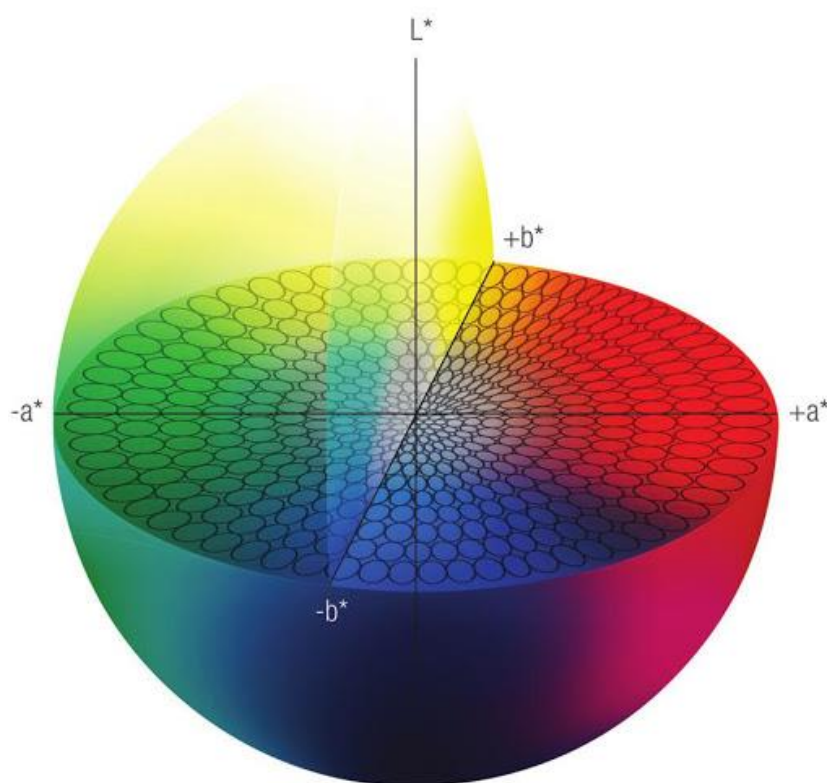


Е.В. Горбунова, Е.А. Сычева, А.Н. Чертов

**КОЛОРИМЕТРИЯ. МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

**ЧАСТЬ 1. ЦВЕТНОЕ ЗРЕНИЕ И ОСНОВЫ
РАСЧЕТОВ ЦВЕТА ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ**



**Санкт-Петербург
2021**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Горбунова, Е.А. Сычева, А.Н. Чертов
КОЛОРИМЕТРИЯ. МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ
ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ЧАСТЬ 1. ЦВЕТНОЕ ЗРЕНИЕ И ОСНОВЫ
РАСЧЕТОВ ЦВЕТА ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ
ИТМО

по направлению подготовки 12.04.02 Опотехника
в качестве учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2021

Горбунова Е.В., Сычева Е.А., Чертов А.Н., Колориметрия. Методические указания к выполнению лабораторных работ. Часть 1. Цветное зрение и основы расчетов цвета источников излучения. – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 63 с.

Рецензент(ы):

Перетягин Владимир Сергеевич, к.т.н., руководитель департамента приборов медицинского назначения, ООО "НТП "ТКА";

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов по направлению подготовки 12.04.02 «Оптотехника» в качестве учебного пособия для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Колориметрия».

В методические указания входит описание 5 лабораторных работ:

1. Восприятие цветов (компьютерная)
 2. Сравнение цветов (компьютерная)
 3. Диаграммы МКО (компьютерная)
 4. Определение цветовых координат светодиодных источников излучения по их спектру
 5. Моделирование светодиодного источника излучения с заданной цветностью
- а также таблицы со справочными данными.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2021

© Горбунова Е.В., Сычева Е.А., Чертов А.Н., 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Восприятие цветов	5
1.1 Теоретический подход к восприятию цвета	5
1.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	8
1.3 Иконки панели инструментов	11
1.4 Вопросы к лабораторной работе.....	12
Лабораторная работа №2. Сравнение цветов	13
2.1 Теоретические основы	13
2.2 Содержание лабораторной работы	16
2.3 Порядок выполнения лабораторной работы.....	17
2.4 Иконки панели инструментов:	24
2.5 Вопросы к лабораторной работе.....	25
Лабораторная работа №3. Диаграммы МКО	26
3.1 Теоретические сведения	26
3.2 Содержание лабораторной работы	28
3.3 Порядок выполнения лабораторной работы.....	29
3.4 Иконки панели инструментов	33
3.5 Вопросы к лабораторной работе.....	33
Лабораторная работа №4. Определение цветовых координат светодиодных источников излучения по их спектру.....	35
4.1 Теоретические основы расчета цветовых параметров излучения источников	35
4.1.1 Способ взвешенных ординат	36
4.1.2 Способ избранных ординат	37
4.1.3 Расчет координат цветности	39
4.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	39
4.3 Вопросы к лабораторной работе.....	46
Лабораторная работа №5. Моделирование светодиодного источника излучения с заданной цветностью	48
5.1 Теоретические основы моделирования многоэлементных источников излучения с заданной цветностью	48
5.2 Порядок выполнения лабораторной работы.....	51
5.3 Вопросы к лабораторной работе.....	52
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	53
Приложение 1	55

ВВЕДЕНИЕ

Данное пособие содержит указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Колориметрия». Предназначено для обучающихся магистратуры по направлению подготовки 12.04.02 «Опtotехника».

Пособие содержит 5 лабораторных работ, которые охватывают все разделы теоретического курса:

- основы колориметрии;
- цветовые системы и модели;
- цветовые стандарты;
- цветовые расчеты и измерения;
- цветоизмерительные приборы.

Выполнение лабораторных работ способствует более глубокой проработке теоретических знаний и непосредственно их применению на практике. Работы выполняются с использованием современного оборудования и специального программного обеспечения, разработанного авторами курса.

В процессе выполнения лабораторных работ обучающийся овладевает следующими знаниями, умениями и навыками:

Знания: типов инструментальных средств (к примеру, MatLAB, MathCAD, Python, Excel и т.д.) для расчета и пересчета цветовых координат различных объектов для различных условий наблюдения при использовании основных моделей описания цветовых параметров и характеристик.

Умения: учитывать особенности восприятия цвета излучения источников света зрительным аппаратом человека.

Навыки: экспресс-оценки и углубленного расчета характеристик результирующего истинного цветового оттенка наблюдаемого самосветящегося или несамосветящегося объекта в заданных условиях наблюдения по известным спектрофотометрическим данным с помощью расчетов, рекомендованных МКО, или при помощи специализированного ПО SpectraSuite и OceanView.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТОВ

Цель работы: ознакомиться с особенностями восприятия цветовых оттенков собственным зрительным аппаратом в различных условиях.

1.1 Теоретический подход к восприятию цвета

Для физика понятие «цвет» ничего не значит! Действительно, с точки зрения классической физики источник излучения или цветной объект может отображаться исключительно в виде спектральной кривой излучения, отражения или пропускания. На этих кривых, которые обычно называют спектром, на оси абсцисс находится длина электромагнитных волн, а на оси ординат – соответствующий уровень излученной, отраженной или прошедшей через объект энергии [1-5].

Для того чтобы говорить о цвете, мы должны объединить две составляющих – световой эффект и наблюдателя.

Световой эффект создается с помощью:

- прямого источника излучения (монитор, телевизор и т.п.),
- наблюдаемого непрозрачного объекта в зеркальном, рассеянном или смешанном отражении и освещаемого источника,
- просвечивающего объекта, освещаемого сзади (оптический фильтр перед источником освещения) или подвергнутого сложному освещению от одного, двух и более источников – прямому и косому (комбинация светофильтров, витраж), или
- любого другого сочетания источников и объектов (сцена, наблюдаемая через цветное стекло и т.п.). Следует добавить к этой схеме также поле наблюдения, формируемое окружающей обстановкой.

Наблюдатель воспринимает световой эффект как цвет. При этом невозможно говорить о цвете как таковом, речь может идти только о воспринимаемом цвете. Иногда говорят о цветовом облике объекта. Явление цвета, следовательно, зависит от физиологических и психологических особенностей наблюдателя. Все исследования в области колориметрии основаны, таким образом, на определении стандартного наблюдателя – комплексе условий, при котором явление цвета объекта не подвергается изменениям. Это определение было сформулировано между 1926 и 1931 годами Международной комиссией по освещению на основе работ Гилда и Райта [1].

Таким образом, понятие цвета переходит в область воспринимаемого и оказывается в ракурсе изучения многих наук: физики, психологии, физиологии, философии.

Физика требуется для описания спектральных особенностей излучения источника освещения объекта, отражения или пропускания излучения цветным объектом, а также особенностей наблюдаемой сцены

(взаимное расположение источника подсветки и объекта, свойства окружающих объектов и т.п.).

Физиология необходима для описания устройства глаза. Знание природы работы фоторецепторов и понимание принципов передачи и обработки цветовой информации зрительным аппаратом человека являются одними из основных аспектов колориметрии.

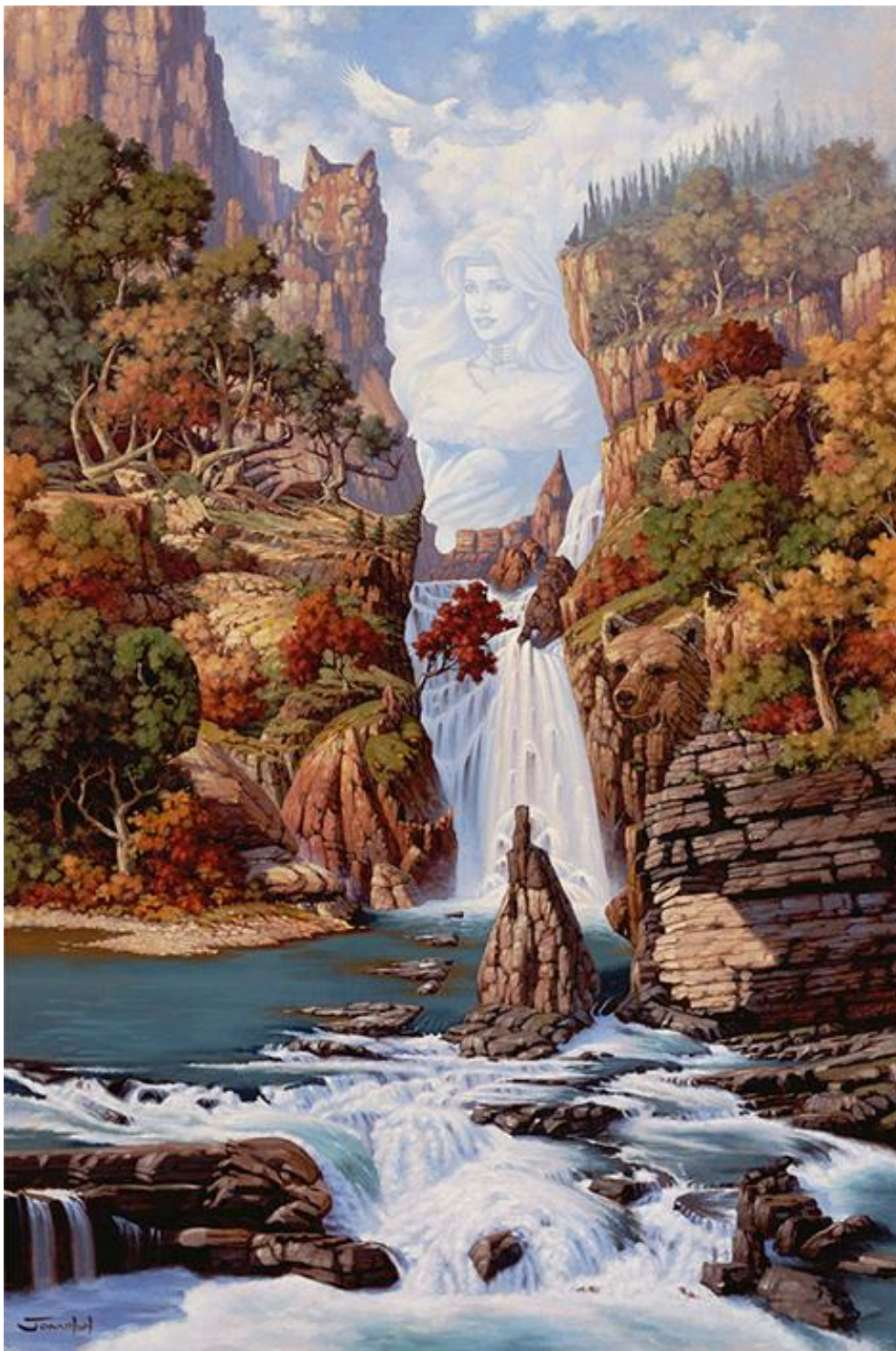


Рисунок 1.1 – Призрак осени (Phantom of the Falls) – картина-загадка художника Джонатана Боузера [6]

Психология изучает способы восприятия, особенно в том, что касается контраста между цветами, зависимости восприятия цвета от поля наблюдения, явлений адаптации и устойчивости. В частности, гештальт-психологи, в том числе Рубен в 1921 году, считали, что любая фигура выделяется на заднем плане из общего поля восприятия, в зависимости от отношения между фигурой и фоном, которые составляют единое целое, при этом любое изменение одного фактора при наблюдении ведет за собой изменение в восприятии другого. Классическим примером данного эффекта являются оптические иллюзии (см. рис. 1.1).

Гете в начале XIX века посвятил многие годы своей жизни изучению цвета и опубликовал «Трактат о цвете», где он оспорил теорию Ньютона, в которой недостаточная роль отведена условиям и наблюдателю [7]. С философской точки зрения противопоставляются две теории: объективная теория цвета, говорящая о том, что цвет не зависит от восприятия, и субъективная теория цвета, в которой понятия светового эффекта и наблюдателя неотделимы от самого понятия цвета.

Первый подход характеризует исследование Дэвида Р. Гильберта «Цвет и его восприятие» («Color and Color Perception»). Сторонники этого подхода утверждают, что банан останется желтым, кто бы на него ни смотрел и как бы он ни был освещен.

Для приверженцев другой точки зрения цвет – это явление, в том смысле, который ему дает Мерло-Понти, ссылаясь, в свою очередь, на труд Канта «Феноменология восприятия». Нам не дано постигнуть предметы в себе, которые Кант называет ноуменами. Мы можем видеть только их феномен. Цветок, который я вижу, например, никогда не будет цветком в себе, то есть одним и тем же цветком в любое время и в любом месте, от расцвета до увядания. Мы не вправе говорить о цвете объекта, мы можем лишь говорить об опыте, который мы получаем от этого цвета.

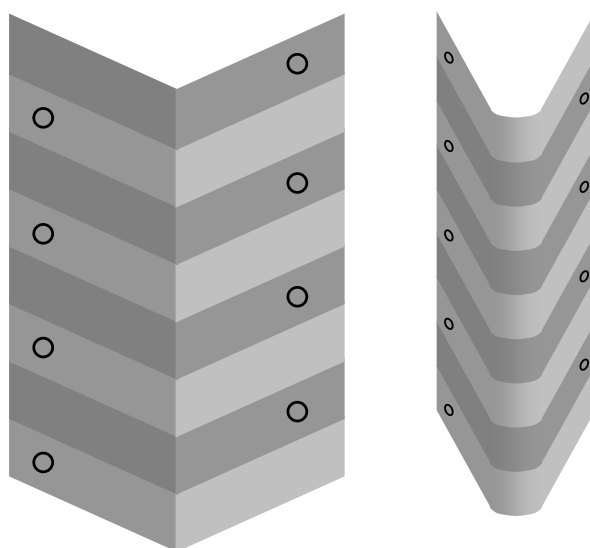


Рисунок 1.2 – Психологическая интерпретация освещенности

На этот опыт влияет еще и интерпретация нашим мозгом этого объекта или цветовой зоны: на рис. 1.2 зоны, отмеченные кругами и эллипсами, имеют одинаковый оттенок цвета. Этот опыт может также зависеть от узнавания форм. Например, банан кажется нам желтым, потому что обычно бананы желтого цвета. С данным эффектом связан один забавный случай. В самом начале развития цветного телевидения во время предварительных опытов перед камерой поставили натюрморт, на котором была изображена корзина с фруктами. Однажды утром главный инженер с ужасом обнаружил, что банан на картине стал синего цвета. Он перепробовал все возможные настройки, до тех пор, пока не подошел к площадке и не увидел, что какой-то шутник действительно покрасил банан в синий цвет.

Таким образом, мы видим, как многогранны понятия «цвет» и «восприятие цвета». Поэтому данная лабораторная работа посвящена практическому знакомству с особенностями восприятия цветовых оттенков собственным зрительным аппаратом в различных условиях освещения и основными параметрами цвета.

1.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работы выполняется индивидуально на компьютере с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного авторами данных методических указаний.

Лабораторная работа выполняется в несколько серий экспериментов при различных условиях наблюдения:

1 – восприятие обоими глазами насыщенных цветовых оттенков на черном фоне;

2 – восприятие обоими глазами насыщенных цветовых оттенков на сером фоне;

3 – восприятие обоими глазами насыщенных цветовых оттенков на белом фоне;

4 – восприятие обоими глазами цветовых оттенков после изменения их насыщенности на черном (сером, белом или произвольном) фоне;

5 – восприятие обоими глазами цветовых оттенков после изменения их светлоты на черном (сером, белом или произвольном) фоне;

6 а – восприятие только правым глазом насыщенных (или средне-насыщенных или средне-ярких) цветовых оттенков на черном (сером, белом или произвольном) фоне;

6 б – восприятие только левым глазом насыщенных (или средне-насыщенных или средне-ярких) цветовых оттенков на черном (сером, белом или произвольном) фоне.

Задача каждой серии экспериментов состоит в воспроизведении изначального порядка цветовых оттенков.

Настройка условий производится для каждой серии экспериментов!

Порядок выполнения

1.1 Запустить приложение Laba1.exe, находящееся в папке Lab1 (Colorimetry\Lab1\Lab1.exe).

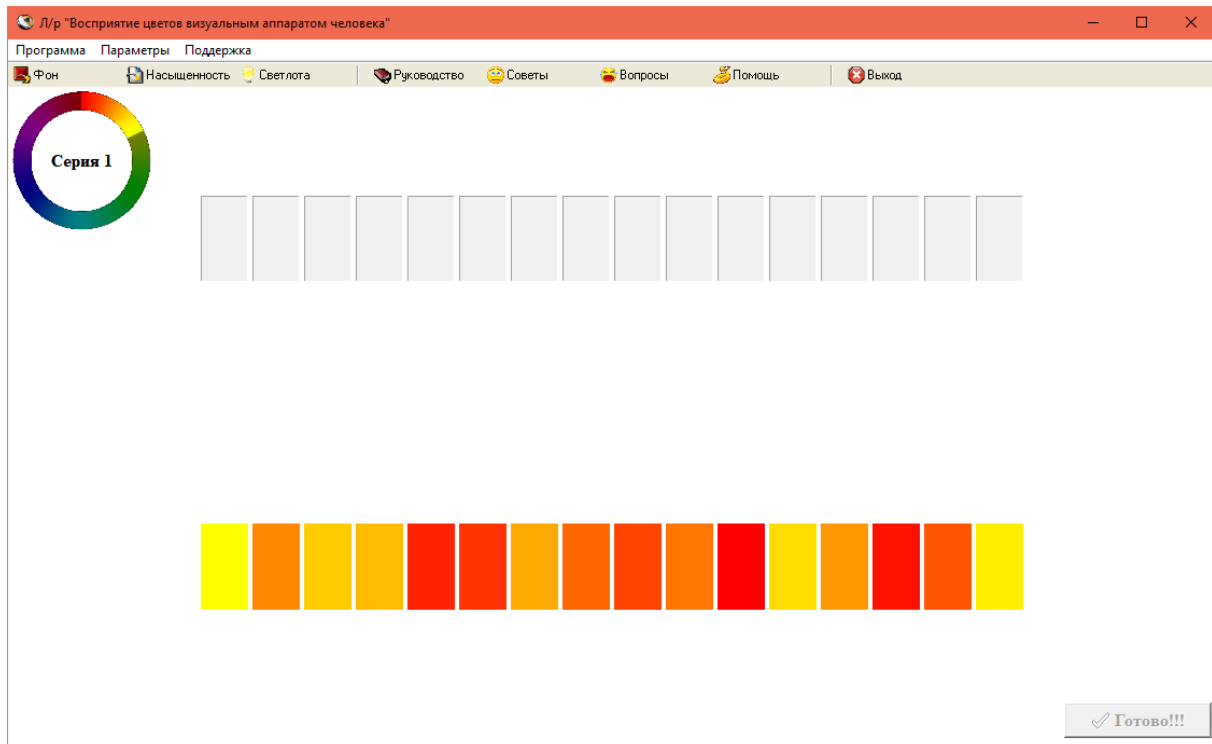


Рисунок 1.3 – Рабочее окно программы

1.2 Воспроизвести исходный порядок карточек красно-желтых цветовых оттенков в серых ячейках (рис. 1.3).

