



# НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

«МЭИ»

Институт ИРЭ Кафедра Светотехника

Направление 11.04.04 Электроника и наноэлектроника

## ЗАДАНИЕ НА МАГИСТЕРСКУЮ ДИССЕРТАЦИЮ

по программе подготовки магистров Теоретическая и прикладная  
светотехника

Тема Исследование спектральной чувствительности рецепторов  
трихроматов при нормальной цветовой адаптации

Время выполнения работы с 01.09.2016 по 18.06. 20 18г.

Студент Рыбина В.А. ЭР-04М-16  
*Фамилия, и., о. группа подпись*

Научный руководитель проф. проф. Григорьев А.А.  
*должность, звание, фамилия, и., о.*

Консультант \_\_\_\_\_  
*должность, звание, фамилия, и., о.*

Консультант \_\_\_\_\_  
*должность, звание, фамилия, и., о.*

Зав. кафедрой к.т.н. Боос Г.В.

*звание, фамилия, и., о., подпись, дата утверждения задания*

Место выполнения научной работы. ВНИСИ им. С.И.Вавилова

Москва «    »    2018 г.

## 1.Обоснование выбора темы диссертационной работы

Построение колориметрической системы на основе спектральных чувствительностей рецепторов глаза позволит проводить расчетные оценки качества освещения, приближающиеся к субъективным оценкам людей с нормальным цветовым зрением. Современные экспериментальные исследования по определению спектральных чувствительностей глаза проводятся по ненадежным методикам. Требуется разработка принципиально новых методик и проведение работ по уточнению спектральных кривых чувствительности КЗС рецепторов трихроматов.

Научный руководитель Григорьев А.А. дата \_\_\_\_\_

Студент Рыбина В.А. дата \_\_\_\_\_

## 2.Консультации по разделу

---

---

---

---

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_

## 3.Консультации по разделу

---

---

---

---

Подпись консультанта \_\_\_\_\_ дата \_\_\_\_\_

#### 4. План работы над магистерской диссертацией

№ п/п	Содержание разделов	Срок выполнения	Трудоём- кость в %
<b>I.</b>	<p><b>Теоретическая и расчетная часть</b></p> <p>Изучение современных методик по определению спектральных чувствительностей рецепторов глаза и разработка новой методики;</p> <p>Разработка программного обеспечения;</p>	<p>01.09.16-07.11.16</p> <p>07.11.16-25.12.16</p>	<b>25%</b>
<b>II.</b>	<p><b>Экспериментальная часть</b></p> <p>Сборка экспериментальной установки;</p> <p>Юстировка установки;</p> <p>Градуировка установки;</p> <p>Подготовка к проведению экспериментов;</p> <p>Проведение экспериментальных исследований порогов по яркости для монохроматических излучений;</p> <p>Обработка результатов;</p>	<p>01.02.17-28.08.17</p> <p>28.08.17-10.09.17</p> <p>10.09.17-01.11.17</p> <p>15.11.17-22.12.17</p> <p>05.02.18-24.05.18</p> <p>24.05.18-04.06.18</p>	<b>55%</b>
<b>III.</b>	<p><b>Публикации</b></p> <p>Доклад научно-технической конференции "Молодые светотехники России";</p> <p>Тезисы доклада на XXIV Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика"</p>	<p>01.11.17-09.11.17</p>	<b>10%</b>
<b>IV.</b>	<p><b>Оформление диссертации</b></p>	<p>04.06.18-14.06.18</p>	<b>10%</b>

## 5. Рекомендуемая литература

1) Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч.2. Физиологическая оптика и колориметрия. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. —432 с.: ил \_\_\_\_\_

2) Григорьев А.А., Гордюхина С.В. Определение удельных координат цвета физиологической системы // Полупроводниковая светотехника. – С-П: Премиум Пресс. – 2011. – №1. – С. 44 – 47. \_\_\_\_\_

3) A. Stockman, D. I. A. MacLeod, and N. E. Johnson. Spectral sensitivities of the human cones. — J. Opt. Soc. Am. A 10, 2491-2521 (1993) \_\_\_\_\_

## 6. Краткие сведения о студенте:

Домашний адрес 107045, г. Москва, пл. Большая Сухаревская, дом 16/18,  
стр. 1 \_\_\_\_\_.

Телефон служебный \_\_\_\_\_ домашний \_\_\_\_\_

**Примечание:** задание брошюруется вместе с диссертацией и с отзывами руководителя и рецензентов.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ.....	11
1.1. Развитие теории трехкомпонентного цветового зрени.....	11
1.2. Исследования сетчатки и различий нормального и аномального цветового зрени.....	13
1.3. Методы определения спектральной чувствительности рецепторов глаза.....	16
1.3.1. Метод определения чувствительностей КЗС рецепторов глаза с помощью расчета координат основных цветов дихроматов.....	16
1.3.2. Вариации двухцветного порогового метода В. Стайлса по определению изолированной спектральной чувствительности рецепторов у трихроматов.....	19
1.3.3. Определение изолированной спектральной чувствительностей рецепторов глаза с помощью дихроматов.....	24
1.3.4. Метод определения спектральной чувствительности рецепторов глаза на основе статистической теории цветового порогового зрени.....	26
2. РАЗРАБОТКА НОВОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЦЕПТОРОВ ГЛАЗА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЦВЕТОВОГО ПОРОГОВОГО ЗРЕНИЯ.....	37
2.1. Вывод основного расчетного выражения.....	37

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГОВ ОБНАРУЖЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БЕЛОМ И ЦВЕТНЫХ ФОНАХ.....	41
3.1. Описание установки .....	41
3.2. Расчет осветителя канала объекта .....	47
3.3. Градуировка экспериментальной установки .....	54
3.4. Юстировка экспериментальной установки.....	59
3.5. Экспериментальные исследования порогов по яркости для монохроматических излучений.....	59
4. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ .....	61
4.1. Протоколы экспериментов.....	61
4.2. Программы обработки результатов исследования монохроматических порогов.....	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	89
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	92

## ВВЕДЕНИЕ

При создании комфортной световой среды важно сохранять неизменность цветного восприятия человека. Для решения этой задачи в колориметрических расчетах учитывают физиологические особенности зрения, а именно, спектральные чувствительности рецепторов глаза, которые используются как для традиционных расчетов координат цвета в системе КЗС, так и для учета цветовой адаптации при расчете индекса цветопередачи источников света. Соответственно, неточность в их определении приводит к погрешности в расчетах [1].

Начиная с двухтысячных годов, МКО разрабатывает новую колориметрическую систему, основанную на спектральных чувствительностях рецепторов глаза [2]. Построение такой системы позволит проводить расчетные оценки качества освещения, приближающиеся к субъективным оценкам людей с нормальным цветовым зрением. Предложенные МКО функции согласуются с экспериментами по сопоставлению цветов трихроматами, но были получены в результате экспериментов по методу тестовой чувствительности с использованием дихроматов.

Поскольку спектральные чувствительности трех видов колбочек перекрывают друг друга, то для определения спектральной чувствительности одного типа колбочек требовалась изоляция его реакции от реакции двух других колбочек. которую пытались добиться в условиях переходной адаптации.

Исходя из предположения (на наш взгляд недостаточно обоснованных), что у отобранных по тесту ДНК дихроматов спектральные чувствительности КЗС рецепторов идентичны людям с нормальным цветовым зрением, их привлекли к участию в экспериментах для упрощения процедуры изоляции [3]. Однако, как доказали авторы [1] спектральные чувствительности рецепторов дихроматов смещены в направлении отсутствующего приемника.

Указанные сомнения в надежности современных применяемых методик делают важной задачу определения спектральной чувствительности КЗС рецепторов людей с нормальным цветовым зрением, а также побуждают к разработке новых методик по их определению в условиях естественной цветовой адаптации.

В первой главе диссертации проведен анализ литературных данных по развитию теории трехкомпонентного цветового зрения. Рассмотрены современные исследования фотопигментов сетчатки и различий нормального и аномального цветового зрения. Проанализированы современные методы определения спектральных чувствительностей рецепторов глаза: расчет координат основных цветов дихроматов, вариации двухцветного порогового метода В. Стайлса с изоляцией колбочек у наблюдателей и метод на основе статистической теории цветового порогового зрения.

Вторая глава посвящена разработке новой методики определения спектральных чувствительностей КЗС рецепторов глаза на основе статистической теории порогового цветового зрения. Предложена методика их определения на основе решения системы нелинейных уравнений, полученных при описании порогов обнаружения монохроматического объекта на фоне, состоящем из комбинации монохроматических излучений.

В третьей главе описывается экспериментальная установка, созданная для реализации новой методики, и приводятся: оптические схемы, энергетический расчет осветителя, градуировочные графики и методика проведения эксперимента и работы на установке.

В четвертой главе излагаются результаты экспериментальных исследований порогов по обнаружению монохроматического излучения на белом и цветных фонах. Описывается программное обеспечение, реализующее методику определения функций сложения  $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментальных исследований.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатные работы.

Работа изложена на \_\_\_\_ страницах, имеет \_\_ рисунка и \_\_ таблиц и приложений на \_\_ страницах. Общий объем диссертации с приложениями и списком использованной литературы составляет \_\_\_\_\_ страниц. Список использованной литературы включает \_ наименований.

Основные положения работы докладывались на научно-технической конференции "Молодые светотехники России" 2017 г., на XXIV международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" 2018 г. и на заседании бюро Научно-технического Совета "Светотехника" 2017, 2018 гг.

# 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ

## 1.1. Развитие теории трехкомпонентного цветового зрения

Теории цветового зрения объясняют явления нормального и аномального цветового зрения. Наиболее фундаментальными опытными фактами, на которых должна основываться каждая теория цветового зрения, являются факты, относящиеся к зрительному уравниванию цветов или, в более широком смысле, к психофизическим аспектам цветового зрения. Для трихроматического зрения такие факты наиболее полно и кратко выражаются законами Грассмана [4]. Любая теория цветового зрения должна также включать физиологические аспекты этого явления. Другими словами, она должна объяснять действие, производимое энергией излучения, которая поглощается рецепторами сетчатки и преобразуется в нервные импульсы. Наконец, всякая теория цветового зрения должна принимать во внимание его психологические аспекты, т.е. должна объяснять, как нервная активность в коре головного мозга приводит к цветовому восприятию.

Существует много различных теорий, пытающихся объяснить большинство или некоторые из аспектов цветового зрения [5]. Ни одна из таких теорий не развита до достаточно высокого уровня, чтобы считаться полностью удовлетворительной, поскольку ни одной из них не удается строго ответить на все вопросы об установленных фактах, относящихся к психофизическому, физиологическому и психологическому аспектам цветового зрения. Сложность проблемы и кажущиеся непреодолимыми трудности в экспериментировании с человеческим глазом и человеческим мозгом не позволили до сих пор построить непротиворечивую и удовлетворительную теорию. Кроме того, современные теории цветового зрения не объясняют такого экспериментального факта, как наличие порогов цветоразличения. Тем не менее, задача о различимости человеком цветов

продолжает оставаться мощным стимулом, и на пути решения этой задачи был достигнут значительный прогресс особенно в последние годы.

Для объяснения возникновения цвета вплоть до 17 века выдвигались такие неправдоподобные теории, как смешение света с темнотой и существование в природе четырех основных цветов.

В 1676 году сэр И. Ньютон с помощью трехгранной призмы разложил белый солнечный свет на цвета. Явление дисперсии было известно и до опытов ученого, но нельзя было понять разлагает ли призма свет или видоизменяет его. Только поместив за первой призмой вторую, Ньютон показал, что полученный спектр уже больше не разлагается и что возможно вновь получить белый свет из его составляющих. Эти классические опыты считаются первыми шагами к решению проблемы восприятия цвета глазом.

М. В. Ломоносов первым высказал мысль, что в глазе находятся три вещества, возбуждаемые тремя разными участками видимого спектра. Первым предложил теорию цветового зрения Томас Юнг в 1807 г. Он постулировал наличие в сетчатке механизмов трех типов, наиболее чувствительных к коротковолновому участку видимого спектра, к средневолновому участку и к длинноволновому участку. Три различных механизма были связаны с тремя главными цветами — красным, зеленым и синим.

Эксперименты по уравниванию цветов Максвелла явились бесспорными доказательствами в пользу трехкомпонентной теории Юнга. Они дали возможность Гельмгольцу придать ей форму, известную теперь под названием теории цветового зрения Юнга — Гельмгольца. Гельмгольц несколько видоизменил теорию Юнга с целью распространить ее на дихроматическое зрение. Он постулировал, что дихроматическое зрение является результатом подавления одной из трех функций спектральной чувствительности, контролирующей реакции колбочек. Соответственно и основные цвета были выбраны им так, чтобы согласоваться с цветами,

неразличимыми при дихроматическом зрении. В случае протанопии отсутствует «красный» процесс, при дейтеранопии — «зеленый», а при тритапопии — «синий».

Д.К. Максвелл построил первый колориметр, в котором измеряемый цвет сравнивался со смесью трех излучений, а Г. Гельмольц признал трехкомпонентную теорию и всячески способствовал ее развитию.

Конкретизация теории шла по двум направлениям: поиску опсинов сетчатки, чувствительных к разным цветам, и изучению чувствительности рецепторов в зависимости от длины волны излучения [5].

## **1.2. Исследования сетчатки и различий нормального и аномального цветового зрения**

Шведский исследователь Р. Гранит, анализируя электроретинограммы, показал существование зрения двух типов и предположил, что в клетках сетчатки имеются специальные вещества, реагирующие на яркость света и воспринимающие цвета. В начале 30-х годов биохимик Д. Уолд показал, что зрительный пигмент родопсин состоит из ретинена (вещества, близкого по структуре витамину А) и белка опсина. В то же время Х. Хартлайн начал исследование зрения, избрав для этой цели удивительно подходящий объект: членистоногого обитателя морских лагун, имеющего множество глазок, которые соединены длинными нервами с центрами мозга. Исследования нервных волокон показали, что оптическое изображение, попадающее на светочувствительные клетки, подвергается обработке в мозге. Реакция групп одних клеток, после предварительной обработки, реагирует на яркость, других на форму, третьих на цвет, четвертых на движение и т. д. В 1967 г. Нобелевский комитет оценил значение названных работ, присудив ученым Нобелевскую премию по физиологии и медицине за их исследования первичных физиологических и химических зрительных процессов [6].

Исследование фотопигментов началось в 1950-х годах и несколько типов колбочек с различной спектральной чувствительностью были идентифицированы у приматов и рыб с помощью микроспектроскопии и электрофизиологии. В 1964 г. исследователи П. Браун и Д. Уолд путем освещения мертвого образца сетчатки и регистрации сигналов на спектрофотометре получили спектры поглощения фотопигментов сетчатки человека.

Однако, исследования на молекулярном уровне затруднялись из-за сложностей в изоляции фотопигментов колбочек от сетчатки [7]. В 1986 году Натан и его коллеги изолировали кодирующую чувствительность кон – опсинов генов путем молекулярного клонирования и в результате вывели их аминокислотную или нуклеотидную последовательности [8]. Основными генетическими обозначениями генов опсинов L, M и S являются OPN1LW, OPN1MW и OPN1SW, соответственно. В начале ожидалось, что люди с нормальным цветовым зрением будут делиться одинаковыми генами опсинов. Однако, в результате рекомбинации, которая смешивает гены опсинов L и M, существует различные вариации аминокислотных последовательностей.

В нескольких исследованиях [9,10] выявлялись различия в аминокислотах, которые меняют спектральные максимумы колбочковых фотопигментов и связывают особенности цветного зрения с изменением генов опсина L и M (рис.1.2.1.).

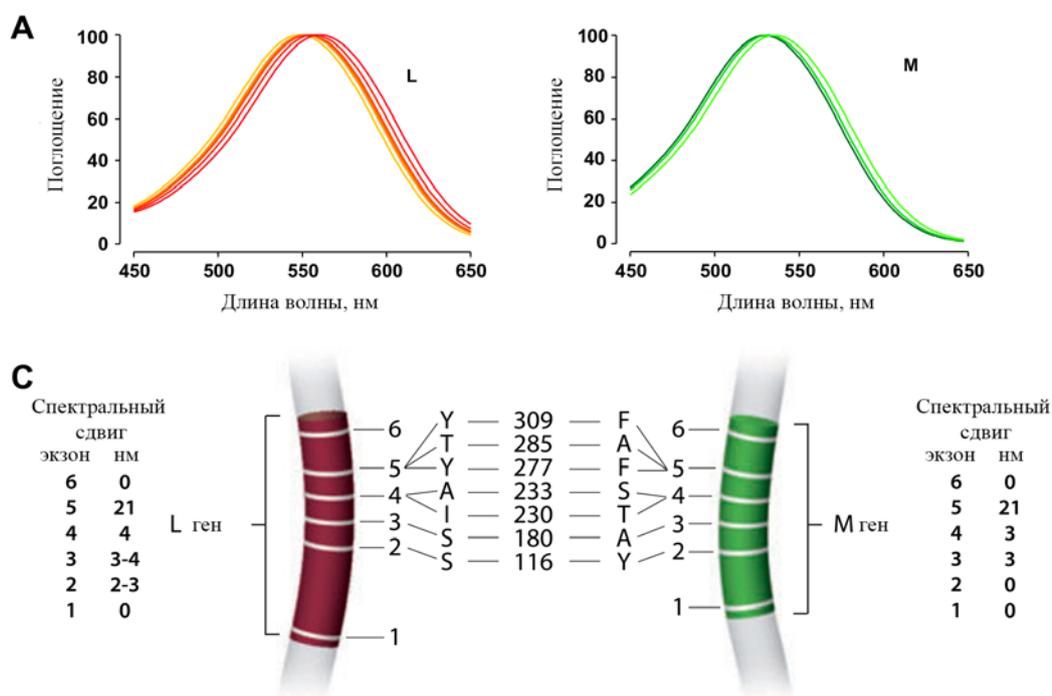


Рис. 1.2.1. (А) Спектральная чувствительности L и M фотопигментов человека; (С) Кодированные L и M опсины гены с шестью экзонами, представленными узкими белыми полосами и пронумерованными 1-6.

Каждый ген опсинов L и M имеет шесть экзонов. Первый и шестой экзоны обычно одинаковые для генов опсина L и M. Экзон 5 кодирует аминокислоты в положениях 277 и 285, которые вместе отвечают за большинство спектральных различий между L и M опсин генами (сдвиги до 21 нм). Экзоны 2, 3 и 4 также кодируют аминокислоты с меньшими спектральными сдвигами [11].

Спектральные чувствительности L и M рецепторов были получены с использованием электроретинограммы методом мерцающей фотометрии [12]. Надежность полученных результатов вызывает сомнения, т.к. не доказано, что применяемая методика эффективно изолирует рецепторы (подробнее в разделе 1.3.), особенно, если учитывать обработку зрительной информации в высших отделах головного мозга.

Подразумевается, что фотопигменты всех людей имеют общую форму спектральной кривой с одним изменяемым параметром, положением максимума, которое можно определить исходя из генотипа. Таким образом,

предлагается заменить традиционные испытания по уравниванию цветоаномалиями цветных изображений на генетические тесты [11]. Однако, из-за недостаточной доказательной базы по корреляции тестов ДНК с кривыми спектральной чувствительности L, M и S рецепторов, наличие естественного разброса спектральных чувствительностей у людей с нормальным цветовым зрением, нельзя на основе теста ДНК отбирать цветоаномалов в качестве наблюдателей, чьи спектральные чувствительности соответствуют людям с нормальным цветовым зрением.

### **1.3. Методы определения спектральной чувствительности рецепторов глаза**

Спектральные чувствительности трех видов колбочек занимают значительную часть видимого спектра и перекрывают друг друга. Следовательно, прямое определение спектральной чувствительности одного типа колбочек у людей с нормальным цветовым зрением требует специальных процедур для выделения его реакции на фоне ответов двух других колбочек.

#### **1.3.1. Метод определения чувствительностей КЗС рецепторов глаза с помощью расчета координат основных цветов дихроматов**

Д. Максвелл ввел понятие цветового пространства как линейного пространства. Следовательно, для определения спектральных чувствительностей К, З, С колбочек, которые в физиологической системе являются функциями сложения, достаточно определить координаты цветности основных цветов КЗС системы в колориметрической системе XYZ.

Традиционный способ определения этих координат для колориметрической системы КЗС основан на использовании результатов уравнивания цветностей излучений дихроматами. Метод определения

основан на том, что координаты цветностей, неразличимых дихроматами располагаются в любой колориметрической системе на прямых линиях, которые должны сходиться в точке с координатами основного цвета, к которому у дихромата отсутствует чувствительность. Для определения искомой точки необходимо экспериментально найти две различные пары неразличимых дихроматом цветов. Каждая из пар определяет одну прямую. Получив точку, в которой пересекается пучок прямых, возможно определить координаты искомой точки – точки основного цвета колориметрической системы.

При этом предполагалось, что причиной дихроматизма является полное отсутствие одного из цветоразличающих аппаратов, а у двух других, нормально работающих рецепторов, спектральные чувствительности точно такие же, как у людей с нормальным цветовым зрением [4]. Данное утверждение вызывало сомнения у разных авторов.

Последние физиологические исследования показали, что характеристики глаза являются эволюционными адаптациями к структуре окружающей среды [13]. В этом направлении изучалась взаимосвязь между количеством типов колбочек в сетчатке, их спектральной чувствительностью, последующей обработкой сигналов ганглиозными клетками и статистикой наиболее часто встречающихся в природе спектров [14]. В результате исследователи пришли к выводам, что положение максимума спектральной чувствительности фотопигментов колбочек оптимально для кодирования визуальной информации в естественных средах [15].

Авторы [1] заметили, что дихроматизм является следствием нарушения на генном уровне, и в ходе эволюции должны были выживать те особи, у которых оставшийся приемник частично компенсирует отсутствующий. В своих исследованиях они сопоставили положения координат цветности основных цветов *K* и *З* колориметрической системы *KЗС*, полученное на

основе экспериментов с дихроматами и людях с нормальным цветовым зрением.

Проанализировав экспериментальные результаты И. Гилда и В. Райта [4] в красной области спектра, авторы отметили, что для установления цветового равенства, трихроматы используют только основной цвет **R**. Следовательно, координаты цветности этих излучений в колориметрических системах *RGB* и *K3C* - (1,0,0). Это позволяет утверждать, что координаты цветности основного цвета К в системе XYZ равны (0.7347; 0.2653; 0.0), и он является реальным цветом.

Для установления причин отличия результатов И. Гилда и В. Райта (0.7347; 0.2653; 0.0) с результатами Е.Н. Юстовой (0.747; 0.250; 0.003) [16] и Д. Джадда (0.747; 0.253; 0.0)[5] было проведено математическое моделирование описанных ранее экспериментов с дихроматами. Когда авторы сместили положение кривой  $\bar{z}(\lambda)$ , полученной с использованием координат цветности основных цветов по Е.Н. Юстовой, на 7.2 нм в синюю область спектра, координаты цветности основного цвета К протанопы практически совпали с координатами трихромата. Это доказывает, что у протанопов функция  $\bar{z}(\lambda)$  смещена, по сравнению с наблюдателем, имеющим нормальное зрение.

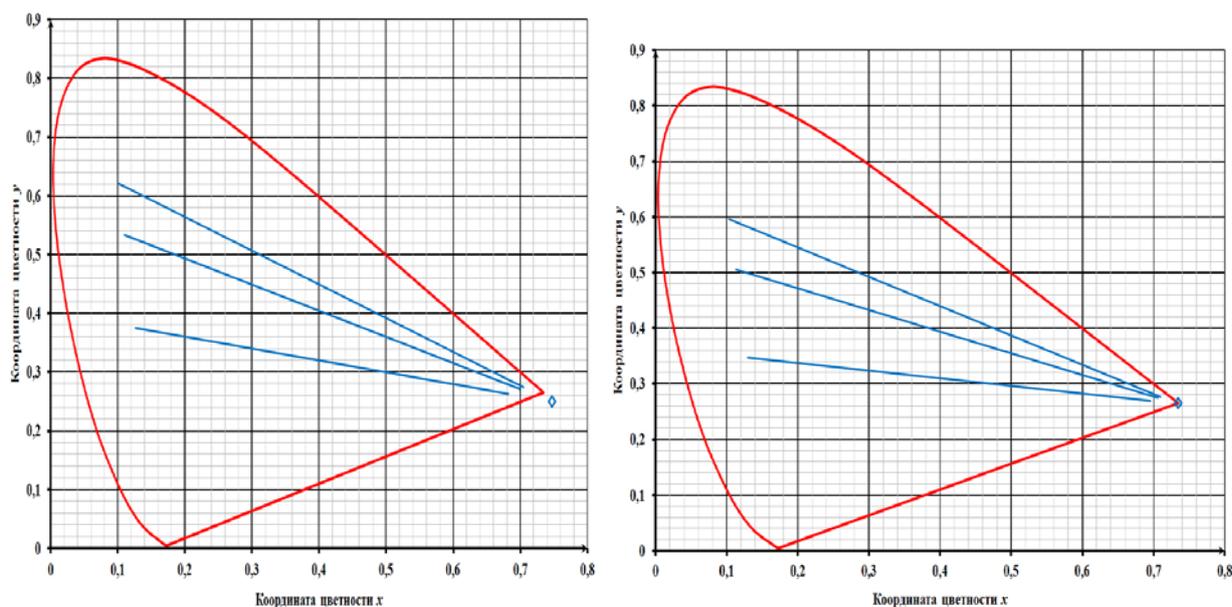


Рис. 1.3.1.1. Координаты цветности основного цвета  $K$  для протанопов по данным Е.Н. Юстовой (слева) и со смещенной на 7.2 нм в синюю область спектра функцией  $\bar{z}(\lambda)$  (справа).

### 1.3.2. Вариации двухцветного порогового метода В. Стайлса по определению изолированной спектральной чувствительности рецепторов у трихроматов

Большинство методов колбочковой изоляции во многом обязаны двухцветному пороговому методу В. Стайлса [17], так называемому, потому что порог обнаружения для объекта или тестового поля одного цвета измеряется на более крупном адаптационном или фоновом поле, обычно второго цвета.

Спектральные чувствительности могут быть получены фиксацией длины волны адаптационного поля и измерением чувствительности обнаружения как функции от изменения длины волны объекта.

Для достижения изоляции объекта длина волны (или смесь длин волн) адаптационного поля должна быть такой, чтобы нежелательные типы

колбочек были к ней более чувствительны и, как следствие, десенсибилизированы этим полем [3].

Существует две методики проведения непосредственно эксперимента: метод мерцающей фотометрии и метод порогового обнаружения мерцания. В работе [18] проводился поиск условий наблюдения, улучшающих изоляцию М- и L-колбочек. Авторы провели измерения на устойчивом фоне и мерцающем фоне, а затем предложили метод обмена двух фоновых полей разного цвета.

#### **1.3.2.1. Метод мерцающей фотометрии**

Эталонное и тестовое излучения  $2^\circ$ - диаметра чередуются с частотой 17 Гц. Эталонное излучение фиксируется на определенной длине волны. Затем на каждой тестовой длине волны наблюдатель корректирует интенсивность тестового излучения, чтобы найти мерцающий фотометрический нуль, то есть интенсивность излучения, при которой одно мерцание нейтрализует другое в противоположной с ним фазе.

#### **1.3.2.2. Метод порогового обнаружения мерцания**

Измеряется пороговая чувствительность мерцания  $2^\circ$  объекта. Тестовое излучение мерцает с частотой 17 Гц и находится в центре  $4^\circ$  адаптационных полей. Наблюдатель регулирует интенсивность тестового излучения до тех пор, пока не убедится, что мерцание происходит только на пороге.

#### **1.3.2.3. Методы изоляции колбочек на устойчивом фоне, мерцающем фоне или сразу после обмена двух фоновых полей разного цвета.**

В 1948 г. де Врис продемонстрировал, что устойчивая хроматическая адаптация может сдвигать мерцающую фотометрическую спектральную чувствительность  $V_\lambda$  в направлении М- или L- спектральных чувствительностей колбочек. В продолжение этой работы Эйснер и Маклеод провели эксперименты на различных цветных фонах и обнаружили, что

возможно уменьшить относительный вклад либо М, либо L-колбочек в  $V_\lambda$  в 10 раз больше, чем предсказывает закон Вебера ( $\Delta I:I=k$ , где  $\Delta I$  - пороговое излучение мишени и  $I$  – излучение фона).

Тем не менее, даже если используется оптимальный цвет, максимально увеличивающий подавление колбочек, маловероятно, что устойчивое поле может десенсибилизировать нежелательные типы колбочек на всех длинах волн объекта. Этот аргумент хорошо иллюстрируется "гомохроматическим" случаем, т.е. когда объект имеет ту же длину волны, что и адаптируемое поле. Адаптируемое поле подавляет обнаружение двумя колбочками данной длины волны, а объект наоборот побуждает к обнаружению.

Один из способов заставить адаптацию превысить закон Вебера - сделать адаптацию переходным процессом. Стокман, Маклеод и Вивьен [18] предположили, что временное чередование адаптирующего поля как по цвету, так и по интенсивности может улучшить изоляцию колбочек.

Их методика заключалась в чередовании двух стандартных изолирующих фонов (678- и 485-нм) каждые 2 с., т.е. мерцание осуществлялось с частотой 0,5 Гц (рис. 1.3.2.3.1. (б)). Тестовые поля были представлены в течение 500 мс сразу после перехода от одного поля (которое называлось предыдущим полем) к другому (которое называлось параллельным полем). Для изоляции М-колбочек предыдущее поле составляло 485 нм, а параллельное - 678 нм. Для изоляции L-колбочек наоборот. На рисунке 1.3.2.3.1. (в) показана мерцание только одним адаптирующим полем, при котором другое поле отсутствовало.

В первых экспериментах измерялась разность мерцающей фотометрической спектральной чувствительности в зависимости от яркости фонов, а в следующих экспериментах подбирали фоновые длины волн для расширения диапазона измерений.

В качестве первичной оценки степени изоляции колбочек авторы сравнивали свои результаты с взвешенной линейной суммой чувствительности колбочек, полученной Смитом и Покорным с использованием данных дихроматических наблюдателей [19]. В подразделе 1.2. объясняется наличие естественного разброса спектральных чувствительностей у людей с нормальным цветовым зрением, а в подразделе 1.3.1. приводится доказательство того, что спектральные чувствительности рецепторов дихроматов смещены в направлении отсутствующего приемника. Поэтому сравнивать и пытаться согласовать данные для трихроматов и дихроматов неуместно.

