157	10.615	2842	3069	8.005	2487	2433	2.175	2160	2174	0.645	2934	2966	1.100	3428	3146	8.215	966	987	2.199	2959	2984	0.823	3767	3831	1.710	3.726	10.6
615	2186	2127	2.697	1752	1924	9.812	2485	2509	0.936	2242	2338	4.290	1806	1906	4.217	2776	2722	0.872	1512	1692	11.948	865	775	10.151	2336	2245	3.877	2775	2876	3.672	5.247	12.0
630	1094	1094	0.055	1648	1638	0.617	1933	1966	8.628	1979	1825	7.772	1617	1527	5.569	1943	1953	0.503	609	626	2.775	503	574	14.083	1092	1117	2.265	1852	1732	6.455	4.872	14.1
645	388	399	2.611	1233	1294	4.977	1047	1070	2.171	1075	1159	7.827	1088	1085	0.215	1066	1059	0.659	174	158	9.500	368	351	4.407	362	366	1.106	82	82	0.460	3.393	9.5
660	604	102	1.296	981	945	3.749	550	557	1.423	614	599	2.450	672	681	1.350	437	438	0.279	2626	2727	4.076	171	171	0.039	8079	79	0.952	307	313	1.953	1.756	4.1
ηср			1.7			2.4			2.4			3.5			3.3			2			3.9			3.6			2.8			3.1	2.9	7.6

ПРИЛОЖЕНИЕ 8

Таблица П.8

нм	Функции сложения			Координаты цветности	
	$\bar{l}_{phys}(\lambda)$	$\bar{m}_{phys}(\lambda)$	$\bar{s}_{phys}(\lambda)$	$l_{phys}(\lambda)$	$m_{phys}(\lambda)$
380	0.00006	0.00004	0.00654	0.00739	0.00244
385	0.00008	0.00004	0.01057	0.00731	0.00254
390	0.00016	0.00006	0.02008	0.00708	0.00259
395	0.00027	0.00012	0.03619	0.00687	0.00278
400	0.00043	0.00018	0.06790	0.00657	0.00274
405	0.00069	0.00034	0.11012	0.00627	0.00294
410	0.00122	0.00065	0.20733	0.00589	0.00330
415	0.00205	0.00136	0.37120	0.00548	0.00371
420	0.00329	0.00302	0.64549	0.00508	0.00463
425	0.00485	0.00676	1.03891	0.00462	0.00650
430	0.00592	0.01300	1.38539	0.00420	0.00926
435	0.00619	0.02182	1.62278	0.00370	0.01324
440	0.00597	0.03305	1.74683	0.00326	0.01853
445	0.00496	0.04636	1.78231	0.00258	0.02529
450	0.00333	0.06287	1.77185	0.00163	0.03420
455	0.00135	0.08297	1.74387	0.00052	0.04538
460	0.00002	0.10636	1.66888	0.00032	0.05993
465	0.00067	0.13177	1.52787	0.00001	0.07937
470	0.00565	0.15961	1.28744	0.00331	0.10993
475	0.01506	0.19205	1.04174	0.01133	0.15390
480	0.02902	0.22953	0.81293	0.02616	0.21443
485	0.04638	0.27124	0.61616	0.04843	0.29086
490	0.06945	0.32346	0.46507	0.07951	0.37758
495	0.09908	0.39201	0.35330	0.11573	0.46513
500	0.13660	0.47925	0.27197	0.15215	0.54091
505	0.18625	0.59303	0.21227	0.18605	0.59938
510	0.24673	0.71854	0.15818	0.21788	0.64101
515	0.31904	0.85167	0.11165	0.24712	0.66560
520	0.39667	0.97407	0.07816	0.27221	0.67367
525	0.47044	1.06539	0.05722	0.29391	0.67009
530	0.54184	1.13224	0.04218	0.31447	0.66092
535	0.60728	1.17473	0.02981	0.33407	0.64943
540	0.66756	1.19537	0.02029	0.35353	0.63568
545	0.72433	1.19700	0.01342	0.37358	0.61948
550	0.77719	1.17973	0.00872	0.39474	0.60081
555	0.82794	1.14682	0.00576	0.41756	0.57954
560	0.87536	1.09745	0.00386	0.44250	0.55553
565	0.91782	1.03170	0.00274	0.46996	0.52863
570	0.95488	0.95193	0.00210	0.50025	0.49865
575	0.98450	0.85941	0.00184	0.53357	0.46545
580	1.00571	0.75809	0.00165	0.56998	0.42909
585	1.01547	0.65059	0.00140	0.60935	0.38981
590	1.01388	0.54331	0.00109	0.65117	0.34813
595	1.00004	0.44054	0.00094	0.69432	0.30499
600	0.97027	0.34791	0.00079	0.73626	0.26313
605	0.92698	0.26603	0.00057	0.77723	0.22227
610	0.86789	0.19813	0.00033	0.81444	0.18524
615	0.79699	0.14387	0.00023	0.84740	0.15235
620	0.71494	0.10182	0.00019	0.87556	0.12421
625	0.62143	0.06979	0.00009	0.89927	0.10059
630	0.52643	0.04640	0.00002	0.91921	0.08070
635	0.44066	0.02991	0.00002	0.93654	0.06339
640	0.36201	0.01860	0.00002	0.95119	0.04876
645	0.29013	0.01108	0.00000	0.96321	0.03676
650	0.22718	0.00646	0.00001	0.97229	0.02771
655	0.17475	0.00368	0.00002	0.97940	0.02060
660	0.13149	0.00206	0.00002	0.98476	0.01524
665	0.09622	0.00061	0.00001	0.98833	0.01167
670	0.06985	0.00117	0.00001	0.99123	0.00877
675	0.05057	0.00033	0	0.99357	0.00643

680	0.03714	0.00017	0	0.99582	0.00418
685	0.02609	0.00006	0	0.99787	0.00213
690	0.01798	0	0	0.99899	0.00101
695	0.01256	0	0	0.99965	0.00035
700	0.00900	0	0	0.99996	0.00004