1.3 Нажать на кнопку «Готово!!!» в нижнем правом углу экрана.

На карточках появятся числа, характеризующие их действительное положение в цветовой последовательности. Затем появится новый ряд карточек.

1.4 Повторить п.п. 1.2 – 1.3 оставшихся пяти цветовых рядов карточек.

В итоге появится диаграмма, изображающая ваше восприятие цветов на хроматическом круге.

1.5 Сохранить полученное изображение диаграммы в формате BMP под именем «Диаграмма 1.bmp», нажав кнопку «Сохранить» в нижней части экрана.

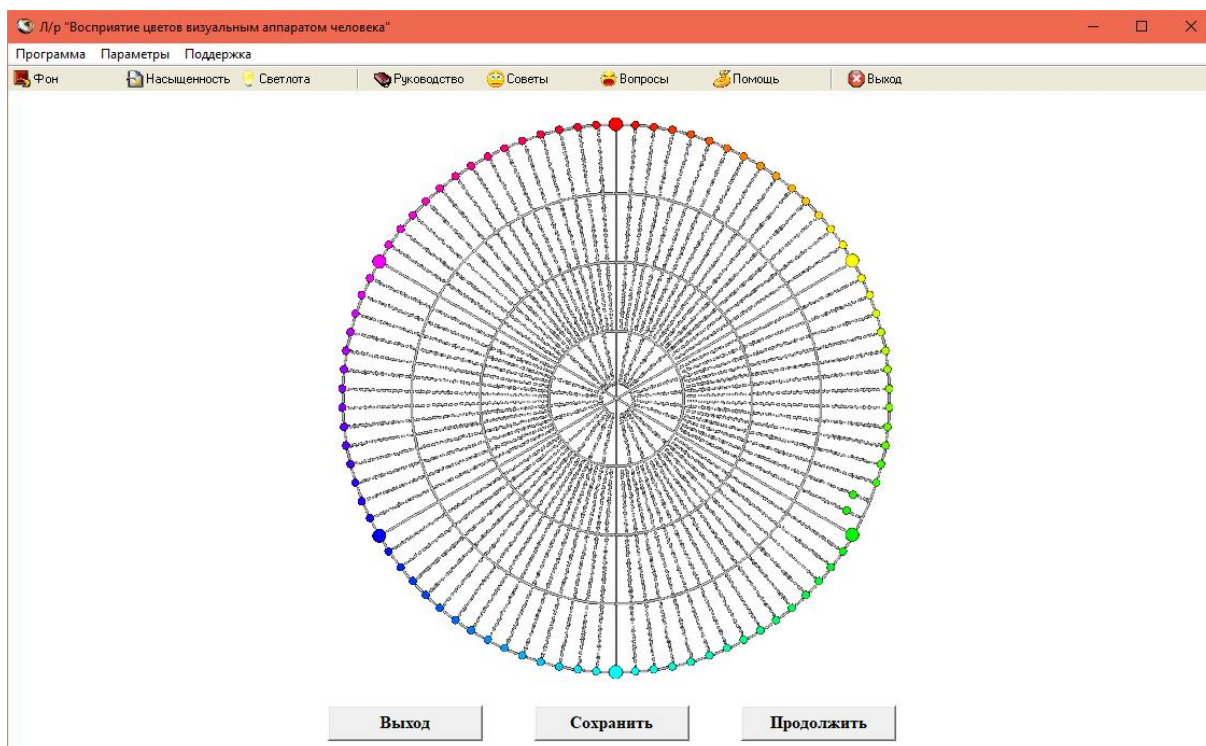


Рисунок 1.4 – Диаграмма результатов восприятия цветовых оттенков

1.6 Нажать кнопку «Продолжить» в нижнем правом углу.
На этом начинается новая серия экспериментов.

1.7 Изменить цвет фона с черного на серый, пройдя в меню **Параметры – Фон – Серый**, или нажав на кнопку «**Фон**» на панели инструментов и выбрав кнопку «**Серый**» в появившемся окне, или пройдя в контекстное меню **Фон – Серый**.

1.8 Повторить п.п. 1.2 – 1.6.

При этом полученную диаграмму надо сохранить под именем «Диаграмма 2.bmp».

Далее следует третья серия экспериментов.

1.9 Изменить цвет фона с серого на белый, пройдя в меню **Параметры – Фон – Белый**, или нажав на кнопку «**Фон**» на панели инструментов и выбрав кнопку «**Белый**» в появившемся окне, или пройдя в контекстное меню **Фон – Белый**.

1.10 Изменить светлоты цветных карточек: пройти в меню **Параметры – Светлота цветов**, или нажать на кнопку «**Светлота**» на панели инструментов, или пройти в контекстное меню **Светлота цветов**, или нажав комбинацию клавиш **Ctrl + Z**, и на появившемся бегунке изменить текущее значение светлоты с 50% до другого, удобного для вас, уровня.

1.11 Повторить п.п. 1.2 – 1.6.

При этом полученную диаграмму надо сохранить под именем «Диаграмма 3.bmp».

Далее производится следующая серия экспериментов.

1.12 Изменить цвет фона на более комфортный для вас, пройдя в меню **Параметры – Фон – Другой...**, или нажав на кнопку «**Фон**» на панели инструментов и выбрав кнопку «**Другой...**» в появившемся окне, или пройдя в контекстное меню **Фон – Другой...**

1.13 Изменить насыщенность цветowych карточек: пройти в меню **Параметры – Насыщенность цветов**, или нажать на кнопку «**Насыщенность**» на панели инструментов, или пройти в контекстное меню **Насыщенность цветов**, или нажав комбинацию клавиш **Ctrl + A**, и на появившемся бегунке изменить насыщенность со 100% до 60%.

1.14 Повторить п.п. 1.2 – 1.6.

Изменять насыщенность со 100% до 60% необходимо для каждого ряда карточек данной серии экспериментов.

При этом полученную диаграмму надо сохранить под именем «Диаграмма 4.bmp».

Далее проводится пятая серия экспериментов.

1.15 Закрывать платком правый глаз (без нажатия).

1.16 Установить комфортный фон, светлоту и насыщенность цветowych карточек.

1.17 Повторить п.п. 1.2 – 1.6.

При этом полученную диаграмму надо сохранить под именем «Диаграмма 5.bmp».

Далее производится последняя серия экспериментов.

1.18 Закрывать платком левый глаз (без нажатия).

1.19 Установить комфортный фон, светлоту и насыщенность цветowych карточек.

1.20 Повторить п.п. 1.2 – 1.6.

При этом полученную диаграмму надо сохранить под именем «Диаграмма 6.bmp».

1.21 Выйти из программы, нажав кнопку «**Выход**» в нижнем левом углу экрана, или пройдя в меню **Программа – Выход**, или нажав кнопку «**Выход**» на панели инструментов, или пройдя в контекстное меню **Выход**, или нажав комбинацию клавиш **Ctrl + F10**.







1.3 Иконки панели инструментов



– Задание цвета фона.



– Задание насыщенности карточек.

-  – Задание светлоты карточек.
-  – Краткое руководство по данной лабораторной работе.
-  – Советы по проведению лабораторной работы.
-  – Вопросы к лабораторной работе.
-  – Помощь.
-  – Выход.

1.4 Вопросы к лабораторной работе

В качестве отчета для данной лабораторной работы принимается аргументированный ответ на один из следующих вопросов с использованием полученных диаграмм восприятия цветовых оттенков для различных условий проведения эксперимента.

1. Какие цвета труднее всего различить? Как вы думаете, почему?
2. Как лучше различаются цвета: близко от монитора, или далеко? Почему?
3. Визуальный аппарат оценивает цвет как абсолютную величину или относительную?
4. Как влияет насыщенность цветовых оттенков на эффективность их разделения?
5. Одинаково ли различают цветовые оттенки левый и правый глаз?
6. Изменится ли способность различать карточки представленных цветовых рядов, если уменьшить яркость цветовых оттенков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. СРАВНЕНИЕ ЦВЕТОВ

Цель работы: изучение понятия константности цвета и различных типов адаптации зрительного аппарата человека.

2.1 Теоретические основы

Визуальный аппарат человека имеет потрясающую особенность – инвариантность восприятия цвета относительно спектрального состава освещения в повседневных условиях (т.е. восприятие цвета большинства объектов не зависит от спектрального состава освещения). Это явление называется **константностью цвета**. Кроме того, визуальный аппарат человека обладает свойством **константности восприятия светлоты** (оценки светлоты не зависят от абсолютных уровней энергии, а основаны на сравнении коэффициентов отражения). Благодаря этому свойству зрения человек в состоянии оценить кусок угля как черный, а кусок мела как белый при совершенно разных условиях освещенности. Константность восприятия светлоты сохраняется при непосредственном сравнении угля и мела, даже если при низких уровнях освещенности абсолютное количество света, отраженного от куска мела, меньше, чем света, отраженного от угля при высоких уровнях освещенности. Эти свойства зрения обуславливают возможность человека видеть мир стабильного цвета и яркости, в условиях постоянного изменения длины волны и интенсивности света, отраженного от объектов зрительной сцены [1, 2, 8, 9].

Константность хорошо сохраняется при наблюдении предмета с текстурированной поверхностью в сложной зрительной сцене, содержащей другие объекты с относительно высокой отражательной способностью. Тогда при условии, что источник освещения излучает в достаточно широком диапазоне, между клетками коры головного мозга, связанными с различными светочувствительными клетками сетчатки, становятся возможными многие реакции сравнения. Таким образом, константность сохраняется, даже если освещение имеет прерывистый спектр или представляет собой смесь полос длин волн. Однако при монохроматическом освещении отношения реакций, связанных цветовым стимулом, становятся искаженными.

Изменение цветового восприятия вызвано нарушением константности. Подобное происходит, если имеются заметные изменения спектрального состава излучения в зрительной сцене или если имеются локализованные яркие огни (например, лучи солнечного света, проникающие сквозь листву на затененной деревьями площади, или прожекторы для домашнего или театрального освещения). Тогда отношение интенсивностей отраженного света различных длин волн не

будет сохраняться постоянным по всей зрительной сцене, и будет происходить частичное или полное нарушение константности.

Чем меньше сравнений коэффициентов отражения длин волн происходит в поле зрения, тем меньше возможности для визуального аппарата сохранить константность. Аналогично, константность обычно нарушается, когда изолированные объекты наблюдаются на черном фоне. Константность нарушается в случае наблюдения малых объектов, с минимальными изменениями спектрального коэффициента отражения и текстуры поверхности. Более того, возникает постепенное нарушение константности при уменьшении зрительного поля до очень малого углового размера, представляющего так называемое «туннельное зрение».

Визуальный аппарат имеет разнообразные механизмы для осуществления «оптимального» режима зрения вне зависимости от изменения условий освещения или свойств наблюдаемого объекта – механизмы адаптации. Адаптация может быть локальная или глобальная, во времени и/или в пространстве, к яркости и/или цвету.

Глобальная адаптация – это перестройка полностью всего зрительного аппарата, например, при входе в темную комнату из светлого помещения, или, наоборот, при выходе из темного подъезда на ярко освещенную солнцем улицу. **Локальная адаптация** зрительного аппарата представляет собой изменения в восприятии наблюдаемого объекта или какой-то его области (рис. 2.1).

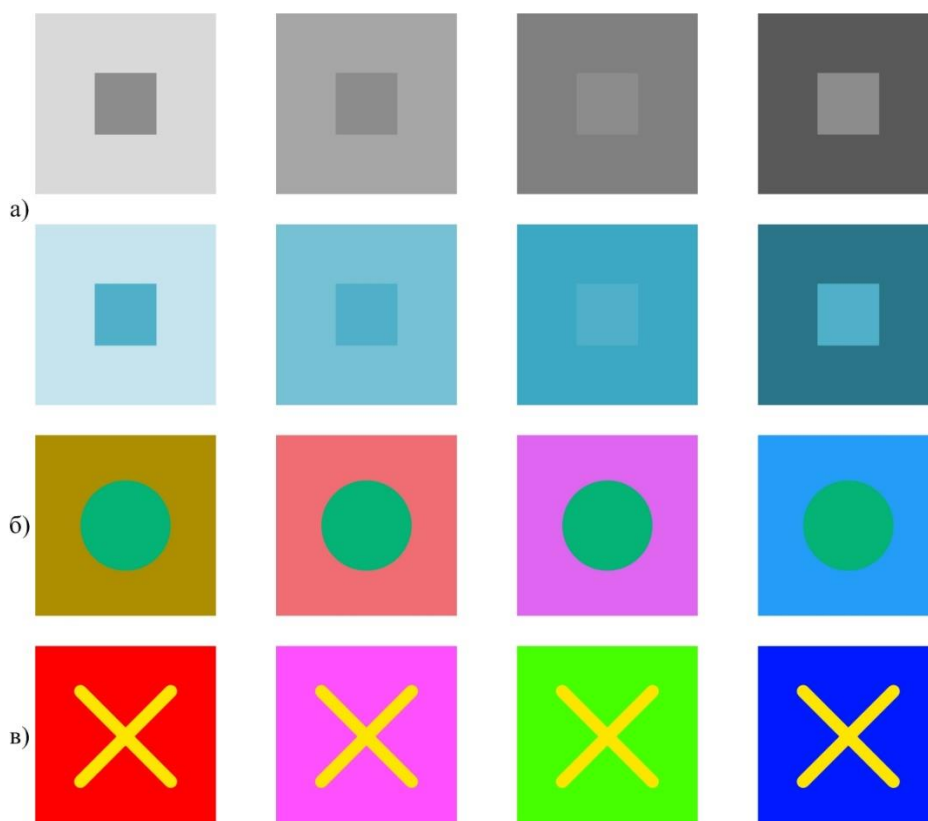


Рисунок 2.1 – Локальная адаптация к яркости, цвету, яркости и цвету

Пространственная адаптация основана на одновременном контрасте цветов. При этом один и тот же цветовой оттенок будет казаться другим при его наблюдении на различающихся фонах [1, 4]. Необходимо отметить, что пространственная адаптация может быть:

- к яркости (рис. 2.1 а) – наблюдаемый оттенок кажется темнее на светлом фоне или светлее на более темном фоне (при этом цветность оттенка не изменяется),

- к цвету (рис. 2.1 б) – наблюдаемый оттенок кажется имеющим дополнительную цветность, противоположную цвету фона (при этом яркость оттенка не изменяется) или

- одновременно к яркости и цвету (рис. 2.1 в) – наблюдаемый оттенок кажется изменившимся и цветность и яркость.

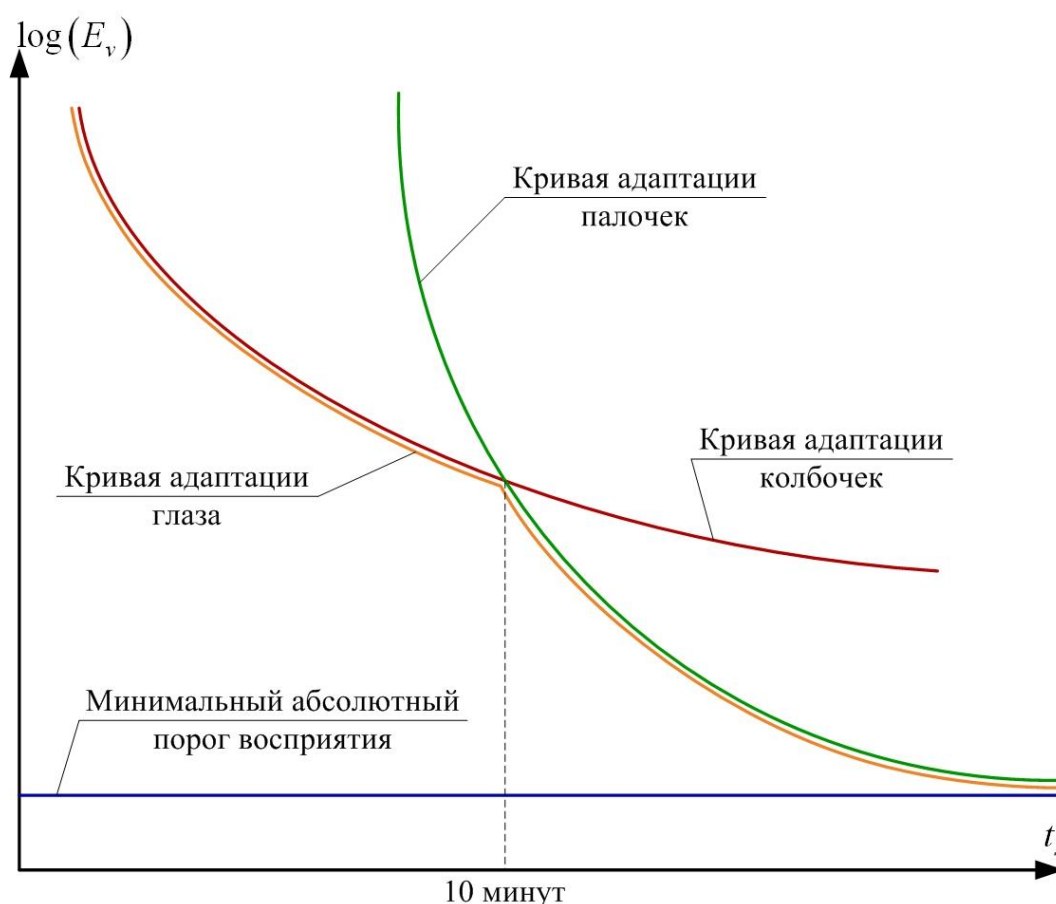


Рисунок 2.2— Кривые адаптации светочувствительных клеток глаза

Адаптация во времени обусловлена скоростью реакции светочувствительных клеток сетчатки на световой стимул. Особенности физиологии восприятия таковы, что колбочки отличаются быстрой, но ограниченной адаптацией, а палочки характеризуются более медленной, но высокой адаптацией. Период адаптации колбочек длится ориентировочно 10 минут (рис. 2.2). Адаптация палочек может продолжаться до полутора часов [1, 4].

Адаптация во времени приводит к тому, что при появлении сильного светового и/или цветового стимула визуальный аппарат воспринимает последовательный цветовой контраст и, соответственно, человек видит дополнительную яркостную и/или цветовую доминанту после исчезновения предыдущей доминанты.

Когнитивный конфликт обусловлен расхождением между сигналами с двух областей мозга – той, которая отвечает за речь, и той, которая управляет зрительным восприятием (рис. 2.3). При тренировке можно его свести к минимуму.

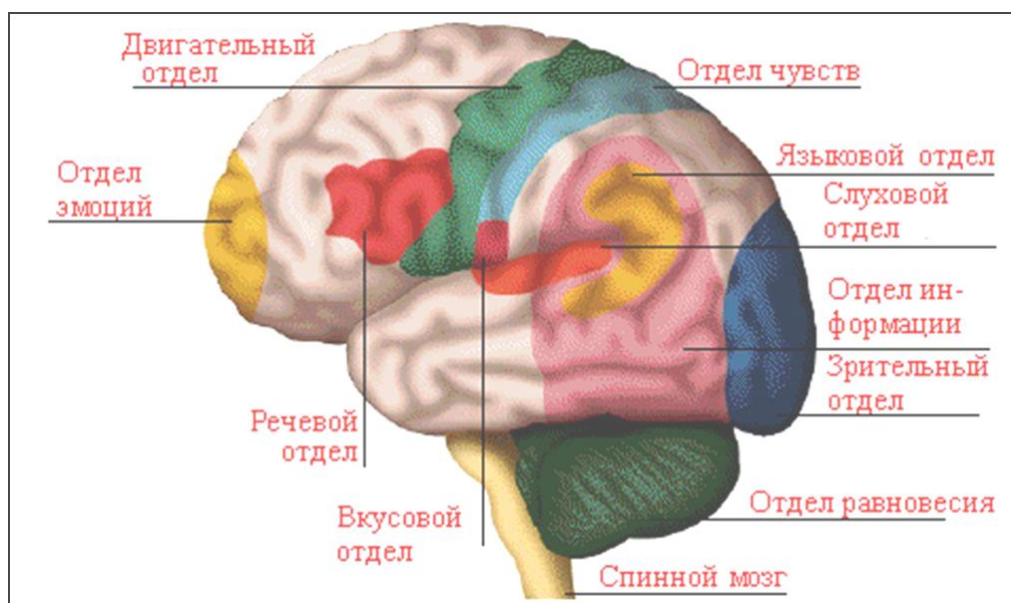


Рисунок 2.3 – Отделы мозга

Данная лабораторная работа предназначена для практического исследования константности цвета, различных типов адаптации зрительного аппарата, а также условий возникновения различного рода визуальных артефактов на реальных примерах при разных условиях.