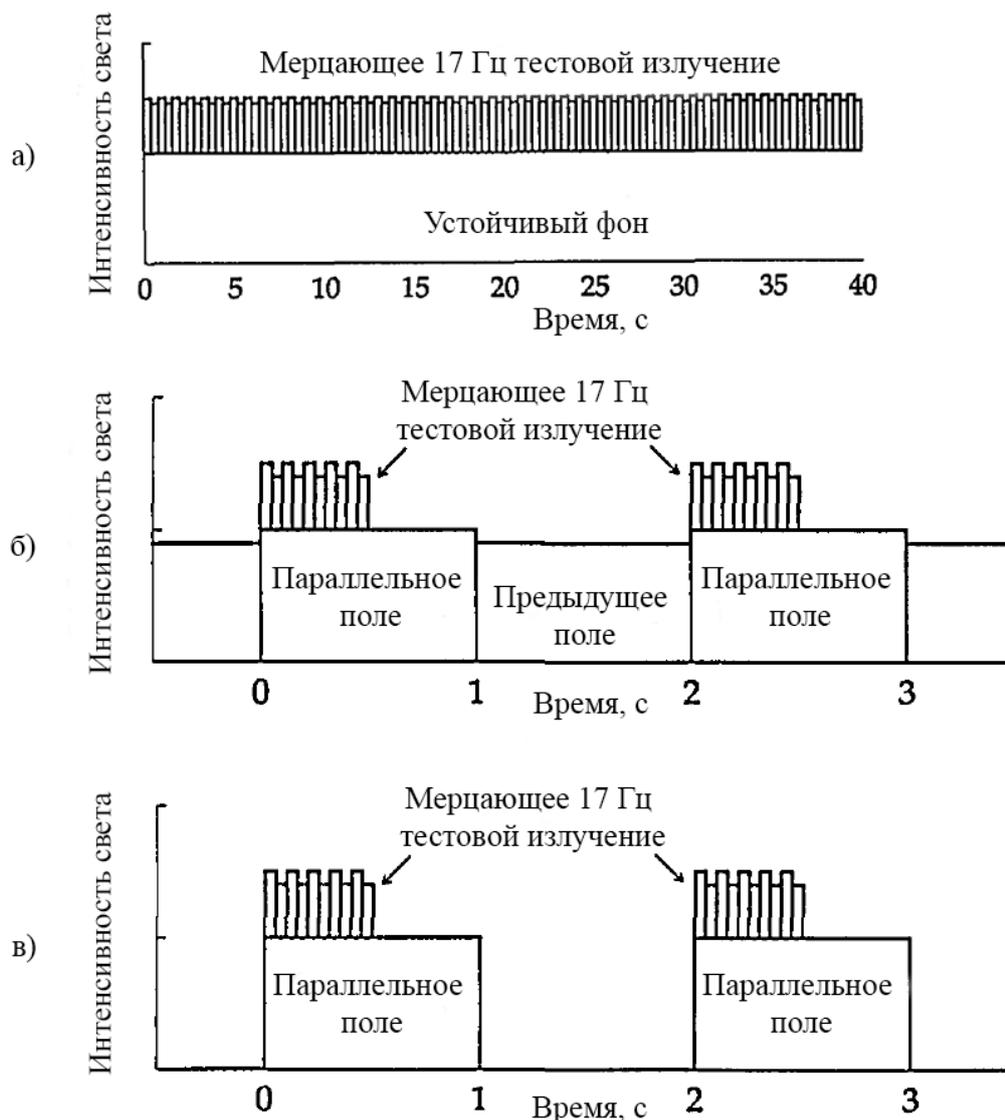


Рис. 1.3.4.1.1. Временная последовательность стимулов: а) устойчивый фон; б) метод обмена двух фоновых полей; в) мерцающий фон

Еще одним косвенным доказательством изоляции служила независимость полученной спектральной чувствительности колбочки от интенсивности фона. Авторы измерили различия в чувствительности обнаружения 470 - 638 нм и 545 - 668 нм с частотой мерцания 17 Гц после фоновых обменов. Однако, авторы отмечают, что спектральная инвариантность может также возникать, когда более чем один тип колбочек участвует в обнаружении.

В качестве дополнительного теста на изоляцию рецепторов авторы определили разности фаз, необходимые для создания мерцающего фотометрического нуля. Если обе цели обнаружены исключительно одним типом колбочки, то различия фаз не должно быть. Однако, фазовых различий также не будет, если изоляция колбочек не удалась и сигналы М- и L-колбочек были в фазе.

Четвертая проверка состояла в том, чтобы проверить, выглядят ли два излучения с разной длины волны одинаковыми. Если два излучения обнаружены только одним типом колбочек, то не должно быть остаточного цветового различия, когда они совпадают по интенсивности. Однако, как и предыдущие тесты, этот тест также неубедителен. Цветовые различия также не будут найдены, если изоляция не удалось, но свет был обнаружен каналом, который реагировал на интенсивность.

Авторы считали [18], что если все проверки пройдены, то изоляция колбочек достигнута. Однако эксперимент не ставил своей целью объяснить механизм изоляции. Только по результатам успешной, по их мнению, изоляции высказываются предположения о влияющих на нее факторах.

### **1.3.3. Определение изолированной спектральной чувствительностей рецепторов глаза с помощью дихроматов**

Изоляцию колбочек можно упростить с помощью красно-зеленых дихроматов, у которых не хватает одного типа колбочек и чувствительность М-L колбочек можно измерить непосредственно. Однако, использование дихроматов для определения спектральной чувствительности колбочек требует наличия цветового зрение, соответствующего гипотезе «Койнига», т.е. спектральная чувствительность оставшихся М - или L-колбочек должна быть идентична соответствующим типам колбочек у людей с нормальным цветовым зрением.

Основная цель комитета МКО [20] по созданию новой колориметрической системы заключалась в том, чтобы предложить функции спектральных чувствительностей колбочек, которые основаны на экспериментах по сопоставлению цветов трихроматами (эксперименты Стайлза и Берча [21]) и будут соответствовать физиологической системе цветового зрения (рис. 1.3.3.1).

В качестве стандартного набора спектральных чувствительностей колбочек комитет принял результаты экспериментов Стокмана и Шарпа [3]. Их эксперименты проводились описанным в предыдущем разделе методом тестовой чувствительности с использованием дихроматов. Основным аргументом в пользу этого решения являлось полученное линейное преобразование функций согласования и КЗС чувствительностей (1.3.3.1).

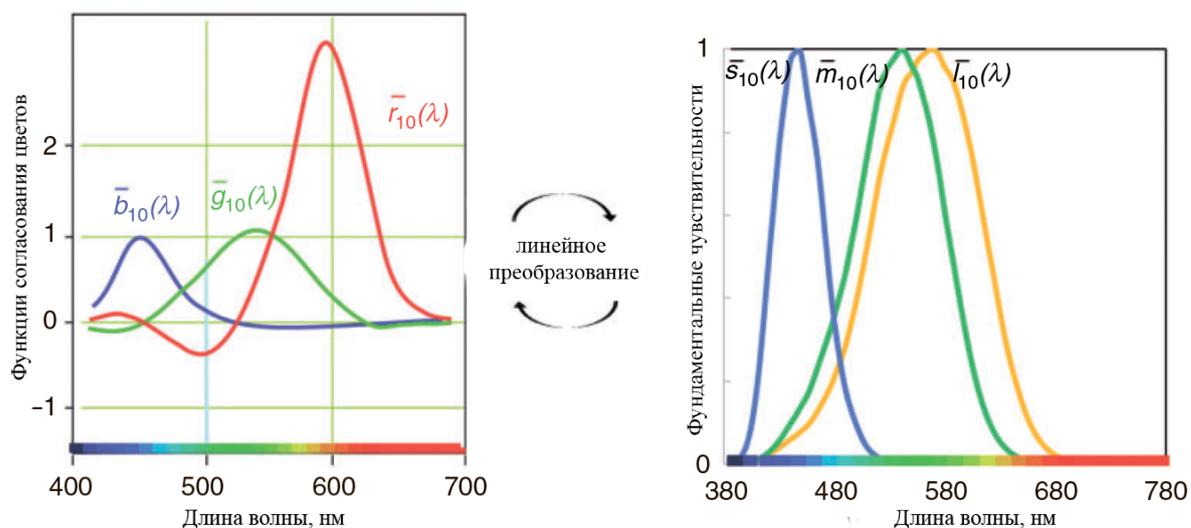


Рис. 1.3.3.1. Функции согласования Стайлза и Берча и чувствительности колбочек Стокмана и Шарпа для  $10^\circ$  поля зрения

$$\begin{aligned}
 \bar{l}_{10}(\lambda) &= 0.192325269 \cdot \bar{r}_{10}(\lambda) + 0.749548882 \cdot \bar{g}_{10}(\lambda) + 0.0675726702 \cdot \bar{b}_{10}(\lambda) \\
 \bar{m}_{10}(\lambda) &= 0.0192290085 \cdot \bar{r}_{10}(\lambda) + 0.940908496 \cdot \bar{g}_{10}(\lambda) + 0.113830196 \cdot \bar{b}_{10}(\lambda) \\
 \bar{s}_{10}(\lambda) &= 0.0105107859 \cdot \bar{g}_{10}(\lambda) + 0.991427669 \cdot \bar{b}_{10}(\lambda)
 \end{aligned}
 \quad (1.3.3.1)$$

Коллектив авторов с помощью ДНК теста выбрал протанопов и дейтеронопов с генами фотопигмента L- и M-колбочек, которые

продуцируют «нормальные» фотопигменты, а также отметил, что дихроматы, участвующие в более ранних исследованиях, были неизвестного генотипа. Ссылаясь на описанное ранее исследование [18], авторы уже утверждают, что временное чередование адаптирующего поля как по цвету, так и по интенсивности подавляет нежелательный тип колбочки достаточно для выделения либо М-, либо L- чувствительности по всему видимому спектру [3].

Однако, изоляция колбочек в применяемой ими методике проверяется только косвенно и согласуется лишь с данными непроверенных по ДНК дихроматов, а отбор наблюдателей по тесту ДНК на данном этапе развития этой технологии (с текущей собранной базой генотипов) не представляется достоверным.

#### **1.3.4. Метод определения спектральной чувствительности рецепторов глаза на основе статистической теории цветового порогового зрения**

Исследование по созданию новой методики определения чувствительностей К, З, С-рецепторов (в переводной литературе L,M,S) у людей с нормальным цветовым зрением проводились в работе [22] на основе статистической модели цветового зрения.

Основная гипотеза, на которой базируется математическая модель, заключается в том, что в процессе эволюции и естественного отбора выжили те представители человеческой расы, которые решали задачи обнаружения лучше других. При разработке математической модели использовался тот факт, что в математической статистике при решении задачи выделения сигналов на фоне случайных помех, был получен алгоритм, лучше которого никакой другой алгоритм не может решить эту задачу. Это алгоритм получил название алгоритма «оптимального приемника». Предполагая, что за счет неизвестных пока нервных связей, мозг человека реализует алгоритм,

близкий к алгоритму оптимального приемника, для его математического описания используется функция отношения правдоподобия.

Структурная схема математической модели зрительной системы (ЗС) фиксирующей отличие исследуемого объекта  $S$  от эталонного  $S_{эт}$ , представлена на рис. 1.3.3.1.

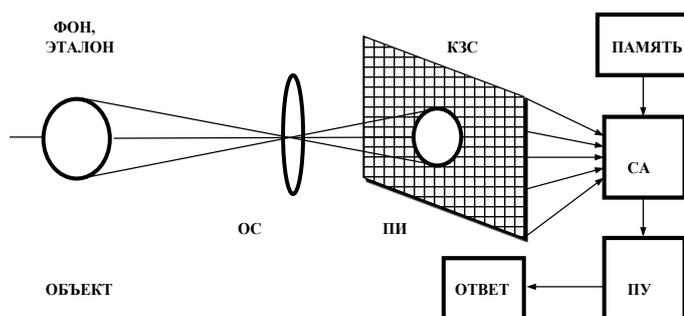


Рис. 1.3.4.1. Структурная схема модели зрительной системы человека: ОС – оптическая система, ПИ – мозаика приемников излучения, УА – устройство анализа, ПУ – пороговое устройство.

Излучение предметов собирается оптической системой глаза (ОС) на мозаику приемников излучения (ПИ), которые в математической модели эквивалентны светочувствительным элементам сетчатки - К, З и С колбочкам. При этом под независимыми приемниками излучения понимаются либо отдельные приемники, либо группы приемников, подключенные через промежуточные нейроны к одному волокну зрительного нерва.

Совокупность случайных сигналов мозаики приемников  $(K, Z, C)$  поступает в систему анализа (СА), содержащее в памяти априорную информацию об объекте ( $S$ ) и эталонном объекте ( $S_{эт}$ ). СА вычисляет одномерную функцию отношения правдоподобия  $\Lambda$ , которая равна отношению вероятности возникновения в опыте по опознаванию случайной реализации  $Y$  ( $K, Z, C$  - совокупности сигналов  $\mu_i$ ) при условии наличия в поле зрения человека объекта ( $P[Y/S]$ ), к вероятности возникновения той же

реализации  $Y$  при условии наличия в поле зрения человека эталона ( $P[Y/S_{эм}]$ ).

$$\Lambda = \frac{p}{q} \frac{P[Y/S]}{P[Y/S_{эм}]} \quad (1.3.4.1)$$

где  $p, q$  – 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:

$$\Lambda \geq \Lambda_{п.} \quad (1.3.4.2)$$

При этом различные критерии характеризуются лишь различными численными значениями  $\Lambda_{п.}$

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

$$\Lambda = \prod_{i=1}^N \left( \frac{x_{oi}}{x_{эмi}} \right)^{\mu_i} \exp[-(x_{oi} - x_{эмi})], \quad (1.3.4.3)$$

или

$$\ln(\Lambda) = \sum_{i=1}^N \mu_i \ln \left( \frac{x_{oi}}{x_{эмi}} \right) - \sum_{i=1}^N (x_{oi} - x_{эмi}), \quad (1.3.4.4)$$

где  $x_{oi}$  – математическое ожидание сигналов приемника с номером  $i$ , при условии присутствия в поле зрения наблюдателя объекта,  $x_{эмi}$  – математическое ожидание сигналов приемника с номером  $i$ , при условии присутствия в поле зрения наблюдателя эталона,  $N$  – число приемников излучения в мозаике приемников.

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

$$f[\ln(\Lambda)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\Lambda^2}} \exp\left\{-\left[\frac{(\ln(\Lambda) - m_\Lambda)^2}{2\sigma_\Lambda^2}\right]\right\}, \quad (1.3.4.5)$$

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

$$m_\Lambda = \sum_{i=1}^N x_{oi} \ln\left(\frac{x_{oi}}{x_{эmi}}\right) - \sum_{i=1}^N (x_{oi} - x_{эmi}). \quad (1.3.4.6)$$

$$\sigma_\Lambda^2 = \sum_{i=1}^N x_{oi} \ln^2\left(\frac{x_{oi}}{x_{эmi}}\right) \quad (1.3.4.7)$$

С учетом монотонности функции натурального логарифма, правило принятия решения (1.3.3.2) эквивалентно правилу  $\ln(\Lambda) \geq \ln(\Lambda_\Pi)$ . С учетом (1.3.3.5) для вероятности обнаружения отличия объекта от эталона несложно получить выражение:

$$P_{об} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_\Lambda} \int_{\ln\Lambda_\Pi}^{\infty} \exp\left(\frac{-(z - m_\Lambda)^2}{2\sigma_\Lambda^2}\right) dz, \quad (1.3.4.8)$$

или

$$P_{об} = \Phi(y),$$

где

$$y = \frac{m_\Lambda - \ln\Lambda_\Pi}{\sigma_\Lambda}, \quad (1.3.4.9)$$

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

В пороговых условиях ( $P_{об}=0,5$ ) аргумент интеграла вероятности равен нулю, поэтому для этой вероятности обнаружения выполняется соотношение:

$$m_{\Lambda} = \ln \Lambda_{II}. \quad (1.3.4.10)$$

Поскольку в области дневного зрения рецепторы сетчатки нелинейны для расчета  $m_{\Lambda}$  необходимо установить взаимосвязь реакций приемников излучения с наблюдаемой яркостью объектов.

Вводится понятие распределения контраста сигналов на выходах приемников излучения:

$$K_i^n = \frac{x_{oi} - x_{эmi}}{x_{эmi}}, \quad (1.3.4.11)$$

где  $x_{oi}$  - среднее значение (математическое ожидание) реакции любого из трех типов приемников (К, З или С) модели ЗС, при условии наличия в поле зрения наблюдателя объекта, а  $x_{эmi}$  - средняя реакция того же приемника, при условии наличия в поле зрения наблюдателя эталона.

Обозначив контраст на выходе нелинейных приёмников как  $K_i^n$ , а  $m_{\Lambda}$  - одно из значений  $m_{\Lambda К}$ ,  $m_{\Lambda З}$  или  $m_{\Lambda С}$ , из (1.3.3.5), с учетом (1.3.3.11), выражение для одного из приемников примет вид:

$$m_{\Lambda} = \sum_{i=1}^n (1 + K_i^n) \ln(1 + K_i^n) x_{эmi} - \sum_{i=1}^n K_i^n x_{эmi}. \quad (1.3.4.12)$$

В том случае, когда объект и фон равной яркости  $K_i^n = K^n$ , при визировании приемниками области внутри контура объекта, и  $K_i^n = 0$ , при визировании области вне контура объекта, т.к. реакции всех таких приемников совпадают независимо от того, какое изображение находится в поле зрения наблюдателя.

Тогда:

$$m_{\lambda} = (1 + K^n) \ln(1 + K^n) X_{эм} - K^n X_{эм}, \quad (1.3.4.13)$$

где  $X_{эм} = x_{эм} n$  - суммарная реакция всех приёмников, визирующих область в пределах контура объекта, а  $n$  - число приёмников, визирующих эту область.

В области дневных яркостей, при визировании объектов с угловым размером от 2 до 10°, пороговый контраст много меньше единицы, поэтому разложим функцию  $\ln(1 + K^n)$  в ряд Тейлора, ограничившись двумя членами разложения. В этом случае, для порогового контраста  $K^n < 0.1$ , погрешность разложения в ряд не будет превышать 0.3%, тогда:

$$m_{\lambda} = (1 + K^n) \left( K^n + \frac{(K^n)^2}{2} \right) X_{эм} - K^n X_{эм}, \quad (1.3.4.14)$$

или

$$m_{\lambda} = \frac{(K^n)^2}{2} X_{эм}. \quad (1.3.4.15)$$

Запишем выражение, связывающее контраст на выходе нелинейных приемников с фотометрическим контрастом. На рис. 1.3.4.2. представлена качественная зависимость математического ожидания  $(X)$  реакции рецепторов ЗС от визируемой яркости  $(L)$ .

Из рис. 1.3.4.2. следует, что:

$$X_o = X_{эм} + \Delta X = X_{эм} + \frac{\Delta X}{\Delta L} \Delta L \approx X_{эм} + \frac{dX}{dL} \Delta L. \quad (1.3.3.16)$$

Введя яркостной контраст  $K = \frac{L_o - L}{L} = \frac{\Delta L}{L}$ , получим:

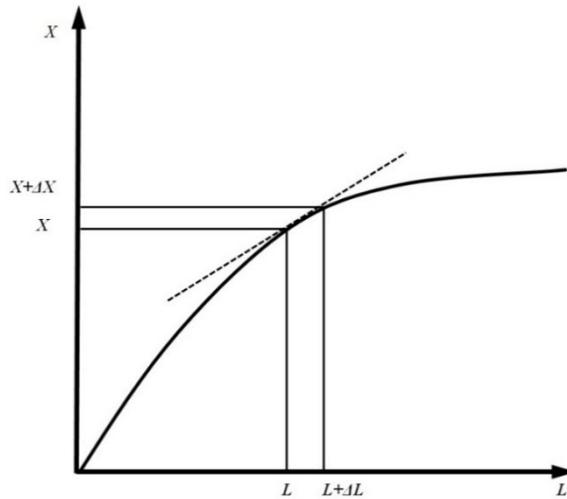


Рис. 1.3.4.2. Нелинейная зависимость реакции приемника излучения от визируемой яркости.

$$K^n = \frac{dX}{dL} \cdot \frac{L}{X} \cdot K. \quad (1.3.4.17)$$

Для большинства задач, где важно цветовое зрение, наблюдение ведется в области яркостей характерных для дневного зрения. При таких яркостях имеется область Вебера-Фехнера, в которой яркостной пороговый контраст  $K$  не зависит от яркости фона, а, следовательно, аргумент интеграла вероятности (7.14) также не должен зависеть от этой яркости, то есть:

$$\frac{dy}{dL} = 0, \quad (1.3.4.18)$$

В этом случае выражение (1.3.4.18) преобразуется к виду:

$$\frac{\sigma_\Lambda \frac{d}{dL}(m_\Lambda - \ln \Lambda_{II}) - (m_\Lambda - \ln \Lambda_{II}) \frac{d}{dL}(\sigma_\Lambda)}{\sigma_\Lambda^2} = 0. \quad (1.3.4.19)$$

В пороговых условиях вероятность обнаружения объекта равна 0.5. Для этих условий аргумент интеграла вероятности равен нулю, т.е.  $m_\Lambda - \ln \Lambda_{II} = 0$ , откуда получаем:

$$\frac{1}{\sigma_\Lambda} \frac{d}{dL}(m_\Lambda - \ln \Lambda_{II}) = 0. \quad (1.3.4.20)$$

Поскольку  $\frac{1}{\sigma_A}$  не равно нулю, то:

$$\frac{dm_\Lambda}{dL} = 0. \quad (1.3.4.21)$$

Подставляя выражение для контраста на выходе нелинейного приёмника (1.3.4.17) в выражение для математического ожидания (1.3.4.15) и преобразуя его, получается из (1.3.4.21) выражение:

$$\frac{d}{dL} \left\{ \frac{1}{2} \cdot K^2 \cdot \frac{d}{dL} \left[ \left( \frac{dx}{dL} \right)^2 \cdot \frac{L^2}{x} \right] \right\} = 0. \quad (1.3.4.22)$$

Поскольку в области Вебера-Фехнера контраст  $K$  не зависит от яркости  $L$  и не равен нулю, то:

$$\frac{d}{dL} \left[ \left( \frac{dx}{dL} \right)^2 \cdot \frac{L^2}{x} \right] = 0 \Rightarrow \left( \frac{dx}{dL} \right)^2 \cdot \frac{L^2}{x} = C_1. \quad (1.3.4.23)$$

Из (1.3.3.23) следует дифференциальное уравнение для зависимости чувствительности рецептора от яркости:

$$\frac{dx}{dL} \cdot \frac{L}{\sqrt{x}} = \sqrt{C_1}. \quad (1.3.4.24)$$

Решая данное дифференциальное уравнение, получается:

$$x = C_2^2 \cdot \ln^2(C_3 L), \quad (1.3.4.25)$$

где  $C_1, C_2, C_3$  – постоянные интегрирования.

Из выражения (1.3.4.25) можно получить:

$$\frac{dx}{dL} = C_2^2 \cdot 2 \ln(C_3 L) \cdot \frac{1}{C_3 L} \cdot C_3 \Rightarrow \frac{dx}{dL} = \frac{2C_2^2 \ln(C_3 L)}{L}. \quad (1.3.4.26)$$

Подставляя полученное выражение в (1.3.4.15), с учетом (1.3.4.17):

$$m_\Lambda = \frac{1}{2} \cdot \frac{4C_2^4 \ln^2(C_3 L)}{L^2 \cdot C_2^2 \ln^2(C_3 L)} \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \cdot L^2 \cdot n = C_4 \left( \frac{\Delta L}{L} \right)^2 \cdot n, \quad (1.3.4.27)$$

где  $\Delta L$  – световая яркость монохроматического источника, добавляемая к световой яркости эталона  $L$  при визировании его К,З или С рецепторами.

При условии одинакового вида нелинейности для всех ПИ (что соответствует широкой области яркостей, в которой цветность излучения не зависит от яркости) выражение для математического ожидания  $\ln(\Lambda)$  принимает вид:

$$m_{\Lambda} = 2 \left[ C_{4k} \left( \frac{\Delta L_k}{L_{k\bar{0}}} \right)^2 + C_{4z} \left( \frac{\Delta L_z}{L_{z\bar{0}}} \right)^2 + C_{4c} \left( \frac{\Delta L_c}{L_{c\bar{0}}} \right)^2 \right] \cdot n, \quad (1.3.4.28)$$

Где  $\Delta L_k = 683 L_{e\lambda}(\lambda) \kappa(\lambda)$  – составляющая световой яркости монохроматического источника при визировании его К рецепторами, аналогично для З и С рецепторов,

$L_{k\bar{0}} = 683 \int_0^{\infty} L_{e\bar{0}}(\lambda) \kappa(\lambda) d\lambda$  – составляющие световой яркости белого источника при визировании его К рецепторами, аналогично для З и С рецепторов,

$C_{4k}, C_{4z}, C_{4c}$  – постоянные интегрирования.

Тогда для пороговых условий, используя выражение (1.3.4.10), можно записать:

$$C_{4k} \left( \frac{L_{en}(\lambda) \kappa(\lambda)}{\int_0^{\infty} L_{e\bar{0}}(\lambda) \kappa(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{4z} \left( \frac{L_{en}(\lambda) z(\lambda)}{\int_0^{\infty} L_{e\bar{0}}(\lambda) z(\lambda) d\lambda} \right)^2 + C_{4c} \left( \frac{L_{en}(\lambda) c(\lambda)}{\int_0^{\infty} L_{e\bar{0}}(\lambda) c(\lambda) d\lambda} \right)^2 =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln \Lambda_n}{\Omega} \cdot \omega, \quad (1.3.4.29)$$

Где  $L_{en}(\lambda)$  – пороговое значение энергетической яркости монохроматического источника излучения.

Решая данное уравнение относительно  $L_{en}(\lambda)$ , получим:

$$L_{en}(\lambda) = \frac{C_5}{\sqrt{C_{4\kappa} \left( \int_0^\infty L_{e\sigma}(\lambda) \kappa(\lambda) d\lambda \right)^2 + C_{4z} \left( \int_0^\infty L_{e\sigma}(\lambda) z(\lambda) d\lambda \right)^2 + C_{4c} \left( \int_0^\infty L_{e\sigma}(\lambda) c(\lambda) d\lambda \right)^2}} \quad (1.3.4.30)$$

где  $C_5 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln \Lambda_n}{\Omega} \cdot \omega$  – составляющие не изменяются при проведении эксперимента.

Полученные выражения позволяют получить расчетные соотношения для порогового обнаружения монохроматического объекта на аддитивном белом фоне (1.3.4.29), либо решить обратную задачу – по результатам эксперимента по пороговому обнаружению монохроматического объекта на белом фоне рассчитать спектральные чувствительности колбочек (1.3.4.30) [23].

Для получения результатов по этой методике нужно относительно небольшое число экспериментальных точек, что сокращает временные затраты на эксперимент.

Решить систему уравнений, состоящих N уравнений (1.3.4.30) непосредственно невозможно, т.к. в каждом уравнении имеется три неизвестных, дополнительных к неизвестным предыдущих уравнений, т.е. число неизвестных в системе из таких уравнений всегда в три раза больше числа уравнений. Это вынуждает априорно задавать тип аппроксимирующих функций  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ , чтобы число неизвестных стало независимым от числа уравнений системы и с увеличением числа уравнений стало меньше числа уравнений в системе.

В процессе работы неизвестные коэффициенты аппроксимации были определены только на белом фоне, что уменьшает надежность и точность

полученных результатов. Это делает необходимым проведение дополнительных исследований этой методики и уточнений её погрешности при проведении экспериментов на цветных фонах.

## 2. РАЗРАБОТКА НОВОЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РЕЦЕПТОРОВ ГЛАЗА НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ЦВЕТОВОГО ПОРОГОВОГО ЗРЕНИЯ

### 2.1. Вывод основного расчетного выражения

В настоящее время ведется разработка ещё одной методики для определения значений КЗС без априорного задания вида аппроксимирующей функции. Суть нового подхода к определению  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  в следующем: при добавлении монохроматического излучения к белому фону уравнение (1.3.4.30) примет вид:

$$L_{en}(\lambda_{об}) = \frac{C_5}{\sqrt{C_{кк} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_{об})}{L_{кб} + \sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_i)} \right)^2 + C_{зз} \left( \frac{\bar{z}(\lambda_{об})}{L_{зб} + \sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_{об})}{L_{сб} + \sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{c}(\lambda_i)} \right)^2}} \quad (2.1.1)$$

где  $\lambda_{об}$  – длина волны монохроматического объекта;

$L_{кб} + \sum_{i=1}^N L(\lambda_i) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_i)$  – составляющие яркости приёмника К; аналогично для З

и С; N – количество добавляемых к излучению белого фона монохроматических излучений.

Количество линейно независимых цветных фонов, образованных из комбинаций монохроматических излучений можно определить согласно табл. 2.1.1.

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

Табл. 2.1.1. Комбинации монохроматических излучений, образующих цветной фон

Решить систему уравнений (2.1.1) можно, если число неизвестных меньше числа уравнений. Из таблицы 2.1.1 видно, что при добавлении к излучению белого источника одного монохроматического источника, мы получаем одно уравнение с тремя неизвестными, которое не имеет решения.

При добавлении двух монохроматических источников получаем шесть уравнений с шестью неизвестными значениями  $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ . Учитывая, что в системе уравнений присутствуют еще неизвестные  $C_{4к}, C_{4з}, C_{4с}$  и  $C_5$ , система уравнений, в этом случае, также не имеет решения.

Решить систему уравнений, состоящих N уравнений (2.1.1), возможно при добавлении к излучению белого источника произвольных излучений на трех длинах волн. Число неизвестных в уравнении (2.1.1) равно 12, а число независимых комбинаций цветных фонов – 21 (по 7 для каждой длины волны). Для монохроматического объекта с длиной волны излучения  $\lambda_1$  образуется следующая система уравнений:

$$\begin{aligned}
L_{en1}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_1)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{3}(\lambda_1)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{c}(\lambda_1)} \right)^2}} \\
L_{en2}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_2)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{3}(\lambda_2)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{c}(\lambda_2)} \right)^2}} \\
L_{en3}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_3) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_3) \cdot \bar{3}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_3) \cdot \bar{c}(\lambda_3)} \right)^2}} \\
L_{en4}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_2)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{3}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{3}(\lambda_2)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{c}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{c}(\lambda_2)} \right)^2}} \\
L_{en5}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_1) + L(\lambda_3) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{3}(\lambda_1) + L(\lambda_3) \cdot \bar{3}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{c}(\lambda_1) + L(\lambda_3) \cdot \bar{c}(\lambda_3)} \right)^2}} \\
L_{en6}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{3}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{3}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_2) \cdot \bar{c}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{c}(\lambda_3)} \right)^2}} \\
L_{en7}(\lambda_1) &= \frac{C_5}{\sqrt{C_{kc} \left( \frac{\bar{\kappa}(\lambda_1)}{L_{\kappa\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{\kappa}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{3c} \left( \frac{\bar{3}(\lambda_1)}{L_{3\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{3}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{3}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{3}(\lambda_3)} \right)^2 + C_{cc} \left( \frac{\bar{c}(\lambda_1)}{L_{c\bar{\sigma}} + L(\lambda_1) \cdot \bar{c}(\lambda_1) + L(\lambda_2) \cdot \bar{c}(\lambda_2) + L(\lambda_3) \cdot \bar{c}(\lambda_3)} \right)^2}}
\end{aligned} \tag{2.1.2}$$

Поскольку на этих фонах можно наблюдать цветные объекты на тех же трех длинах волн, то для монохроматического объекта с длинами волн излучения  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$ , образуется по 7 аналогичных уравнений.

Таким образом, такую систему уравнений можно решить методом «наименьших квадратов».

Плюс этого подхода в том, что при установлении порогового равенства проводится определение одного параметра, пороговой энергетической яркости изображения. В то время как при уравнивании полей по цветности (что используется в традиционных методах) – нужно установить 4 параметра: три значений составляющих, основных цветов и исследуемый цвет. Таким образом погрешность предлагаемого метода в 2 раза меньше.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОГОВ ОБНАРУЖЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БЕЛОМ И ЦВЕТНЫХ ФОНАХ**

#### **3.1. Описание установки**

Для уточнения существующей и реализации новой методик была разработана экспериментальная установка, к которой предъявлялись следующие требования:

- наличие трех монохроматических каналов фона;
- наличие в канале фона источника излучения с непрерывным спектром для обеспечения условий наблюдения в области Вебера-Фехнера;
- возможность устанавливать в канале объекта любую длину
- плавная регулировка яркости в канале объекта наблюдения.

