

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
УНИКАЛЬНОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи



Кушкочева Анастасия Сергеевна

**МЕТОД И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД
ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА
ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ**

Специальность – 1.3.2 Приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Мачихин Александр Сергеевич

Москва – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДА К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ	10
1.1 Анализ нормативной базы для оценки качества драгоценных камней	10
1.2 Обзор методов и инструментов для анализа качества цветных драгоценных камней.....	14
1.3 Исследование возможности перехода от субъективной к объективной оценке качества цветных драгоценных камней	20
Выводы по главе 1	25
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ.....	27
2.1 Построение системы координат для цифровой оценки цвета цветных ДК..	28
2.2 Определение показателя качества «чистота».....	41
Выводы по главе 2.....	46
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ.....	47
3.1 Принципы построения экспериментального стенда	47
3.2 Описание конструкции экспериментального стенда.....	51
3.2.1 Описание технической реализации модуля верхней подсветки	54
3.2.2 Описание технической реализации модуля нижней подсветки	56
3.3. Разработка принципов обработки и анализа изображений образцов цветных драгоценных камней с помощью экспериментального стенда	59
3.3.1 Алгоритмы предобработки и коррекции изображений.....	62
3.3.1.1 Алгоритм колориметрической коррекции по однородному фону для режима «на отражение»	62

3.3.1.2 Алгоритм колориметрической коррекции по эталону белого в режиме «на отражение».....	63
3.3.1.3 Алгоритм колориметрической коррекции в режиме «на пропускание».	64
3.3.1.4 Алгоритм метрической коррекции изображений	65
3.3.2 Алгоритмы определения показателей качества цветных ДК	66
3.3.2.1 Алгоритм определения класса крупности	67
3.3.2.2 Алгоритм определения коэффициента прозрачности	68
3.3.2.3 Алгоритм определения класса прозрачности.....	68
3.3.2.4 Алгоритм расчета цветовых координат	68
3.3.2.5 Алгоритм определения цветового класса	69
3.3.2.6 Чистота и зональность	70
Выводы по главе 3	71
ГЛАВА 4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА	74
4.1. Исследование стабильности работы экспериментального стенда.....	74
4.2. Экспериментальные исследования определения показателей качества ДК с помощью разработанного экспериментального стенда	96
Выводы по главе 4.....	108
ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ	110
5.1. Анализ критических состояний работы экспериментального стенда	110
5.2 Определение погрешностей и классов точности измеряемых параметров	124
5.2.1 Оценка погрешности цветового анализа	124
5.2.2. Оценка достоверности алгоритма цветового анализа	128
5.2.3 Оценка погрешности определения прозрачности образцов ДК.....	129
5.2.4 Оценка погрешности определения размеров ДК.....	130
Выводы по главе 5.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	132

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	134
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	135
СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА.....	143
Приложение 1. Протокол испытания	146
Приложение 2. Протокол испытания	148

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Анализ и контроль качества сырья, промежуточных и конечных продуктов являются важным аспектом при автоматизации различных технологических процессов. Одним из перспективных методов решения подобного класса задач является машинное зрение, обеспечивающее бесконтактную визуализацию, идентификацию и анализ свойств и состояния объектов при минимальном участии человека или полностью в автоматическом режиме.

Актуальной задачей, для решения которой целесообразно применение машинного зрения, с технической и экономической точек зрения, является оценка показателей качества цветных драгоценных камней (ДК). В настоящее время для этого по-прежнему широко используется экспертный метод с использованием специальных геммологических микроскопов, позволяющий изучать цвет, дефектность, огранку и другие качественные показатели ДК.

Основные показатели качества цветных ДК приведены в СТО 45866412-16-2014 «Драгоценные камни. Термины и определения» ГОХРАНа Российской Федерации. В нём регламентированы органолептические (визуальные) методы их оценки с использованием оптических инструментов и контрольно-арбитражных образцов – мер-имитаторов. При этом наибольшую сложность для визуальной оценки представляют такие параметры цветных камней, как цветовой тон, цветовой оттенок, насыщенность цвета, светлота, прозрачность, а также физико-морфологический показатель - чистота, определяемый прозрачностью и наличием дефектов. Процесс визуальной оценки указанных параметров требует от специалиста строгого соблюдения стандартных условий освещения и методик анализа, даже случайное нарушение которых может приводить к ошибкам. Кроме того, органолептический метод оценки опирается на набор цветных мер-имитаторов, характеристики которых деградируют со временем даже при соблюдении условий их хранения и эксплуатации.