2.2 Содержание лабораторной работы

Данная лабораторная работа состоит из шести различных серий экспериментов:

- Контраст цветов. Изучаются эффекты зрительного восприятия цветов в присутствии одновременного контраста цветов.
- Двухцветная сетка. Изучается одновременный контраст цветов в присутствии локальной адаптации зрительного аппарата.
- Устойчивость цвета. Изучается последовательный контраст.
- Линии Маха. Изучается локальная адаптация глаза к яркости и синхронный контраст.

– Когнитивный конфликт. Изучаются особенности процесса принятия решения в присутствии когнитивного конфликта между различными свойствами цветового стимула.

– Прыгающий мячик. Изучается синхронный контраст цветов для объектов в движении.

Серии экспериментов можно выполнять в произвольном порядке.

Зайдите в папку Colorimetry\Lab2

2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется индивидуально на компьютере с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного авторами данных методических указаний.

ЧАСТЬ 1. КОНТРАСТ ЦВЕТОВ

Запустите приложение Laba2_1.exe. На главном окне программы есть несколько элементов управления (рис. 2.4).

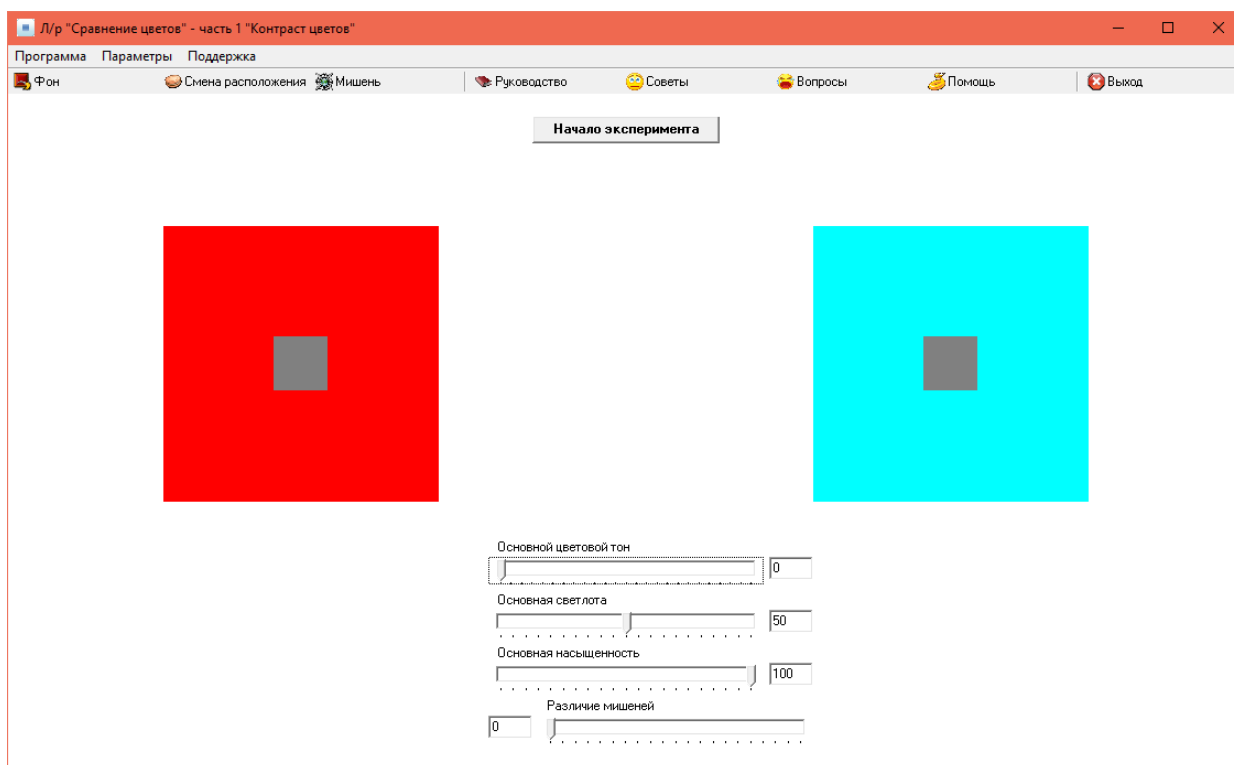


Рисунок 2.4 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Контраст цветов»

Бегунок «Основной цветовой тон» регулирует цветовой тон левой фоновой карточки. Цвет правой фоновой карточки имеет противоположный (по цветовому кругу) цветовой тон.

Бегунок «Основная светлота» регулирует светлоту цветов фоновых карточек.

Бегунок «Основная насыщенность» регулирует насыщенность цветов фоновых карточек.

Бегунок «Различие мишеней» определяет коэффициент различия цветов центральных мишеней. Если цвета одинаковы, то данный коэффициент равен 0.

Форму центральных мишеней можно задать при помощи главного меню, панели инструментов и контекстного меню. Возможны 4 варианта: квадрат, круг, крест, звезда.

Есть возможность изменять положение фоновых карточек при помощи главного меню, панели инструментов, контекстного меню или двойным щелчком левой кнопки мыши по полю. При совмещенном положении карточек их можно переключать при помощи кнопки «Смена».

Также можно менять цвет фона при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед экспериментом попробуйте изменить основные цветовой тон, светлоту и насыщенность фоновых карточек. При каких условиях центральные мишени кажутся одинаковыми?

2. Попробуйте изменить форму центральных мишеней. Форма мишени влияет на её воспринимаемый цвет?

3. Попробуйте изменить коэффициент различия мишеней по цвету.

4. Попробуйте изменить цвет фона. Влияет ли фон на воспринимаемый цвет центральных мишеней.

5. Оцените воспринимаемый цвет центральных мишеней при различных положениях фоновых карточек. Когда цвета центральных мишеней воспринимаются адекватнее?

6. Нажмите на кнопку «Начало эксперимента», пройдите эксперимент на определение различия центральных мишеней. Если мишени кажутся одинаковыми, то нажимайте кнопку «Одинаковы», в противном случае нажимайте на кнопку «Различны». В ходе эксперимента допускается возможность изменять положение фоновых карточек и фон. В итоге появляется процент правильных ответов.

7. Повторите эксперимент, закрыв левый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить».

8. Повторите эксперимент, закрыв правый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить».

9. Закройте приложение.

ЧАСТЬ 2. ДВУЦВЕТНАЯ СЕТКА

Запустите приложение Laba2_2.exe. На главном окне программы есть несколько элементов управления (рис. 2.5).

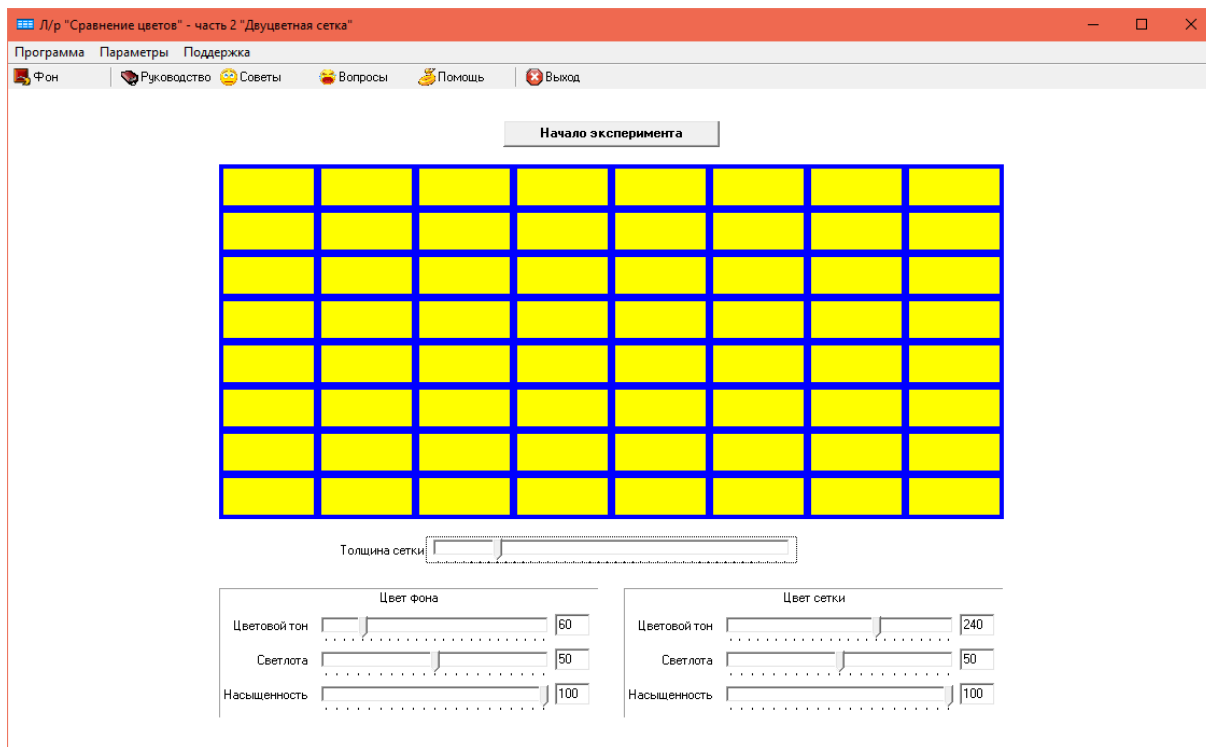


Рисунок 2.5 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Двуцветная сетка»

Бегунок «Толщина сетки» регулирует толщину двуцветной сетки.

Бегунки «Цветовой тон», «Светлота» и «Насыщенность» задают цвет фона или сетки, в зависимости от положения на соответствующей панели: «Цвет фона» или «Цвет сетки».

Есть возможность изменять цвет основного фона экрана при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед экспериментом попробуйте изменить цветовой тон, светлоту и насыщенность фона двуцветной сетки. При каких условиях в перекрестиях сетки возникают артефакты зрительного восприятия (пятна)?

2. Попробуйте изменить цветовой фон, светлоту и насыщенности самой сетки. При каких сочетаниях цветов фона и сетки возникают и пропадают артефакты зрительного восприятия?

3. Попробуйте изменить толщину двуцветной сетки. При каких толщинах сетки возникают и пропадают артефакты зрительного восприятия?

4. Попробуйте изменить цвет основного фона экрана. Влияет ли его цвет на появление артефактов.

5. Нажмите на кнопку «Начало эксперимента», пройдите эксперимент на определение наличия эффектов зрительного восприятия при различных толщинах и сочетаниях цветов двуцветной сетки. Если артефакты присутствуют, то нажимайте кнопку «Артефакты есть», в противном случае нажимайте на кнопку «Артефактов нет». В ходе эксперимента допускается возможность изменять основной фон экрана. В итоге появляется диаграмма возникновения артефактов зрительного восприятия в зависимости от параметров двуцветной сетки. Сохраните полученные результаты, для этого нажмите на кнопку «Сохранить результат».

6. Повторите эксперимент, закрыв левый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить эксперимент».

7. Повторите эксперимент, закрыв правый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить эксперимент».

8. Закройте приложение.

ЧАСТЬ 3. УСТОЙЧИВОСТЬ ЦВЕТА

Запустите приложение Laba2_3.exe. На главном окне программы сразу после запуска отображается первое задание серии экспериментов (рис. 2.6).

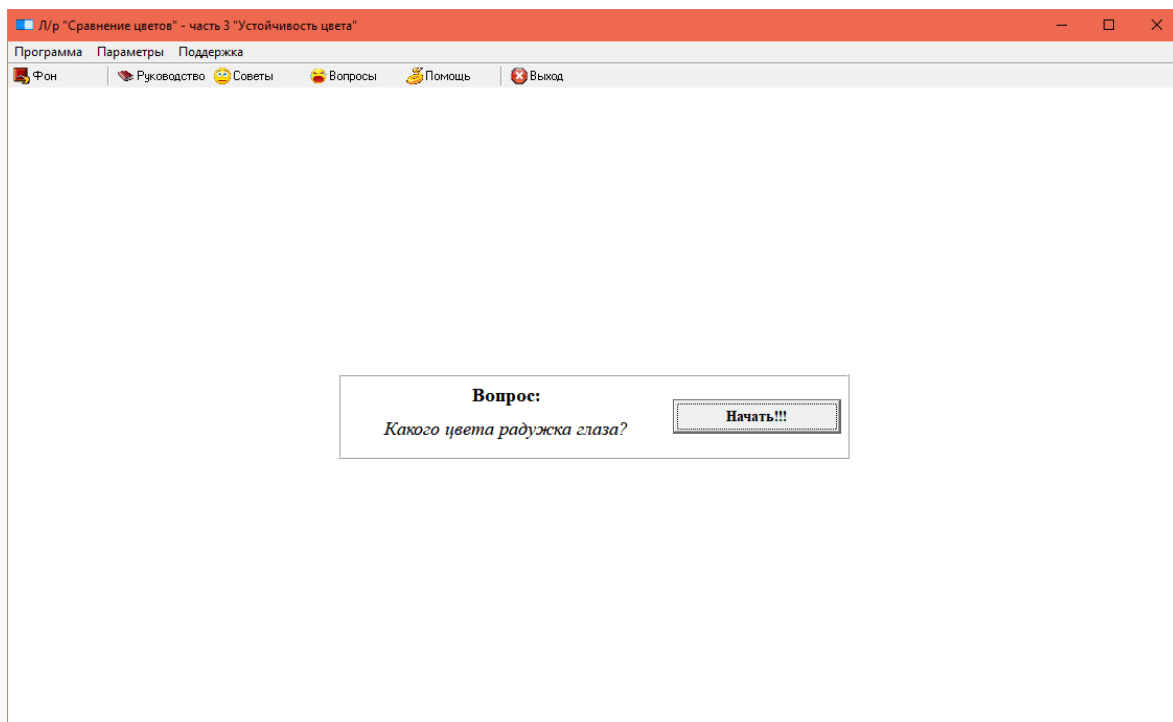


Рисунок 2.6 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Устойчивость цвета»

Есть возможность изменять цвет основного фона экрана при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

В ходе эксперимента необходимо определить ответ на вопрос по возникающей зрительной иллюзии.

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед каждым опытом изменяйте цвет основного фона экрана.
2. Прочитайте и запомните вопрос, появившийся на экране.
3. Для проведения опыта нажмите кнопку «Начать!!!».
4. Во время опыта (примерно 30 секунд) смотрите на черную точку посреди появившегося изображения.
5. После смены изображения продолжайте смотреть на черную точку посреди изображения и определите ответ на вопрос.
6. Введите ответ на вопрос и нажмите кнопку «Готово!!!».
7. Пройдите остальные 8 опытов, повторяя пп.1-6.
8. Сравните ваши ответы с исходниками зрительных иллюзий.
9. Закройте приложение.

ЧАСТЬ 4. ЛИНИИ МАХА

Запустите приложение Laba2_4.exe. На главном окне программы есть несколько элементов управления (рис. 2.7).

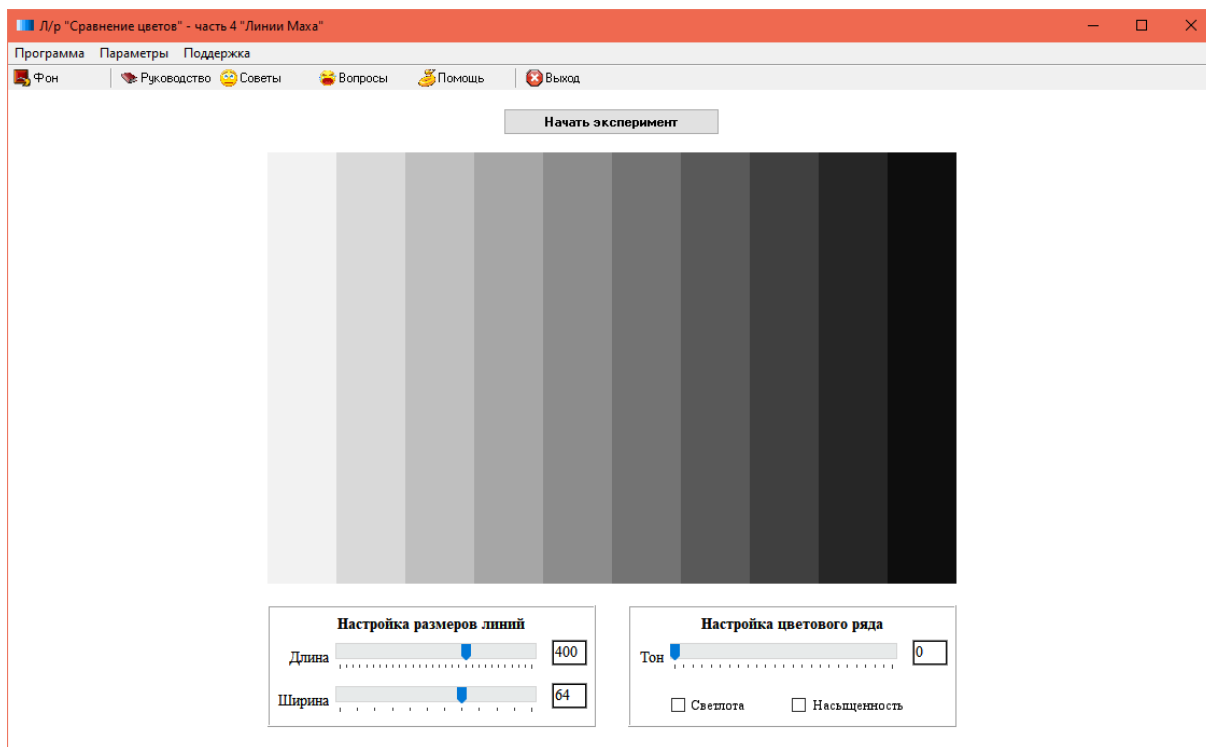


Рисунок 2.7 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Линии Маха»

Бегунки «Длина» и «Ширина» регулируют размеры линий Маха.

Бегунок «Тон» задает цветовой тон линий Маха.

Переключатели «Светлота» и «Насыщенность» определяют ряд линий Маха: только по изменению светлоты, только по изменению насыщенности, по изменению светлоты и насыщенности, ахроматический ряд.

Есть возможность изменять цвет основного фона экрана при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед экспериментом попробуйте изменить цветовой тон линий Маха. Меняется ли что-нибудь?

2. Попробуйте задать цветовой ряд по светлоте и поменять цветовой тон линий Маха. При каких условиях возникает эффект зрительного восприятия (плавный переход цвета)?

3. Задайте различные ряды: по светлоте, по насыщенности, по насыщенности и светлоте. Всегда ли появляется эффект?

4. Попробуйте изменить размеры линий Маха. При каких величинах длины и толщины возникает и пропадает данный эффект зрительного восприятия?

5. Попробуйте изменить цвет основного фона экрана. Влияет ли его цвет на появление эффекта?

6. Нажмите на кнопку «Начать эксперимент», пройдите эксперимент на определение наличия эффекта зрительного восприятия при различных размерах и цветовых параметрах ряда линий Маха. Если эффект присутствует, то нажимайте кнопку «Есть эффект», в противном случае нажимайте на кнопку «Нет эффекта». В ходе эксперимента допускается возможность изменять основной фон экрана. В итоге появляется диаграмма возникновения эффекта для вашего зрительного восприятия в зависимости от параметров линий Маха. Сохраните полученные результаты, для этого нажмите на кнопку «Сохранить результаты».

7. Повторите эксперимент, закрыв левый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить».

8. Повторите эксперимент, закрыв правый глаз платком. Для этого достаточно нажать кнопку «Повторить».

9. Закройте приложение.

ЧАСТЬ 5. КОГНИТИВНЫЙ КОНФЛИКТ

Запустите приложение Laba2_5.exe. На главном окне программы есть несколько элементов управления (рис. 2.8).

Бегунок «Скорость» задает скорость появления слов.

Есть возможность изменять цвет основного фона экрана при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед экспериментом попробуйте изменить скорость появления слов. Определите для себя её оптимальное значение.
2. Попробуйте изменить цвет основного фона экрана. Определите для себя оптимальный цвет фона.
3. Нажмите кнопку «Начать эксперимент».
4. Пройдите первую часть эксперимента, заключающуюся в определении **цвета шрифта** слова. Ответить необходимо за то время, пока заданное слово находится на экране.