Структурная схема установки представлена на рис. 3.1.1. Установка состоит из пяти каналов. После юстировки всех каналов наблюдатель через окуляр видит двухградусный прямоугольный монохроматический объект на сложном цветном фоне (рис. 3.1.2).

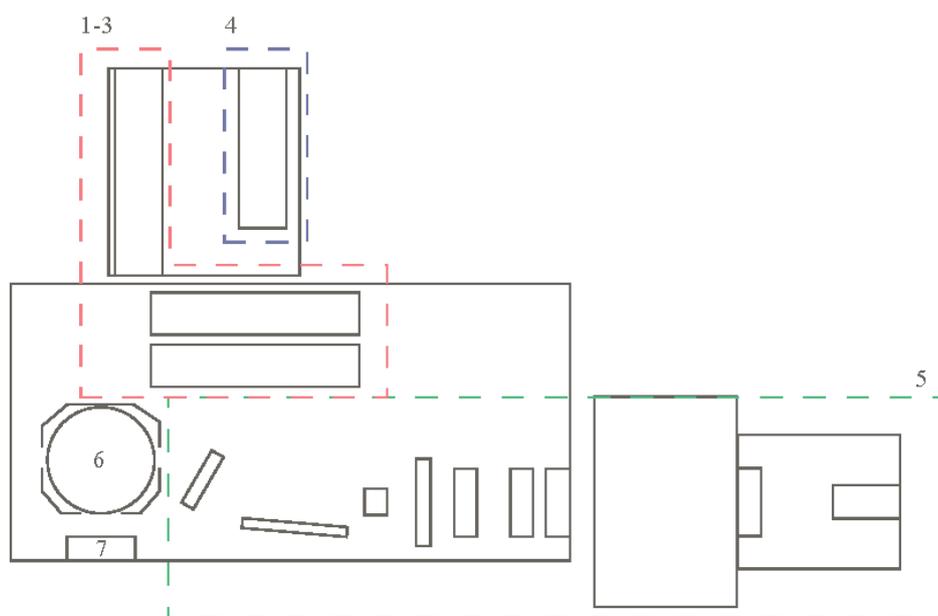


Рис. 3.1.1. Структурная схема экспериментальной установки: 1-3 – каналы монохроматического излучения фона; 4 – канал фона с источником непрерывного излучения; 5 – канал источника монохроматического излучения объекта; 6 – элемент совмещения каналов (интегрирующая сфера); 7 – окуляр.

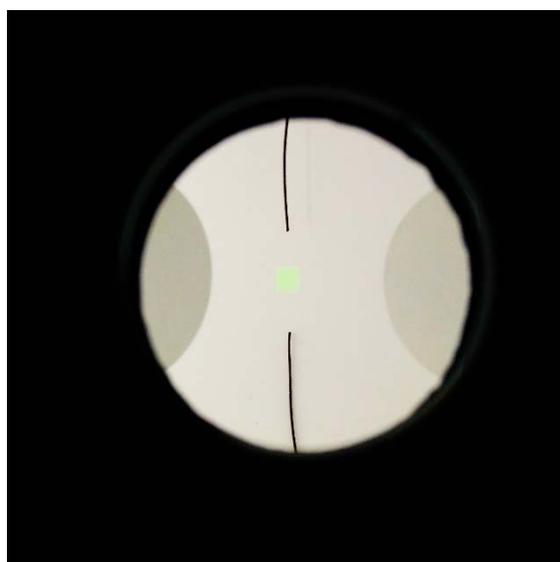


Рис. 3.1.2. Изображение объекта в интегрирующей сфере

В канале монохроматического излучения объекта (рис. 3.1.3) изображение источника с помощью конденсора строится на входной щели монохроматора MSA-130. После прохождения входной щели поток излучения от осветителя попадает в монохроматор MSA-130, который выделяет из сплошного спектра источника требуемую длину волны в

необходимом для эксперимента диапазоне. На выходе из монохроматора находится оптическая система, которая представляет собой последовательно расположенный и отъюстированный набор следующих оптических элементов: конденсор для освещения тест объекта, тест объект (щель), коллиматорный объектив, фильтр для плавной регулировки яркости канала объекта, зеркало, объектив, создающий изображение объекта на стенке интегрирующей сферы. В этом канале осветитель состоит из нескольких светодиодных источников, а также присутствует оптический затвор, который позволяет уменьшить дисперсию ответов наблюдателей.

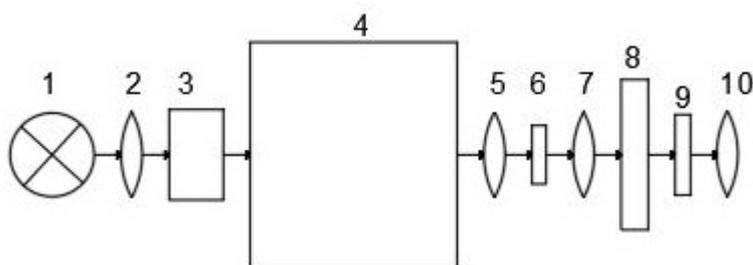


Рис. 3.1.3. Оптическая схема канала монохроматического излучения объекта: 1 – ИИ; 2 – конденсор ИИ; 3 – оптический затвор; 4 – монохроматор; 5 – конденсор для освещения тест объекта; 6 – тест объект (щель); 7 – коллиматорный объектив; 8 – фильтр для плавной регулировки яркости канала объекта; 9 – зеркало; 10 – объектив, создающий изображение объекта.

Таким образом, канал монохроматического излучения объекта позволяет устанавливать нужную длину волны, плавно регулировать яркость от нуля до порогового значения и фиксировать эти пороговые значения.

В канале непрерывного излучения фона (рис. 3.1.4) конденсор собирает пучок лучей источника и направляет его на оптоволоконный жгут, посредством которого реализуется перенос излучения в интегрирующую сферу. Предусматривается возможность изменять спектральный состав излучения установкой фильтров.

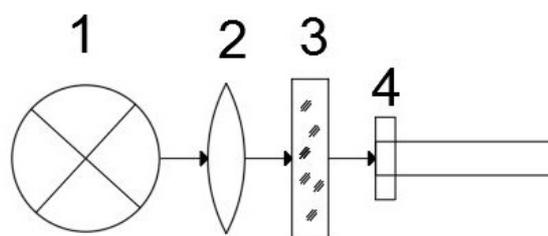


Рис. 3.1.4. Оптическая схема канала непрерывного излучения фона: 1 – ИИ; 2 – конденсор; 3 – оптический фильтр; 4 – ВОЖ.

В трех каналах монохроматического излучения фона (рис. 3.1.5) устанавливаются интерференционные фильтры, которые соответствуют выбранным длинам волн. Интерференционный фильтр работает в параллельном пучке лучей, который обеспечивают два встречно работающих объектива.

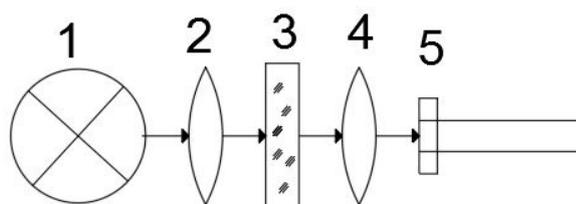


Рис. 3.1.5. Оптическая схема канала монохроматического излучения фона: 1 – источник излучения (ИИ) с непрерывным спектром; 2 – коллиматорный объектив; 3 – интерференционный фильтр; 4 – конденсор; 5 – волоконно-оптический жгут (ВОЖ).

Установка была собрана на двух оптических плитах с использованием 125 стандартных элементов. Однако, некоторые детали (рис. 3.1.6) пришлось специально разрабатывать для этой установки, а затем напечатать на 3d-принтере. Например: держатели и оправы для сменных фильтров, ввод в интегрирующую сферу волоконно-оптических жгутов, подсветка камеры и коробки осветителей, обеспечивающие необходимое расстояние до плоскости установки светодиода.

Фотографии и другие виды напечатанных деталей находятся в Приложении 1.

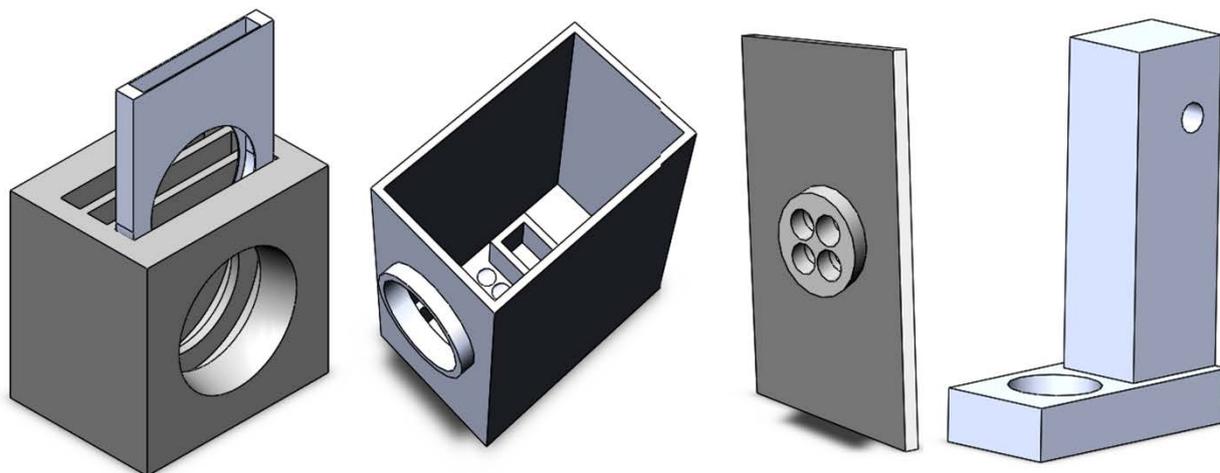


Рис. 3.1.6. Спроектированные детали (слева направо): 1 – держатели и оправы для сменных фильтров; 2 – коробки осветителей, обеспечивающие необходимое расстояние до плоскости установки светодиода; 3 – ввод в интегрирующую сферу волоконно-оптических жгутов; 4 – подсветка камеры

Фотографии собранной установки приводятся на рис. 3.1.6, 3.1.7, 3.1.8, 3.1.9.

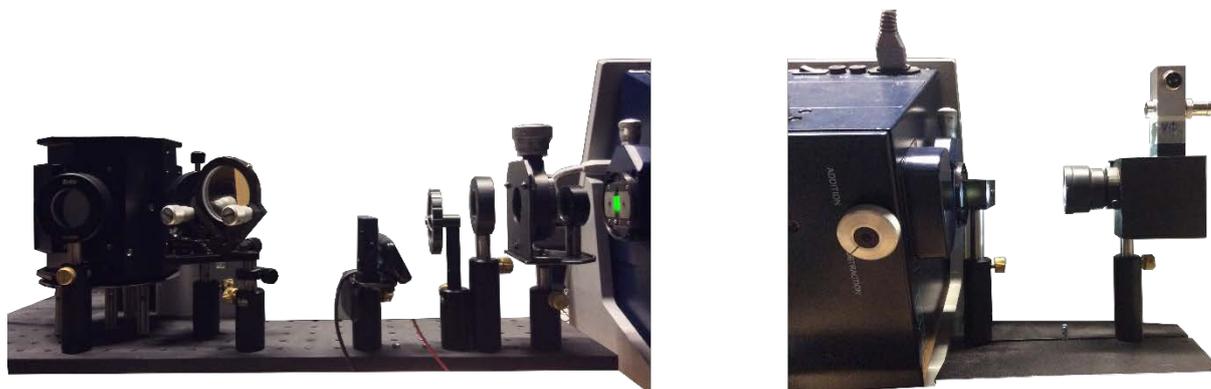


Рис. 3.1.6. Фотография канала монохроматического излучения объекта: (справа) вид со стороны осветителя; (слева) вид со стороны интегрирующей сферы

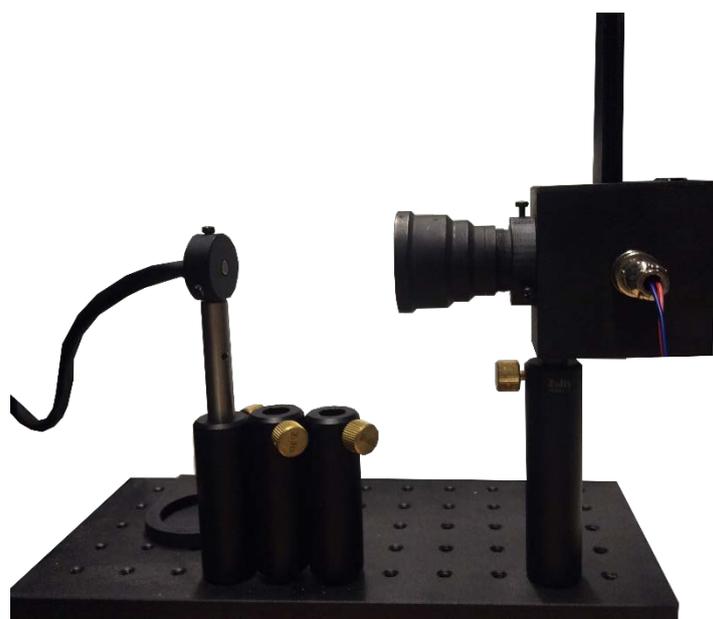


Рис. 3.1.7. Фотография канала непрерывного излучения фона

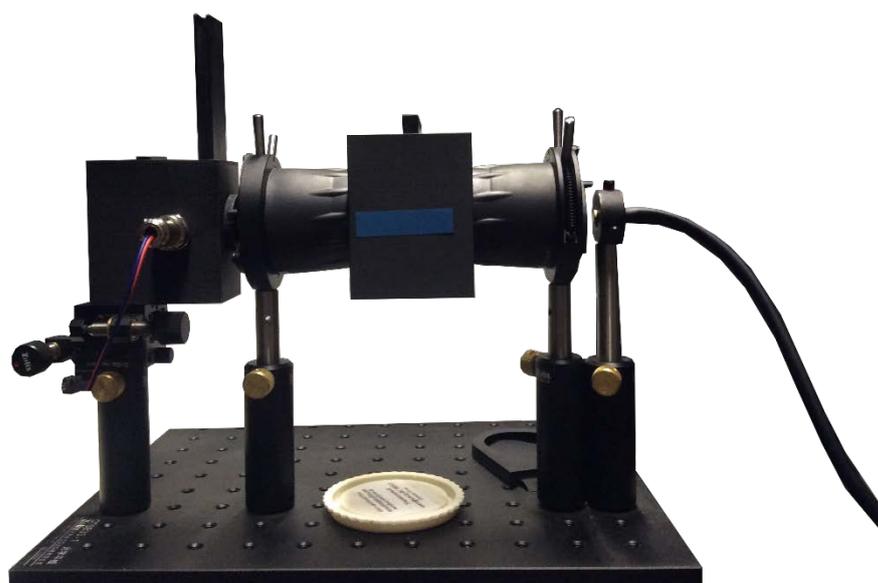


Рис. 3.1.8. Фотография канала монохроматического излучения фона

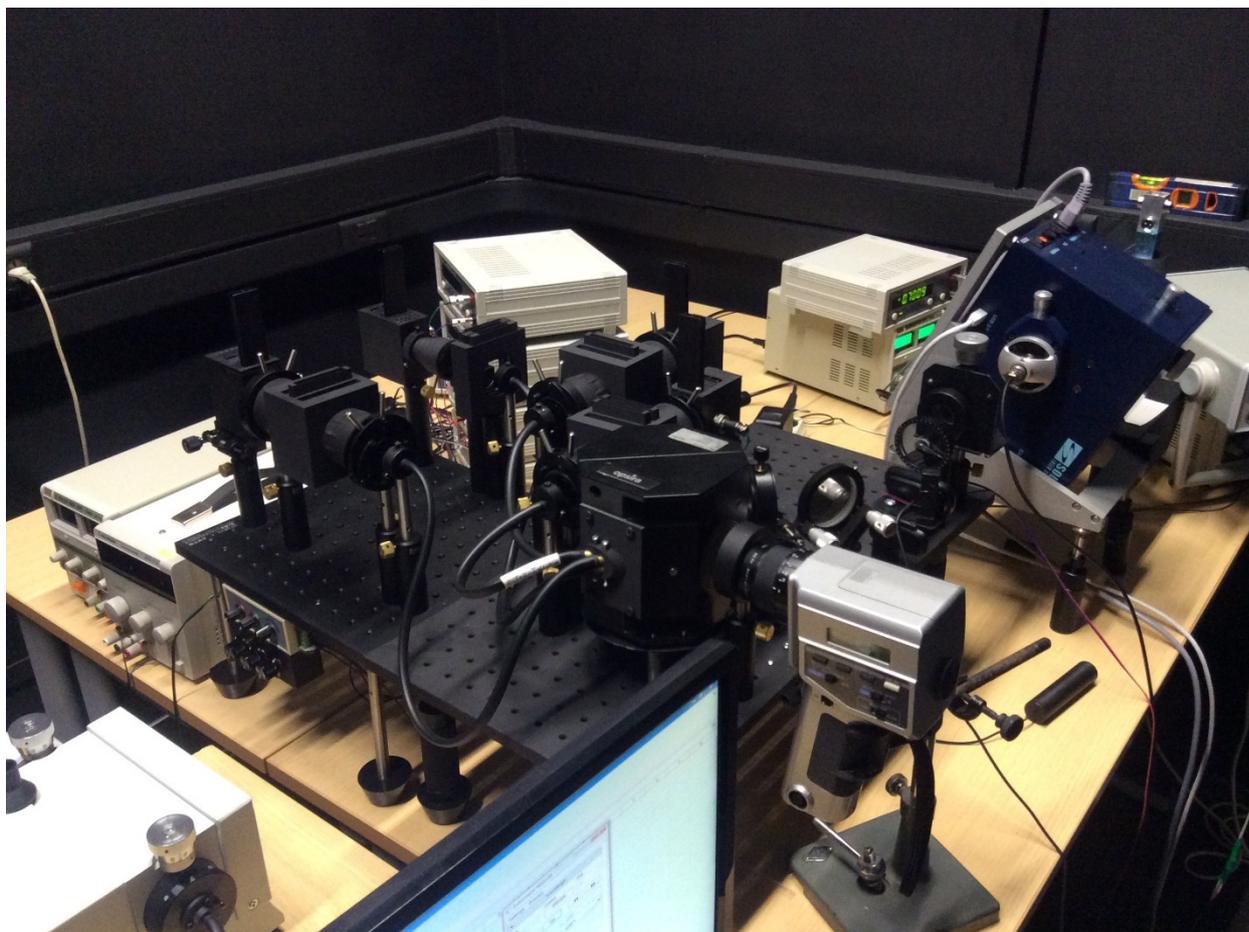


Рис. 3.1.9. Фотография собранной экспериментальной установки

### 3.2. Расчет осветителя канала объекта

Оптическая схема канала объекта представлена на рис. 3.1.2. В табл. 3.2.1. приведены параметры элементов согласно их паспортным данным.

Оптический элемент	Параметры
1 – светодиодный источник	Диаметр светящейся поверхности $\sim 5$ мм;
2 – конденсор источника	Фокусное расстояние = 37 мм; Относительное отверстие = 1:1; Коэффициент пропускания = 0.85;
4 – монохроматор	Относительное отверстие оптической части = 1:4.5; Высота щели = 12 мм; Ширина входной щели = 0.6 мм; Ширина промежуточной щели = 0.75 мм;

	Коэффициент пропускания = 0.66342;
5 – конденсор	Фокусное расстояние = 15.5 мм;
6 – тест объект (щель)	Размеры 4.187 x2 мм
7 – коллиматорный объектив	Фокусное расстояние = 50 мм;
8 – фильтр	Коэффициент пропускания = 0.91;
9 – зеркало	Коэффициент отражения = 0.95;
10 – объектив, создающий изображение объекта	Фокусное расстояние = 125 мм;

Табл. 3.2.1. Исходные данные оптической схемы канала

Изображение источника от источника строится на входной щели монохроматора MSA-130, оптическая схема этого узла установки представлена на рис. 3.2.1.

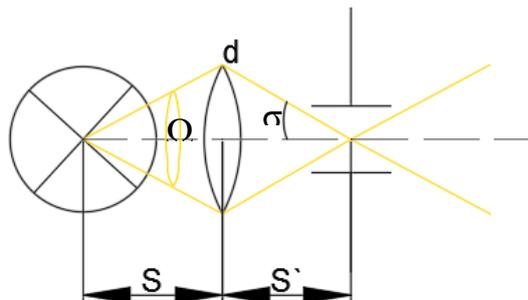


Рис. 3.2.1. Оптическая схема построения изображения источника на входной щели монохроматора

Согласно паспортным данным монохроматора MSA-130 относительное отверстие оптической части = 1:4.5, поэтому  $tg(\sigma)$  для эффективного использования потока источника должно быть равно 1:9. В качестве объектива используется объектив от прибора ночного видения с относительным отверстием 1:1 и фокусным расстоянием 37 мм.

Из геометрии следует соотношение между элементами оптической схемы:

$$\frac{d}{2S'} = \operatorname{tg}(\sigma) \Rightarrow S' = \frac{d}{2\operatorname{tg}(\sigma)} = \frac{37\text{мм}}{2 \cdot \frac{1}{9}} = 166.5\text{мм}, \quad (3.2.1)$$

По формуле тонкой линзы можно определить расстояние от линзы до источника:

$$\frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{1}{f} \Rightarrow S = \frac{S' \cdot f}{S' - f} = \frac{166.5 \cdot 37}{166.5 - 37} = 47.571 \text{ мм}, \quad (3.2.2)$$

Размер построенного линзой оптического изображения:

$$\frac{S'}{S} = \frac{a_{\text{изобрСД}}}{a_{\text{СД}}} \Rightarrow a_{\text{изобрСД}} = \frac{S' \cdot a_{\text{СД}}}{S} = \frac{166.5 \cdot 5}{47.571} = 17.5 \text{ мм} \quad (3.2.3)$$

Энергетический поток на выходе монохроматора определяется выражением:

$$\Phi_{eMX} = I_{\text{СД}} \cdot \Omega' \cdot \tau_{\text{об2}} \cdot \tau_{\text{МХ}} \cdot \frac{S_{\text{вх.цели}}}{S_{\text{изобрСД}}}, \quad (3.2.4)$$

где  $\Omega' = 2\pi \cdot (1 - \cos(\sigma')) = 0.427$  – телесный угол, в пределах которого распространяется излучение от осветителя;

$$\cos(\sigma') = \frac{S}{\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + S^2}} = \frac{47.571}{\sqrt{\left(\frac{37}{2}\right)^2 + 47.571^2}} = 0.932, \quad (3.2.5)$$

$$I_{\text{СД}} = \frac{\Phi_e(\lambda)}{\Omega_{\text{СД}}} \text{ – сила света светодиода;} \quad (3.2.6)$$

$\Omega_{\text{СД}} = 2\pi \cdot (1 - \cos(60^\circ)) = 3.139$  – полный телесный угол распространения излучения от светодиода; (3.2.7)

$$\frac{S_{\text{вх.щели}}}{S_{\text{изобрСД}}} = \frac{h \cdot b}{\pi \cdot r_{CL}^2} = \frac{12 \cdot 0.6}{\pi \cdot 2.5^2} = 0.03 \quad \text{– отношения площадей входной щели}$$

монохроматора и изображения светодиода на входной щели; (3.2.8)

$\tau_{об2}$  и  $\tau_{МХ}$  – пропускание объектива и монохроматора;

Взаимосвязь между монохроматическим потоком и спектральной плотностью потока излучения:

$$\Phi_e(\lambda) = \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (3.2.9)$$

где  $\Delta\lambda$  - спектральный диапазон, вырезаемый монохроматором;

Спектральную плотность потока излучения возможно выразить через световой поток [24] следующим образом:

$$\Phi_{e\lambda}(\lambda) = \Phi_{e\lambda \max} \cdot \Phi_{e\lambda \text{отн}}(\lambda), \quad (3.2.10)$$

По определению световой поток:

$$\Phi_v = 683 \cdot \Phi_{e\lambda \max} \cdot \int \Phi_{e\lambda \text{отн}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda, \quad (3.2.11)$$

Выражаем:

$$\Phi_{e\lambda \max} = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \int \Phi_{e\lambda \text{отн}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}, \quad (3.2.12)$$

Подставляем в (3.2.10), а затем в (3.2.9):

$$\Phi_e(\lambda) = \frac{\Phi_v}{683 \cdot \int \Phi_{e\lambda \text{отн}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot \Phi_{e\lambda \text{отн}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda, \quad (3.2.13)$$

Полученное выражение (3.2.13) подставим в (3.2.4). После всех подстановок выражение энергетического потока на выходе монохроматора примет вид:

$$\Phi_{eMX}(\lambda) = \frac{\frac{\Phi_v}{683 \cdot \int \Phi_{e\lambdaотн}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot \Phi_{e\lambdaотн}(\lambda) \cdot \Delta\lambda}{\Omega_{сд}} \cdot \Omega \cdot \tau_{об} \cdot \tau_{MX} \cdot \frac{S_{вх.щели}}{S_{ист}}$$

(3.2.14)

После прохождения монохроматора изображение источника строится на тест-объекте (рис. 3.2.2). Для получения минимальных габаритов установки элементы расположены на двойном фокусном расстоянии объектива  $2 \cdot 15.5 = 31$  мм.

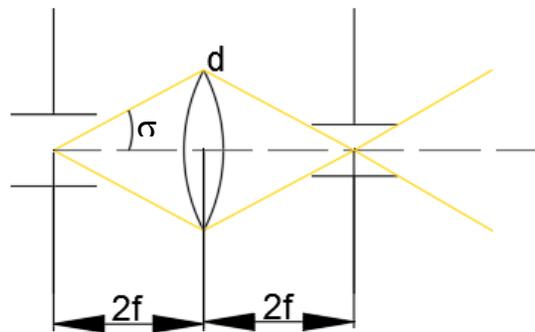


Рис. 3.2.2. Построение хода лучей при освещении тест-объекта

Прошедший через тест-объект поток:

$$\Phi_{тест}(\lambda) = \Phi_{eMX}(\lambda) \cdot \tau_{об5} \cdot \frac{S_{тест}}{S_{щели}}, \quad (3.2.15)$$

где  $\frac{S_{тест}}{S_{щели}} = \frac{h_{тест} \cdot b_{тест}}{h_{щели} \cdot b_{пром}} = \frac{4.187 \cdot 2}{12 \cdot 0.75} = 0.931$  – отношения площадей тест-

объекта и промежуточной щели монохроматора; (3.2.16)

Установленные после коллиматорного объектива оптические элементы находятся в параллельном пучке лучей (рис. 3.2.3), и размер изображения объекта в интегрирующей сфере определяется через фокусные расстояния 7 и 10 объективов.

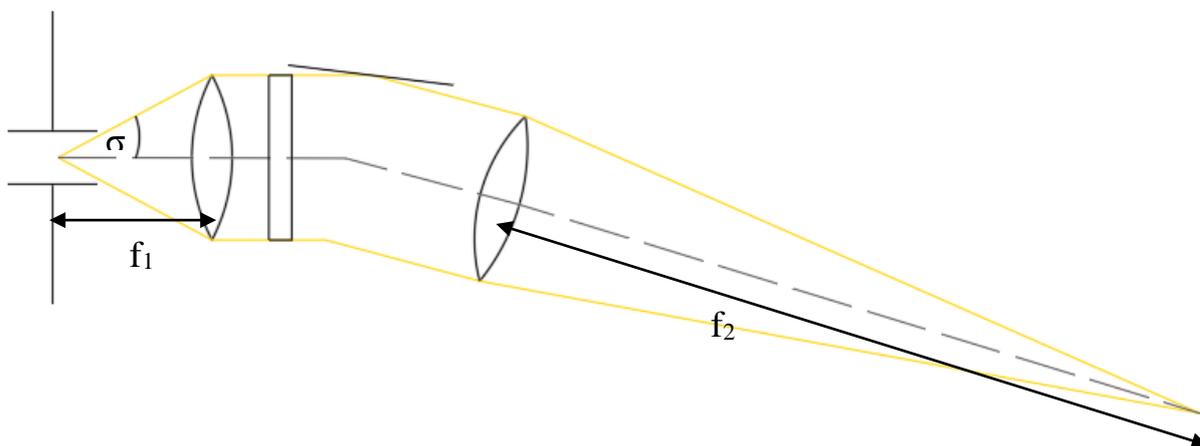


Рис. 3.2.3. Построение хода лучей при прохождении излучения через оптические элементы от тест-объекта до интегрирующей сферы

Поток, попадающий в интегрирующую сферу:

$$\Phi_{\text{инт}}(\lambda) = \Phi_{\text{тест}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{обл}} \cdot \tau_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{зер}} \cdot \tau_{\text{обл10}} \cdot \frac{S_{\text{изобр}}}{S_{\text{тест}}} \quad (3.2.17)$$

где  $\frac{S_{\text{изобр}}}{S_{\text{тест}}} = \frac{a_{\text{изобр}}^2}{h_{\text{тест}} \cdot b_{\text{тест}}}$  – отношения площадей изображения и тест-объекта; (3.2.18)

Размер изображения тест-объекта в интегрирующей сфере:

$$\frac{a_{\text{тест}}}{f_7} = \frac{a_{\text{изобр}}}{f_{10}} \Rightarrow a_{\text{изобр}} = \frac{f_{10} \cdot a_{\text{тест}}}{f_7} = \frac{125 \cdot 4.187}{50} = 10.468 \text{ мм} \quad (3.2.19)$$

$$\text{и } \frac{S_{\text{изобр}}}{S_{\text{тест}}} = \frac{a_{\text{изобр}}^2}{h_{\text{тест}} \cdot b_{\text{тест}}} = \frac{10.468^2}{4.187 \cdot 2} = 13.085$$

Облученность на стенке интегрирующей сферы:

$$E_e = \Phi_{\text{инт}}(\lambda) \cdot S_{\text{изобр}} \quad (3.2.20)$$

Энергетическая яркость изображения объекта в интегрирующей сфере:

$$L_e = E_e \cdot \frac{\rho}{\pi} \quad (3.2.21)$$

Для обнаружения двухградусного объекта яркость должна быть больше или равна:

$$L_e \geq \frac{K_{\text{нор}}(\alpha^\circ, L_{\text{вф}}) \cdot L_{\text{вф}}}{683 \cdot \int V(\lambda) d\lambda} \quad (3.2.22)$$

где  $L_{\text{вф}}$  – яркость фона;

$K_{\text{нор}}(\alpha^\circ, L_{\text{ф}}) = K_{\text{нор}}(2^\circ, 20) = 0.005$  – пороговый контраст при текущих размерах объекта и яркости фона;

Последовательно подставляя согласно оптической схеме канала выражения потока, получаем итоговое выражение:

$$\frac{\Phi_v}{683 \cdot \int \Phi_{\text{елотн}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda} \cdot \Phi_{\text{елотн}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \geq \frac{K_{\text{нор}} \cdot L_{\text{ф}}}{683 \cdot \int V(\lambda) d\lambda} \cdot \Omega_{\text{СД}} \cdot \tau_{\text{об2}} \cdot \tau_{\text{МХ}} \cdot \frac{S_{\text{вх.щели}}}{S_{\text{изобрСД}}} \cdot \tau_{\text{об5}} \cdot \frac{S_{\text{мест}}}{S_{\text{вх.щели}}} \cdot \tau_{\text{об7}} \cdot \tau_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{зер}} \cdot \tau_{\text{об10}} \cdot \frac{S_{\text{изобр}}}{S_{\text{мест}}} \cdot a_{\text{изобр}}^2 \cdot \frac{\rho}{\pi}$$

Откуда необходимый световой поток светодиода:

$$\Phi_v = \frac{\frac{K_{\text{нор}} \cdot L_{\text{вф}}}{\int V(\lambda) d\lambda} \cdot \Omega_{\text{СД}} \cdot \int \Phi_{\text{елотн}}(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda}{\Omega \cdot \tau_{\text{об2}} \cdot \tau_{\text{МХ}} \cdot \frac{S_{\text{вх.щели}}}{S_{\text{изобр}}} \cdot \tau_{\text{об5}} \cdot \frac{S_{\text{диа}}}{S_{\text{вх.щели}}} \cdot \tau_{\text{об7}} \cdot \tau_{\text{ф}} \cdot \rho_{\text{зер}} \cdot \tau_{\text{об10}} \cdot \frac{S_{\text{изобр}}}{S_{\text{мест}}} \cdot a_{\text{изобр}}^2 \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot \Phi_{\text{елотн}}(\lambda) \cdot \Delta\lambda} \cdot (3.2.23)$$

Рассмотрим наихудший случай, а именно, обнаружение монохроматического объекта на краю видимого человеком диапазона. При расчете использовался спектр белого светодиода, приведенный в приложении 2 (Табл. П.3.).

$$\Phi_{\text{елотн}}(410) = 0.008905923.$$

Подставив численные значения, получим:

$$\Phi_v = \frac{0.005 \cdot 20}{0.000073} \cdot 3.138704342 \cdot 0.0000285 =$$

$$0.427 \cdot 0.9 \cdot 0.66342 \cdot 0.029934 \cdot 0.9 \cdot 0.931 \cdot 0.9 \cdot 0.91 \cdot 0.95 \cdot 0.9 \cdot 13.085 \cdot 10.468^2 \cdot \frac{0.93}{\pi} \cdot 0.008905923 \cdot 15 \cdot 10^{-3}$$

$$= 512.4 \text{ лм}$$

Связь светового потока и мощности светодиода определяется выражением:

$$\eta_{\text{сд}} = \frac{\Phi_v}{P} \Rightarrow \Phi_v = P \cdot \eta_{\text{сд}}, \quad (3.2.24)$$

Значения световой отдачи типичных светодиодов  $\sim 100$  лм/Вт. Для светодиода мощностью 5 Вт световой поток будет:

$$\Phi_v = 5 \text{ Вт} \cdot 100 \frac{\text{лм}}{\text{Вт}} = 500 \text{ лм}$$

Для обнаружения монохроматического объекта на других длинах волн необходимы значения светового потока на порядок ниже (Табл. П.3.), поэтому в данной работе осветитель состоит из нескольких светодиодных источников. В области коротких длин эксперименты проводятся с использованием светодиода ARPL-Star-1W UV400, а остального диапазона используется белый светодиод мощностью 5Вт.

Спектральные распределения энергетических потоков источников представлены в подразделе градуировки установки (рис. 3.3.4).

### 3.3. Градуировка экспериментальной установки

Для проведения экспериментов было необходимо провести градуировку установки.

Градуировка канала непрерывного излучения фона по световой яркости проводилась с помощью яркомера, установленного на выходе интегрирующей сферы (рис. 3.3.1).

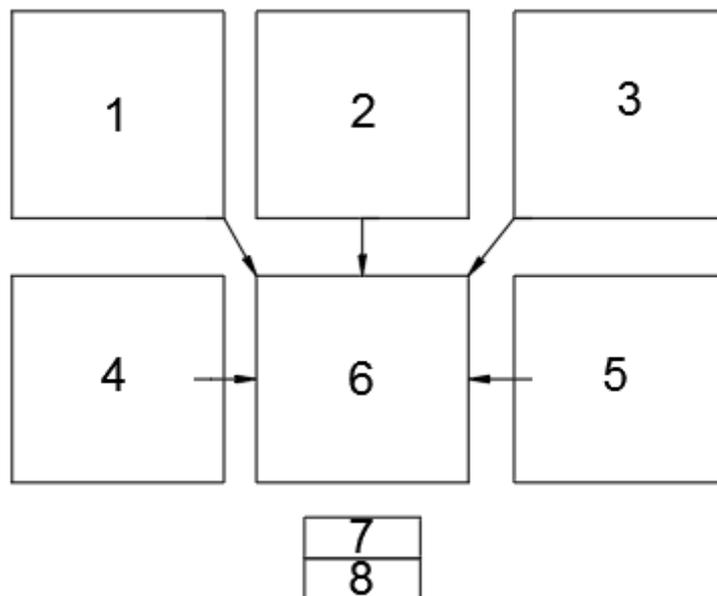


Рис. 3.3.1. Структурная схема измерений с помощью яркомера: 1-3 – каналы монохроматического излучения фона; 4 – канал фона с источником непрерывного излучения; 5 – канал источника монохроматического излучения объекта; 6 – элемент совмещения каналов (интегрирующая сфера); 7 – окуляр; 8 – яркомер

Данный канал обеспечивает работу в области цветового зрения и мощности источника достаточно для работы в области Вебера-Фехнера (рис. 3.3.2). Плавное изменение яркости канала осуществляется изменением тока светодиода.

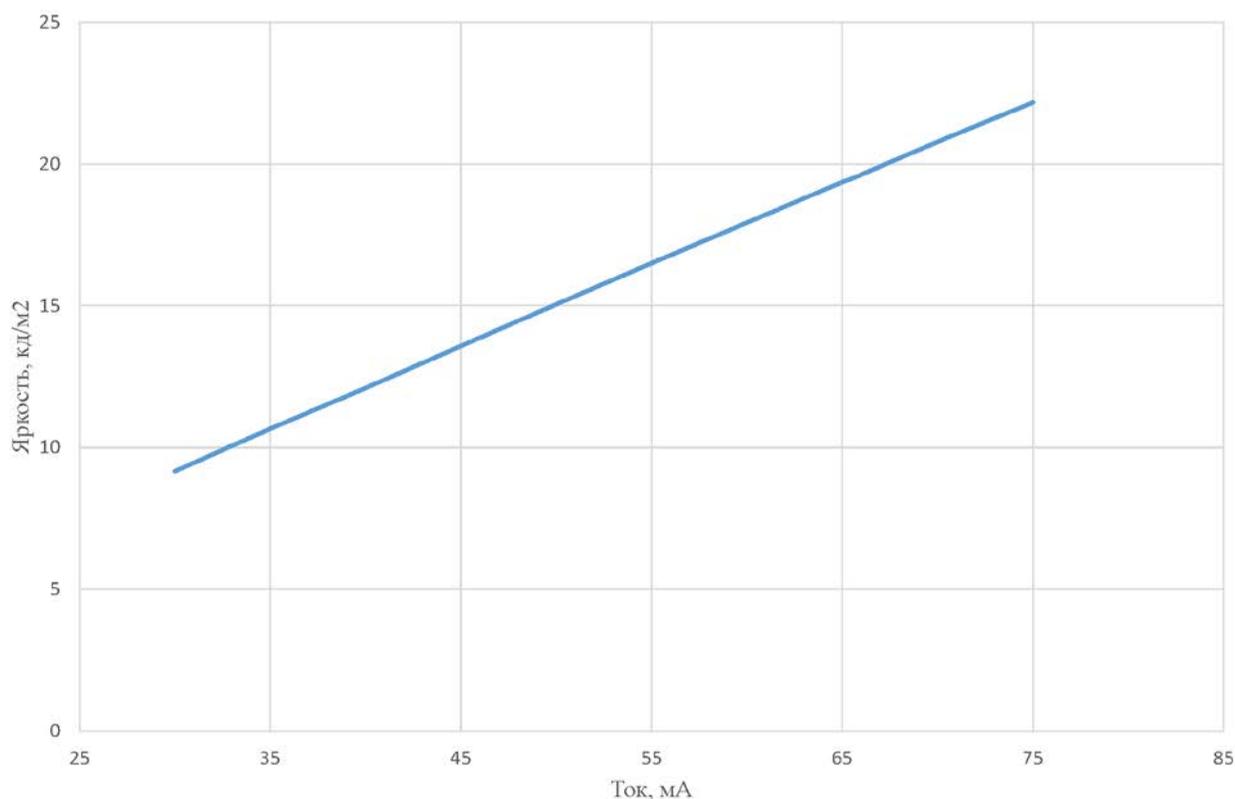


Рис. 3.3.2. Результаты градуировки канала непрерывного излучения фона

Градуировка канала объекта осуществлялась с помощью калиброванного во ВНИИОФИ по энергетическому потоку фотодиода. Фотодиод был установлен на выходной щели монохроматора (рис. 3.3.3).

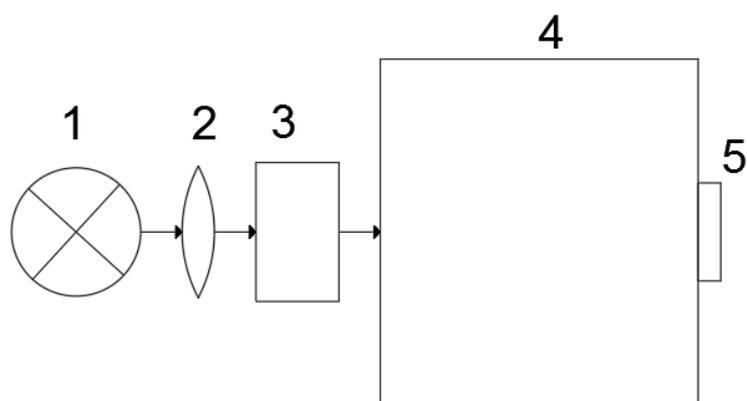


Рис. 3.3.3. Оптическая схема градуировки с помощью фотодиода: 1 – ИИ; 2 – конденсор ИИ; 3 – оптический затвор; 4 – монохроматор; 5 – калиброванный фотодиод

Результаты градуировки нескольких источников по длинам волн подтверждает возможность работы во всем видимом диапазоне (рис. 3.3.4).

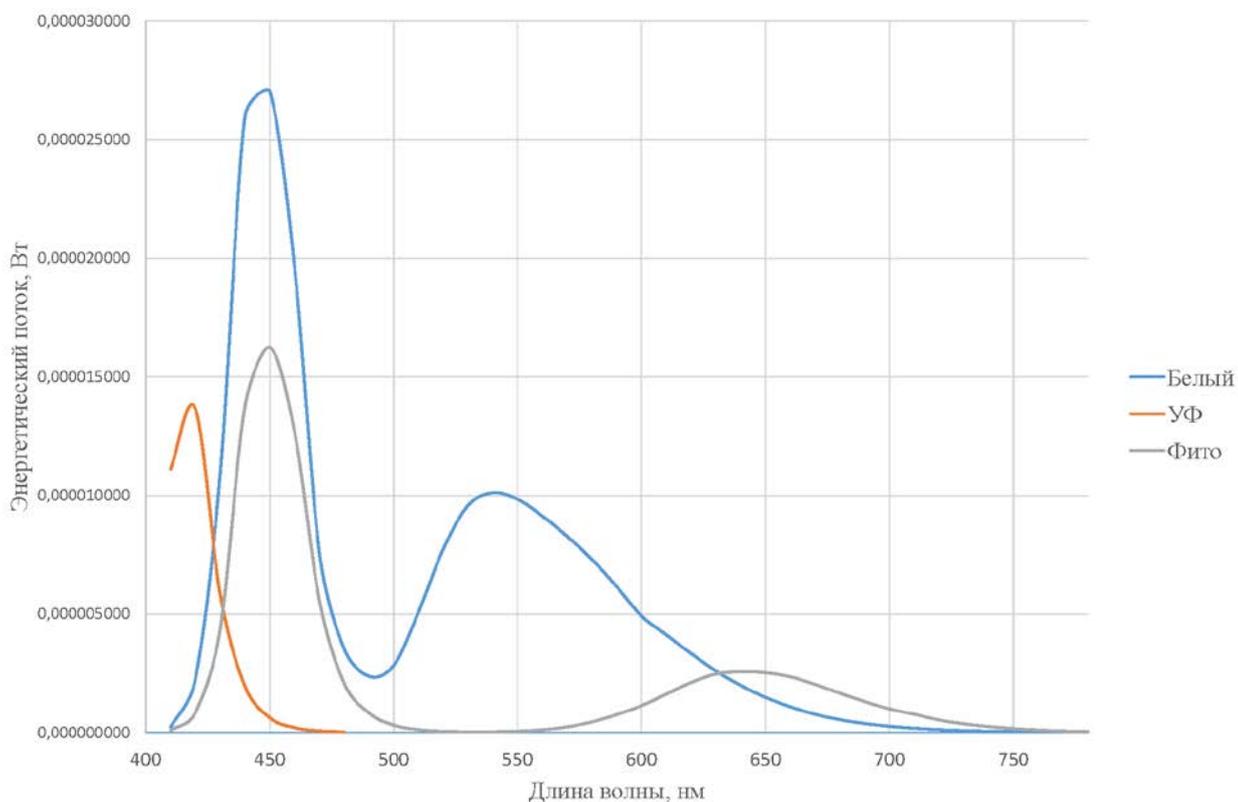


Рис. 3.3.4. Результаты градуировки канала монохроматического излучения объекта

Градуировка нейтрального поглощающего фильтра (рис. 3.3.5) позволяет определить рабочую область и получить зависимость его коэффициента пропускания от угла поворота фильтра вокруг его оси вращения.

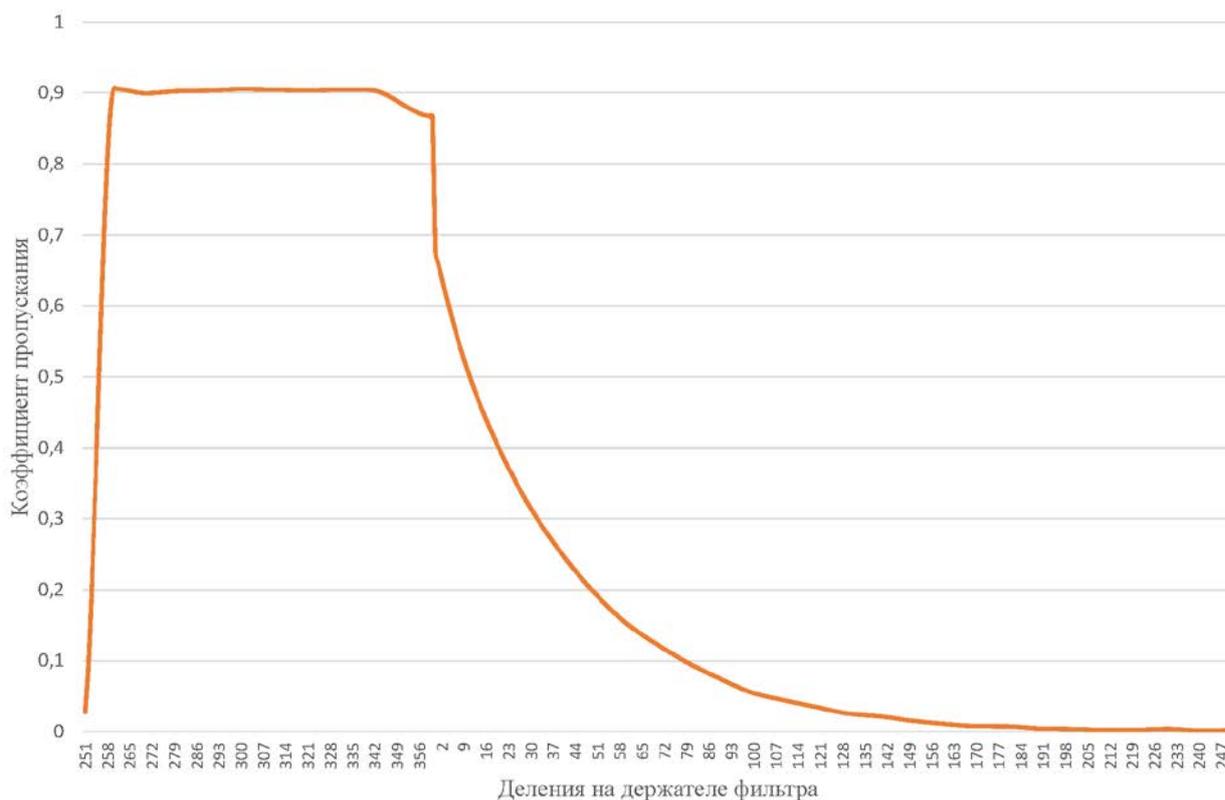


Рис. 3.3.5. Результаты градуировки нейтрального поглощающего фильтра

Для определения среднего значения коэффициента пропускания использовался яркомер, установленный на выходе интегрирующей сферы (рис. 3.3.1).

Градуировочные графики установки были аппроксимированы сплайнами с помощью программы написанной в среде Matlab.

В оптической системе выходные величины линейно зависят от входных, поэтому взаимосвязь между потоком на выходе монохроматора и энергетической яркостью изображения объекта в интегрирующей сфере можно найти с помощью коэффициента:

$$K = \frac{L_v(\lambda_i)}{683 \cdot V(\lambda_i) \cdot \Phi_e(\lambda_i)} \quad (3.3.1)$$

У яркомера всегда присутствует погрешность коррекции его спектральной чувствительности под  $V(\lambda_i)$ . Для определения этой

погрешности яркомера использовалась следующая методика: выставлялся максимальный ток светодиода на локальном минимуме его спектра и с помощью калиброванного фотодиода определялся  $\Phi_e(\lambda_i)$ . Затем, уменьшая ток светодиода, добивались того же значения  $\Phi_e$  на других длинах волн. Далее измерялась световая яркость объекта при полученных значениях тока светодиода и проводился переход к энергетическим величинам. При проведении измерений фотодиод был помещен на выходной щели монохроматора (рис. 3.3.3), а яркомер установлен на выходе интегрирующей сферы (рис. 3.3.1).

Результаты всех градуировок приведены в приложении 2.

### **3.3. Юстировка экспериментальной установки**

В канале монохроматического излучения объекта проверяется положение сфокусированного светового пятна на входной щели монохроматора и выставленные значения щелей монохроматора. Затем визуально сверяется изображение монохроматического объекта в интегрирующей сфере по: форме, центральному расположению в поле зрения наблюдателя и равномерности излучения.

В каналах непрерывного излучения фона и монохроматических излучений фона проверяется фокусировка пучка лучей на волоконно-оптических жгутах по максимуму световой яркости измеряемой яркомером.

### **3.4. Экспериментальные исследования порогов по яркости для монохроматических излучений**

Для выявления отклонений в цветовом зрении все наблюдатели проходили проверку по цветовым таблицам Рабкина Е.Б. После прохождения теста на цветоразличение наблюдатели проходили обучение на

экспериментальной установке по обнаружению объекта на фоне методом едва заметного различия.

Каждый наблюдатель вначале проходил темновую адаптацию в течение пяти минут, а затем световую адаптацию на яркость равную  $20 \text{ кд/м}^2$  в течение трех минут. После чего на каждой из установленных длин волн наблюдателю предъявлялась ситуация «на исчезновение» объекта, при этом начальное положение оптического клина устанавливалось на 40 делений, а конечное значение соответствовало исчезновению отличий между объектом и фоном. Затем предъявлялась ситуация «на появление» объекта с начальным положением оптического клина, соответствующим наименьшему пропусканию излучения и фиксацией конечного положения при обнаружении объекта.

Эксперименты на цветных фонах проводились по той же методике, только в каналы монохроматического излучения фона устанавливались интерференционные фильтры, а затем поочередно перекрывались затворами согласно табл. 3.4.1.

Длина волны объекта	Комбинации цветных фонов						
$\lambda_1$	$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$	$\lambda_1 + \lambda_2$	$\lambda_1$	$\lambda_1 + \lambda_3$	$\lambda_3$	$\lambda_2 + \lambda_3$	$\lambda_2$
$\lambda_2$							
$\lambda_3$							

Табл. 3.4.1. Последовательность предъявления смеси монохроматических излучений фона

Одна экспериментальная серия проводилась двумя попеременно меняющимися друг друга наблюдателями, один из которых являлся наблюдателем, а другой в это время проводил эксперимент. Такая методика уменьшает утомление наблюдателя в процессе работы.

## 4. ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

### 4.1. Протоколы экспериментов

Все результаты по каждому наблюдателю, полученные в течение дня оформлялись протоколом на листе программы Excel. Пример протокола для эксперимента на белом фоне на рис. 4.1.1, а для эксперимента на цветных фонах на рис. 4.1.2.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Наблюдатель Б	Дата	24.04.2018							
2										
3		-	+	-	+	-	+	-	+	
4	L (нм)	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Среднее	Среднее	Среднее
5	410(УФ)	148	142	152	144	149	142	149,666667	142,666667	146,166667
6	422(УФ)	150	146	151	146	152	146	151	146	148,5
7	434(УФ)	125	116	122	116	122	116	123	116	119,5
8	434	178	183	174	178	178	174	176,666667	178,333333	177,5
9	446	178	178	180	178	180	178	179,333333	178	178,666667
10	458	154	150	154	146	154	146	154	147,333333	150,666667
11	470	120	110	118	110	116	110	118	110	114
12	482	94	90	94	86	92	85	93,333333	87	90,166667
13	494	130	124	130	124	128	120	129,333333	122,666667	126
14	506	158	156	158	156	158	156	158	156	157
15	518	176	176	172	172	176	172	174,666667	173,333333	174
16	530	188	182	188	182	188	181	188	181,666667	184,833333
17	542	176	176	176	174	176	174	176	174,666667	175,333333
18	554	168	164	172	166	172	164	170,666667	164,666667	167,666667
19	566	160	152	160	152	162	156	160,666667	153,333333	157
20	578	162	156	162	154	162	154	162	154,666667	158,333333
21	590	158	157	158	154	158	154	158	155	156,5
22	602	150	148	152	147	154	148	152	147,666667	149,833333
23	614	134	134	136	132	136	135	135,333333	133,666667	134,5
24	614(Фито)	120	114	121	113	120	113	120,333333	113,333333	116,833333
25	626(Фито)	116	116	116	110	114	110	115,333333	112	113,666667

Рис. 4.1.1. Фрагмент протокола .xls одной серии эксперимента на белом фоне для наблюдателя Б.

№	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Наблюдатель Б	Дата	08.05.18							
2		-	+	-	+	-	+	-	+	
3	λоб, нм	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Среднее	Среднее	Среднее
4	λ <sub>1</sub> = 520 нм; λ <sub>2</sub> = 540 нм; λ <sub>3</sub> = 555 нм									
5	520	174	168	174	168	174	168	180,67	190,67	171
6	540	170	166	172	170	174	168	191,33	198,67	170
7	555	166	160	166	160	166	158	196,67	200,67	162,67
8	λ <sub>1</sub> = 520 нм; λ <sub>2</sub> = 540 нм;									
9	520	174	166	174	166	174	166	196	200,67	170
10	540	166	164	167	168	168	165	204	214	166,33
11	555	169	164	168	164	168	162	195	204	165,83
12	λ <sub>1</sub> = 520 нм;									
13	520	182	180	178	178	185	182	187,33	195,67	180,83
14	540	196	194	196	192	196	192	191	195,67	194,33
15	555	180	178	178	176	178	176	184	192,33	177,67
16	λ <sub>1</sub> = 520 нм; λ <sub>3</sub> = 555 нм									
17	520	182	175	182	176	182	175	180	182,33	178,67
18	540	180	174	178	172	178	174	184,33	184,33	176
19	555	168	166	169	166	169	166	175,33	174,67	167,33
20	λ <sub>3</sub> = 555 нм									
21	520	200	194	196	194	198	192	194	199,33	195,67
22	540	188	182	188	182	188	182	197	196,33	185
23	555	188	178	186	184	184	178	182,33	190,67	183
24	λ <sub>2</sub> = 540 нм; λ <sub>3</sub> = 555 нм									
25	520	180	174	182	178	180	177	188,33	192,67	178,5
26	540	180	174	180	174	180	174	184,67	184,67	177
27	555	176	168	174	167	174	167	178	175,67	171
28	λ <sub>2</sub> = 540 нм;									
29	520	190	182	188	184	188	186	189	190	186,33
30	540	192	190	192	188	192	190	192,67	194,33	190,67
31	555	184	176	183	176	184	176	129,67	130	179,83

Рис. 4.1.2. Фрагмент протокола .xls одной серии эксперимента на цветных фонах для наблюдателя Б.

В таблицу заносятся следующие данные: дата проведения эксперимента, длины волн монохроматического излучения объекта, угловые деления оптического клина – три по методике «на появление» объекта на фоне и три по методике «на исчезновение».

Перевод угловых делений оптического клина в  $L_{en}(\lambda_i)$  осуществлялся согласно формуле:

$$L_{en}(\lambda_i) = \Phi_e(\lambda_i) \cdot \tau \cdot K \quad (4.1.1)$$

где  $\tau$  – коэффициент пропускание фильтра при данном угловом положении (рис. 3.3.3);  $\Phi_e(\lambda_i)$  – энергетический поток монохроматического излучения объекта (рис. 3.3.2);  $K$  – коэффициент перехода, определяемый

выражением (3.3.1), с учетом погрешности яркомера, определенной в разделе 3.2;

При обработке экспериментальных результатов по различным сериям, ожидалось систематические сдвиги в результатах, связанные с небольшими временными изменениями параметров установки. Для исключения этих систематических погрешностей необходимо использовать приведение результатов измерений в разных сериях к одному среднему параметру.

Приведенные к одному среднему параметру зависимости  $L_{en}^3(\lambda_i)$  заносились в итоговый протокол (рис. 4.1.3), где рассчитывались средние значения по всем сериям и их относительные СКО.

Наблюдатель В Дата		10.04.2018														
L (нм)	-		+		-		+		-		+		-		+	
	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Исчез	Появл	Среднее	Среднее	Среднее	СКО	СКО	2°СКО*2	2°СКО*2	СКО N	СКО N	
410	0.0042826	0.004589182	0.00346	0.00428	0.00354	0.00403	0.00376	0.0043	0.00403	0.12085	0.06556	0.02921	0.0086	0.03558	0.02053	
422	0.0018288	0.002163353	0.00174	0.00212	0.0019	0.00179	0.00182	0.00202	0.00192	0.0449	0.1022	0.00403	0.02089	0.0333	0.03552	
434	0.0006768	0.001107415	0.0007	0.00103	0.00066	0.00111	0.00068	0.00108	0.00088	0.03505	0.0412	0.00246	0.00339	0.02101	0.0191	
446	0.0021724	0.002030314	0.00162	0.00146	0.00152	0.00162	0.00177	0.0017	0.00174	0.19993	0.1731	0.07994	0.05993	0.03596	0.03238	
458	0.0026088	0.002083993	0.00274	0.00261	0.00222	0.00248	0.00252	0.00239	0.00246	0.10581	0.11454	0.02239	0.02624	0.03317	0.02663	
470	0.0013926	0.001861705	0.00154	0.00186	0.00146	0.00208	0.00146	0.00194	0.0017	0.05121	0.06648	0.00524	0.00884	0.02346	0.01582	
482	0.0008428	0.001187651	0.00096	0.00105	0.00078	0.00122	0.00086	0.00115	0.00101	0.10912	0.08185	0.02381	0.0134	0.02501	0.02702	
494	0.0006655	0.001019622	0.00063	0.00087	0.00062	0.00076	0.00064	0.00088	0.00076	0.0398	0.14662	0.00317	0.043	0.01038	0.02686	
506	0.0002811	0.000401368	0.00025	0.00037	0.00028	0.0004	0.00027	0.00039	0.00033	0.06945	0.03989	0.00965	0.00318	0.01562	0.02386	
518	0.000259	0.000383025	0.00018	0.00045	0.0002	0.00043	0.00021	0.00042	0.00032	0.19243	0.08631	0.07406	0.0149	0.05887	0.04764	
530	0.0002013	0.000299012	0.00019	0.00031	0.00019	0.0003	0.00019	0.0003	0.00025	0.03022	0.01723	0.00183	0.00059	0.02493	0.04619	
542	0.0001825	0.000347119	0.00018	0.00039	0.00018	0.00044	0.00018	0.00039	0.00029	0	0.12121	0	0.02939	0.04128	0.02154	
554	0.0002386	0.000465281	0.00017	0.00046	0.00023	0.0004	0.00021	0.00044	0.00033	0.1914	0.08399	0.07327	0.01411	0.03687	0.02435	
566	0.0004051	0.000398716	0.0004	0.00035	0.0004	0.00041	0.0004	0.00039	0.00039	0.00396	0.08993	3.1E-05	0.01617	0.00402	0.02748	
578	0.0002056	0.000343256	0.00024	0.00034	0.0002	0.00035	0.00021	0.00035	0.00028	0.10223	0.00891	0.0209	0.00016	0.01706	0.02571	
590	0.0002782	0.000271891	0.00026	0.00035	0.00026	0.00037	0.00027	0.00033	0.0003	0.04224	0.1583	0.00357	0.05012	0.02871	0.0355	
602	0.0002343	0.000514349	0.00029	0.00048	0.00027	0.00041	0.00027	0.00047	0.00037	0.11399	0.10814	0.02599	0.02339	0.03369	0.039	
614	0.0004449	0.000471504	0.00042	0.00038	0.00036	0.00036	0.00041	0.0004	0.0004	0.11184	0.15286	0.02502	0.04673	0.03924	0.0379	
626	0.0003806	0.000380627	0.00036	0.00049	0.00043	0.00043	0.00039	0.00043	0.00041	0.08763	0.12365	0.01536	0.03058	0.02713	0.02987	
									Среднее СКО	0.08695	0.09379		Макс СКО N=	0.05887	0.04764	
													Среднее СКО N	0.0287	0.02963	

Рис. 4.1.3. Фрагмент итогового протокола .xls одной серии эксперимента на белом фоне для наблюдателя В.

На рис. 4.1.4 приведены обработанные для одного из наблюдателей результаты исследования зависимости  $L_{en}^3(\lambda_i)$ .