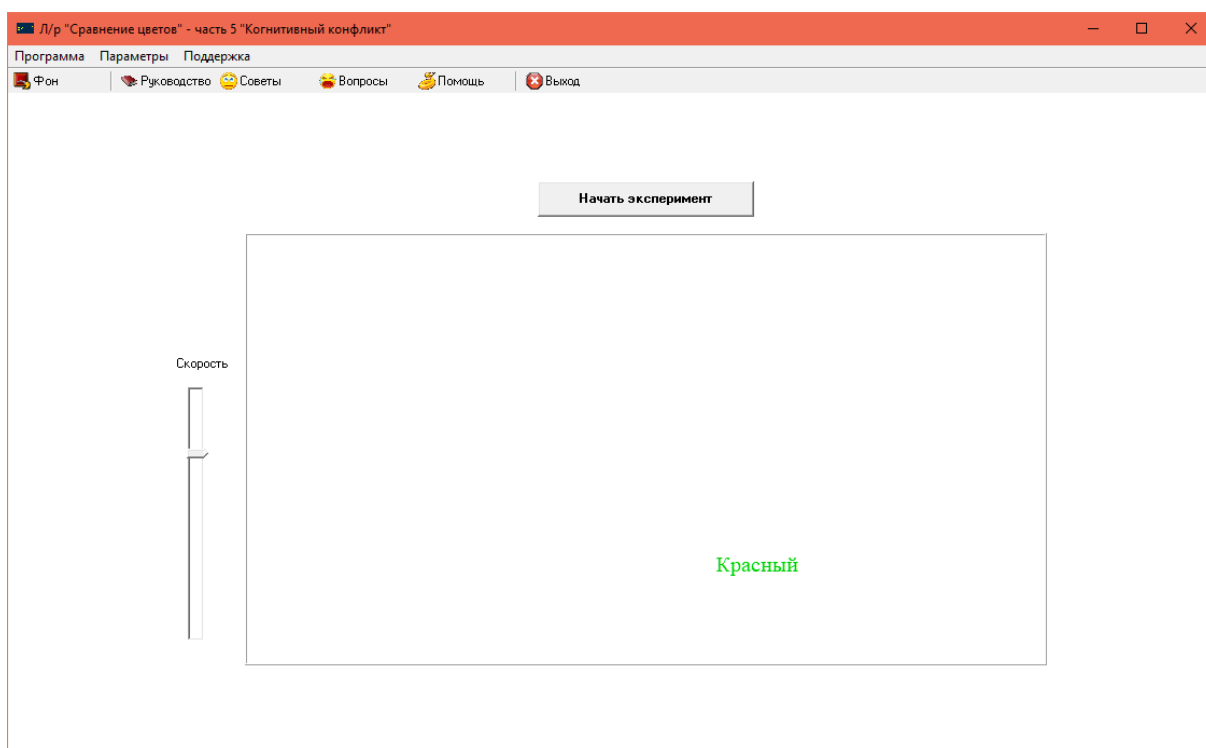


Рисунок 2.8 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Когнитивный конфликт»

5. После первой части эксперимента можно изменить фон экрана.
6. Пройдите вторую часть эксперимента, заключающуюся в определении **цвета, характеризуемого данным словом**. Ответить необходимо за то время, пока заданное слово находится на экране.
7. Оцените ваши результаты.
8. Вы можете повторить эксперимент, увеличив или уменьшив скорость появления слов при помощи соответствующего бегунка.
9. Закройте приложение.

ЧАСТЬ 6. ДИНАМИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ

Запустите приложение Laba2_6.exe. На главном окне программы есть несколько элементов управления (рис. 2.9).

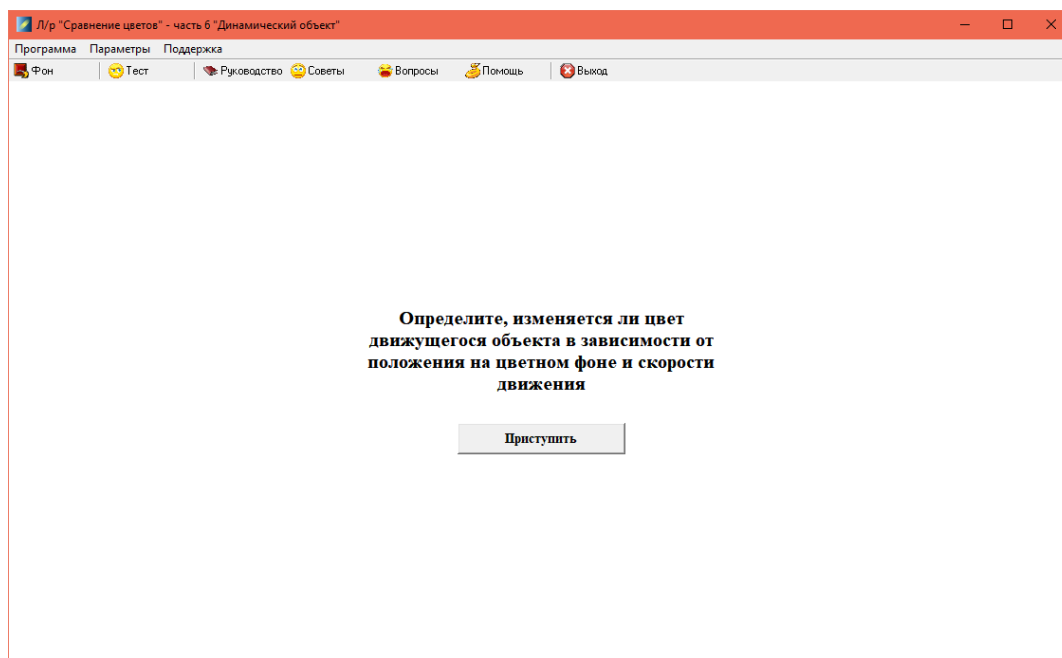


Рисунок 2.9 – Главное окно программы для проведения серии экспериментов «Динамический объект»

Есть возможность изменять цвет основного фона экрана при помощи главного меню, панели инструментов или контекстного меню.

В ходе эксперимента необходимо определить, изменяется ли цвет движущегося объекта на неоднородном фоне при различных скоростях движения.

Порядок выполнения эксперимента

1. В ходе эксперимента меняйте цвет основного фона экрана. Влияет ли фон на восприятие изменения цвета движущегося объекта?
2. На каждом из неоднородных цветовых фонов определите, изменяется ли цвет движущегося объекта. Если изменяется, то нажимайте кнопку «Меняется», если нет – кнопку «Не меняется».
3. Закройте приложение.

2.4 Иконки панели инструментов:








– Задание цвета фона.



– Смена расположения фоновых карточек.



– Смена формы центральных мишеней.

-  – Краткое руководство по данному эксперименту.
-  – Советы по проведению эксперимента.
-  – Вопросы к лабораторной работе.
-  – Помощь.
-  – Выход.

2.5 Вопросы к лабораторной работе

В качестве отчета для данной лабораторной работы принимается аргументированный ответ на один из следующих вопросов с использованием полученных результатов проведения серий экспериментов.

1. Контраст цветов

- При каких условиях наблюдается наибольший эффект опыта?
- Почему центральные элементы кажутся окрашенными в разный цвет?
- Изменяется ли восприятие цвета центрального элемента при быстром мелькании фоновых квадратов? Почему?

2. Двухцветная сетка

- Какой эффект возникает на изображении сетки?
- При каких условиях он возникает?
- Как его можно объяснить?

3. Устойчивость цвета

- Как изменяются закрытые прямоугольниками рисунки в ходе проведения опыта?
- Изменяется ли цвет белой точки, когда вы внимательно смотрите на нее в течение 30 секунд?
- Как можно объяснить возникающий эффект?

4. Линии Маха

- Какое явление возникает в полосах Маха?
- Как его можно объяснить?
- Почему оно возникает?

5. Когнитивный конфликт

- Каковы результаты первого и повторного тестов?
- В чем состоит эффект когнитивного конфликта?
- Можно ли указанный эффект устранить?

6. Прыгающий мячик

- Возникает ли впечатление, что мячик изменяет свой цвет?
- Оставляет ли мячик след во время движения? Почему?
- От каких факторов может зависеть данный эффект?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. ДИАГРАММЫ МКО

Цель работы: изучение особенностей диаграмм МКО.

3.1 Теоретические сведения

Цветовые параметры излучения источников излучения, также как цветовые параметры непрозрачных, полупрозрачных и прозрачных объектов, характеризуются координатами цвета в **цветовом пространстве МКО 1931 г.** (\bar{x} , \bar{y} , \bar{z}), координатами цветностей на **цветовой диаграмме МКО 1931 г.** (x , y) и координатами цветностей на **цветовой диаграмме МКО 1976 г.** (u' , v') [4, 5].

Расчет координат цветностей на цветовой диаграмме МКО 1931 г. Чтобы упростить представление определяемых цветов, используется цветная диаграмма МКО 1931 г [10] (рис. 3.1). Точка \vec{E} обозначает цвет белой поверхности, освещенной источником типа E (точка белого цвета).

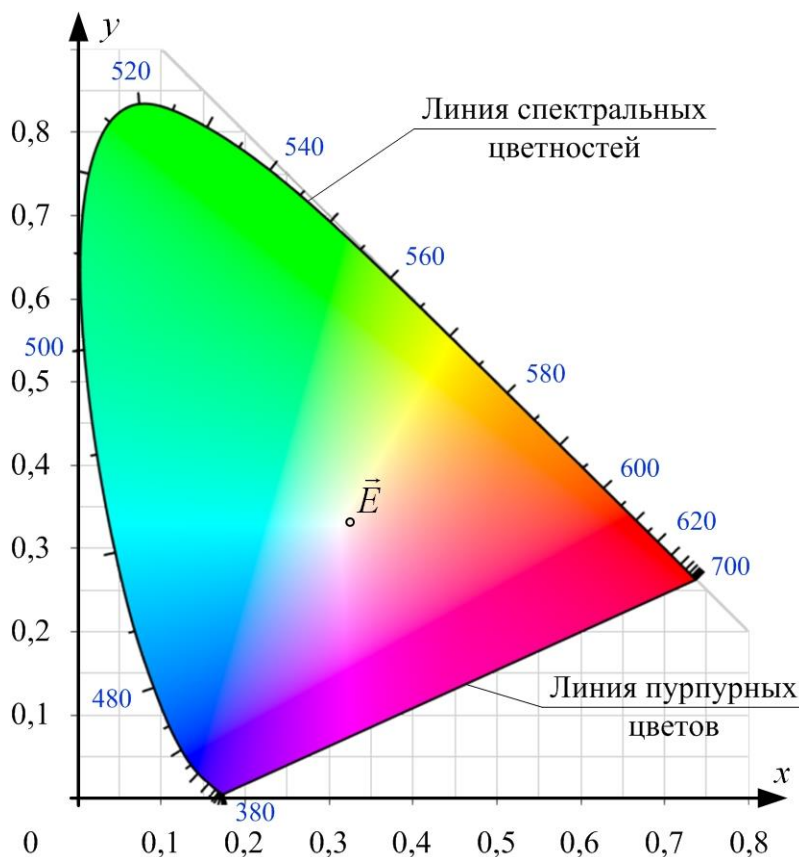


Рисунок 3.1 – Цветовая диаграмма МКО 1931 г.

Для её построения используются координаты цветностей x , y и z – относительные цветовые координаты

$$x = \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}$$

$$y = \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}}, \quad (3.1)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения.

При этом учитывается соотношение координат цветностей

$$x + y + z = 1,$$

поэтому для представления цвета на цветовой диаграмме МКО 1931 г. используют только координаты цветностей (x, y) . Поскольку цвет определяется тремя параметрами, то к координатам цветностей (x, y) часто добавляют цветовую координату \bar{y} в качестве характеристики яркости.

Расчет координат цвета в цветовом пространстве МКО 1976 г. СIE $Lu'v'$ Попытки привести цветовую диаграмму МКО 1931 г к такому виду, чтобы эллипсы Мак-Адама приняли форму окружностей, привели к созданию цветовой диаграммы МКО 1976 г. (рис. 3.2). Данный цветовой график считается равноконтрастным, т. е., в нем расстояние между любыми двумя точками пропорционально числу порогов цветоразличения.

Данное цветовое пространство описывается одной координатой цвета L и двумя координатами цветностей u' и v' . Обычно в качестве точки белого используется стандартный источник типа E .

При этом координата цвета L характеризует яркость источника и приравнивается к цветовой координате \bar{y}

$$L = \bar{y},$$

координаты цветностей (u', v') рассчитываются по следующим соотношениям [11]:

$$u' = \frac{4\bar{x}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}$$

$$v' = \frac{9\bar{y}}{\bar{x} + 15\bar{y} + 3\bar{z}}, \quad (3.2)$$

где \bar{x} , \bar{y} и \bar{z} – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения. Третья координата цветности $w' = 1 - u' - v'$.

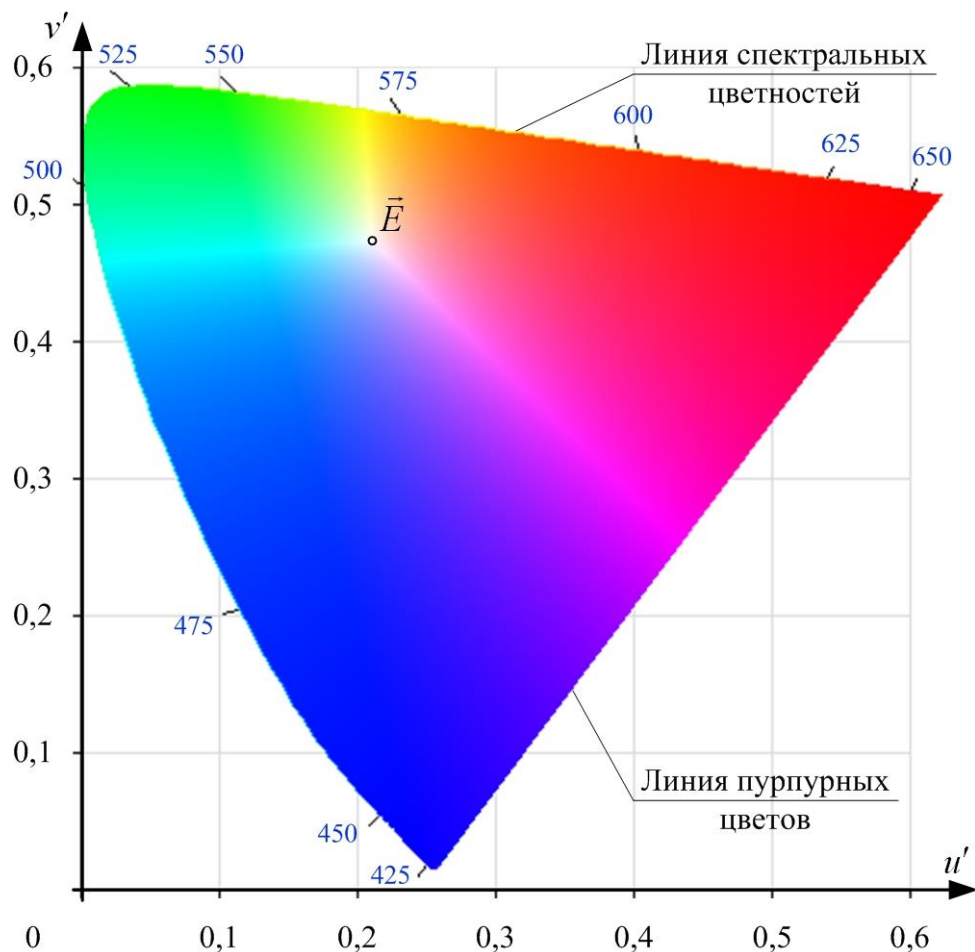


Рисунок 3.2 – Цветовая диаграмма МКО 1976 г.

Координаты цветностей (u', v') можно также рассчитать по известным значениям координат цветностей (x, y) на диаграмме 1931 г. следующим образом [10]:

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad (3.3)$$

С подробной информацией по расчету координат цвета в цветовых пространствах МКО и особенностями диаграмм МКО можно ознакомиться в учебном пособии к лекционному курсу [4].

3.2 Содержание лабораторной работы

Данная лабораторная работа состоит из восьми разделов [4, 12]:

– Пространство по стандартам МКО 1931 года (Пространство CIE 1931 xY).

– Пространство по стандартам МКО 1960 года (Пространство CIE 1960 Luv).

- Пространство по стандартам МКО 1976 года (Пространство CIE 1976 Lu'v').
- Эллипсы Мак-Адама.
- Кривые сложения XYZ.
- Кривые сложения R'V'B'.
- Спектры излучения люминофоров экранов (Системы).
- Стандартные источники света (Источники).

Зайдите в папку Colorimetry\Lab3

3.3 Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется индивидуально на компьютере с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного авторами данных методических указаний.

Серии экспериментов можно выполнять в произвольном порядке.

Запустите приложение Laba3.exe.

1. Пространство по стандартам мко 1931 года

Вкладка «Пространство CIE 1931 xyY».

Справа находится меню «Опции»:

В локальном меню «Системы» можно выбрать отображение пространства по различным нормам:

- Система основных цветов МКО.
- Норма ФКС США.
- Люминофоры с длительным послесвечением.
- Люминофоры с коротким послесвечением.
- SMPTE C 1979.
- SMPTE240M.
- EBU.
- DELL.
- CCIR 709.
- Apple RGB.
- Adobe RGB.
- Color Match.
- sRGB.
- Wide Gamut DLP.
- Wide Gamut Laser.
- Pro RGB.
- Локус.

В локальном меню «Источники света» можно выбрать отображение пространства в зависимости от стандартного осветителя: А, В, С, D50, D65, D75, D93, Е, F2 (CWF), F7, F11, Хе, без осветителя.

В локальном меню «Стандартный наблюдатель» вы можете выбрать отображение пространства в зависимости от угла зрения наблюдателя: 2°(1931) или 10°(1964).

В локальном меню «Настройки» можно включить или отключить следующие опции:

- Длины волн.
- Оси.
- Сетка.
- Гамма-коррекция.
- Черное тело.

1. Сравните два локуса (для углов зрения в 2° и 10°).
2. Просмотрите различные отображения пространства по различным нормам.
3. Оцените положение и цветовую температуру точки белого для различных норм.
4. Определите стандартный источник света, излучающий белый свет для каждой нормы.

2. Пространство по стандартам МКО 1960 года

Вкладка «Пространство CIE 1960 Luv».

Меню «Опции» аналогично предыдущему разделу.

1. Сравните два локуса (для углов зрения в 2° и 10°).
2. Просмотрите различные отображения пространства по различным нормам.
3. Оцените положение и цветовую температуру точки белого для различных норм.
4. Определите стандартный источник света, излучающий белый свет для каждой нормы.

3. Пространство по стандартам МКО 1976 года

Вкладка «Пространство «CIE 1976 Lu'v'».

Меню «Опции» аналогично предыдущему разделу.

1. Сравните два локуса (для углов зрения в 2° и 10°).
2. Просмотрите различные отображения пространства по различным нормам.
3. Оцените положение и цветовую температуру точки белого для различных норм.
4. Определите стандартный источник света, излучающий белый свет для каждой нормы.

4. Эллипсы Мак-Адама

Вкладка «Эллипсы Мак-Адама».

Справа находится меню «Опции».

С помощью бегунка «Размер эллипсов» можно изменять масштаб визуализации эллипсов.

В локальном меню «Пространство МКО» можно выбрать одно из двух пространств:

- МКО xuY .
- МКО $Lu'v'$.

В локальном меню «Стандартный наблюдатель» можно выбрать отображение пространства в зависимости от угла зрения наблюдателя: $2^\circ(1931)$ или $10^\circ(1964)$.

В локальном меню «Настройки изображения» можно включить или отключить следующие опции:

- Длина волны.
- Оси.
- Сетка.
- Эллипсы в цвете.

1. Оцените изменения порогов различения эталонных цветов для двух пространств МКО.

2. Определите влияние на пороги значения угла зрения наблюдателя.

5. Кривые сложения XYZ

Вкладка «Кривые сложения XYZ».

В меню справа вы можете выбрать отображение графиков кривых сложения в зависимости от угла наблюдения стандартного наблюдателя: $2^\circ(1931)$ или $10^\circ(1964)$.

Оцените изменения кривых.

6. Кривые сложения RVB

Вкладка «Кривые сложения RVB».

Справа находится меню «Опции».

В локальном меню «Системы» можно выбрать отображение диаграммы по различным нормам:

- Система основных цветов МКО.
- Норма ФКС США.
- Люминофоры с длительным послесвечением.
- Люминофоры с коротким послесвечением.
- SMPTE C 1979.
- SMPTE 240M.
- EBU.

- DELL.
- CCIR 709.
- Apple RGB.
- Adobe RGB.
- Color Match.
- sRGB.
- Wide Gamut DLP.
- Wide Gamut Laser.
- Pro RGB.
- Без нормы.

В локальном меню «Стандартный наблюдатель» можно выбрать отображение диаграммы в зависимости от угла зрения наблюдателя: 2° (1931) или 10° (1964).

1. Оцените изменения кривых при различных нормах для двух углов зрения наблюдателя.

2. Оцените изменения кривых для различных норм. В чем они выражаются?

7. Спектры излучения люминофоров экранов

Вкладка «Системы».

Справа находится меню «Данные». Можно выбрать различные виды систем:

- Средние ЭЛТ для широкого вещания.
- Sony PVM.
- Sony HD.
- DELL LCD.
- APPLE CRT.
- BARCO TRI DLP.
- MONO DLP для широкого вещания.

С помощью курсора мыши можно включить или отключить опцию отображения относительной яркости RGB.

Изучите спектральные кривые относительной и абсолютной яркости люминофоров различных систем.

8. Стандартные источники света

Вкладка «Источники».

Можно выбрать тип стандартного осветителя в локальном меню «Источники»: А, С, D50, D55, D65, D75, Е.

Сравните спектральные кривые излучения различных стандартных источников света.

3.4 Иконки панели инструментов



– Задание цвета фона.



– Краткое руководство по данной лабораторной работе.



– Советы по проведению лабораторной работы.



– Вопросы к лабораторной работе.



– Помощь.



– Выход.

3.5 Вопросы к лабораторной работе

В качестве отчета для данной лабораторной работы принимается аргументированный ответ на один из следующих вопросов с использованием полученных результатов проведения серий экспериментов.

1. В чём выражается различие между локусами в пространствах по стандартам МКО 1931, 1960 и 1976 годов для углов зрения наблюдателя в 2° и 10° ? Почему?

2. Как в пространствах МКО 1931, 1960 и 1976 годов изменяются их отображения для различных норм? Одинаково ли изменяются отображения для различных норм в пространствах МКО? Почему?

3. Всегда ли точка белого цвета в отображении пространств МКО для различных норм находится на линии цветových температур? Почему? Какой стандартный источник белого света соответствует точке белого каждой из рассмотренных норм?

4. Изменяются ли эллипсы Мак-Адама при различных углах зрения наблюдателя? Почему? Как изменяется форма и положение эллипсов Мак-Адама при переходе от пространства МКО 1931 г. к пространству 1976 г.?

5. В чем выражается изменение кривых сложения $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ и R, G, B при изменении угла зрения наблюдателя? Что является причиной данного изменения? Как, в общем, отличаются кривые $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ от кривых R, G, B ? Почему? Насколько существенны изменения графиков R, G, B для различных норм? Чем они могут быть вызваны?

6. Похожи ли спектры излучения люминофоров различных систем на кривые сложения? Можно ли люминофоры различных систем отождествить с узкоспектральными источниками излучения (например,

светодиодом)? Как вы думаете, можно ли оценить параметры свечения люминофоров с помощью цветовой температуры?

7. Есть ли что-либо общее между спектрами излучения стандартных источников? Как вы думаете, чем вызваны различия? Зачем вообще понадобилось такое количество эталонов «белого» излучения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ КООРДИНАТ СВЕТОДИОДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ИХ СПЕКТРУ

Цель работы: изучить с особенностями практического расчета цветковых параметров излучения реальных источников по измеренным спектральным характеристикам.

4.1 Теоретические основы расчета цветковых параметров излучения источников

Для заданного спектрального распределения излучения источника $P_\lambda(\lambda)$ координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г. можно рассчитать по выражениям [4, 13]:

$$\begin{aligned} X &= k_c \int_0^{\infty} P_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= k_c \int_0^{\infty} P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z &= k_c \int_0^{\infty} P_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (4.1)$$

где $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ – кривые сложения, k_c – множитель.

Поскольку кривые сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ обычно задаются относительными значениями ординат, рассчитанные по ним координаты цвета также будут иметь относительных характер [14, 15]. Во многих случаях, когда цель расчета заключается в определении координат цветности, этого достаточно. Поэтому общий множитель k можно опустить. Когда же процесс представляет абсолютная количественная мера цвета, обычно измеряется его яркость. Для расчета абсолютных значений яркости используется соотношение, устанавливающее, что 1 Вт монохроматического потока излучения с длиной волны 555 нм равен 683 лм светового потока [16, 17]. Относительную яркость можно оценить при расчете координат цвета, выбрав

$$k_c = \frac{100}{\int_0^{\infty} P_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}. \quad (4.2)$$

Следовательно, для источника излучения всегда цветковая координата

$$Y = \frac{100}{\int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \cdot \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

численно равна 100.

При численном определении координат цвета выражение (4.1) не используется, так как ни кривые сложения, ни спектральные характеристики излучения, как правило, не являются простыми функциями, удобными для интегрирования. Кроме того, кривые сложения задаются таблично для дискретных значений длин волн (Приложение 1). Поэтому при практических расчетах интегрирование (4.1) заменяют суммированием соответствующих произведений для ряда длин волн, то есть:

$$\begin{aligned} X &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \\ Y &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda, \\ Z &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda \end{aligned} \quad (4.4)$$

при этом

$$k_c = \frac{100}{\sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda}. \quad (4.5)$$

Существуют два способа расчета координат цвета по формулам (4.4):

- способ взвешенных ординат и
- способ избранных ординат.

4.1.1 Способ взвешенных ординат

При использовании **способа взвешенных ординат** суммируются произведения $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{x}(\lambda_i)$, $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{y}(\lambda_i)$ и $P_{\lambda}(\lambda_i) \bar{z}(\lambda_i)$ для ряда значений длин волн видимого спектра с одинаковым интервалом $\Delta\lambda$. В большинстве случаев вполне достаточная точность расчета обеспечивается с интервалом 10 нм. При спектральных характеристиках излучения с крутыми склонами прибегают к суммированию с интервалом 5 нм, а при плавных характеристиках иногда оказывается достаточной точность расчетов и с интервалом 20 нм. В общем, при выборе размера спектрального интервала для расчета координат цвета можно придерживаться правила, что этот интервал должен быть таким, чтобы использование меньшего интервала существенно не влияло на результат расчета. Для источников с узким спектром излучения, в частности светодиодов, имеет смысл суммировать с интервалом в 1 нм [4, 18-20].

Расчеты координат цвета по (4.4) представляют собой, очевидно, приближенное определение площадей под кривыми $P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)$. Эти площади разбиваются на участки шириной $\Delta\lambda$, а последние аппроксимируются прямоугольниками, как показано на рис. 4.1, при $\Delta\lambda = 20$ нм. Высоты прямоугольников равны значениям функции $P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)$ для длин волн, находящихся в середине интервалов $\Delta\lambda$.

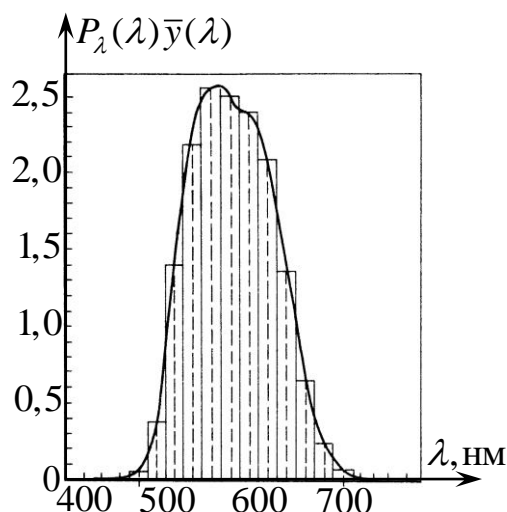


Рисунок 4.1 – К иллюстрации расчета координат цвета по способу взвешенных ординат

В расчетах по (4.4) ординаты функции спектрального распределения излучения взвешиваются тремя функциями сложения, поэтому данный способ расчета называется способом взвешенных ординат.

4.1.2 Способ избранных ординат

Метод **избранных ординат** основан на том, что интервал $\Delta\lambda$ делается переменным, и его значения по спектру можно подобрать таким образом, чтобы произведения $P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)$ были одинаковыми для всех i . Тогда значение произведения можно вынести за знак суммы, и формула при расчленении спектра на n интервалов имеет вид:

$$\begin{aligned}
 X &= k [P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)\Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i \\
 Y &= k [P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)\Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i . \\
 Z &= k [P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)\Delta\lambda_i] \sum_{i=1}^n i
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Значения произведений перед знаком суммы различны для каждой кривой сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ и для каждого источника излучения.

Из (4.6) видно, что расчет координаты цвета сводится в основном к суммированию n ординат, взятых для определенных заранее установленных длин волн λ_i – избранных ординат. После этого каждое из трех полученных значений умножается на свой множитель. Эти множители, как видно по (4.5), равны значениям соответствующих координат цвета источника излучения, умноженным на k/n . Таким образом,

$$\begin{aligned} X &= \frac{k}{n} X_P \sum_{i=1}^n i \\ Y &= \frac{k}{n} Y_P \sum_{i=1}^n i \quad . \\ Z &= \frac{k}{n} Z_P \sum_{i=1}^n i \end{aligned} \quad (4.7)$$

Длины волн λ_i для избранных ординат выбирают следующим образом. Для каждого из трех сочетаний одной из кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ со спектральным распределением источника излучения по своему весь видимый спектр разбивают на n участков таким образом, чтобы площади под каждой из кривых $P_\lambda(\lambda_i)\bar{x}(\lambda_i)$, $P_\lambda(\lambda_i)\bar{y}(\lambda_i)$ и $P_\lambda(\lambda_i)\bar{z}(\lambda_i)$ на этих участках были одинаковыми. В качестве λ_i берут значения длин волн, соответствующие ординатам, делящим эти площади пополам. Коэффициент k выбирают, как и в (4.1), из условия, чтобы координата Y численно равнялась значению коэффициента яркости в процентах. Из (4.3) видно, что $k=100/Y$. Подставив это значение k в (4.7), получаем:

$$\begin{aligned} X &= \frac{100}{n} \cdot \frac{X_P}{Y_P} \sum_{i=1}^n i \\ Y &= \frac{100}{n} \cdot \frac{Y_P}{Y_P} \sum_{i=1}^n i \quad . \\ Z &= \frac{100}{n} \cdot \frac{Z_P}{Y_P} \sum_{i=1}^n i \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таким образом, можно считать, что при определении координат цвета по способу избранных ординат также находятся площади под тремя кривыми, получающимися при взвешивании кривой результирующего спектрального распределения излучения источника тремя функциями сложения, но, в отличие от способа взвешенных ординат, участки площадей под кривыми аппроксимируются прямоугольниками неравной

ширины. Если изменить шкалу длин волн графика таким образом, чтобы эти прямоугольники имели одинаковую ширину, для нахождения координаты цвета достаточно было бы определить площадь по спектральной характеристике излучения, построенной на таком графике.

Видоизменение шкалы длин волн для каждой комбинации кривой сложения и источника излучения различно, как различно расположение избранных ординат по шкале длин волн для каждой такой комбинации.

4.1.3 Расчет координат цветности

Координаты цветности излучения определяются по соотношениям:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (4.9)$$

где X , Y и Z – координаты цвета в цветовом пространстве МКО 1931 г., которые могут быть рассчитаны по спектральным характеристикам излучения анализируемого источника при помощи кривых сложения.

4.2 Порядок выполнения лабораторной работы

1. Получить у преподавателя набор из трёх различных светодиодов.
2. Поместить один из светодиодов на посадочное место установки по исследованию светодиодов (рис. 4.2).

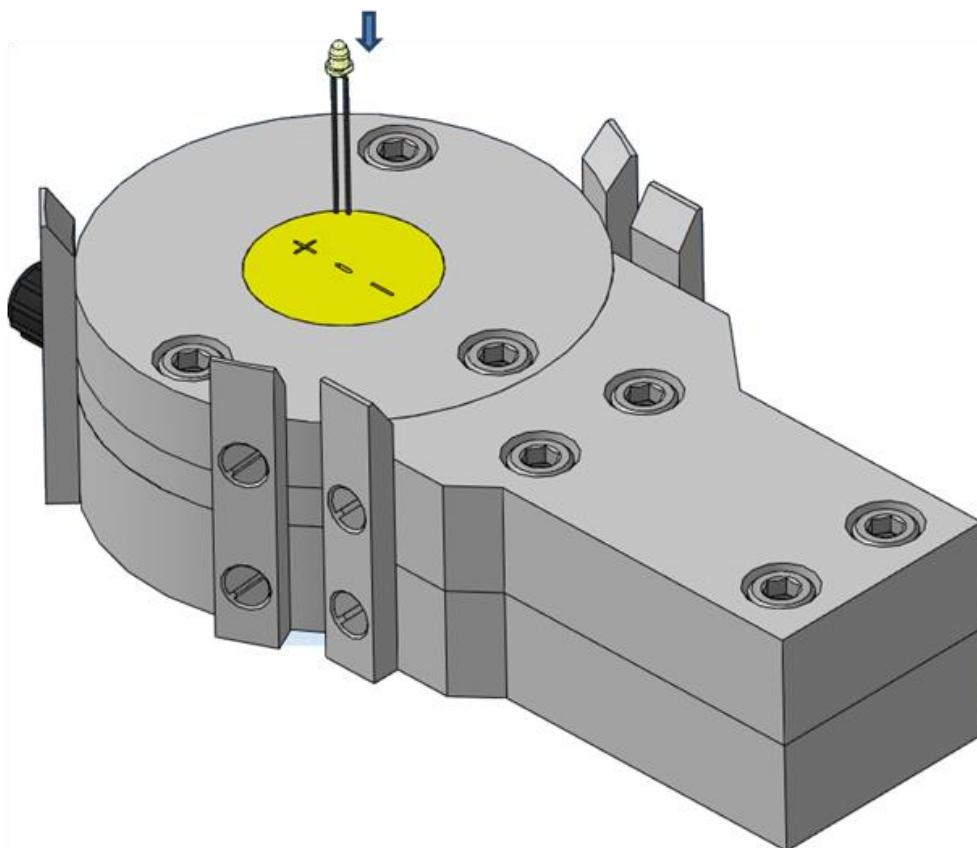


Рисунок 4.2 – Посадочное место установки по исследованию светодиодов

3. Запустить программное обеспечение SpectraSuite.
4. Накрыть светодиод интегрирующей сферой S-I-50 фирмы OceanOptics, соединённой со спектрометром USB4000.
5. Включить блок питания светодиода.
6. Произвести измерение спектра излучения светодиода при помощи программного обеспечения SpectraSuite.
 - 6.1. На главном окне программы выбрать абсолютное измерение (рис. 4.3).
 - 6.2. На открывшейся первой странице мастера абсолютного измерения необходимо указать график (лучше - новый), на котором будет отражаться измеряемый откалиброванный спектр (рис. 4.4) и нажать на кнопку «Next».
 - 6.3. На открывшейся второй странице мастера абсолютного измерения необходимо выбрать марку спектрометра, с которым производится работа (рис. 4.5) и нажать на кнопку «Next».