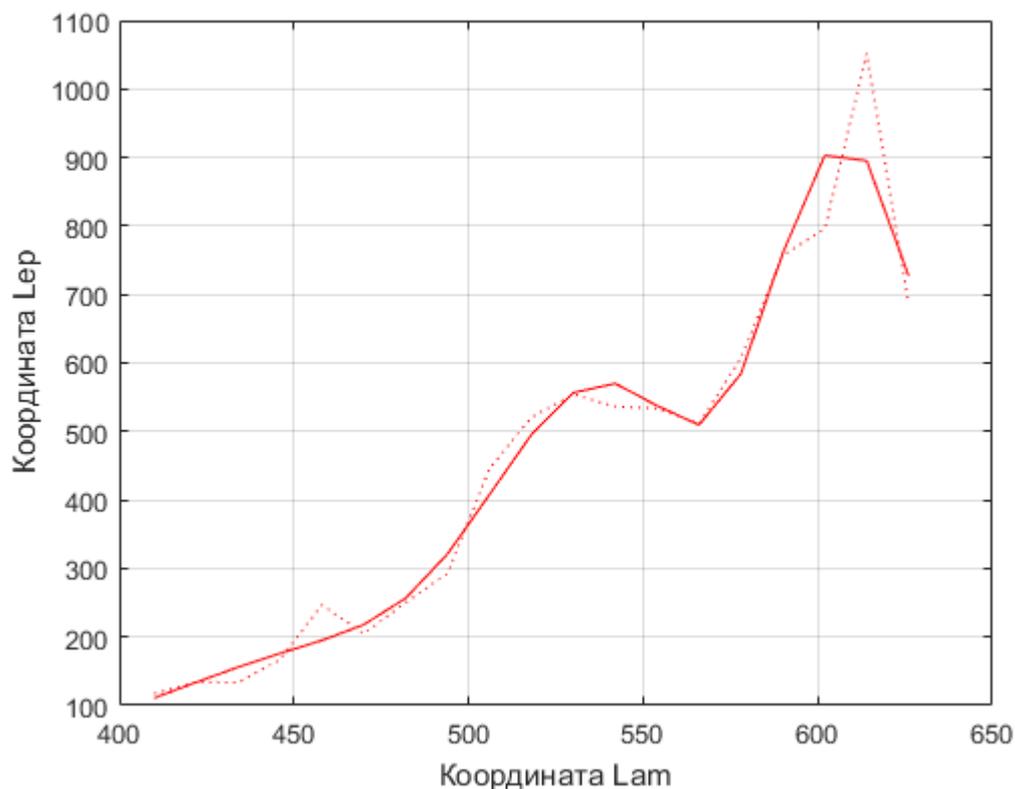


Рис. 4.1.4. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) для наблюдателя А

В приложении 3 приведены результаты экспериментальных исследований порогов по яркости для монохроматических излучений для остальных 4 наблюдателей.

## 4.2. Программы обработки результатов исследования монохроматических порогов

Практически все методы решения системы нелинейных уравнений типа (1.3.4.30) осуществляются путем минимизации некоторого функционала, зависящего от параметров, получившего название “невязка”. В качестве “невязки” для решения системы уравнений используется сумма квадратов разностей между экспериментально полученными значениями  $L_{en}^p(\lambda_i)$  на разных длинах волн и значениями  $L_{en}(\lambda_i)$ , рассчитанными для тех же длин

волн по разработанной модели цветового зрения. Такой метод получил название метода «наименьших квадратов». Таким образом, “невязка”  $S$  определится выражением:

$$S = \sum_{i=1}^n (L_{en}^o(\lambda_i) - L_{en}(\lambda_i))^2. \quad (4.2.1)$$

В качестве метода «наименьших квадратов» был реализован алгоритм «плавающей сетки».

Упрощенная структурная схема программы обработки экспериментов на белом фоне представлена на рис. 4.2.1.

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 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).

Для аналитического представления  $\bar{k}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  чувствительностей стандартного наблюдателя МКО эти функции, полученные из системы XYZ с помощью стандартной матрицы преобразования по Е.Н. Юостовой [2], были аппроксимированы одной квадратичной экспонентой, либо суммами из двух или трех квадратичных экспонент, т.е.:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\kappa}(\lambda) &= \sum_{i=1}^3 C_{ik} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{k \max} - \lambda_{ik \max})^2}{\sigma_{ik}^2}\right) \\ \bar{z}(\lambda) &= \sum_{i=1}^3 C_{iz} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{z \max} - \lambda_{iz \max})^2}{\sigma_{iz}^2}\right) \\ \bar{c}(\lambda) &= \sum_{i=1}^3 C_{ic} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_{c \max} - \lambda_{ic \max})^2}{\sigma_{ic}^2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (4.2.2)$$

где  $\lambda_{k \max}, \lambda_{z \max}, \lambda_{c \max}$  - длины волн максимума чувствительности  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  стандартного наблюдателя МКО;

Коэффициенты аппроксимации стандартного наблюдателя МКО,  $\kappa(\lambda), z(\lambda), c(\lambda)$ , при числе экспонент равном трем представлены в табл.

4.2.1..

i	$\lambda_{k \max}$	$C_{ik}$	$\Delta\lambda_{ik \max}$	$\sigma_{ik}$	$\lambda_{z \max}$	$C_{iz}$	$\Delta\lambda_{iz \max}$	$\sigma_{iz}$	$\lambda_{c \max}$	$C_{ic}$	$\Delta\lambda_{ic \max}$	$\sigma_{ic}$
1		1	0.461	57.31		1	2.54	51.1		1	7.2	23.1
2	572	0.0877	43.49	27	543	0.113	23.94	29.39	448	0.426	15.6	42.2
3		0.1614	-	24.42		0.123	-	16.14		0.647	-15.4	14.5
			43.09				17.03					

Табл. 4.2.1. Коэффициенты аппроксимации стандартного наблюдателя МКО

Ниже приведены фрагменты кода, реализованные в среде Matlab.

```
% Подпрограмма вычисления Lep, K, Z и C
function [Lep,K,Z,C]=Fx(Lam,Pkzc)
global h;
DLam=(Lam(length(Lam),1)-Lam(1,1))/(length(Lam)-1);
[K,Z,C]=KZC(Lam,Pkzc);
b1=sum(K.*h.MeA).*DLam;
b2=sum(Z.*h.MeA).*DLam;
b3=sum(C.*h.MeA).*DLam;
k1=K./b1; z1=Z./b2; c1=C./b3;
S2=c1.^2+Pkzc(2,1).*z1.^2+Pkzc(3,1).*k1.^2;
Lep=sqrt(S2)./Pkzc(1,1);
```

```
% Подпрограмма вычисления СКО
```

```

function Sko=sko
    global h;
    [Lep,K,Z,C]=Fx(h.Lam,h.Pkzc); % Вычисление Lep
    if h.CkOtnAbs==1
        D1=((Lep-h.Lep(:,1))./h.Lep(:,1)).^2; % Вычисление относительного СКО
        D11=((Lep-h.Lep(:,1))./Lep).^2;
        Sko=sum(D1+D11);
    else
        D1=abs(Lep-h.Lep(:,1)); % Вычисление абсолютного СКО
        Sko=sum(D1);
    end

% Подпрограмма вычисления СКО и запоминания Pkzc для минимального СКО
function [SkoCur,file]= Wsp(SkoCur,file,handles)
    global h;
    % Вычисление СКО
    SkoNext=sko;
    Ws=SkoCur./SkoNext-1;
    if Ws>1e-06 % Сравнение нового и сохраненного ранее СКО
        SkoCur=SkoNext;
        h.WsPkzc=h.Pkzc; % Сохранение значения Pkzc с минимальным СКО
    end
    file=file+1; % Переход к новому узлу сетки

% Программа аппроксимации Сетка Fast
function SkoNext=ApprSetka(handles)
    global h;
    % Подготовка исходных данных
    ReadLepMeA;
    h.Pkzc=ReadPkzcD('\data\Pkzc.bit');
    Pkzc=h.Pkzc;
    h.WsPkzc=h.Pkzc;
    % Вычисление текущего СКО
    SkoCur=sko;
    SkoNext=SkoCur;
    file=1; % Начальное значение номера узла сетки
    % Условие аппроксимации Par1
    if h.ApprPar1==1
        for ip1=-1:1
            h.Pkzc(1,1)=Pkzc(1,1).*(1+h.Step.*ip1./100);
        % Вычисление значения СКО и вывод минимального значения СКО
            [SkoCur,file]=Wsp(SkoCur,file,handles);
        end
    % Сохранение Pkzc с минимальным СКО
        h.Pkzc=h.WsPkzc;
    else
    % Условие аппроксимации K,3 и C
        if and(and(h.ApprK==1,h.ApprZ==1),h.ApprC==1)
    % Аппроксимация параметров Pkzc(1,1),Pkzc(2,1),Pkzc(3,1)
            for ip1=-1:1
                h.Pkzc(1,1)=Pkzc(1,1).*(1+h.Step.*ip1./100);
                for ip2=-1:1

```

```

    h.Pkzc(2,1)=Pkzc(2,1).*(1+h.Step.*ip2./100);
    for ip3=-1:1
        h.Pkzc(3,1)=Pkzc(3,1).*(1+h.Step.*ip3./100);
    % Вычисление значения СКО и вывод минимального значения СКО
        [SkoCur,file]=Wsp(SkoCur,file,handles);
    end
end
end
h.Pkzc=h.WsPkzc; % Сохранение Pkzc с минимальным СКО
% Аппроксимация K,3 и C
for ik2=-1:1
    h.Pkzc(1,2)=Pkzc(1,2)+h.Step.*ik2;
    for ik3=-1:1
        h.Pkzc(1,3)=Pkzc(1,3).*(1+h.Step.*ik3./100);
        for iz2=-1:1
            h.Pkzc(2,2)=Pkzc(2,2)+h.Step.*iz2;
            for iz3=-1:1
                h.Pkzc(2,3)=Pkzc(2,3).*(1+h.Step.*iz3./100);
                for ic2=-1:1
                    h.Pkzc(3,2)=Pkzc(3,2)+h.Step.*ic2;
                    for ic3=-1:1
                        h.Pkzc(3,3)=Pkzc(3,3).*(1+h.Step.*ic3./100);
                    [SkoCur,file]=Wsp(SkoCur,file,handles); % Вычисление значения СКО и возвращение
                    минимального значения СКО SkoCur
                end
            end
        end
    end
end
end
h.Pkzc=h.WsPkzc; % Сохранение Pkzc с минимальным СКО
end

```

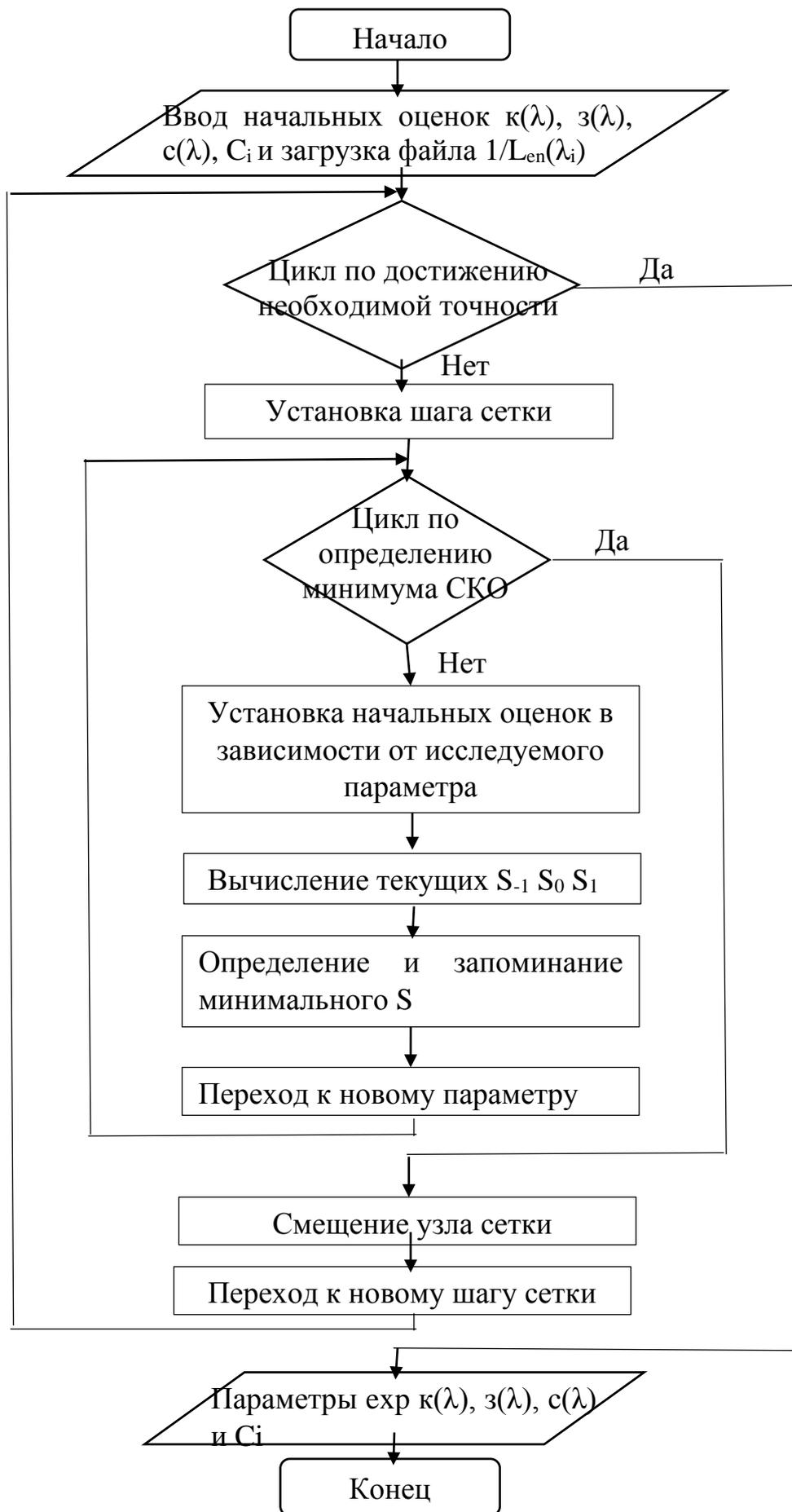


Рис. 4.2.1. Структурная схема программы по обработке экспериментов на белом фоне

Упрощенная структурная схема программы обработки экспериментов на цветных фонах представлена на рис. 4.2.2.

В цикле для всех коэффициентов аппроксимации определяется минимум «невязки» и происходит смещение их узла сетки в направлении уменьшения остаточной суммы. Шаг сетки происходит по всем коэффициентам. В точке локального минимума шаг сетки уменьшается в 3 раза и процесс повторяется до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность вычислений.

В качестве начальной оценки  $\bar{\kappa}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ ,  $\bar{c}(\lambda)$  для трех длин волн объекта использовались значения стандартного наблюдателя МКО, полученные из системы XYZ с помощью матрицы преобразования по Е.Н. Юстовой [4].

**% Выражения для расчета Lep по 21 комбинации**

**function** Lep=Lep(Pkzc)

**global** h;

Dlam=(h.LY(2,1)-h.LY(1,1))./1000;

kk=exp(-(h.x(1,1)-h.LY(:,1)).^2./h.x(2,1).^2);

zz=exp(-(h.x(1,2)-h.LY(:,1)).^2./h.x(2,2).^2);

cc=exp(-(h.x(1,3)-h.LY(:,1)).^2./h.x(2,3).^2);

SumKK=sum(kk.\*h.LWhite(:,2)).\*Dlam;

SumZZ=sum(zz.\*h.LWhite(:,2)).\*Dlam;

SumCC=sum(cc.\*h.LWhite(:,2)).\*Dlam;

Lw(1)=h.Le(1,1).\*SumKK;

Lw(2)=h.Le(1,1).\*SumZZ;

Lw(3)=h.Le(1,1).\*SumCC;

**% 7 комбинаций для монохроматического объекта с длиной волны лямбда 1**

k1(1)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(2,1)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,1)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,1)\*h.Le(4,1)));

z1(1)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(2,2)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,2)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,2)\*h.Le(4,1)));

c1(1)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(2,3)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,3)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,3)\*h.Le(4,1)));

k1(2)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(3,1)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,1)\*h.Le(4,1)));

z1(2)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(3,2)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,2)\*h.Le(4,1)));

c1(2)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(3,3)\*h.Le(3,1)+Pkzc(4,3)\*h.Le(4,1)));

k1(3)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(2,1)\*h.Le(2,1)+Pkzc(4,1)\*h.Le(4,1)));

z1(3)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(2,2)\*h.Le(2,1)+Pkzc(4,2)\*h.Le(4,1)));

c1(3)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(2,3)\*h.Le(2,1)+Pkzc(4,3)\*h.Le(4,1)));

k1(4)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(2,1)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,1)\*h.Le(3,1)));

z1(4)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(2,2)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,2)\*h.Le(3,1)));

c1(4)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(2,3)\*h.Le(2,1)+Pkzc(3,3)\*h.Le(3,1)));

```

k1(5)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(2,1)*h.Le(2,1)));
z1(5)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(2,2)*h.Le(2,1)));
c1(5)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(2,3)*h.Le(2,1)));

```

```

k1(6)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(4,1)*h.Le(4,1)));
z1(6)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(4,2)*h.Le(4,1)));
c1(6)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(4,3)*h.Le(4,1)));

```

```

k1(7)=Pkzc(2,1)/(Lw(1)+(Pkzc(3,1)*h.Le(3,1)));
z1(7)=Pkzc(2,2)/(Lw(2)+(Pkzc(3,2)*h.Le(3,1)));
c1(7)=Pkzc(2,3)/(Lw(3)+(Pkzc(3,3)*h.Le(3,1)));

```

```

S2=Pkzc(1,2).*k1.^2+Pkzc(1,3).*z1.^2+c1.^2;
Lep(:,1)=sqrt(S2)./Pkzc(1,1);

```

*% Затем для двух других длин волн строится колонка Lep, и в результате получается массив размером [7,3]*

В программе вычисления КЗС реализован метод синхронного изменения параметров размытия всех входящих в аппроксимирующее выражение экспонент при изменении одного параметра аппроксимации. Для обеспечения неизменности относительной формы экспонент в программе рассчитываются длины волн максимумов составляющих экспонент, обеспечивающих постоянство формы кривых чувствительности КЗС.

*Подпрограмма вычисления K,3 и C*

```
function x=CalcExp(Lam,Pkzc)
```

```
global h;
```

```
x=[];
```

```
c1=((Lam(3,1).^2-Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,1)./Pkzc(2,1))-(Lam(2,1).^2- ...
Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,1)./Pkzc(3,1)));
```

```
c2=2.*((Lam(3,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,1)./Pkzc(2,1))- ...
(Lam(2,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,1)./Pkzc(3,1)));
```

```
x(2,1)=c1./c2;
```

```
x(3,1)=sqrt(((Lam(2,1)-Lam(1,1)).*(Lam(2,1)+Lam(1,1)-2.*x(2,1)))./log(Pkzc(1,1)./Pkzc(2,1)));
```

```
x(1,1)=Pkzc(1,1).*exp((Lam(1,1)-x(2,1)).^2./x(3,1).^2);
```

```
c1=((Lam(3,1).^2-Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,2)./Pkzc(2,2))-(Lam(2,1).^2- ...
Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,2)./Pkzc(3,2)));
```

```
c2=2.*((Lam(3,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,2)./Pkzc(2,2))- ...
(Lam(2,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,2)./Pkzc(3,2)));
```

```
x(2,2)=c1./c2;
```

```
x(3,2)=sqrt(((Lam(2,1)-Lam(1,1)).*(Lam(2,1)+Lam(1,1)-2.*x(2,2)))./log(Pkzc(1,2)./Pkzc(2,2)));
```

```
x(1,2)=Pkzc(1,2).*exp((Lam(1,1)-x(2,2)).^2./x(3,2).^2);
```

```
c1=((Lam(3,1).^2-Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,3)./Pkzc(2,3))-(Lam(2,1).^2- ...
Lam(1,1).^2).*log(Pkzc(1,3)./Pkzc(3,3)));
```

```
c2=2.*((Lam(3,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,3)./Pkzc(2,3))- ...
```

```

(Lam(2,1)-Lam(1,1)).*log(Pkzc(1,3)./Pkzc(3,3));
x(2,3)=c1./c2;
x(3,3)=sqrt(((Lam(2,1)-Lam(1,1)).*(Lam(2,1)+Lam(1,1)-2.*x(2,3)))./log(Pkzc(1,3)./Pkzc(2,3)));
x(1,3)=Pkzc(1,3).*exp((Lam(1,1)-x(2,3)).^2./x(3,3).^2);

```

**% Программа аппроксимации**

```
function Sko=Appr
```

```
global h;
```

```
PkzcP=[]; Pkzc=[]; PkzcM=[];
```

```
SkoCur=sko;
```

```
Sko=SkoCur;
```

```
SizePkzc=size(h.Pkzc);
```

```
Pkzc=h.Pkzc;
```

**% Вычисление текущих S-1 S0 S1**

```
for ii=1:SizePkzc(1,1)
```

```
for jj=1:SizePkzc(1,2)
```

```
h.Pkzc(ii,jj)=Pkzc(ii,jj).*(1+h.Step./100);
```

```
SkoLepP(ii,jj)=sko;
```

```
PkzcP(ii,jj)=h.Pkzc(ii,jj);
```

```
h.Pkzc(ii,jj)=Pkzc(ii,jj).*(1-h.Step./100);
```

```
SkoLepM(ii,jj)=sko;
```

```
PkzcM(ii,jj)=h.Pkzc(ii,jj);
```

```
h.Pkzc(ii,jj)=Pkzc(ii,jj);
```

```
end
```

```
end
```

```
[SkoMinP1,IstrP]=min(SkoLepP);
```

```
[SkoMinP2,IcolP]=min(SkoMinP1);
```

```
[SkoMinM1,IstrM]=min(SkoLepM);
```

```
[SkoMinM2,IcolM]=min(SkoMinM1);
```

```
if SkoCur > min(SkoMinM2,SkoMinP2)
```

```
if SkoMinM2 < SkoMinP2
```

```
h.Pkzc(IstrM(IcolM),IcolM)=PkzcM(IstrM(IcolM),IcolM);
```

```
Sko=SkoMinM2;
```

```
else
```

```
h.Pkzc(IstrP(IcolP),IcolP)=PkzcP(IstrP(IcolP),IcolP);
```

```
Sko=SkoMinP2;
```

```
end
```

```
end
```

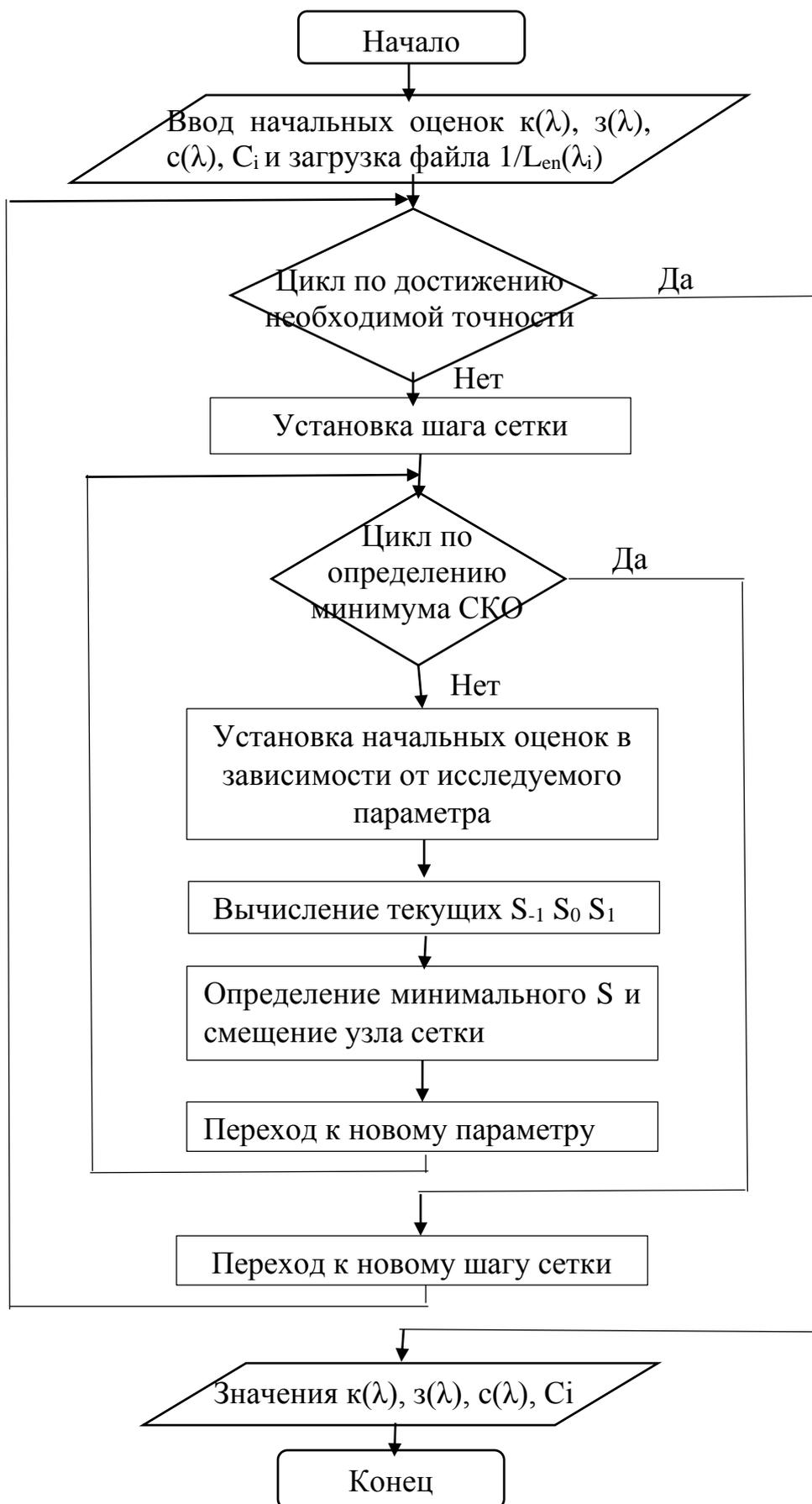


Рис. 4.2.2. Структурная схема программы по обработке экспериментов на цветных фонах

На рис. 4.2.3. представлен интерфейс программы обработки экспериментов на белом фоне.

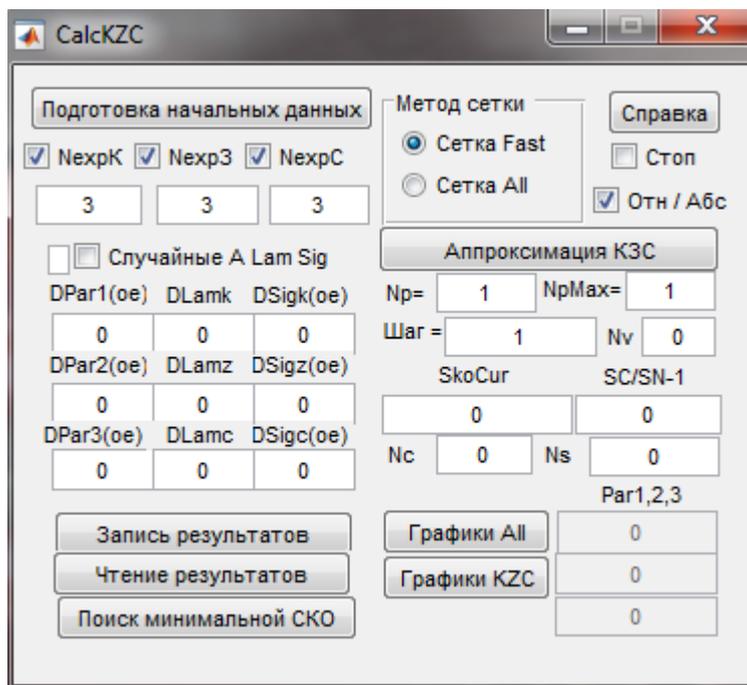


Рис. 4.2.3. Интерфейс программы обработки экспериментов на белом фоне

Основное диалоговое окно представлено на рис. 4.2.3. и состоит из окон редактирования и управляющих клавиш. Работа с программой начинается с подготовки исходных данных.

Исходные данные для формирования реализации  $L_{er}$  являются файлы с аппроксимацией чувствительности КЗС рецепторов (произведений функций сложения на яркостные коэффициенты) экспонентами согласно выражению (4.2.2):

- Pkzc111 – при аппроксимации одной экспонентой;
- Pkzc222 - при аппроксимации двумя экспонентами;
- Pkzc333 - при аппроксимации тремя экспонентами.

Девять окон редактирования отвечают за относительный разброс параметров (по три на К, З и С):

- DA - амплитуд экспонент начальных исходных данных (н.и.д.);

- DLam - длины волны Мах экспонент начальных исходных данных;
- DSig - полуширины экспонент начальных исходных данных;

Ключ случайного равномерного разброса значений DA,DLam,DSig (при активации ключа) или фиксированного их значения, указанного в окнах. Рядом с ключем - окно циклического вызова стандартных значений DA,DLam,DSig и их обнуления. Управляется циклическим вводом в окно любого символа или пробела.

Кнопка "Подготовка начальных данных" формирует файл Pkzs начальных значений Pkzs для работы программы аппроксимации и выводит график чувствительности КЗС рецепторов стандартного наблюдателя МКО с выбранным числом экспонент (рис. 4.2.4).

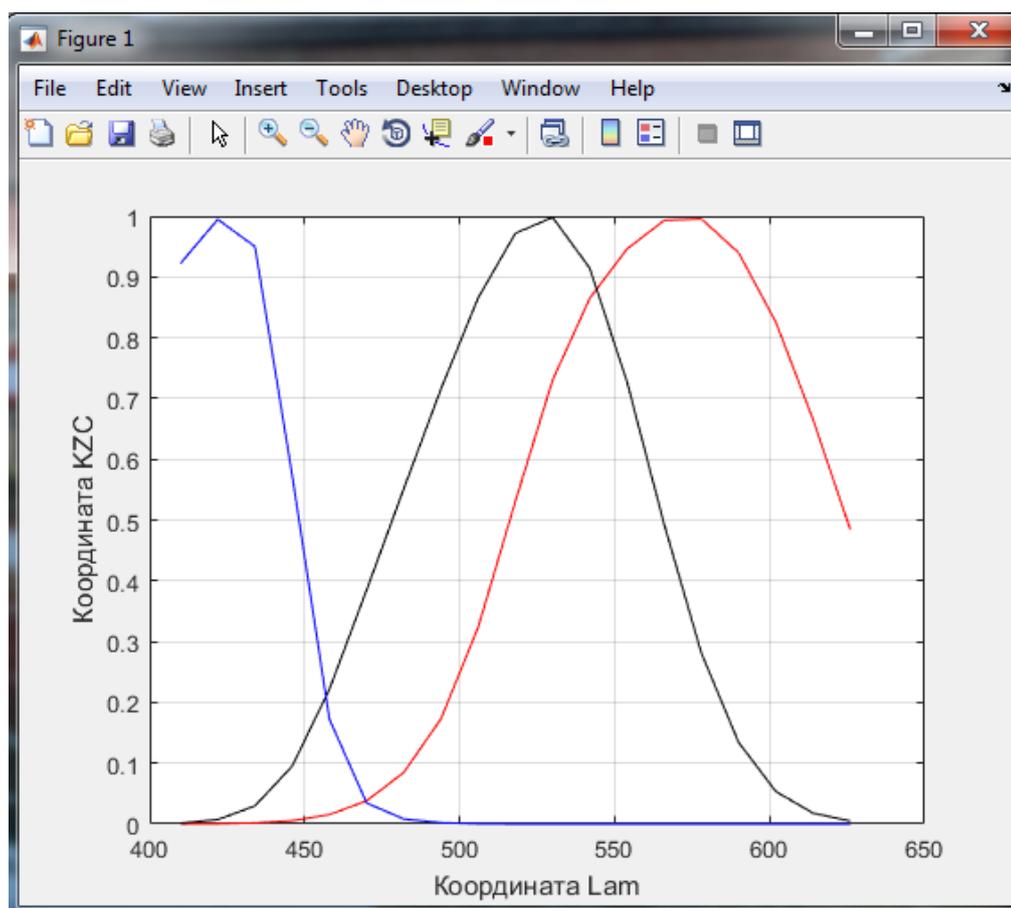


Рис. 4.2.4. График аппроксимации чувствительности КЗС рецепторов заданным пользователем количеством экспонент

До запуска программы аппроксимации в редактируемых окнах возможно задать начальный максимальный шаг аппроксимации и число повторных циклов расчета из найденной точки минимума.