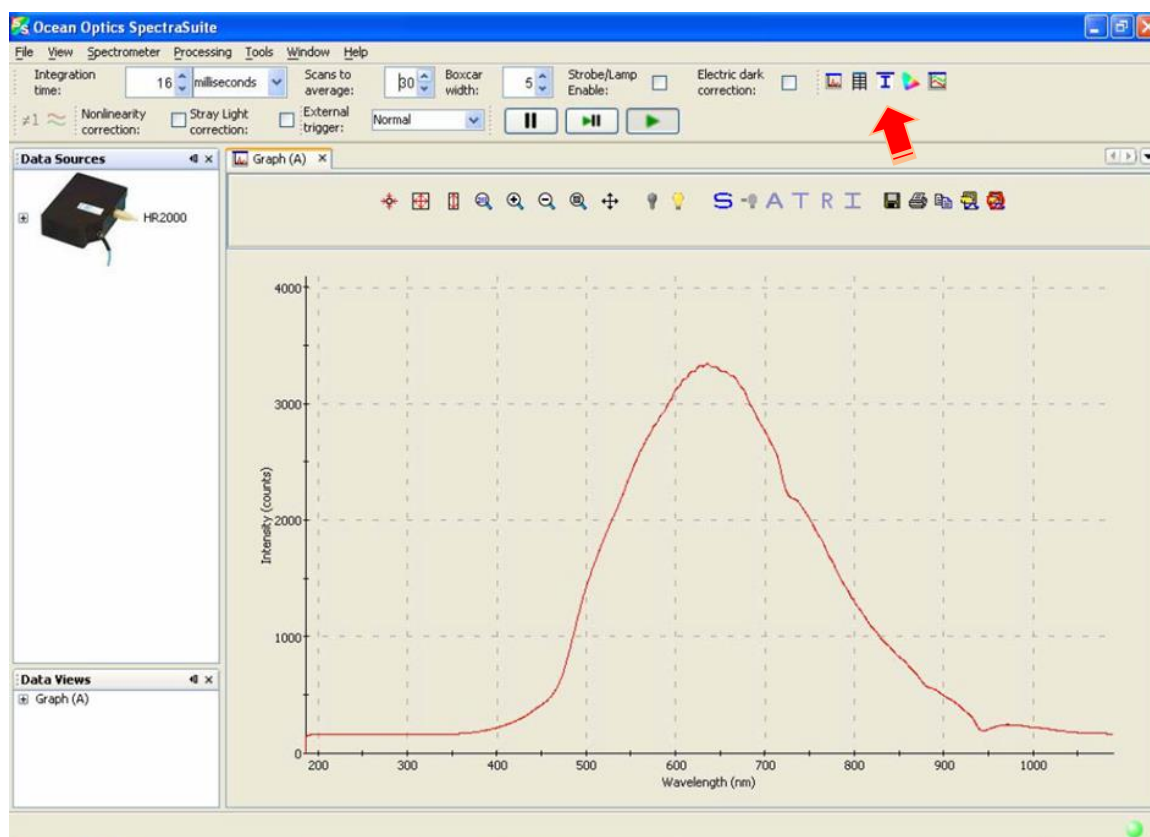


Рисунок 4.3 – Главное окно программного обеспечения SpectraSuite

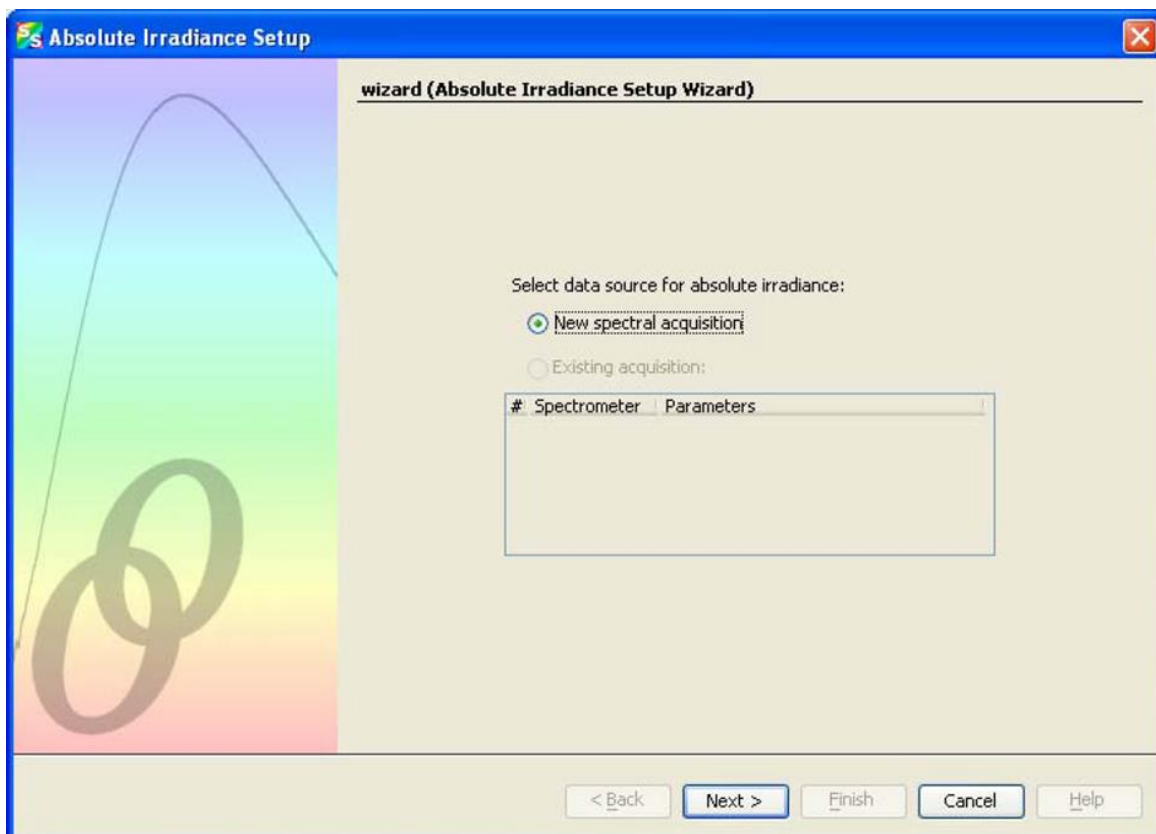


Рисунок 4.4 – Первая страница мастера абсолютного измерения

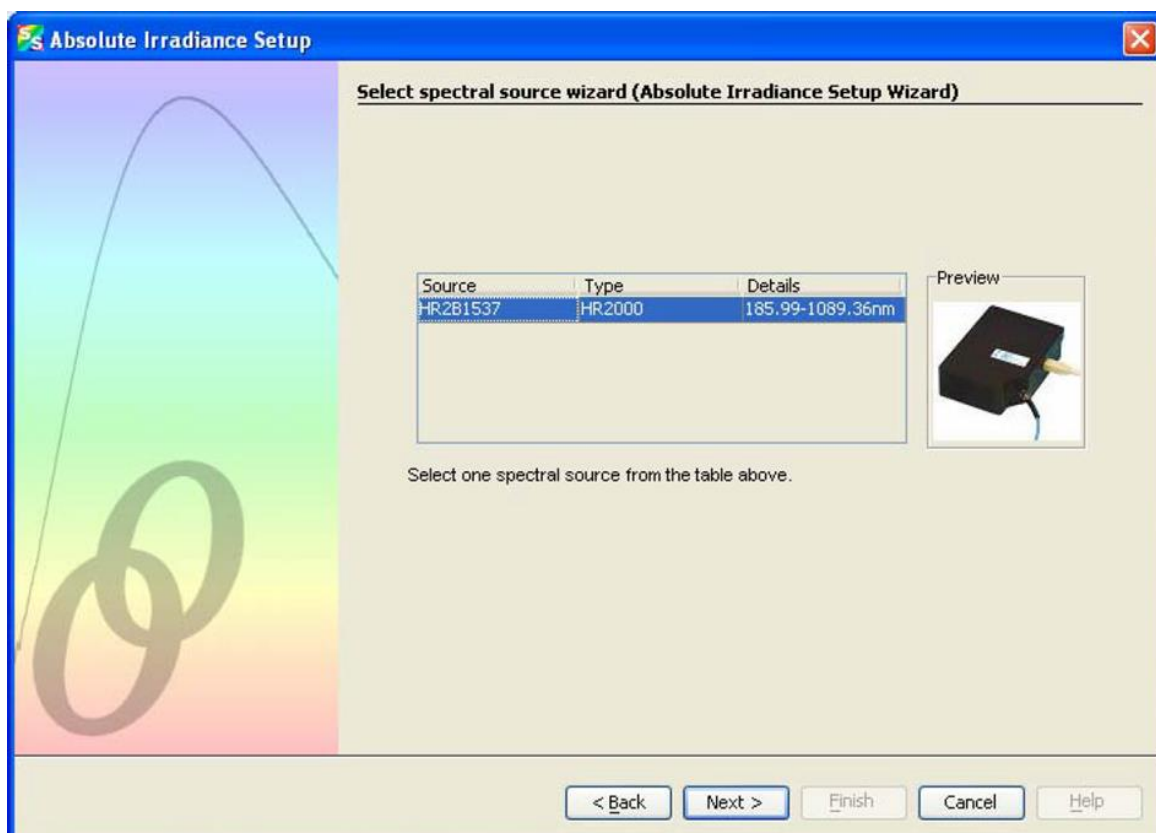


Рисунок 4.5 – Вторая страница мастера абсолютного измерения

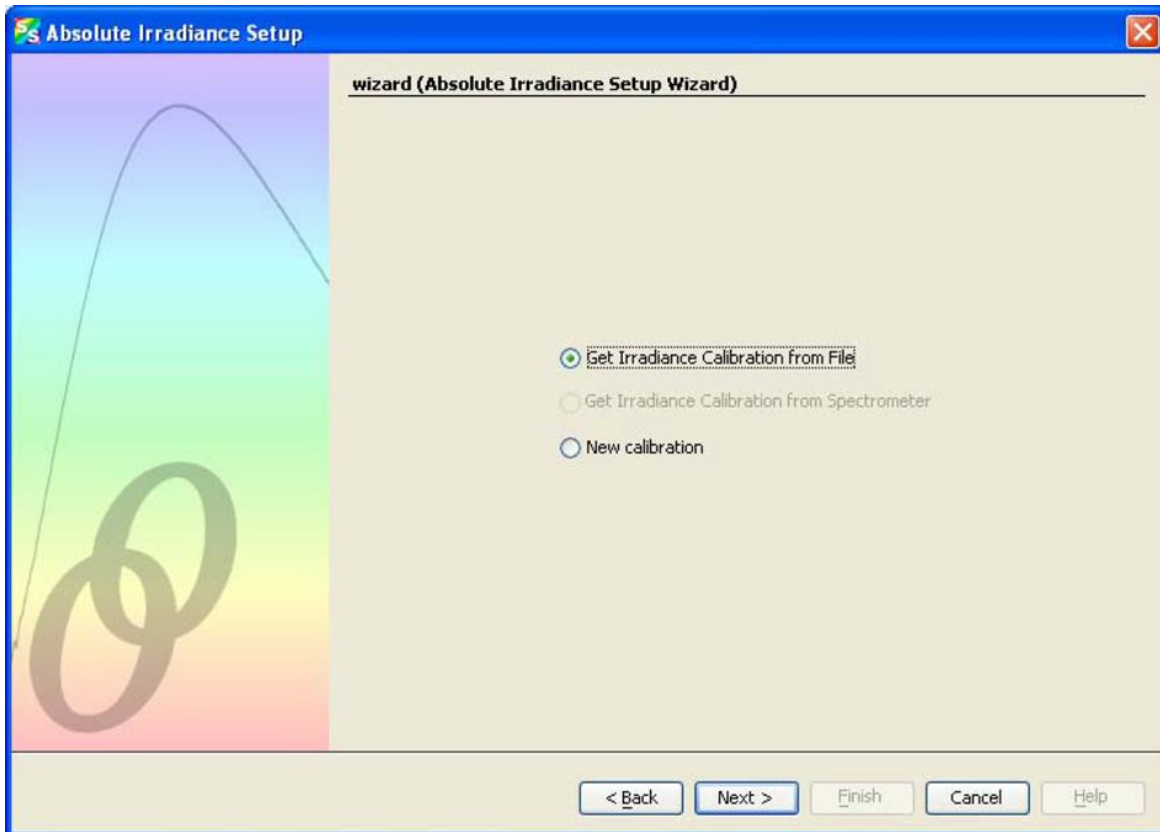


Рисунок 4.6 – Третья страница мастера абсолютного измерения

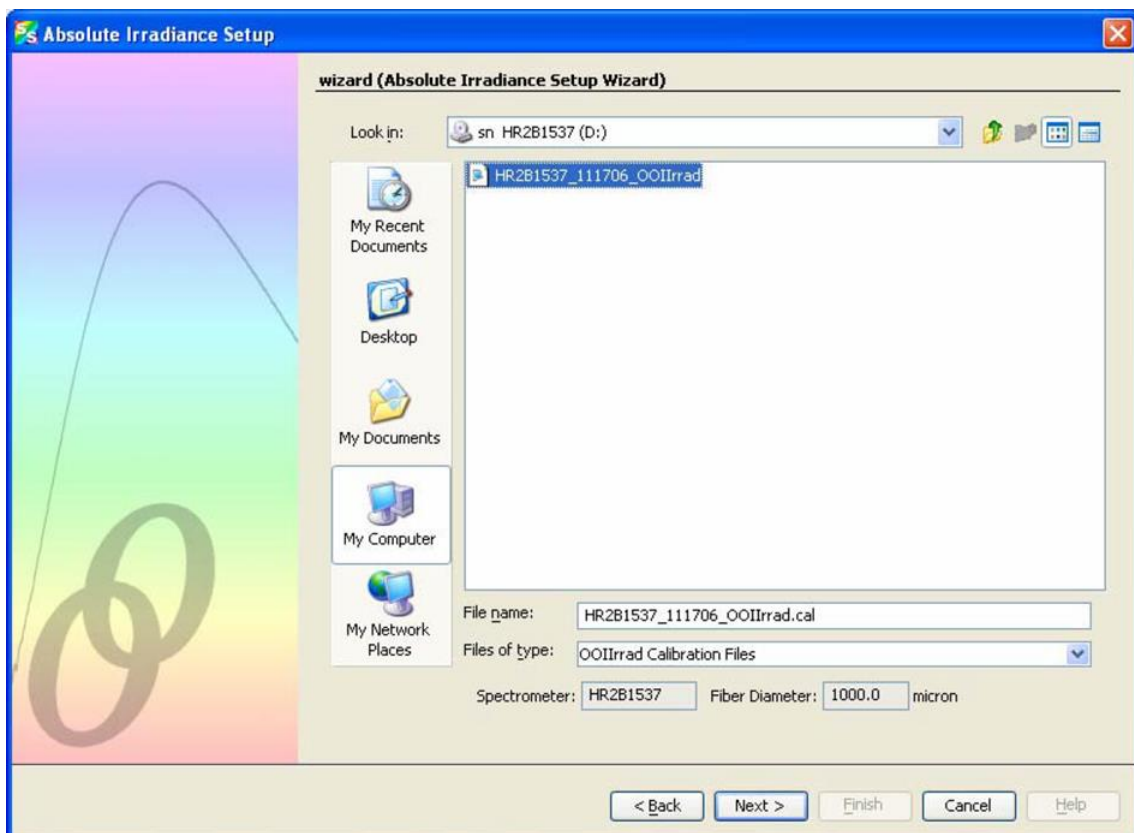


Рисунок 4.7 – Диалог выбора калибровочного файла

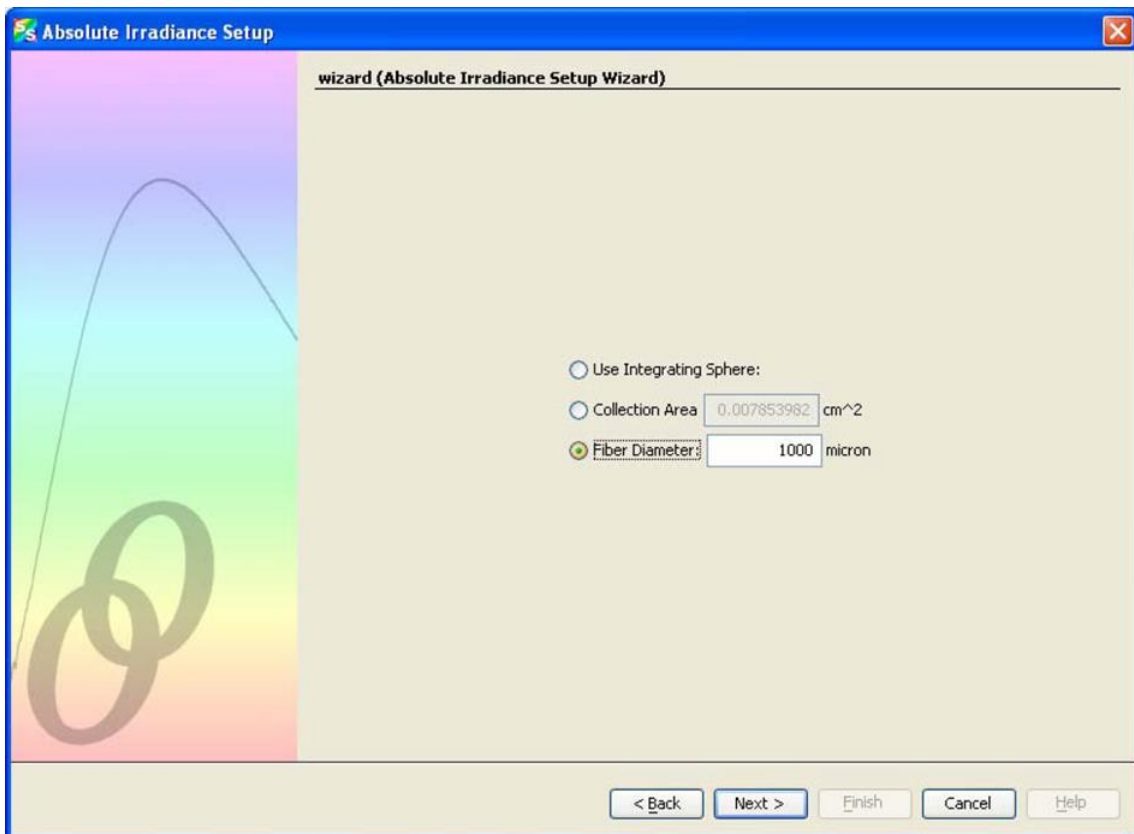


Рисунок 4.8 – Четвертая страница мастера абсолютного измерения

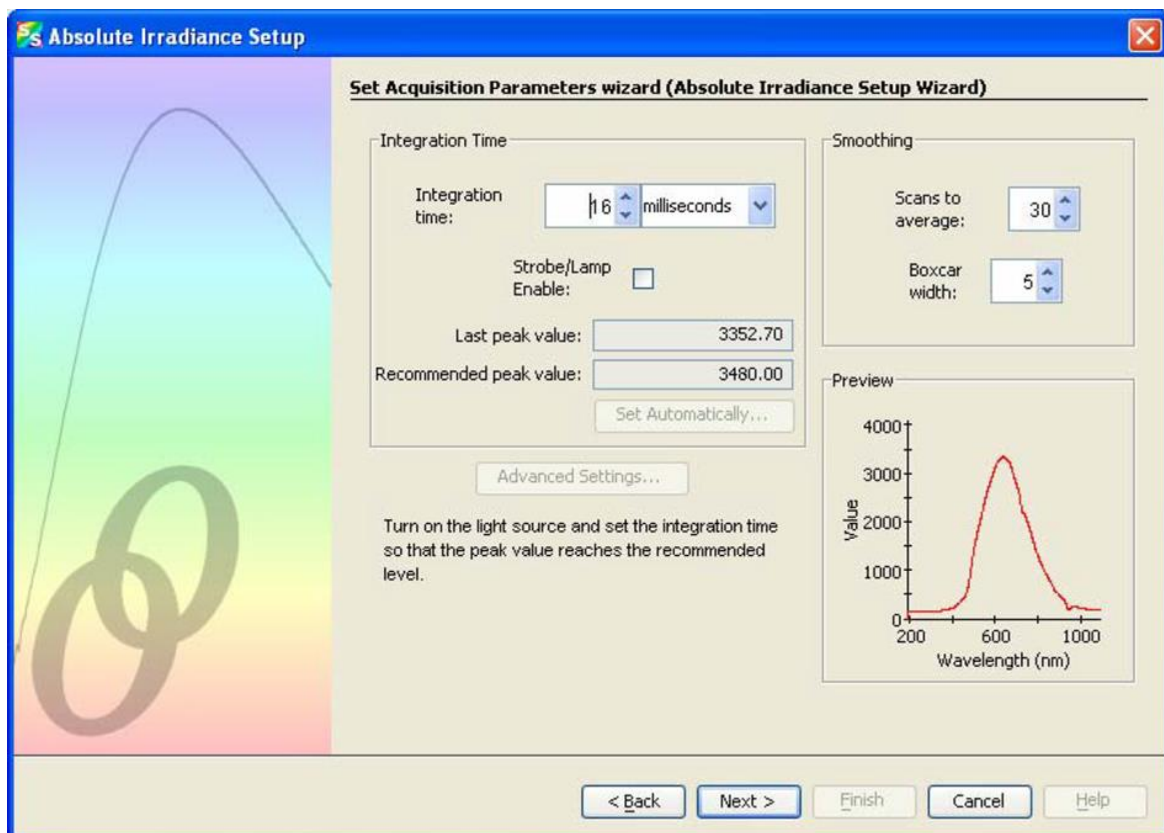


Рисунок 4.9 – Пятая страница мастера абсолютного измерения

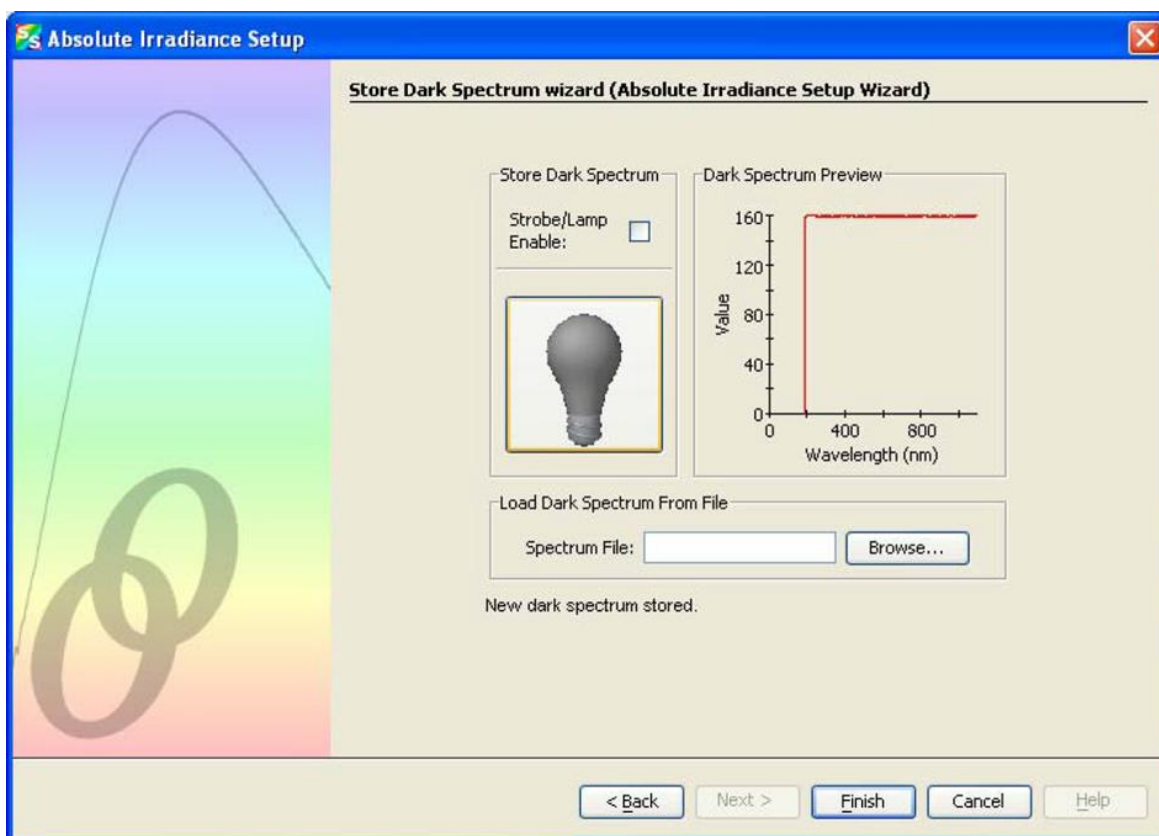


Рисунок 4.10 – Шестая страница мастера абсолютного измерения

6.4. На открывшейся третьей странице мастера абсолютного измерения необходимо указать программе, что будет использоваться имеющийся калибровочный файл (рис. 4.6), и нажать на кнопку «Next».

6.5. В открывшемся диалоге выбора файла калибровки следует выбрать файл «All_OOPIrrad.cal», находящийся на рабочем столе компьютера, и нажать на кнопку «Next» (рис. 4.7).

6.6. На открывшейся четвертой странице мастера абсолютного измерения необходимо указать, что измерения производятся при помощи интегрирующей сферы (Use Integrating Sphere), и нажать на кнопку «Next» (рис. 4.8).

6.7. На открывшейся пятой странице мастера абсолютного измерения необходимо подобрать оптимальное время интегрирования при измерении сигнала – при помощи кнопки «Set Automatically...» программа вычислит необходимое время. При правильном задании времени интегрирования числа, характеризующие «Last peak value» будут черного цвета (рис. 4.9). После подбора времени интегрирования следует нажать на кнопку «Next».

6.8. Выключить блок питания светодиода.

6.9. На открывшейся шестой странице мастера абсолютного измерения произвести измерение темнового спектра, нажав на кнопку с серой лампочкой (можно несколько раз) – см. рис. 4.10. Нажать на кнопку «Finish».

6.10. Включить блок питания светодиода и получить график спектрального распределения потока излучения.

6.11. Запустить команду сохранения полученного графика при помощи нажатия на кнопку с изображением дискеты (рис. 4.11).

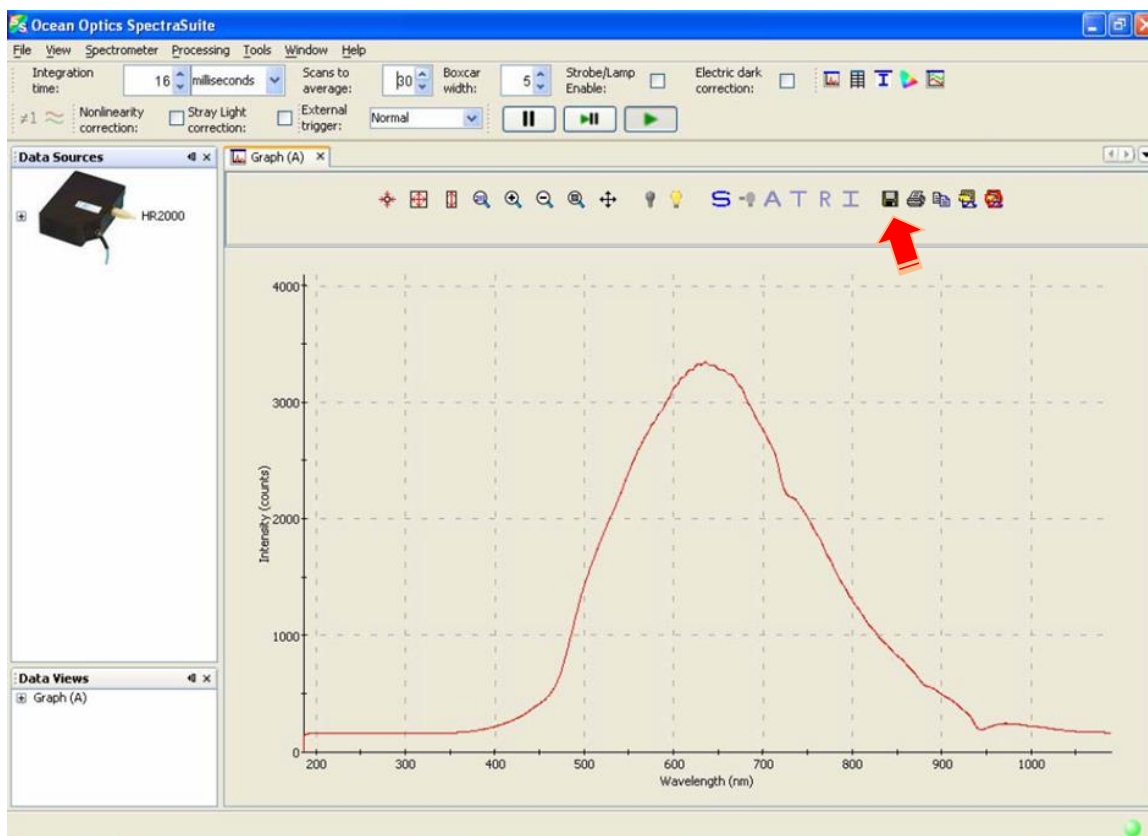


Рисунок 4.11 – Сохранение спектра

6.12. Произвести сохранение файла абсолютного измерения (рис. 4.12).

При помощи кнопки «Browse...» выбрать положение и задать имя для сохраняемого файла.

В меню «Desired Spectrum» необходимо указать «Processed Spectrum».

В меню «File Type» необходимо указать «Tab Delimited».

Нажать на кнопку «Save» и проверить, что в указанной папке появился заданный файл. Нажать на кнопку «Close».

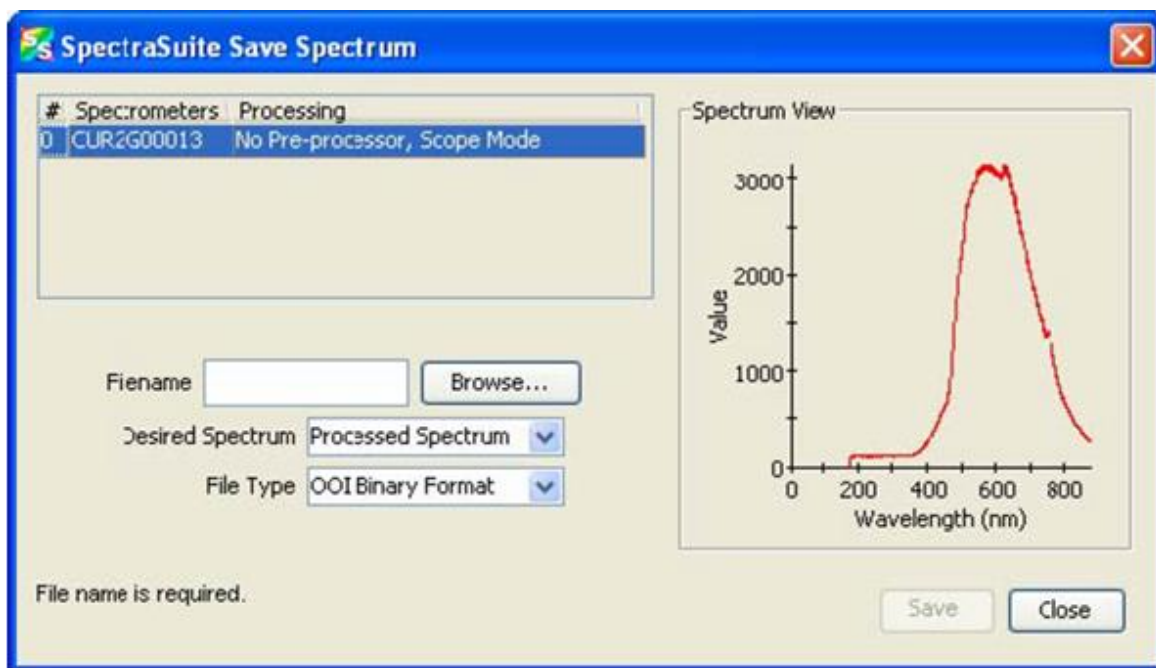


Рисунок 4.12 – Меню сохранения получаемого спектра

7. Выключить блок питания светодиода.
8. Вынуть светодиод из посадочного места установки по исследованию светодиодов
9. Повторить пп. 2 – 8 для оставшихся светодиодов.
10. Рассчитать координаты цветности излучения для каждого из светодиодов.

В качестве отчетных материалов по лабораторной работе необходимо предъявить результаты расчетов в следующем порядке:

1. Спектры излучения каждого измеренного светодиода (графики спектров можно представлять отдельно или совместно).
2. Координаты цвета XYZ каждого измеренного светодиода, рассчитанные по любому из рассмотренных выше способов (избранных ординат или взвешенных ординат).
3. Координаты цветности ху каждого измеренного светодиода.
4. Длина волны максимума излучения каждого измеренного светодиода
5. Диаграмма цветностей, на которую нанесены точки, характеризующие цветность каждого измеренного светодиода. Данные точки должны формировать треугольник.

4.3 Вопросы к лабораторной работе

1. С какой дискретизацией по спектру следует рассчитывать координаты цвета излучения светодиодов?

2. Расчет координат цвета и координат цветности излучения светодиодов необходимо проводить по абсолютным или относительным спектральным характеристикам излучения?

3. Чем отличается способ избранных ординат от способа взвешенных ординат? Каким способом расчета цветовых параметров излучения лучше пользоваться?

4. Чем отличаются координаты цвета от координат цветности?

5. Какие свойства излучения описываются при помощи диаграммы цветности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5. МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОДИОДНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ С ЗАДАННОЙ ЦВЕТНОСТЬЮ

Цель работы: изучить особенности аддитивного смешения цветов и особенности практического применения правил моделирования и расчета многоэлементных источников излучения с заданной цветностью.

5.1 Теоретические основы моделирования многоэлементных источников излучения с заданной цветностью

На практике часто применяется соединение или аддитивное смешение излучений от двух или более источников света. Например, в светодиодных экранах используют три типа светодиодов: красного, зеленого и синего свечения, излучение которых смешивается, и человек, смотрящий на экран, фактически воспринимает широкий диапазон цветов как комбинацию этих трех излучений. Другим примером смешения цветов являются источники белого света, построенные на основе двух- или трехцветных источников излучения. На рис. 5.1 показан принцип аддитивного смешения цветов и приведен пример аддитивного смешения излучения светодиодов [4, 18-20].

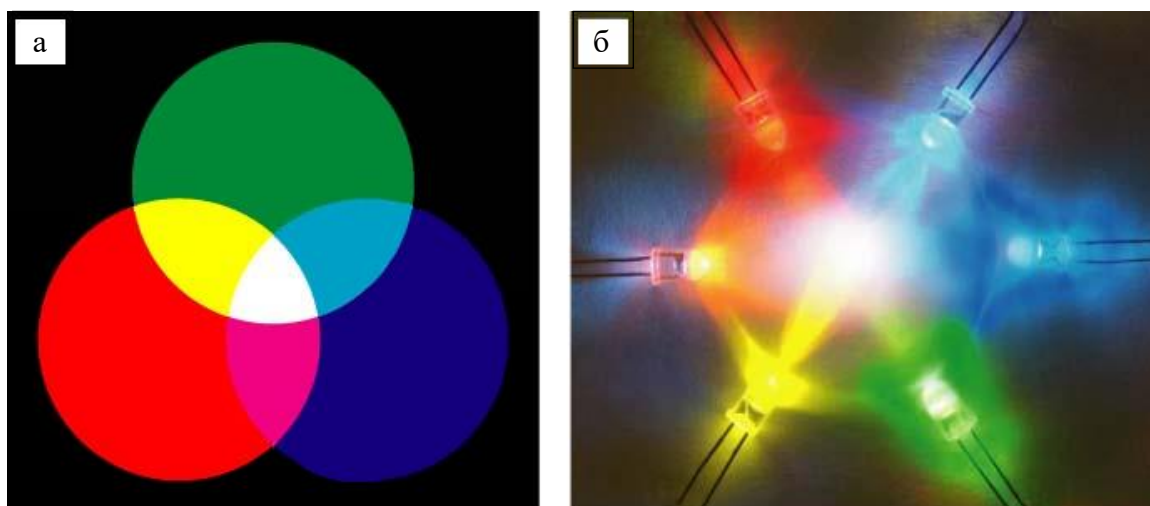


Рисунок 5.1 – Принцип аддитивного смешения трех основных цветов (а).
Аддитивное смешение излучения светодиодов (б)

Определим координаты цветности источников, излучающих свет в трех дискретных диапазонах длин волн.

Считаем, что ширина спектра каждого источника намного уже любой из трех функций согласования цветов.

Рассмотрим три источника со спектральными плотностями мощности излучения $P_1(\lambda)$, $P_2(\lambda)$, $P_3(\lambda)$ с максимумами интенсивности на

длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$. Предположим, что координаты цветности этих трех источников излучений определяются как $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$. Тогда результирующий цвет можно описать следующими тремя параметрами цветности:

$$X = \int_{\lambda}^{\bar{x}(\lambda) \cdot P_1(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{x}(\lambda) \cdot P_2(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{x}(\lambda) \cdot P_3(\lambda)} d\lambda \approx \bar{x}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{x}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{x}(\lambda_3) \cdot P_3, \quad (5.1)$$

$$Y = \int_{\lambda}^{\bar{y}(\lambda) \cdot P_1(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{y}(\lambda) \cdot P_2(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{y}(\lambda) \cdot P_3(\lambda)} d\lambda \approx \bar{y}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{y}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{y}(\lambda_3) \cdot P_3, \quad (5.2)$$

$$Z = \int_{\lambda}^{\bar{z}(\lambda) \cdot P_1(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{z}(\lambda) \cdot P_2(\lambda)} d\lambda + \int_{\lambda}^{\bar{z}(\lambda) \cdot P_3(\lambda)} d\lambda \approx \bar{z}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{z}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{z}(\lambda_3) \cdot P_3, \quad (5.3)$$

где P_1, P_2, P_3 – оптические мощности трех излучателей.

Следовательно

$$X \approx \bar{x}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{x}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{x}(\lambda_3) \cdot P_3, \quad (5.4)$$

$$Y \approx \bar{y}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{y}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{y}(\lambda_3) \cdot P_3 \quad (5.5)$$

$$Z \approx \bar{z}(\lambda_1) \cdot P_1 + \bar{z}(\lambda_2) \cdot P_2 + \bar{z}(\lambda_3) \cdot P_3. \quad (5.6)$$

Используя соотношения:

$$L_1 = \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_1)P_1, \quad (5.7)$$

$$L_2 = \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_2)P_2, \quad (5.8)$$

$$L_3 = \bar{x}(\lambda_3)P_3 + \bar{y}(\lambda_3)P_3 + \bar{z}(\lambda_3)P_3, \quad (5.9)$$

из уравнений (5.4) – (5.6) можно найти координаты цветности комбинированного цвета:

$$x = \frac{x_1 L_1 + x_2 L_2 + x_3 L_3}{L_1 + L_2 + L_3}, \quad (5.10)$$

$$y = \frac{y_1 L_1 + y_2 L_2 + y_3 L_3}{L_1 + L_2 + L_3}. \quad (5.11)$$

Из этих выражений видно, что координаты цветности многокомпонентного света являются линейными комбинациями координат цветности каждого источника с весовыми коэффициентами L_i .

Принцип смешения цветов показан на рис. 5.2. Смешиваются два цвета с координатами цветности (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . Для данного случая $L_3 = P_3 = 0$. Результирующий цвет расположен на прямой линии, соединяющей координаты цветности двух источников света. Следовательно, любой цвет (включая белый), расположенный между двумя точками на цветовой диаграмме, может быть получен смешением этих двух цветов.

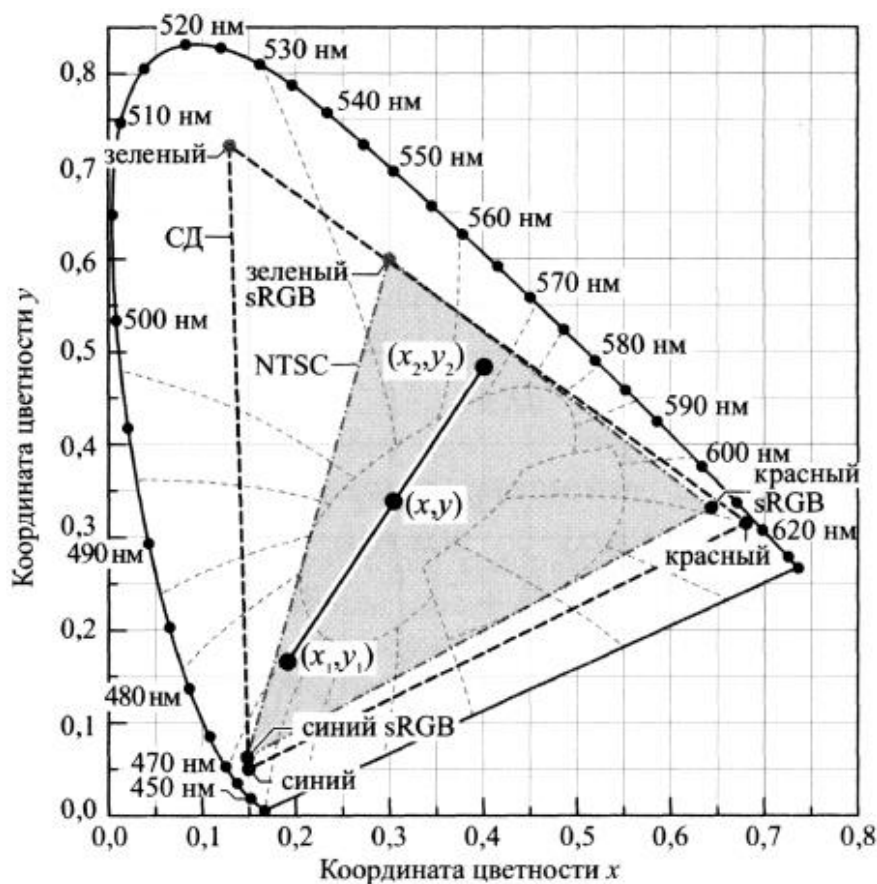


Рисунок 5.2 – Принцип смешения цветов. Рассматриваются два источника света с координатами цветности (x_1, y_1) , (x_2, y_2) . Результирующий цвет расположен в точке с координатами (x, y)

На рис. 5.2 также показано смешение трех цветов, расположенных в красной, зеленой и синей областях цветовой диаграммы. Три выбранные точки на диаграмме соответствуют излучению светодиодов красного, зеленого и синего свечения. Область внутри треугольника из штриховых линий, соединяющих эти три точки между собой, называется цветовой

гаммой, поскольку все цвета внутри этой области могут быть получены смешением трех основных цветов: красного, зеленого и синего. Способность воспроизведения как можно большего числа цветов является одной из важных характеристик мониторов. Чем больше область цветовой гаммы, тем выше качество экрана.

Цветовая гамма представляет собой полную совокупность цветов, которую можно получить из набора исходных цветов, на цветовой диаграмме она отображается в виде многоугольника. В случае трех исходных основных цветов гамма имеет вид треугольника, что и показано на рис. 5.2. Все цвета, получаемые при аддитивном смешивании основных цветов гаммы, соответствующих вершинам многоугольника, всегда располагаются внутри нее.

Знание того, как происходит смешение цветов, помогает понять расположение различных светодиодов на цветовой диаграмме. Граница диаграммы в области красных цветов является практически прямой линией, поэтому светодиоды красного свечения, несмотря на тепловое уширение спектра, располагаются на этой границе. Поскольку в области зеленых цветов диаграмма обладает сильно выраженной кривизной, светодиоды зеленого свечения из-за спектрального расширения смещаются от границы к центру диаграммы.

5.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Прежде чем начать работу, каждый студент должен получить свой набор из трех светодиодов разной цветности. **Спектры излучения $P_i(\lambda)$, координаты цветности излучения (x_i, y_i) и длину волны максимума излучения $\lambda_{\max i}$** каждого светодиода из набора студент должен был получить в ходе выполнения предыдущей лабораторной работы.

1. На основе рассчитанных координат цветности (x_i, y_i) светодиодов из набора получить от преподавателя координаты цветности (x, y) для создаваемого источника излучения.

2. Рассчитать весовые коэффициенты L_i (L_1 – для синего светодиода, L_2 – для зеленого (или желтого) светодиода, L_3 – для красного (или оранжевого) светодиода) по формулам:

$$L_2 = 1,$$

$$L_3 = L_2 \cdot \frac{(y_2 - y) \cdot (x - x_1) + (y_1 - y) \cdot (x_2 - x)}{(y - y_3) \cdot (x - x_1) + (y - y_1) \cdot (x_3 - x)},$$

$$L_1 = \frac{L_2 \cdot (x_2 - x) + L_3 \cdot (x_3 - x)}{(x - x_1)},$$

Данные соотношения выведены из уравнений (5.10) – (5.11).

3. Найти значения кривых сложения $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ и $\bar{z}(\lambda)$ для максимальных длин волн синего светодиода $\lambda_{\max 1}$, зеленого (или желтого) светодиода $\lambda_{\max 2}$ и красного (или оранжевого) светодиода $\lambda_{\max 3}$.

4. Рассчитать оптические мощности излучения светодиодов из набора по соотношениям:

$$P_1 = \frac{L_1}{\bar{x}(\lambda_{\max 1}) + \bar{y}(\lambda_{\max 1}) + \bar{z}(\lambda_{\max 1})},$$

$$P_2 = \frac{L_2}{\bar{x}(\lambda_{\max 2}) + \bar{y}(\lambda_{\max 2}) + \bar{z}(\lambda_{\max 2})},$$

$$P_3 = \frac{L_3}{\bar{x}(\lambda_{\max 3}) + \bar{y}(\lambda_{\max 3}) + \bar{z}(\lambda_{\max 3})}.$$

5. По выданным преподавателем вольт-ваттовым характеристикам и по полученным значениям оптических мощностей излучения определить необходимые параметры питания используемых светодиодов (U_1, U_2, U_3).

6. Под руководством преподавателя собрать составной источник при помощи стандартной макетной платы и подвести необходимое питание к используемым светодиодам при помощи лабораторных источников питания.

7. Проверить координаты цветности собранного источника при помощи колориметра фирмы ТКА.

Лабораторная работа считается выполненной в случае, если координаты цветности собранного источника излучения, получаемые при помощи колориметра фирмы ТКА, совпадают с координатами цветности, заданными преподавателем, с погрешностью в 0,05.

5.3 Вопросы к лабораторной работе

1. Почему цветность собранного источника отличается от заданной?
2. Можно ли создать источник излучения с любыми координатами цветности?
3. Какие факторы ограничивают создание источников излучения с большим диапазоном цветностей?
4. Можно ли с большой точностью рассчитать цветность создаваемого источника излучения?

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Годен Ж. Колориметрия при видеообработке. Москва: Техносфера, 2008. – 328 с., 2 стр. цв. Вклейки. ISBN 978-5-94836-173-4.
2. Николс Джон, Мартин Роберт, Валлас Брюс, Фукс Пол, От нейрона к мозгу: Пер. с англ. Изд. 2-е – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 672 с., цв. вкл. ISBN 978-5-382-00808-0.
3. Грегори Ричард Лэнгтон, Разумный глаз: Как мы узнаем то, что нам не дано в ощущениях. Пер с англ. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 240 с., цв. вкл. ISBN 978-5-397-00597-4.
4. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Колориметрия источников излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 126 с.
5. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Типовые расчеты по колориметрии источников излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 90 с. – Режим доступа в ЭБС изд-ва «Лань»: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=71142.
6. Phantom of the Falls: [Электронный ресурс] // Embraced by Spirits IV. Phantom of the Falls. URL: <https://www.jonathonart.com/nati4.html>. (Дата обращения: 19.11.11).
7. Месяц С. В. Иоганн Вольфганг Гёте и его учение о цвете (часть первая). – 2012.
8. ГОСТ Р 55703-2013 Источники света электрические. Методы измерений спектральных и цветовых характеристик [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vsegost.com/Catalog/55/55470.shtml>.
9. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения / М.В. Домасев, С.П. Гнатюк. – СПб.: Питер, 2009. – 217 с.
10. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2000. – 397 с. ISBN 5-288-02648-3.
11. Агостон Ж. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 184 с., ил.
12. Основы теории цвета и цветоспроизведения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vunivere.ru/work3767/page7>
13. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 240 с.
14. М.Д. Фершильд Модели цветового восприятия, второе издание: пер. с англ. – СПб., 2006.
15. Кравков С.В. Цветове зрение – изд-во академии наук СССР, Москва, 1951 г., 175 стр.
16. Н.Д. Нюберг «Измерение цвета и цветовые стандарты» – Государственное издательство Стандартизация и Рационализация Москва, 1933, 104 стр.