Кнопка "Аппроксимация КЗС" запускает работу программы аппроксимации и появляется диалоговое окно с выбором файла  $L_{en}(\lambda_i)$  (рис. 4.2.5).

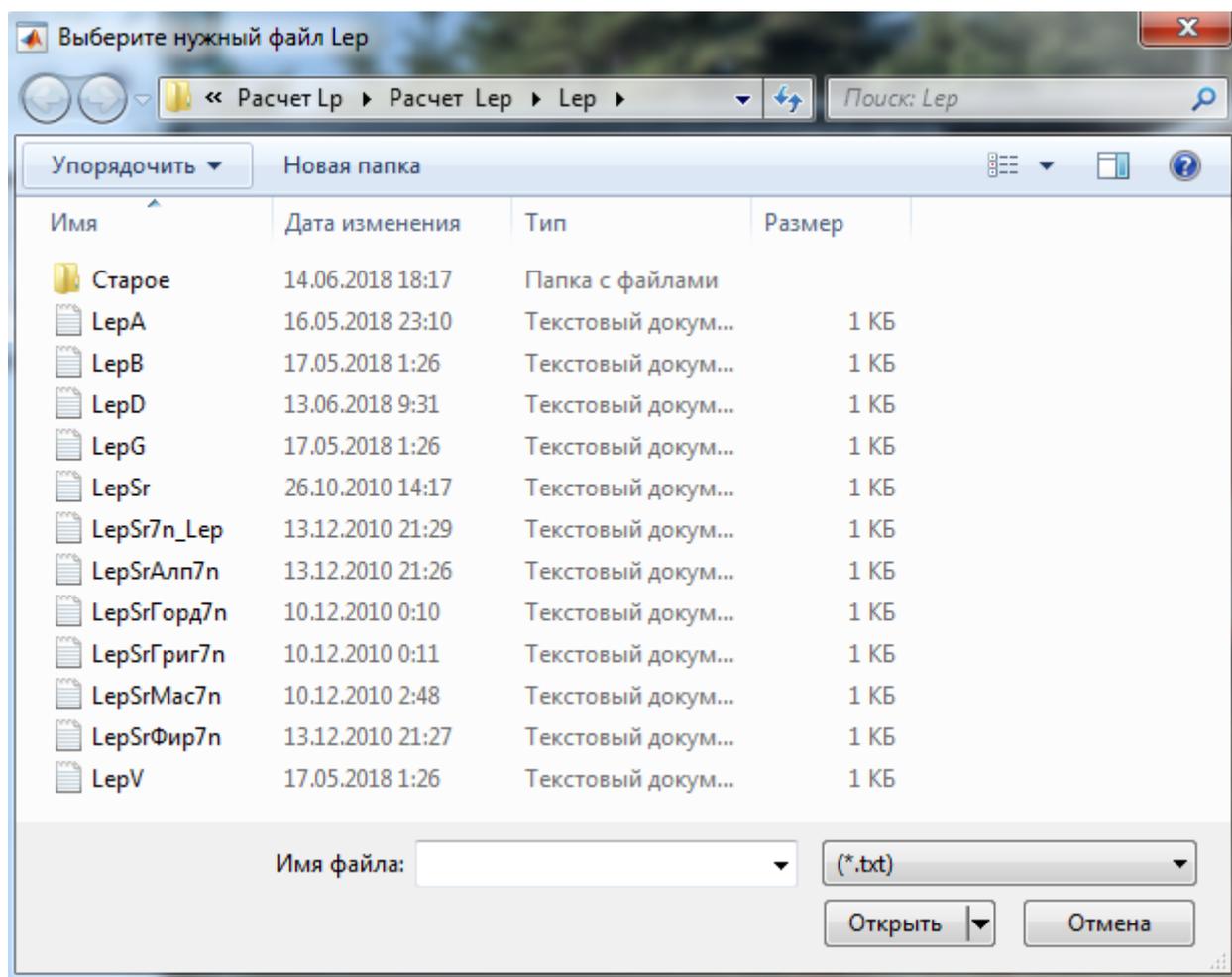


Рис. 4.2.5. Диалоговое окно для выбора файла  $L_{en}(\lambda_i)$

В процессе работы программы в редактируемых окнах отображаются следующие значения (рис. 4.2.6):

- Окно SkoCug - показывает текущее значение остаточной суммы разности квадратов Lep исходного и Lep расчетного.

- 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.

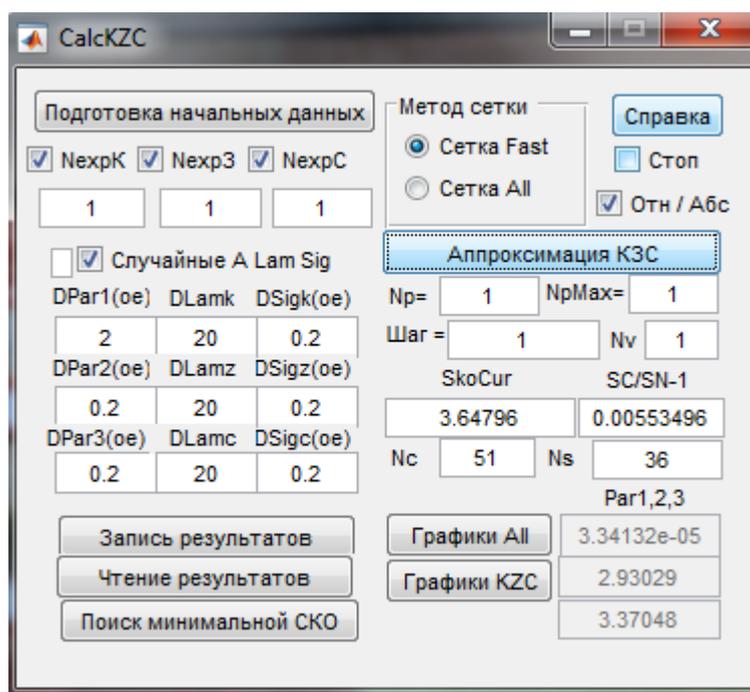


Рис. 4.2.6. Скриншот работы программы аппроксимации

Кнопки "Графики KZC" и "Графики All" выводят графики исходных и рассчитанных значений КЗС и  $Lep$  (рис. 4.2.7 и рис. 4.1.4).

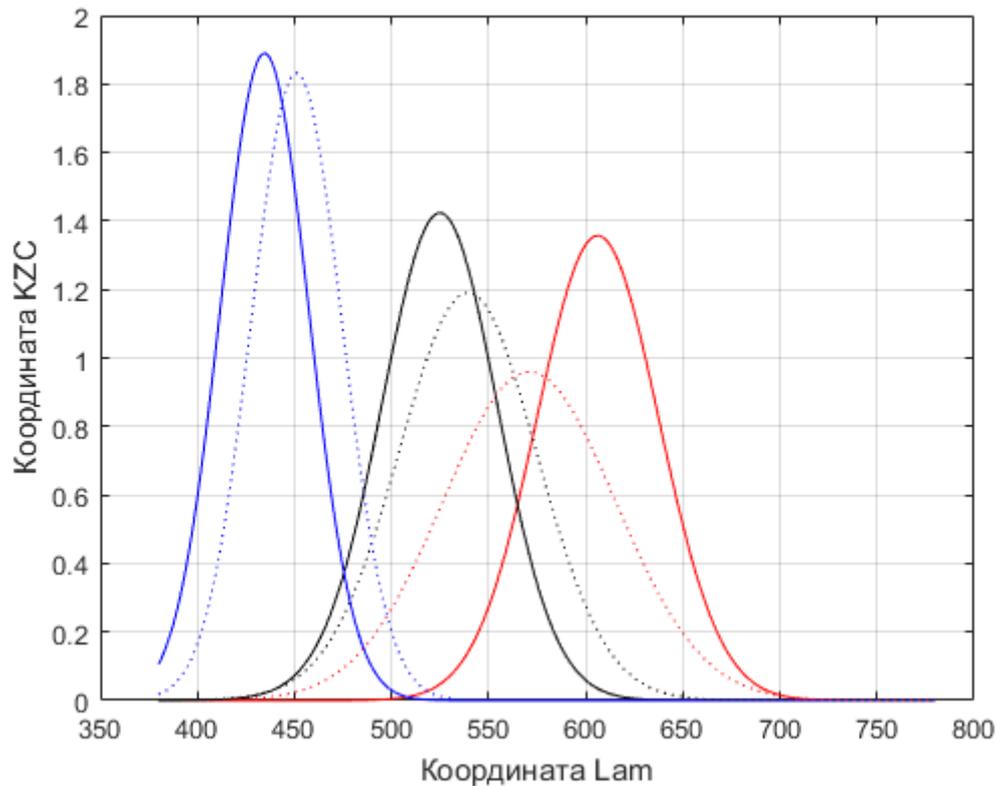


Рис. 4.2.7. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  для стандартного наблюдателя МКО по Е.Н.

Юстовой (пунктирные кривые) и  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  после решения системы уравнений (1.3.4.30) (сплошные кривые) для наблюдателя А.

Кнопка "Чтение результатов" позволяет загрузить результаты расчета из выбранной директории с выбранным именем файла. Программа восстанавливает содержимое 3-х окон экспонент, значение СКО и 9-ти окон DA, DLam, DSig.

Кнопка "Поиск минимальной СКО" создает в той же папке файл Rez.txt, содержащий минимальное значение СКО и название текстового файла, в котором хранятся результаты.

Программа позволяет пользователю найти минимальное значение СКО по файлу Rez.txt, загрузить соответствующий файл с результатами и вывести графики  $L_{ep}$  и КЗС.

В приложении 3 приведены зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  для оставшихся наблюдателей.

В Приложении 4 приведен файл с результатами расчета программы, содержащий значения  $L_{ep}$ , параметры аппроксимирующих экспонент и оценки погрешности.

Для оценки погрешности определения чувствительности КЗС рецепторов первоначально использовались несколько параметров:

- 1) Погрешность определения длины волны  $\lambda_{\max}$  максимума чувствительности  $K, Z$  и  $C$  рецепторов:

$$\eta_{\lambda_{\max}} = \frac{\Delta \lambda_{\max}}{\lambda_{\max}}. \quad (4.2.3)$$

- 2) Погрешность определения полуширины определялась по формуле:

$$\eta_{\sigma} = \frac{\Delta \sigma}{\sigma}. \quad (4.2.4)$$

Параметры обозначены на графиках рис. 4.2.8. на примере  $c(\lambda)$ . На графике обозначена абсолютная погрешность определения максимальной длины волны  $\Delta \lambda_{\max}$  определяющая  $\eta_{\lambda_{\max}}$ , и  $\Delta \sigma = (\sigma_2 - \sigma_1)$ , определяющая погрешность  $\eta_{\sigma}$ .

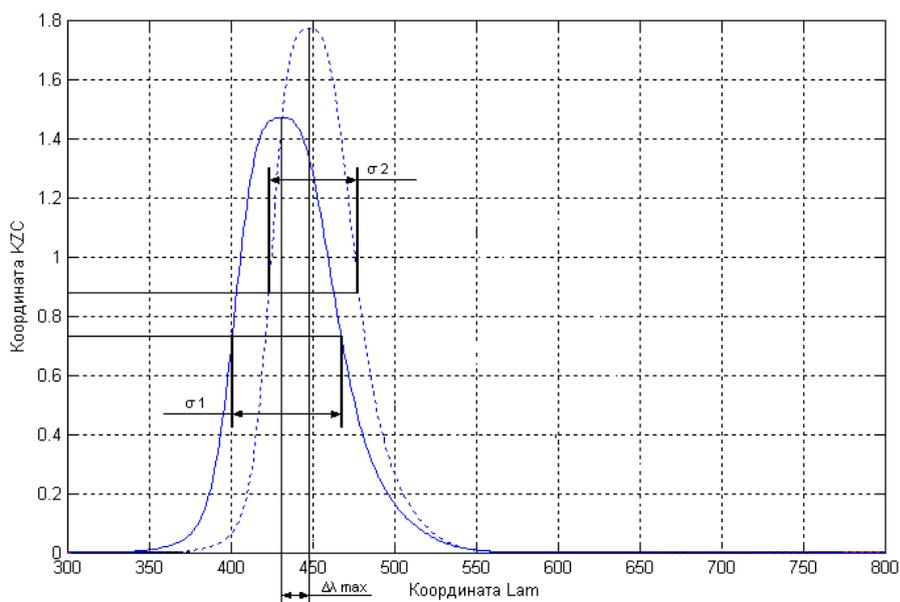


Рис. 4.2.8. Расчетная и истинная зависимости чувствительности  $\bar{c}(\lambda)$  рецептора при определении  $\eta_{\lambda_{\max}}$  и  $\eta_{\sigma}$ .

В таблице 4.2.2 приведены отличия исследованных наблюдателей от стандартного наблюдателя МКО по Е.Н. Юстовой.

Наблюдатели	$\Delta\lambda_k, \text{нм}$	$\Delta\lambda_s, \text{нм}$	$\Delta\lambda_c, \text{нм}$	$\Delta\sigma_k / \sigma_k$	$\Delta\sigma_s / \sigma_s$	$\Delta\sigma_c / \sigma_c$
А	35.27	-14.63	-16.47	-0.29	-0.16	-0.02
Б	41.12	-8.22	-11.58	-0.41	0.28	0.83
В	37.77	-7.38	-14.09	-0.32	-0.33	0.07
Г	36.86	-2.79	16.32	-0.35	-0.21	1.30
Д	36.43	10.06	-19.02	-0.34	-0.17	0.05
Среднее по 5	37.49	-4.59	-8,97	-0.34	-0.12	0.45

Табл. 4.2.2. Отличие характеристик исследованных наблюдателей от характеристик стандартного наблюдателя МКО по данным Е.Н. Юстовой

Максимумы чувствительности  $\bar{\kappa}(\lambda)$  для всех наблюдателей смещены в область больших длин волн по сравнению со стандартным наблюдателем МКО по Е.Н.Юостовой. Среднее смещение составляет около 35 нм.

Максимумы чувствительности  $\bar{\varepsilon}(\lambda)$  и  $\bar{c}(\lambda)$  для большинства наблюдателей смещены в область коротких длин волн по сравнению со стандартным наблюдателем МКО по Е.Н.Юостовой. Среднее смещение составляет около 10 нм.

На рис. 4.2.9. представлен интерфейс программы обработки экспериментов на цветных фонах.

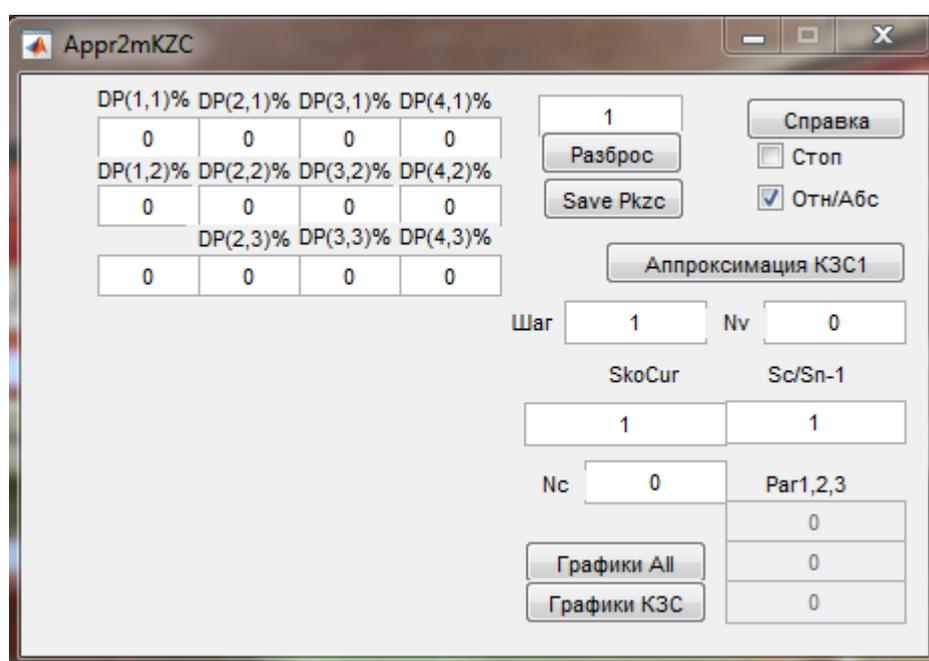


Рис. 4.2.9. Интерфейс программы обработки экспериментов на цветных фонах

При запуске программы аппроксимации считывается текстовый файл Lam\_Lv\_Lep, содержащий длины волн монохроматических излучений, значения полуширины интерференционных фильтров и результаты эксперимента Lep.

Работа с программой осуществляется также, как и при обработке экспериментов на белом фоне. Возможно задать разброс начальных

параметров, кнопка "Аппроксимация КЗС1" запускает расчет, а кнопка "Графики All " строит графики КЗС и  $L_{ep}$  (рис. 4.2.10).

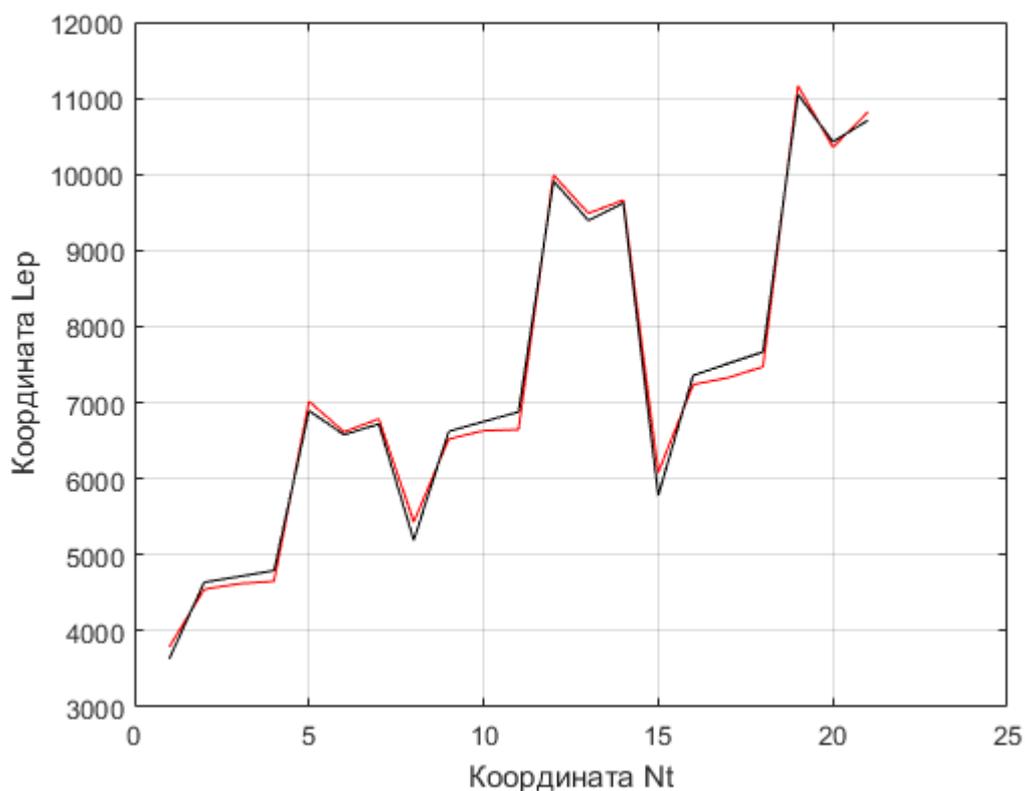


Рис. 4.2.10. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (красная кривая) и аппроксимированные (черная кривая) путем решения системы уравнений (2.1.2) для наблюдателя А

В процессе аппроксимации происходит расчет непосредственно значений  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  на трех длинах волн объекта. Полученные значения используются во второй итерации при вычислении реакции на источник непрерывного излучения в канале фона.

Полученные в пределах одной серии экспериментальные результаты приводились к среднему параметру по пяти наблюдателям. На рис. 4.2.11-4.2.13. представлено сравнение значений  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по экспериментам на белом фоне и цветных фонах. Результаты полученные по двум методикам хорошо согласуются между собой, разброс значений  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  на трех

длинах волн не превышает 15% , что меньше свойственного наблюдателям естественного разброса спектральных характеристик [5].

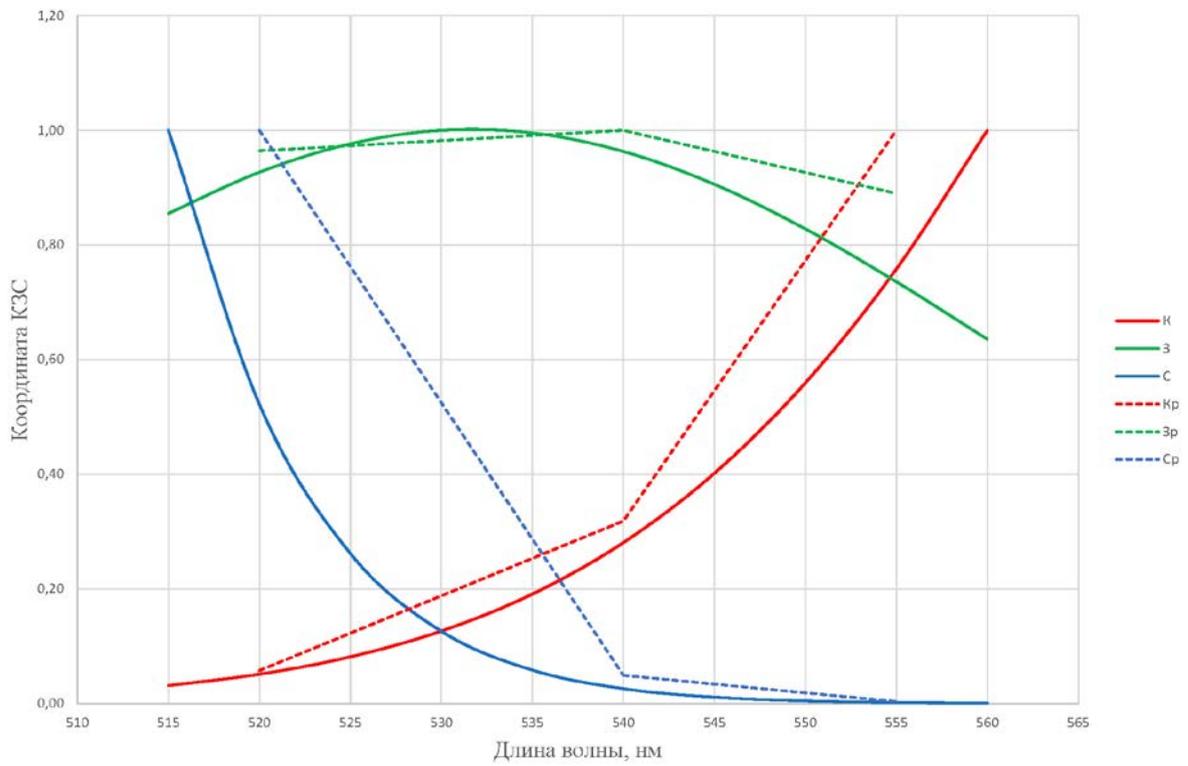


Рис. 4.2.11. . Средние зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на цветных фонах, состоящих из комбинации длин волн 520,540,555 нм (пунктирные кривые) и  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на белом фоне (сплошные кривые)

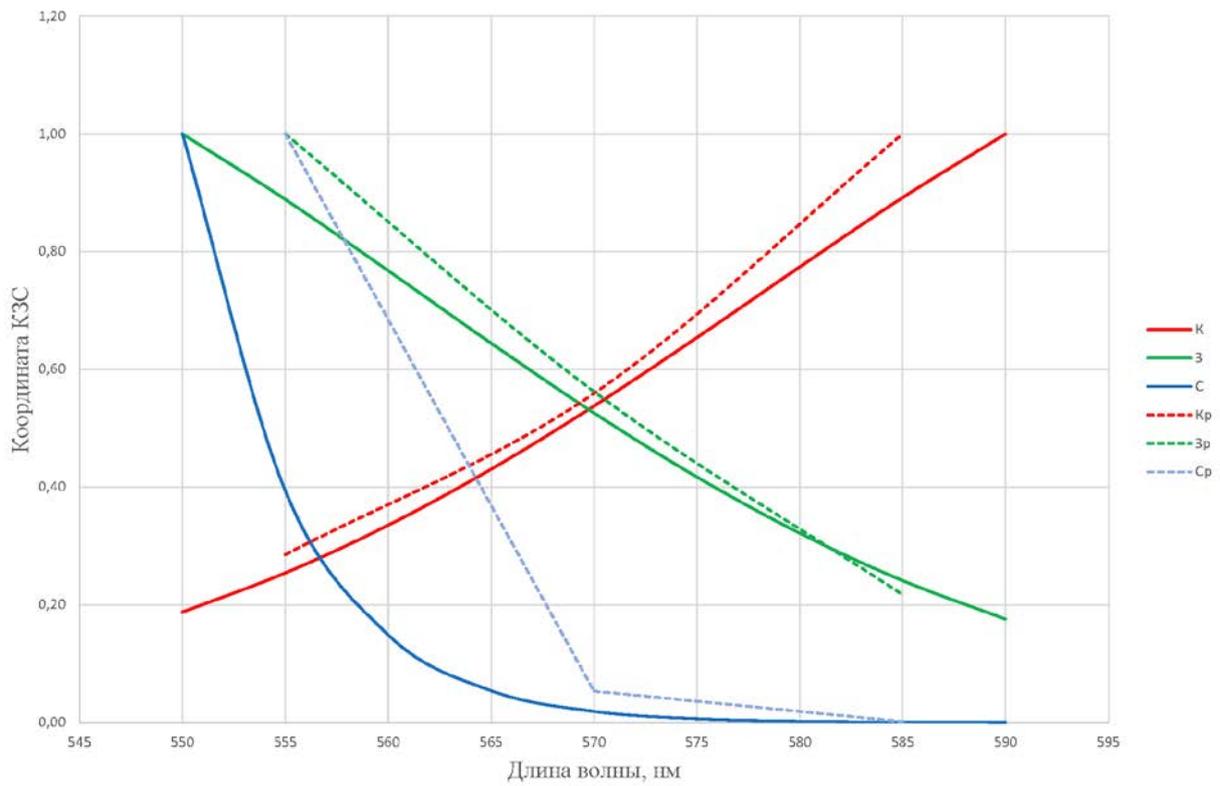


Рис. 4.2.12. . Средние зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на цветных фонах, состоящих из комбинации длин волн 555, 570, 585 нм (пунктирные кривые) и  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на белом фоне (сплошные кривые)

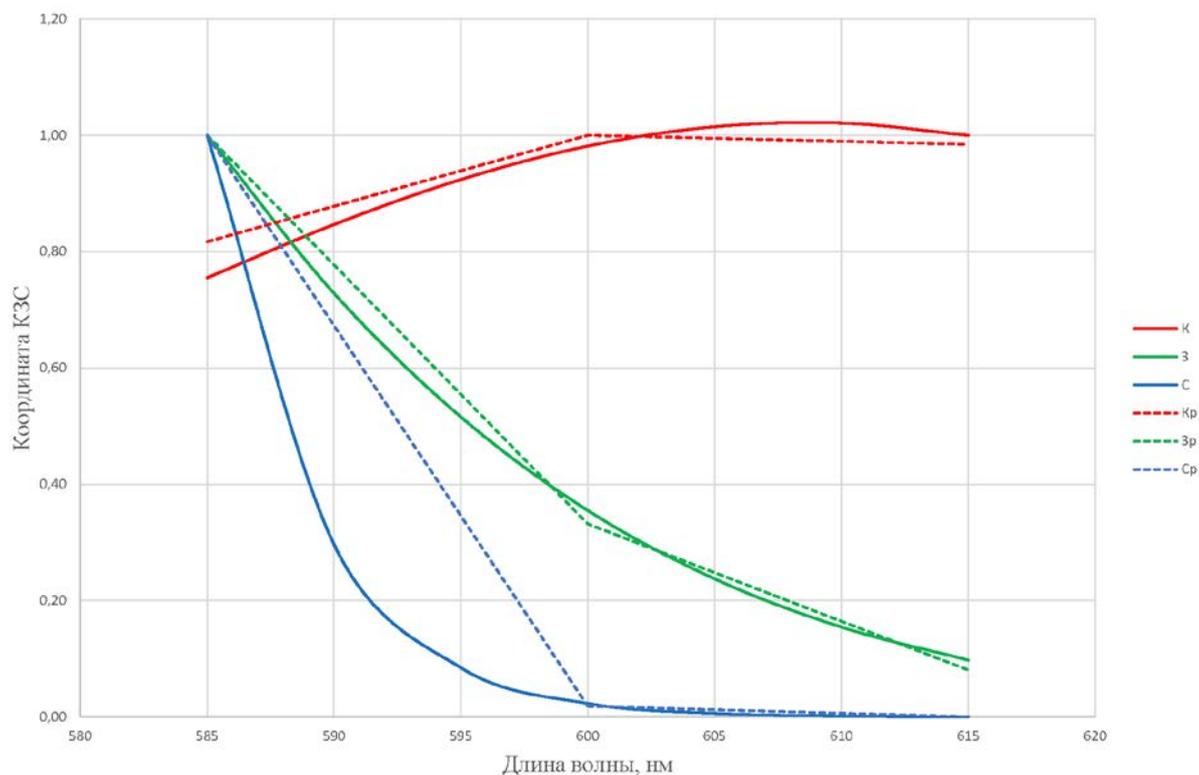


Рис. 4.2.13. . Средние зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на цветных фонах, состоящих из комбинации длин волн 585,600,615 нм (пунктирные кривые) и  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  по результатам экспериментов на белом фоне (сплошные кривые)

Методику по обнаружению монохроматического объекта на белом фоне благодаря меньшим временным затратам на эксперимент можно применять для набора статистики.

В дальнейшем целесообразно улучшить программу обработки по обнаружению монохроматического объекта на цветных фонах путем добавление второй итерации, вычисляющей (для определения реакции К,З, и С рецепторов на белый фон)  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  согласно выражению:

$$\bar{S}(\lambda) = S(\lambda_1) \cdot \exp\left(-\frac{(\lambda_1 - \lambda_{i \max})^2}{\sigma_i^2}\right), \quad (4.2.5)$$

Со следующими параметрами:

$$\lambda_{i \max} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2) \cdot \ln\left(\frac{S(\lambda_3)}{S(\lambda_2)}\right) + (\lambda_2^2 - \lambda_3^2) \cdot \ln\left(\frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_2)}\right)}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \ln\left(\frac{S(\lambda_3)}{S(\lambda_2)}\right) + (\lambda_2 - \lambda_3) \cdot \ln\left(\frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_2)}\right)}, \quad (4.2.6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{2\lambda_i \cdot \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{\ln\left(\frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_2)}\right)} - \frac{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)}{\ln\left(\frac{S(\lambda_1)}{S(\lambda_2)}\right)}}. \quad (4.2.7)$$

Проведенные экспериментальные исследования показали, что статистическая модель зрительной системы человека дает возможность, путем описания порогов обнаружения монохроматических цветных объектов на цветных фонах с нужным спектром, определять кривые спектральной чувствительности  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  рецепторов различными методами. Совпадение (в пределах погрешности эксперимента) результатов, полученных по разным методикам показывает:

1. Достаточно высокую достоверность получаемых результатов при определении  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$ .