17. Измайлов Ч.А., Соколов Е.Н., Чериоризов А.М. Психофизиология цветового зрения. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 206 с. ISBN 5-211-00228-8.
18. Основы светотехники: Учебное пособие / Г.Г. Ишанин, М.Г. Козлов, К.А. Томский. – СПб.: Береста, 2004. – 292 с.
19. Светотехнические измерения / М.Г. Козлов, К.А. Томский. – СПб.: Издательство "Петербургский институт печати", 2004. – 306 с.
20. Светодиоды / Ф.Е. Шуберт; пер. с англ. под ред. А.Э. Юновича. – 2-е изд. – М.: Физматлит, 2008. – 495 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Кривые сложения для цветового пространства МКО 1931 г.

λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	λ , нм	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
360	0,000130	0,000004	0,000606	596	1,059794	0,682219	0,000969
361	0,000146	0,000004	0,000681	597	1,061799	0,669472	0,000930
362	0,000164	0,000005	0,000765	598	1,062807	0,656674	0,000887
363	0,000184	0,000006	0,000860	599	1,062910	0,643845	0,000843
364	0,000207	0,000006	0,000967	600	1,062200	0,631000	0,000800
365	0,000232	0,000007	0,001086	601	1,060735	0,618156	0,000761
366	0,000261	0,000008	0,001221	602	1,058444	0,605314	0,000724
367	0,000293	0,000009	0,001373	603	1,055224	0,592476	0,000686
368	0,000329	0,000010	0,001544	604	1,050977	0,579638	0,000645
369	0,000370	0,000011	0,001734	605	1,045600	0,566800	0,000600
370	0,000415	0,000012	0,001946	606	1,039037	0,553961	0,000548
371	0,000464	0,000014	0,002177	607	1,031361	0,541137	0,000492
372	0,000519	0,000016	0,002436	608	1,022666	0,528353	0,000435
373	0,000582	0,000017	0,002732	609	1,013048	0,515632	0,000383
374	0,000655	0,000020	0,003078	610	1,002600	0,503000	0,000340
375	0,000742	0,000022	0,003486	611	0,991368	0,490469	0,000307
376	0,000845	0,000025	0,003975	612	0,979331	0,478030	0,000283
377	0,000965	0,000028	0,004541	613	0,966492	0,465678	0,000265
378	0,001095	0,000032	0,005158	614	0,952848	0,453403	0,000252
379	0,001231	0,000035	0,005803	615	0,938400	0,441200	0,000240
380	0,001368	0,000039	0,006450	616	0,923194	0,429080	0,000230
381	0,001502	0,000043	0,007083	617	0,907244	0,417036	0,000221
382	0,001642	0,000047	0,007745	618	0,890502	0,405032	0,000212
383	0,001802	0,000052	0,008501	619	0,872920	0,393032	0,000202
384	0,001996	0,000057	0,009415	620	0,854450	0,381000	0,000190
385	0,002236	0,000064	0,010550	621	0,835084	0,368918	0,000174
386	0,002535	0,000072	0,011966	622	0,814946	0,356827	0,000156
387	0,002893	0,000082	0,013656	623	0,794186	0,344777	0,000136
388	0,003301	0,000094	0,015588	624	0,772954	0,332818	0,000117
389	0,003753	0,000106	0,017730	625	0,751400	0,321000	0,000100
390	0,004243	0,000120	0,020050	626	0,729584	0,309338	0,000086
391	0,004762	0,000135	0,022511	627	0,707589	0,297850	0,000075
392	0,005330	0,000151	0,025203	628	0,685602	0,286594	0,000065
393	0,005979	0,000170	0,028280	629	0,663810	0,275625	0,000057
394	0,006741	0,000192	0,031897	630	0,642400	0,265000	0,000050
395	0,007650	0,000217	0,036210	631	0,621515	0,254763	0,000044

396	0,008751	0,000247	0,041438	632	0,601114	0,244890	0,000039
397	0,010029	0,000281	0,047504	633	0,581105	0,235334	0,000036
398	0,011422	0,000319	0,054120	634	0,561398	0,226053	0,000033
399	0,012869	0,000357	0,060998	635	0,541900	0,217000	0,000030
400	0,014310	0,000396	0,067850	636	0,522600	0,208162	0,000028
401	0,015704	0,000434	0,074486	637	0,503546	0,199549	0,000026
402	0,017147	0,000473	0,081362	638	0,484744	0,191155	0,000024
403	0,018781	0,000518	0,089154	639	0,466194	0,182974	0,000022
404	0,020748	0,000572	0,098540	640	0,447900	0,175000	0,000020
405	0,023190	0,000640	0,110200	641	0,429861	0,167224	0,000018
406	0,026207	0,000725	0,124613	642	0,412098	0,159646	0,000016
407	0,029782	0,000826	0,141702	643	0,394644	0,152278	0,000014
408	0,033881	0,000941	0,161304	644	0,377533	0,145126	0,000012
409	0,038468	0,001070	0,183257	645	0,360800	0,138200	0,000010
410	0,043510	0,001210	0,207400	646	0,344456	0,131500	0,000008
411	0,048996	0,001362	0,233692	647	0,328517	0,125025	0,000005
412	0,055023	0,001531	0,262611	648	0,313019	0,118779	0,000003
413	0,061719	0,001720	0,294775	649	0,298001	0,112769	0,000001
414	0,069212	0,001935	0,330799	650	0,283500	0,107000	0,000000
415	0,077630	0,002180	0,371300	651	0,269545	0,101476	0,000000
416	0,086958	0,002455	0,416209	652	0,256118	0,096189	0,000000
417	0,097177	0,002764	0,465464	653	0,243190	0,091123	0,000000
418	0,108406	0,003118	0,519695	654	0,230727	0,086265	0,000000
419	0,120767	0,003526	0,579530	655	0,218700	0,081600	0,000000
420	0,134380	0,004000	0,645600	656	0,207097	0,077121	0,000000
421	0,149358	0,004546	0,718484	657	0,195923	0,072826	0,000000
422	0,165396	0,005159	0,796713	658	0,185171	0,068710	0,000000
423	0,181983	0,005829	0,877846	659	0,174832	0,064770	0,000000
424	0,198611	0,006546	0,959439	660	0,164900	0,061000	0,000000
425	0,214770	0,007300	1,039050	661	0,155367	0,057396	0,000000
426	0,230187	0,008087	1,115367	662	0,146230	0,053955	0,000000
427	0,244880	0,008909	1,188497	663	0,137490	0,050674	0,000000
428	0,258777	0,009768	1,258123	664	0,129147	0,047550	0,000000
429	0,271808	0,010664	1,323930	665	0,121200	0,044580	0,000000
430	0,283900	0,011600	1,385600	666	0,113640	0,041759	0,000000
431	0,294944	0,012573	1,442635	667	0,106465	0,039085	0,000000
432	0,304897	0,013583	1,494804	668	0,099690	0,036564	0,000000
433	0,313787	0,014630	1,542190	669	0,093331	0,034200	0,000000
434	0,321645	0,015715	1,584881	670	0,087400	0,032000	0,000000
435	0,328500	0,016840	1,622960	671	0,081901	0,029963	0,000000

436	0,334351	0,018007	1,656405	672	0,076804	0,028077	0,000000
437	0,339210	0,019214	1,685296	673	0,072077	0,026329	0,000000
438	0,343121	0,020454	1,709875	674	0,067687	0,024708	0,000000
439	0,346130	0,021718	1,730382	675	0,063600	0,023200	0,000000
440	0,348280	0,023000	1,747060	676	0,059807	0,021801	0,000000
441	0,349600	0,024295	1,760045	677	0,056282	0,020501	0,000000
442	0,350147	0,025610	1,769623	678	0,052971	0,019281	0,000000
443	0,350013	0,026959	1,776264	679	0,049819	0,018121	0,000000
444	0,349287	0,028351	1,780433	680	0,046770	0,017000	0,000000
445	0,348060	0,029800	1,782600	681	0,043784	0,015904	0,000000
446	0,346373	0,031311	1,782968	682	0,040875	0,014837	0,000000
447	0,344262	0,032884	1,781700	683	0,038073	0,013811	0,000000
448	0,341809	0,034521	1,779198	684	0,035405	0,012835	0,000000
449	0,339094	0,036226	1,775867	685	0,032900	0,011920	0,000000
450	0,336200	0,038000	1,772110	686	0,030564	0,011068	0,000000
451	0,333198	0,039847	1,768259	687	0,028381	0,010273	0,000000
452	0,330041	0,041768	1,764039	688	0,026345	0,009533	0,000000
453	0,326636	0,043766	1,758944	689	0,024453	0,008846	0,000000
454	0,322887	0,045843	1,752466	690	0,022700	0,008210	0,000000
455	0,318700	0,048000	1,744100	691	0,021084	0,007624	0,000000
456	0,314025	0,050244	1,733560	692	0,019600	0,007085	0,000000
457	0,308884	0,052573	1,720858	693	0,018237	0,006591	0,000000
458	0,303290	0,054981	1,705937	694	0,016987	0,006138	0,000000
459	0,297258	0,057459	1,688737	695	0,015840	0,005723	0,000000
460	0,290800	0,060000	1,669200	696	0,014791	0,005343	0,000000
461	0,283970	0,062602	1,647529	697	0,013831	0,004996	0,000000
462	0,276721	0,065278	1,623413	698	0,012949	0,004676	0,000000
463	0,268918	0,068042	1,596022	699	0,012129	0,004380	0,000000
464	0,260423	0,070911	1,564528	700	0,011359	0,004102	0,000000
465	0,251100	0,073900	1,528100	701	0,010629	0,003838	0,000000
466	0,240848	0,077016	1,486111	702	0,009939	0,003589	0,000000
467	0,229851	0,080266	1,439522	703	0,009288	0,003354	0,000000
468	0,218407	0,083667	1,389880	704	0,008679	0,003134	0,000000
469	0,206811	0,087233	1,338736	705	0,008111	0,002929	0,000000
470	0,195360	0,090980	1,287640	706	0,007582	0,002738	0,000000
471	0,184214	0,094918	1,237422	707	0,007089	0,002560	0,000000
472	0,173327	0,099046	1,187824	708	0,006627	0,002393	0,000000
473	0,162688	0,103367	1,138761	709	0,006195	0,002237	0,000000
474	0,152283	0,107885	1,090148	710	0,005790	0,002091	0,000000
475	0,142100	0,112600	1,041900	711	0,005410	0,001954	0,000000

476	0,132179	0,117532	0,994198	712	0,005053	0,001825	0,000000
477	0,122570	0,122674	0,947347	713	0,004718	0,001704	0,000000
478	0,113275	0,127993	0,901453	714	0,004404	0,001590	0,000000
479	0,104298	0,133453	0,856619	715	0,004109	0,001484	0,000000
480	0,095640	0,139020	0,812950	716	0,003834	0,001384	0,000000
481	0,087300	0,144676	0,770517	717	0,003576	0,001291	0,000000
482	0,079308	0,150469	0,729445	718	0,003334	0,001204	0,000000
483	0,071718	0,156462	0,689914	719	0,003109	0,001123	0,000000
484	0,064581	0,162718	0,652105	720	0,002899	0,001047	0,000000
485	0,057950	0,169300	0,616200	721	0,002704	0,000977	0,000000
486	0,051862	0,176243	0,582329	722	0,002523	0,000311	0,000000
487	0,046282	0,183558	0,550416	723	0,002354	0,000850	0,000000
488	0,041151	0,191274	0,520338	724	0,002197	0,000793	0,000000
489	0,036413	0,199418	0,491967	725	0,002049	0,000740	0,000000
490	0,032010	0,208020	0,465180	726	0,001911	0,000690	0,000000
491	0,027917	0,217120	0,439925	727	0,001781	0,000643	0,000000
492	0,024144	0,226735	0,416184	728	0,001660	0,000690	0,000000
493	0,020687	0,236857	0,393882	729	0,001546	0,000558	0,000000
494	0,017540	0,247481	0,372946	730	0,001440	0,000520	0,000000
495	0,014700	0,258600	0,353300	731	0,001340	0,000484	0,000000
496	0,012162	0,270185	0,334858	732	0,001246	0,000450	0,000000
497	0,009920	0,282294	0,317552	733	0,001158	0,000418	0,000000
498	0,007967	0,295051	0,301338	734	0,001076	0,000389	0,000000
499	0,006296	0,308578	0,286169	735	0,001000	0,000361	0,000000
500	0,004900	0,323000	0,272000	736	0,000929	0,000335	0,000000
501	0,003778	0,338402	0,258817	737	0,000862	0,000311	0,000000
502	0,002945	0,354686	0,246484	738	0,000801	0,000289	0,000000
503	0,002425	0,371699	0,234772	739	0,000743	0,000268	0,000000
504	0,002236	0,389288	0,223453	740	0,000690	0,000249	0,000000
505	0,002400	0,407300	0,212300	741	0,000641	0,000231	0,000000
506	0,002926	0,425630	0,201169	742	0,000595	0,000215	0,000000
507	0,003837	0,444310	0,190120	743	0,000552	0,000199	0,000000
508	0,005175	0,463394	0,179225	744	0,000512	0,000185	0,000000
509	0,006982	0,482940	0,168561	745	0,000476	0,000172	0,000000
510	0,009300	0,503000	0,158200	746	0,000442	0,000160	0,000000
511	0,012149	0,523569	0,148138	747	0,000412	0,000149	0,000000
512	0,015536	0,544512	0,138376	748	0,000383	0,000138	0,000000
513	0,019478	0,565690	0,128994	749	0,000357	0,000129	0,000000
514	0,023993	0,586965	0,120075	750	0,000332	0,000120	0,000000
515	0,029000	0,608200	0,111700	751	0,000310	0,000112	0,000000

516	0,034815	0,629346	0,103905	752	0,000289	0,000104	0,000000
517	0,041120	0,650307	0,096667	753	0,000270	0,000097	0,000000
518	0,047985	0,670875	0,089983	754	0,000252	0,000091	0,000000
519	0,055379	0,690842	0,083845	755	0,000235	0,000085	0,000000
520	0,063270	0,710000	0,078250	756	0,000219	0,000079	0,000000
521	0,071635	0,728185	0,073209	757	0,000205	0,000074	0,000000
522	0,080462	0,745464	0,068678	758	0,000191	0,000069	0,000000
523	0,089740	0,761969	0,064568	759	0,000178	0,000064	0,000000
524	0,099456	0,777837	0,060788	760	0,000166	0,000060	0,000000
525	0,109600	0,793200	0,057250	761	0,000155	0,000056	0,000000
526	0,120167	0,808110	0,053904	762	0,000145	0,000052	0,000000
527	0,131115	0,822496	0,050747	763	0,000135	0,000049	0,000000
528	0,142368	0,836307	0,047753	764	0,000126	0,000045	0,000000
529	0,153854	0,849492	0,044899	765	0,000117	0,000042	0,000000
530	0,165500	0,862000	0,042160	766	0,000110	0,000040	0,000000
531	0,177257	0,873811	0,039507	767	0,000102	0,000037	0,000000
532	0,189140	0,884962	0,036936	768	0,000095	0,000034	0,000000
533	0,201169	0,895494	0,034458	769	0,000089	0,000032	0,000000
534	0,213366	0,905443	0,032089	770	0,000083	0,000030	0,000000
535	0,225750	0,914850	0,029840	771	0,000078	0,000028	0,000000
536	0,238321	0,923735	0,028812	772	0,000072	0,000026	0,000000
537	0,251067	0,932092	0,025694	773	0,000067	0,000024	0,000000
538	0,263992	0,939923	0,023787	774	0,000063	0,000023	0,000000
539	0,277102	0,947225	0,021989	775	0,000059	0,000021	0,000000
540	0,290400	0,954000	0,020300	776	0,000055	0,000020	0,000000
541	0,303891	0,960256	0,018718	777	0,000051	0,000018	0,000000
542	0,317573	0,966007	0,017240	778	0,000048	0,000017	0,000000
543	0,331438	0,971261	0,015864	779	0,000044	0,000016	0,000000
544	0,345483	0,976023	0,014585	780	0,000042	0,000015	0,000000
545	0,359700	0,980300	0,013400	781	0,000039	0,000014	0,000000
546	0,374084	0,984092	0,012307	782	0,000036	0,000013	0,000000
547	0,388640	0,987418	0,11302	783	0,000034	0,000012	0,000000
548	0,403378	0,990313	0,010378	784	0,000031	0,000011	0,000000
549	0,418312	0,992812	0,009529	785	0,000029	0,000011	0,000000
550	0,433450	0,994950	0,008750	786	0,000027	0,000010	0,000000
551	0,448795	0,996711	0,008035	787	0,000026	0,000009	0,000000
552	0,464336	0,998098	0,007382	788	0,000024	0,000009	0,000000
553	0,480064	0,999112	0,006785	789	0,000022	0,000008	0,000000
554	0,495971	0,999748	0,006243	790	0,000021	0,000007	0,000000
555	0,512050	1,000000	0,005750	791	0,000019	0,000007	0,000000

556	0,528296	0,999857	0,005304	792	0,000018	0,000006	0,000000
557	0,544692	0,999305	0,004900	793	0,000017	0,000006	0,000000
558	0,561209	0,998326	0,004534	794	0,000016	0,000006	0,000000
559	0,577822	0,996899	0,004202	795	0,000015	0,000005	0,000000
560	0,594500	0,995000	0,003900	796	0,000014	0,000005	0,000000
561	0,611221	0,992601	0,003623	797	0,000013	0,000005	0,000000
562	0,627976	0,989743	0,003371	798	0,000012	0,000004	0,000000
563	0,644760	0,986444	0,003141	799	0,000011	0,000004	0,000000
564	0,661570	0,982724	0,002935	800	0,000010	0,000004	0,000000
565	0,678400	0,978600	0,002750	801	0,000010	0,000003	0,000000
566	0,695239	0,974084	0,002585	802	0,000009	0,000003	0,000000
567	0,712059	0,969171	0,002439	803	0,000008	0,000003	0,000000
568	0,728828	0,963857	0,002309	804	0,000008	0,000003	0,000000
569	0,745549	0,958135	0,002197	805	0,000007	0,000003	0,000000
570	0,762100	0,952000	0,002100	806	0,000007	0,000002	0,000000
571	0,778543	0,945450	0,002018	807	0,000006	0,000002	0,000000
572	0,794826	0,938499	0,001948	808	0,000006	0,000002	0,000000
573	0,810926	0,931163	0,001890	809	0,000005	0,000002	0,000000
574	0,826825	0,923458	0,001841	810	0,000005	0,000002	0,000000
575	0,842500	0,915400	0,001800	811	0,000005	0,000002	0,000000
576	0,857933	0,907006	0,001766	812	0,000004	0,000002	0,000000
577	0,873082	0,898277	0,001738	813	0,000004	0,000001	0,000000
578	0,887894	0,889205	0,001711	814	0,000004	0,000001	0,000000
579	0,902318	0,879782	0,001683	815	0,000004	0,000001	0,000000
580	0,916300	0,870000	0,001650	816	0,000003	0,000001	0,000000
581	0,929800	0,859861	0,001610	817	0,000003	0,000001	0,000000
582	0,942798	0,849392	0,001564	818	0,000003	0,000001	0,000000
583	0,955278	0,838622	0,001514	819	0,000003	0,000001	0,000000
584	0,967218	0,827581	0,001459	820	0,000003	0,000001	0,000000
585	0,978600	0,816300	0,001400	821	0,000002	0,000001	0,000000
586	0,989386	0,804795	0,001337	822	0,000002	0,000001	0,000000
587	0,999549	0,793082	0,001270	823	0,000002	0,000001	0,000000
588	1,009089	0,781192	0,001205	824	0,000002	0,000001	0,000000
589	1,018006	0,769155	0,001147	825	0,000002	0,000001	0,000000
590	1,026300	0,757000	0,001100	826	0,000002	0,000001	0,000000
591	1,033983	0,744754	0,001069	827	0,000001	0,000001	0,000000
592	1,040986	0,732422	0,001049	828	0,000001	0,000000	0,000000
593	1,047188	0,720004	0,001036	829	0,000001	0,000000	0,000000
594	1,052467	0,707497	0,001021	830	0,000001	0,000000	0,000000
595	1,056700	0,694900	0,001000				

Горбунова Елена Васильевна
Сычева Елена Александровна
Чертов Александр Николаевич

**Колориметрия. Методические указания к
выполнению лабораторных работ**

**Часть 1. Цветное зрение и основы расчетов цвета
источников излучения**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А