2. Возможность распространения статистической пороговой модели зрительной системы на расчет порогов обнаружения цветных объектов на произвольных цветных фонах

3. Задача исследования спектральной чувствительности рецепторов трихроматов при нормальной цветовой адаптации решена, т.е. тема диссертационной работы - выполнена.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный в магистерской диссертации анализ литературных данных показал, что экспериментальные исследования проводятся по методикам, в достоверности которых сами авторы не уверены: в условиях неестественной цветовой адаптации, с неподтвержденным фактом изоляции колбочек, с привлечением в качестве наблюдателей вместо трихроматов дихроматов, — и в настоящее время спектральные чувствительности рецепторов трихроматов нуждаются в уточнении. В связи с этим представляют интерес методики на основе статистической теории порогового цветового зрения, которые позволяют по результатам эксперимента по пороговому обнаружению монохроматического объекта рассчитать спектральные чувствительности рецепторов.

Изученная методика по проведению экспериментов на белых фонах [22] имеет ряд недостатков, которые устранены в предлагаемой в диссертации методике. Расчетные исследования показали, что, если добавить сумму из 3 монохроматических излучений к белому фону и провести серию экспериментов по обнаружению объекта на таких сложных фонах, то образованную систему уравнений можно решить методом наименьших квадратов (без априорного задания вида функций).

Была разработана экспериментальная установка для уточнения существующей и реализации новой методик, и проведены экспериментальные исследования по обеим методикам. Результаты методик хорошо согласуются между собой, разброс значений  $\bar{k}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ ,  $\bar{c}(\lambda)$  порядка  $\sim 15\%$ , что не превышает свойственный наблюдателям естественный разброс спектральных характеристик их чувствительности [5].

Методику по обнаружению монохроматического объекта на белом фоне благодаря малым временным затратам на эксперимент можно

рекомендовать для набора статистики, а новую методику – для оценки погрешностей получаемых экспериментальных результатов.

Разработанную установку для экспериментальных исследований порогов обнаружения монохроматических объектов на цветных фонах целесообразно модернизировать в направлении использования в канале объекта источника с более широким спектром излучения, что позволит расширить спектральный диапазон исследования и уменьшит погрешности, возникающие при обработке результатов эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боос Г.В., Григорьев. А.А. О координатах цветности основных цветов колориметрической системы КЗС . — Светотехника, 2016, №3, С. 30 — 34.
2. F Vie´ not PhD. Cone fundamentals: A model for the future of colorimetry. —Lighting Res. Technol. 2016; Vol. 48: 5–13.
3. Stockman A, Sharpe LT. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype.. — Vision Research 2000; Vol. 40: 1711–1737.
4. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов: В 2-х ч. Ч.2. Физиологическая оптика и колориметрия. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1989. —432 с.: ил.
5. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. — М.: Мир. 1978. 592 с.
6. В. Чолаков. Нобелевские премии. Ученые и открытия. — М.: Мир. 1987. 370 с.
7. Y. Imamoto, Y.Shichida. Cone visual pigments. — Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Bioenergetics. 2014; Vol. 1837, 664-673.
8. J. Nathans , D.Thomas, D. S. Hogness. Molecular genetics of human color vision: The genes encoding blue, green, and red pigments. — Science. 1986b; Vol. 232, 193–202.
9. S. K. Shevell, J. C. He, P. M. Kainz, J. Neitz, M. Neitz. Relating color discrimination to photopigment genes in deutan observers. — Vision Research. 1998; Vol. 38, 3371–3376.
10. Neitz, M., Carroll, J., Renner, A., Knau, H., Werner, J. S., & Neitz, J. Variety of genotypes in males diagnosed as dichromatic on a conventional clinical anomaloscope. — Visual Neuroscience. 2004; Vol. 21, 205–216.
- 11.J.Neitz, M. Neitz. The genetics of normal and defective color vision. — Vision Res. 2011; Vol. 51, 633-651.
- 12.J. Carroll, M. Neitz, J. Neitz. Estimates of L:M cone ratio from ERG flicker photometry and genetics. — Journal of Vision. 2002; Vol. 2, 531–542.

- 13.P. Garrigan, CP. Ratliff, JM. Klein, P. Sterling, DH. Brainard, V. Balasubramanian. Design of a Trichromatic Cone Array. — PLoS Comput Biol. 2010; Vol. 12.
- 14.HB.Barlow. What causes trichromacy? A theoretical analysis using combfiltered spectra. — Vision Res. 1982; Vol. 22(6)
- 15.A. Lewis, L. Zhaoping. Are cone sensitivities determined by natural color statistics? — Journal of Vision, 2006; Vol.6.
16. Юстова Е.Н. Определение координатных осей основной физиологической системы из опытов с цветослепыми. — Доклады АН СССР, 1948. -Т. 63. № 4. С. 383–385.
- 17.Stiles WS, Burch JM. N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958). — Optica Acta. 1959; Vol. 6: 1–26.
- 18.A. Stockman, D. 1. A. MacLeod, J. A. Vivien. Isolation of the middle- and long-wavelength-sensitive cones in normal trichromats. — J. Opt. Soc. Am. A. 1993b; Vol. 10; 2491-2521.
- 19.V C. Smith and J. Pokorny. Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. — Vision Res. 1975; Vol.15, 161-171.
- 20.Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Publication 170-1-2006 Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes. Vienna: CIE, 2006. CIE Publication 170-2 (in press)
- 21.Stiles WS, Burch JM. N.P.L. colour-matching investigation: Final report (1958). — Optica Acta. 1959; Vol. 6: 1–26.
- 22.Григорьев А.А., Гордюхина С.В. Определение удельных координат цвета физиологической системы. — Полупроводниковая светотехника, 2011, №1, С. 44 – 47.
- 23.Боос Г. В. Цвет и цветовые расчеты : учебное пособие по курсам "Основы светотехники", "Моделирование и оценка светоцветовой среды" по направлению "Электроника и нанoeлектроника". — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 32 с.: ил.

24. Энергоэффективное электрическое освещение: учебное пособие / С.М. Гвоздев, Д.И. Панфилов, Т.К. Романова и др.; под ред. Л.П. Варфоломеева. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. 288 с.: ил.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

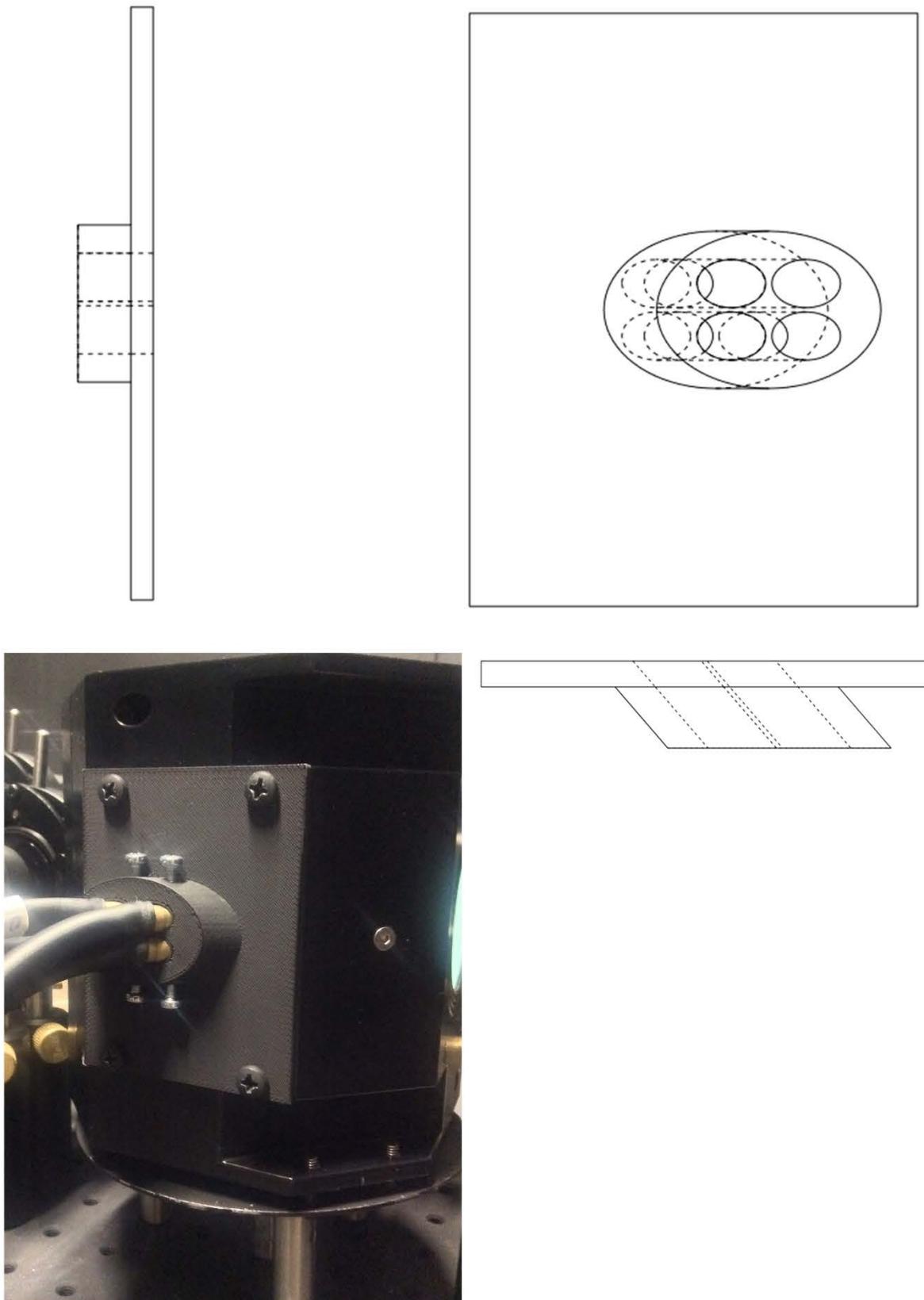


Рис. П.1. Виды и фотография ввода в интегрирующую сферу волоконно-оптических жгутов

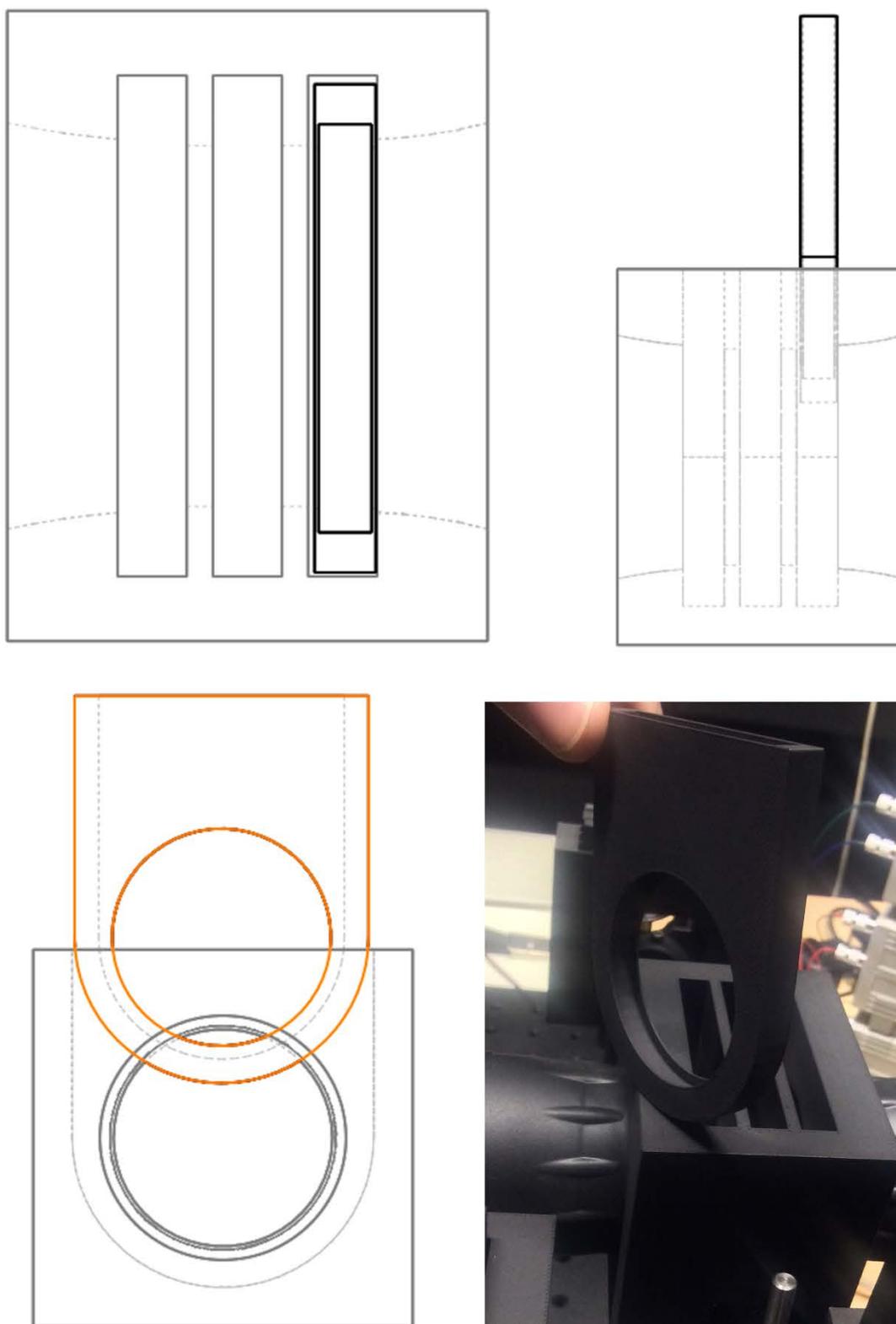


Рис. П.2. Виды и фотография держателей и оправ для сменных фильтров

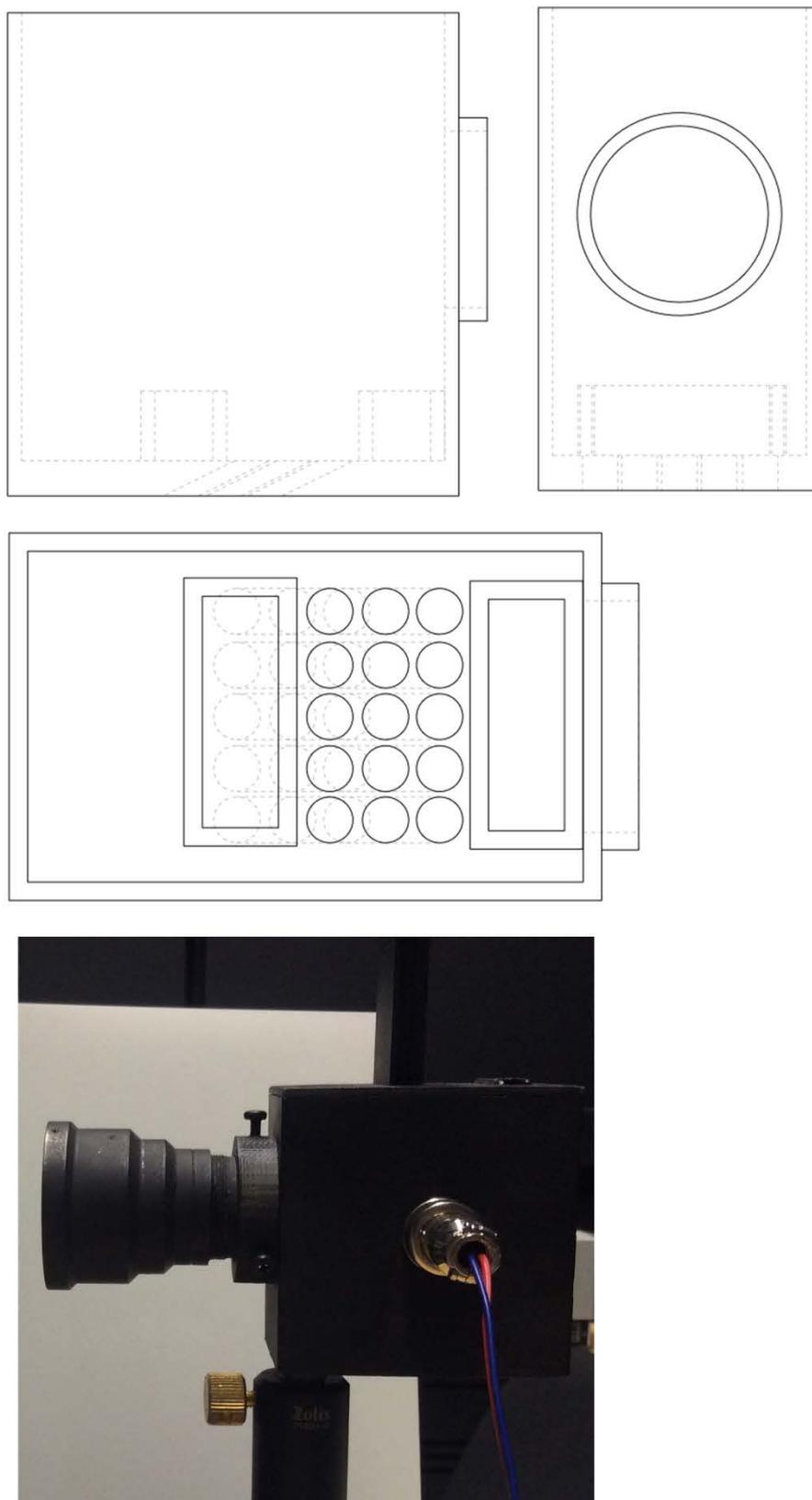


Рис. П.3. Виды и фотография коробки осветителей

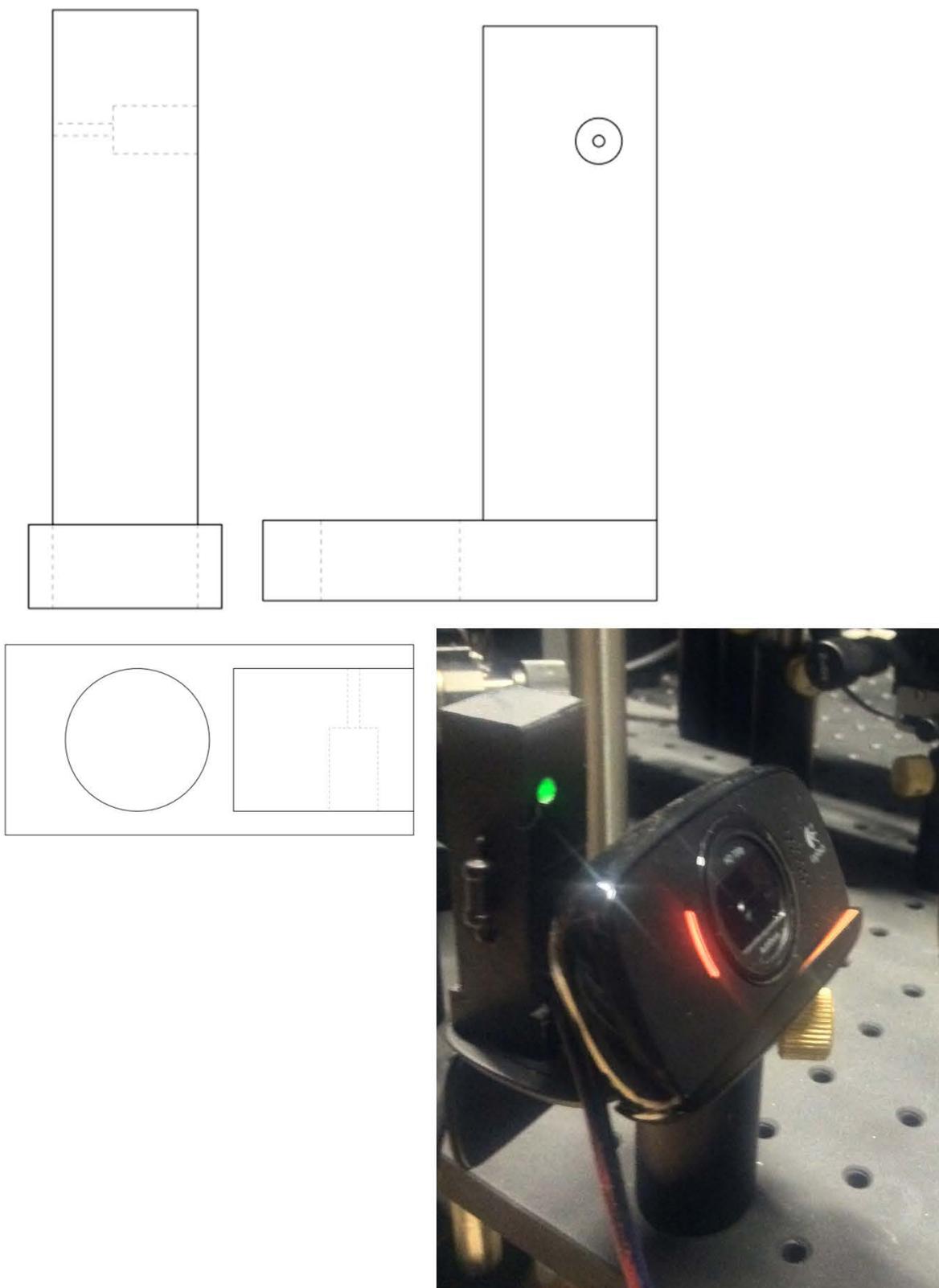


Рис. П.4. Виды и фотография подсветки камеры

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Белый фон	
I, mA	Яркость, кд/м <sup>2</sup>
30	9,162
35	10,66
40	12,1
45	13,58
50	15,05
55	16,5
60	17,93
65	19,36
65,5	19,48
70	20,78
75	22,17

Табл. П.1. Градуировка канала непрерывного излучения фона

Деление клина	Коэффициент пропускания	Дел.	Коэффициент пропускания	Дел.	Коэффициент пропускания	Дел.	Коэффициент пропускания
0	0,67780	31	0,30739	61	0,14925	91	0,07149
1	0,65858	32	0,30030	62	0,14590	92	0,06938
2	0,63983	33	0,29341	63	0,14267	93	0,06727
3	0,62159	34	0,28668	64	0,13956	94	0,06517
4	0,60390	35	0,28011	65	0,13653	95	0,06312
5	0,58678	36	0,27370	66	0,13358	96	0,06114
6	0,57027	37	0,26742	67	0,13068	97	0,05925
7	0,55439	38	0,26127	68	0,12782	98	0,05748
8	0,53919	39	0,25523	69	0,12498	99	0,05586
9	0,52470	40	0,24930	70	0,12214	100	0,05441
10	0,51094	41	0,24346	71	0,11931	101	0,05311
11	0,49785	42	0,23772	72	0,11650	102	0,05190
12	0,48529	43	0,23209	73	0,11372	103	0,05077
13	0,47324	44	0,22657	74	0,11098	104	0,04971
14	0,46163	45	0,22115	75	0,10828	105	0,04871
15	0,45045	46	0,21584	76	0,10562	106	0,04773
16	0,43964	47	0,21065	77	0,10301	107	0,04678
17	0,42916	48	0,20557	78	0,10045	108	0,04584
18	0,41898	49	0,20062	79	0,09795	109	0,04489
19	0,40904	50	0,19578	80	0,09551	110	0,04391
20	0,39932	51	0,19104	81	0,09313	111	0,04293
21	0,38982	52	0,18635	82	0,09080	112	0,04196
22	0,38055	53	0,18173	83	0,08852	113	0,04100
23	0,37153	54	0,17720	84	0,08628	114	0,04006

24	0,36274	55	0,17277	85	0,08408	115	0,03912
25	0,35418	56	0,16847	86	0,08192	116	0,03819
26	0,34584	57	0,16430	87	0,07979	117	0,03726
27	0,33773	58	0,16028	88	0,07769	118	0,03634
28	0,32983	59	0,15642	89	0,07561	119	0,03542
29	0,32214	60	0,15275	90	0,07356	120	0,03450

Дел.	Коэффициент пропускания						
121	0,03355	151	0,01494	181	0,00732	211	0,00268
122	0,03255	152	0,01444	182	0,00710	212	0,00268
123	0,03153	153	0,01396	183	0,00681	213	0,00268
124	0,03051	154	0,01348	184	0,00647	214	0,00267
125	0,02950	155	0,01303	185	0,00611	215	0,00267
126	0,02853	156	0,01258	186	0,00574	216	0,00267
127	0,02762	157	0,01215	187	0,00539	217	0,00267
128	0,02679	158	0,01174	188	0,00508	218	0,00267
129	0,02605	159	0,01135	189	0,00482	219	0,00267
130	0,02544	160	0,01097	190	0,00465	220	0,00267
131	0,02493	161	0,01060	191	0,00454	221	0,00270
132	0,02448	162	0,01021	192	0,00445	222	0,00281
133	0,02408	163	0,00982	193	0,00437	223	0,00296
134	0,02372	164	0,00944	194	0,00430	224	0,00315
135	0,02338	165	0,00907	195	0,00423	225	0,00335
136	0,02305	166	0,00874	196	0,00417	226	0,00355
137	0,02271	167	0,00844	197	0,00411	227	0,00374
138	0,02235	168	0,00819	198	0,00404	228	0,00389
139	0,02195	169	0,00801	199	0,00397	229	0,00400
140	0,02150	170	0,00789	200	0,00388	230	0,00404
141	0,02100	171	0,00782	201	0,00377	231	0,00398
142	0,02043	172	0,00777	202	0,00364	232	0,00381
143	0,01982	173	0,00773	203	0,00349	233	0,00357
144	0,01918	174	0,00770	204	0,00333	234	0,00327
145	0,01852	175	0,00767	205	0,00317	235	0,00295
146	0,01786	176	0,00764	206	0,00302	236	0,00263
147	0,01721	177	0,00761	207	0,00289	237	0,00234
148	0,01659	178	0,00757	208	0,00279	238	0,00210
149	0,01599	179	0,00752	209	0,00272	239	0,00193
150	0,01545	180	0,00745	210	0,00269	240	0,00187

Дел.	Коэффициент пропускания						
241	0,00188	271	0,89973	301	0,90543	331	0,90453
242	0,00189	272	0,89992	302	0,90540	332	0,90453
243	0,00192	273	0,90021	303	0,90535	333	0,90452
244	0,00196	274	0,90056	304	0,90529	334	0,90452
245	0,00201	275	0,90095	305	0,90522	335	0,90452
246	0,00208	276	0,90136	306	0,90514	336	0,90452
247	0,00215	277	0,90176	307	0,90506	337	0,90452
248	0,00224	278	0,90211	308	0,90497	338	0,90451
249	0,00234	279	0,90241	309	0,90489	339	0,90451
250	0,00244	280	0,90261	310	0,90481	340	0,90450
251	0,02784	281	0,90275	311	0,90473	341	0,90423
252	0,09657	282	0,90287	312	0,90462	342	0,90346
253	0,19781	283	0,90297	313	0,90451	343	0,90225
254	0,32071	284	0,90307	314	0,90439	344	0,90064
255	0,45443	285	0,90315	315	0,90427	345	0,89871
256	0,58814	286	0,90323	316	0,90416	346	0,89649
257	0,71101	287	0,90332	317	0,90406	347	0,89406
258	0,81218	288	0,90341	318	0,90398	348	0,89146
259	0,88084	289	0,90351	319	0,90393	349	0,88874
260	0,90613	290	0,90363	320	0,90391	350	0,88597
261	0,90595	291	0,90379	321	0,90392	351	0,88321
262	0,90546	292	0,90399	322	0,90397	352	0,88049
263	0,90473	293	0,90421	323	0,90404	353	0,87789
264	0,90385	294	0,90446	324	0,90413	354	0,87545
265	0,90290	295	0,90470	325	0,90422	355	0,87323
266	0,90194	296	0,90493	326	0,90431	356	0,87129
267	0,90106	297	0,90513	327	0,90439	357	0,86968
268	0,90034	298	0,90530	328	0,90446	358	0,86846
269	0,89985	299	0,90540	329	0,90451	359	0,86768
270	0,89966	300	0,90544	330	0,90453	360	0,86740

Табл. П.2. Градуировка оптического клина

Длина волны, нм	Энергетический поток, Вт			
	Белый СД	Белый СД (отн)	Фито СД	УФ СД
410	0,000000241	0,008905923	0,0000000991	0,000011120401
420	0,000002257	0,083489438	0,0000008473	0,000013660631
430	0,000010849	0,401241446	0,0000043275	0,000005868119
440	0,000025970	0,960476374	0,0000137482	0,000001962105
450	0,000027038	1	0,0000162508	0,000000629485
460	0,000019653	0,72683532	0,0000126955	0,000000212094

470	0,000007646	0,282778529	0,0000056187	0,000000077301
480	0,000003543	0,13105026	0,0000020941	0,000000032369
490	0,000002381	0,088054588	0,0000008308	
500	0,000002839	0,104999166	0,0000003178	
510	0,000005083	0,187980254	0,0000001292	
520	0,000007738	0,28619549	0,0000000576	
530	0,000009577	0,354210434	0,0000000375	
540	0,000010119	0,374259796	0,0000000400	
550	0,000009840	0,363942425	0,0000000646	
560	0,000009131	0,337693989	0,0000001216	
570	0,000008276	0,306068533	0,0000002438	
580	0,000007303	0,270090637	0,0000004560	
590	0,000006150	0,227464642	0,0000007644	
600	0,000004918	0,181895572	0,0000011400	
610	0,000004120	0,152377231	0,0000016303	
620	0,000003337	0,123410118	0,0000021151	
630	0,000002601	0,096199232	0,0000024770	
640	0,000001992	0,073687387	0,0000025687	
650	0,000001489	0,055063693	0,0000025279	
660	0,000001089	0,04029001	0,0000023563	
670	0,000000777	0,028734684	0,0000020309	
680	0,000000548	0,020251842	0,0000016659	
690	0,000000385	0,014223618	0,0000013096	
700	0,000000269	0,009964285	0,0000010003	
710	0,000000186	0,00689425	0,0000007794	
720	0,000000128	0,004725166	0,0000005344	
730	0,000000087	0,003235399	0,0000003742	
740	0,000000060	0,002217631	0,0000002595	
750	0,000000041	0,001501274	0,0000001738	
760	0,000000027	0,001016806	0,0000001127	
770	0,000000043	0,001583292	0,0000000707	
780	0,000000031	0,001163427	0,0000000515	

Табл. П.3. Градуировка канала монохроматического излучения объекта

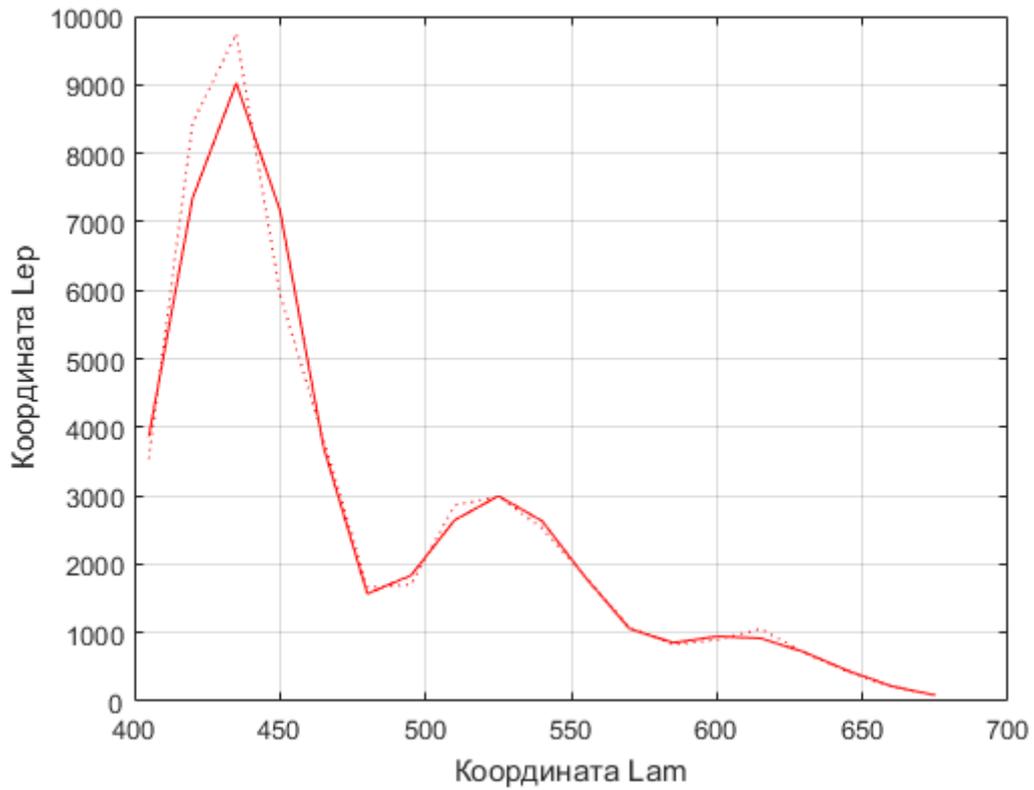


Рис. П.5. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) наблюдателя А

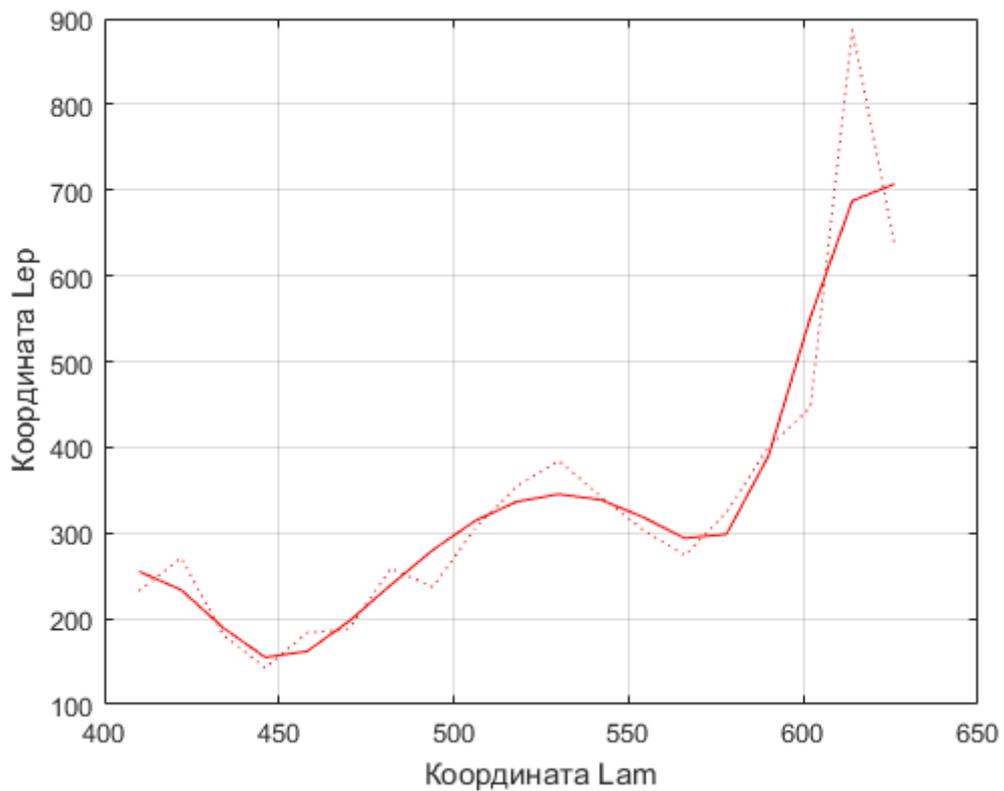


Рис. П.6. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) наблюдателя Б

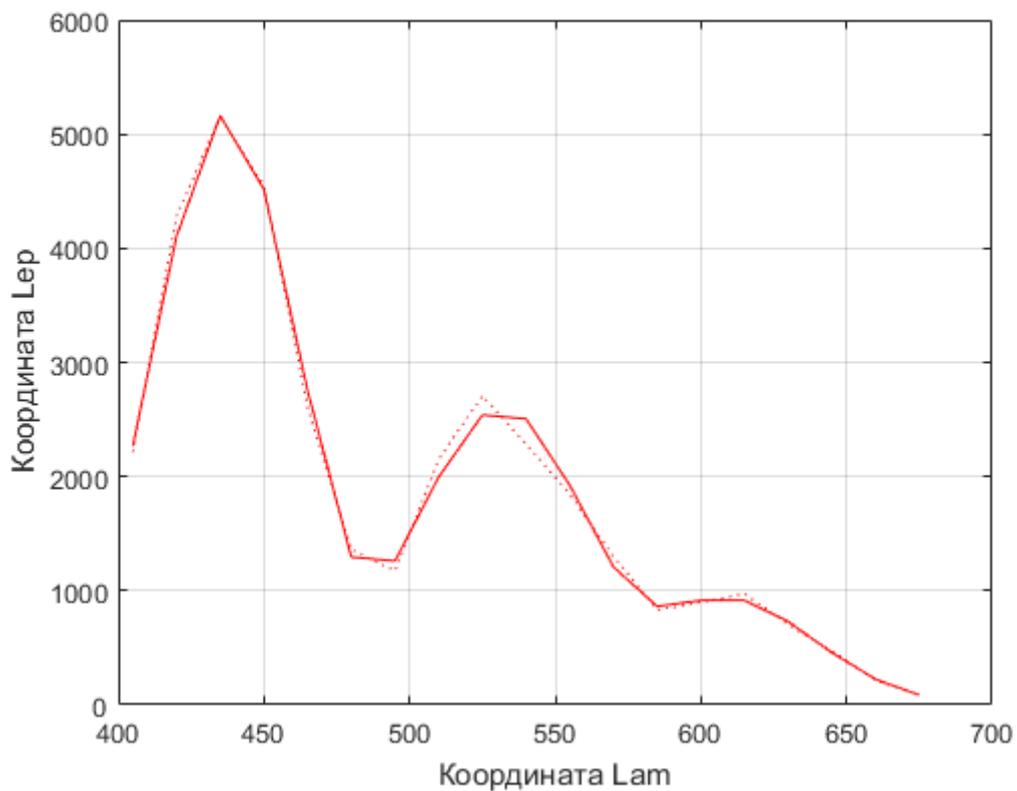


Рис. П.7. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) наблюдателя В

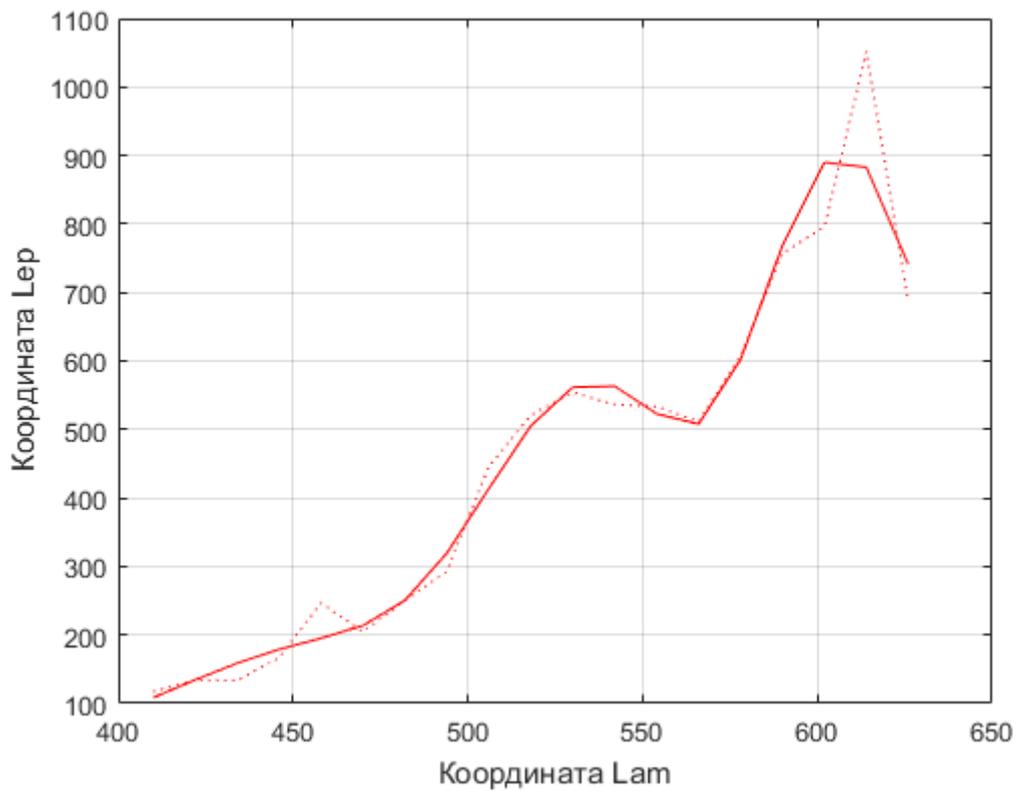


Рис. П.8. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) наблюдателя Г

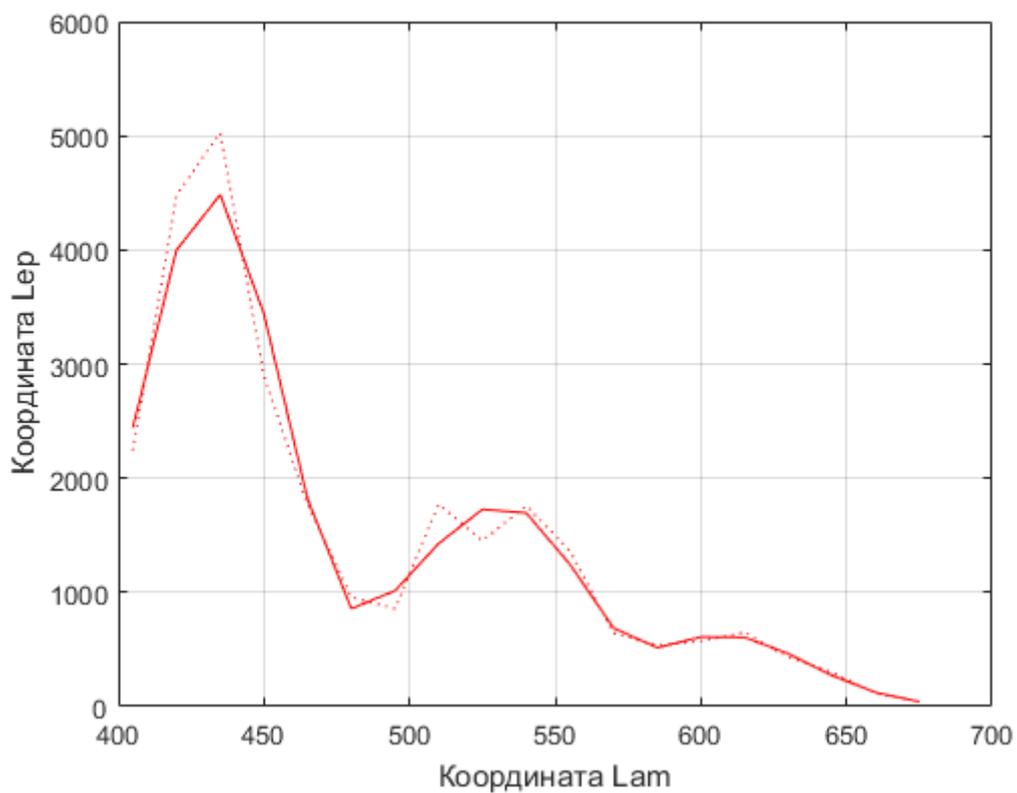


Рис. П.9. Экспериментальные зависимости  $L_{en}(\lambda_i)$  (пунктирная кривая) и аппроксимированные (сплошная кривая) путем решения системы уравнений (1.3.4.30) наблюдателя Д

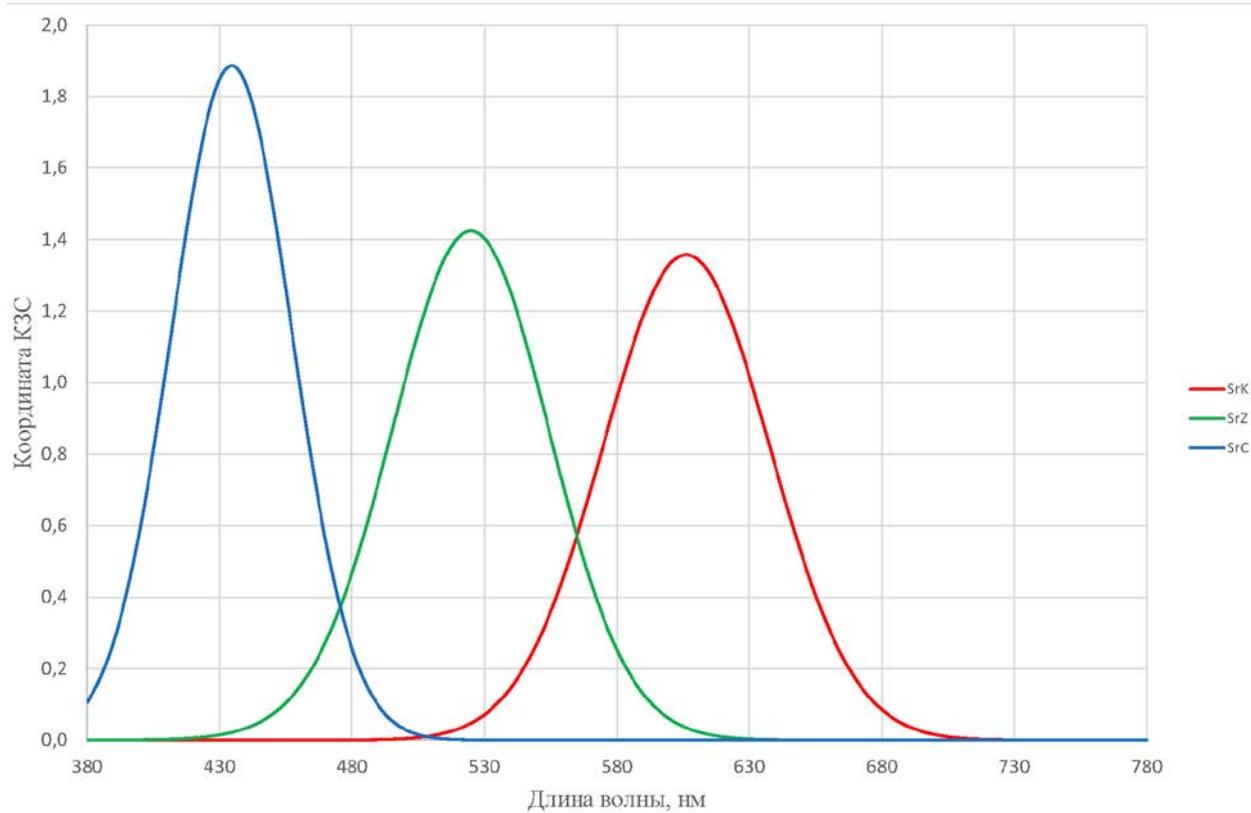


Рис. П.10. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  наблюдателя А

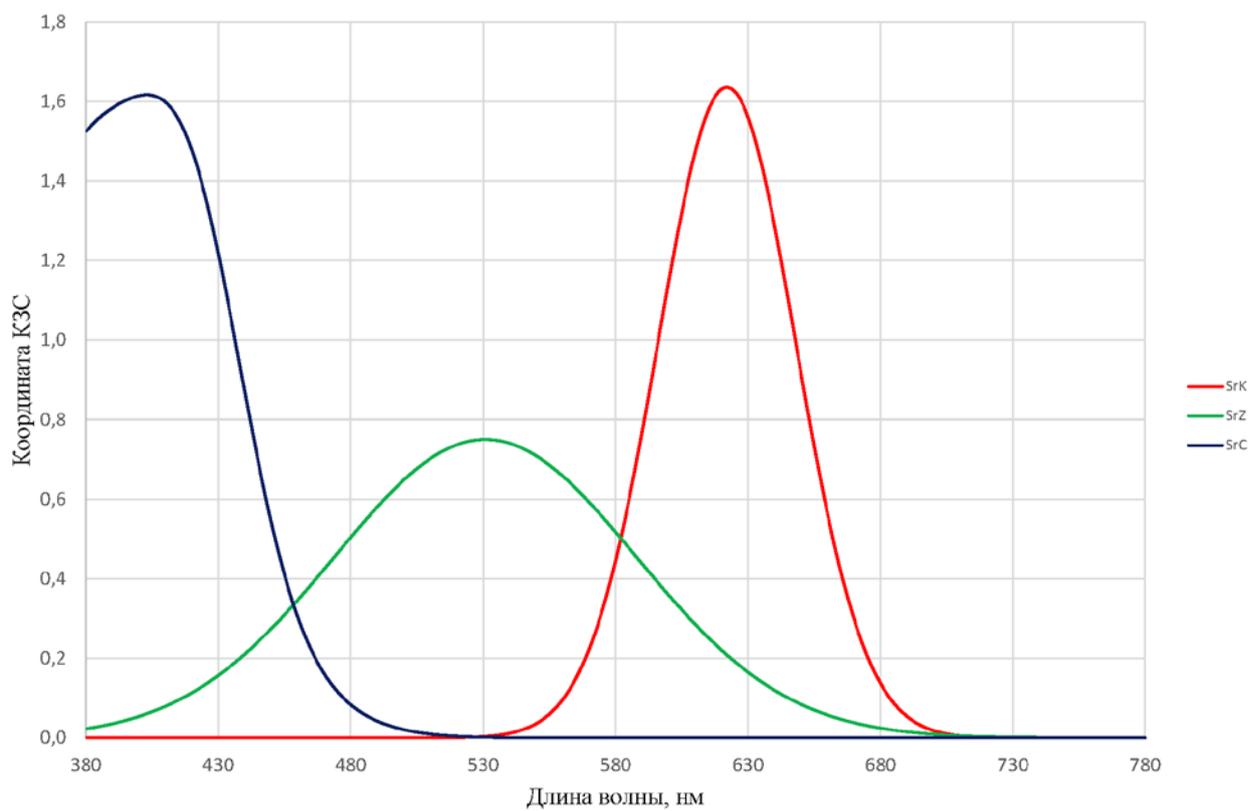


Рис. П.11. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  наблюдателя Б

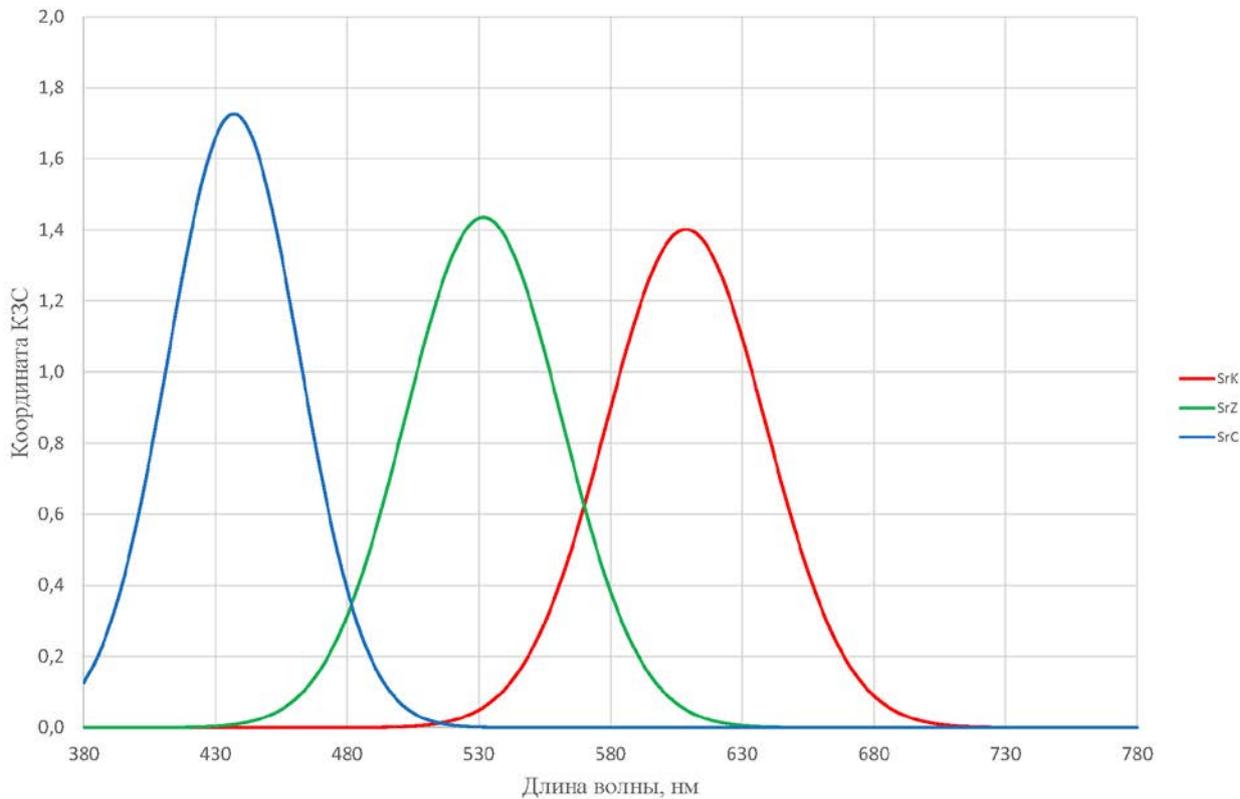


Рис. П.12. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  наблюдателя В

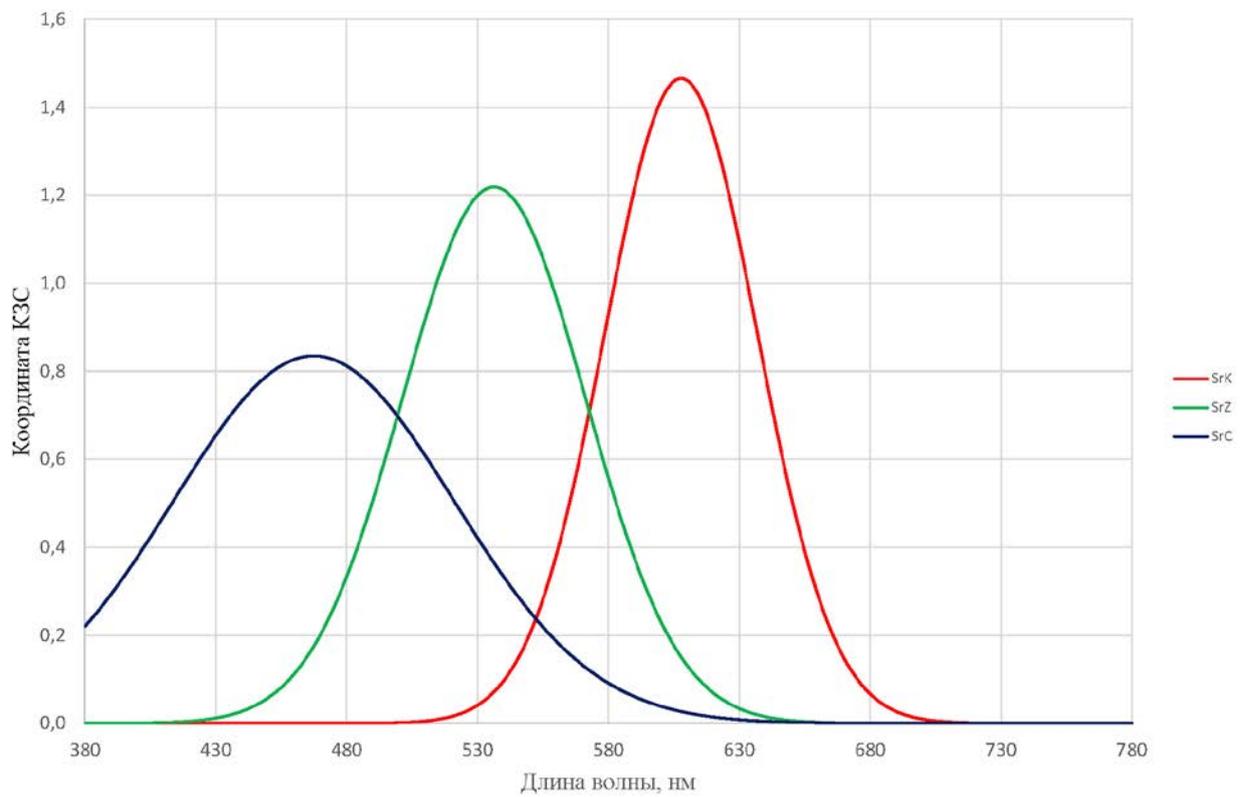


Рис. П.13. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  наблюдателя Г

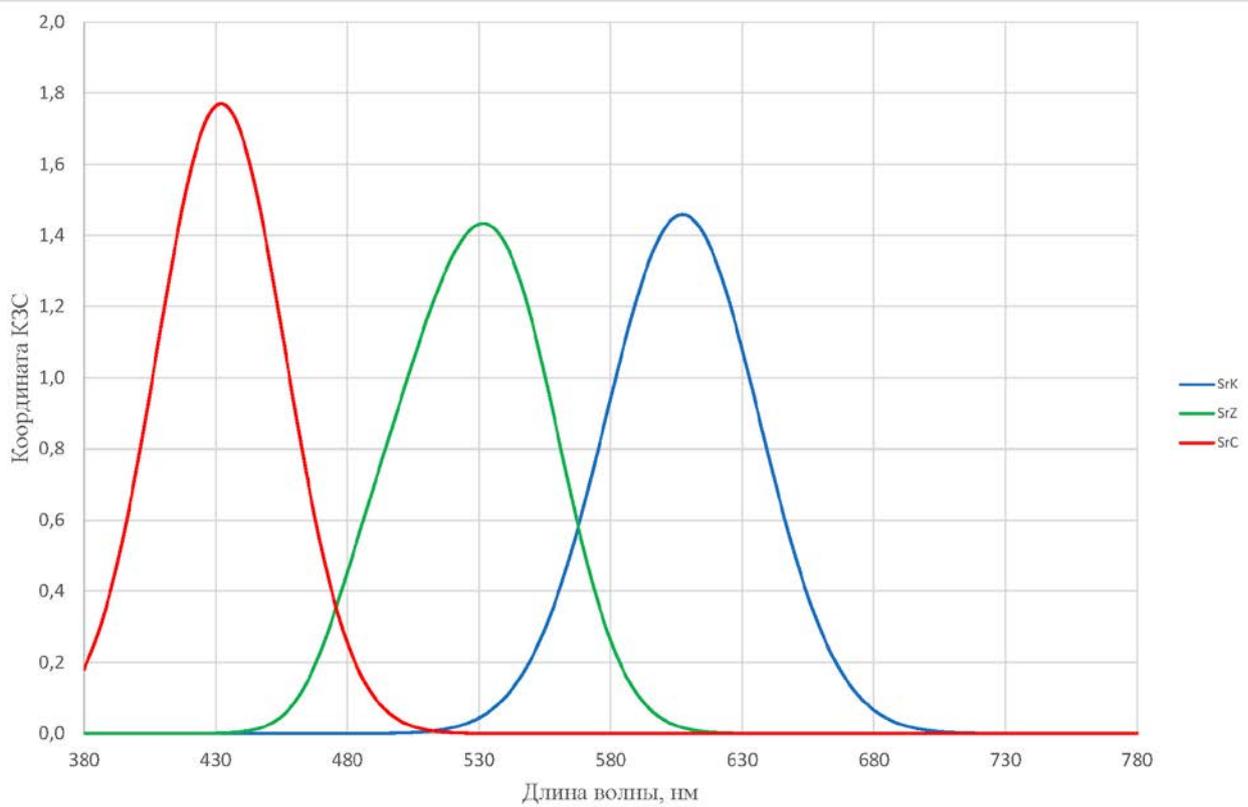


Рис. П.14. Зависимости  $\bar{\kappa}(\lambda), \bar{z}(\lambda), \bar{c}(\lambda)$  наблюдателя Д

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Пример тестового файла с результатами расчета для наблюдателя А:

2856,00	Температура источника белого		
0,00	Sko Lep		
0,00	DPar1-3		
1,00	2,00	1,00	NExpAppr
Исходные Pkzc			
0,00	590,00	1,00	
1,00	543,00	1,00	
1,00	448,00	1,00	
0,24 SkoCur			
Начальные Pkzc до аппроксимации			
0,00	590,00	1,00	
1,00	550,00	1,00	
1,00	448,00	1,00	
Конечные Pkzc			
0,00	625,27	0,71	
1,45	528,37	0,84	
0,46	431,53	0,98	
Lam Lep исходное Lep конечное			
405,00	3539,36	3864,55	
420,00	8438,20	7342,65	
435,00	9746,12	9021,40	
450,00	5947,03	7168,79	
465,00	3822,83	3706,71	
480,00	1660,99	1569,49	
495,00	1701,45	1836,51	
510,00	2859,61	2644,91	
525,00	2990,57	2996,39	
540,00	2526,61	2630,79	
555,00	1812,89	1801,28	
570,00	1082,50	1058,81	
585,00	826,98	853,16	
600,00	894,43	946,20	
615,00	1055,98	919,69	
630,00	708,16	716,79	
645,00	427,41	444,84	
660,00	207,16	219,72	
675,00	90,38	86,38	

Исходные PkzcP			
1,47	0,00	0,00	
-19,11	0,00	0,00	
62,80	0,00	0,00	
1,04	0,19	0,00	
-2,76	-11,14	0,00	
48,71	59,94	0,00	
3,01	0,00	0,00	
3,05	0,00	0,00	
32,92	0,00	0,00	
PkzcP при аппроксимации (PkzcPNa)			
1,47	0,00	0,00	
-19,11	0,00	0,00	
62,80	0,00	0,00	
1,04	0,19	0,00	
-2,76	-11,14	0,00	
48,71	59,94	0,00	
3,01	0,00	0,00	
3,05	0,00	0,00	
32,92	0,00	0,00	
0,31	- Погрешность K по площади		
35,27	- Смещение максимума K		
-0,29	- Отклонение SigK		
-0,70	- Максимальная погрешность K		
547,40	- Длина волны MAX погрешности K		
0,16	- Погрешность Z по площади		
-14,63	- Смещение максимума Z		
-0,16	- Отклонение SigZ		
-0,37	- Максимальная погрешность Z		
568,70	- Длина волны MAX погрешности Z		
0,25	- Погрешность C по площади		
-16,47	- Смещение максимума C		
-0,02	- Отклонение SigC		
-0,43	- Максимальная погрешность C		
466,60	- Длина волны MAX погрешности C		