Таким образом, можно выделить несколько существенных проблем в области оценки показателей качества цветных ДК. Анализ ДК, как правило, является субъективным и подверженным неконтролируемому влиянию различных факторов. Одновременный анализ большого количества образцов ДК, проводимый экспертом, приводит к увеличению трудозатрат и обладает ограниченной производительностью. При оценке используются зачастую устаревшие иностранные меры-имитаторы, представленные в ограниченном количестве и имеющие риск деградации со временем.

Для решения данных проблем необходима разработка технических средств инструментального анализа показателей качества ДК, обеспечивающих объективное и автоматизированное получение альтернативной оценки наряду с органолептической, а также позволяющих сократить трудозатраты и увеличить производительность работы экспертов при оценке партий образцов.

Цели и основные задачи работы

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности и объективности процедуры анализа показателей качества цветных ДК за счет разработки средств технического сопровождения процесса анализа на основе методов машинного зрения и колориметрии.

Для достижения данной цели в диссертационном исследовании поставлены и решены следующие задачи.

1. Анализ нормативной документации, применяемой для определения показателей качества цветных ДК.
2. Разработка подхода к количественной оценке показателей качества цветных ДК с использованием принципов машинного зрения и колориметрии, позволяющего повысить степень автоматизации, увеличить точность и скорость определения оптических характеристик ДК.
3. Сравнительный анализ существующих принципов цветовоспроизведения зрительного аппарата человека с помощью систем машинного зрения.

4. Разработка экспериментального стенда для оптического анализа показателей качества цветных ДК и его методического, алгоритмического и программного обеспечения.

5. Разработка методики калибровки, определение оптимальных параметров и режимов работы экспериментального стенда. Создание базы цифровых двойников мер-имитаторов набора GIA GemSet.

6. Экспериментальная апробация предложенных методических и аппаратно-программных средств контроля показателей качества цветных ДК и проверка эффективности их применения.

7. Оценка погрешностей определения показателей качества цветных ДК с помощью разработанного экспериментального стенда и подтверждение точности проводимой с его помощью классификации.

Методы исследования

В работе применялись классические методы описания оптических свойств цветных драгоценных камней, теория измерения цветовых характеристик, компьютерные методы моделирования цветовых оттенков, элементы теории оптико-электронных систем, методы машинного зрения и цифровой обработки изображений, методы проведения физических измерений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Созданная база цифровых двойников мер-имитаторов ДК и разработанный алгоритм пересчета регистрируемых оптических характеристик с учётом спектра излучения источника освещения, спектральной зависимости квантовой эффективности приемника излучения и спектра отражения используемого эталона белого позволяет осуществлять объективную оценку цветовых показателей качества ДК.

2. Регистрация цветных изображений ДК, сформированных отраженным от него и прошедшим через него излучением, и сравнение вычисленных по этим изображениям оптических параметров с параметрами цифровых двойников обеспечивает бесконтактное определение светлоты, тона и насыщенности цвета ДК с относительной погрешностью не более 1,3%.

3. Геометрическая и колориметрическая коррекция изображений ДК на основе предварительной калибровки экспериментального стенда обеспечивает независимо от положения ДК в зоне анализа определение класса крупности ДК с погрешностью не более 5% и класса чистоты с погрешностью не более 3,3%.

Научная новизна

1. Разработан метод пересчета спектральных характеристик системы машинного зрения в цветовые характеристики зрительного аппарата человека, обеспечивающий переход от качественного анализа к количественному и позволяющий осуществлять автоматизированную оценку цветовых параметров ДК в соответствии с общепринятыми методиками.

2. Разработан метод контроля качества цветных ДК с использованием систем машинного зрения на основе их калибровки по впервые созданной базе цифровых мер-имитаторов, обеспечивающий высокую стабильность и точность определения оптических показателей за счет стабильности характеристик с течением времени.

3. Разработан экспериментальный стенд, обеспечивающий количественную оценку показателей их качества (цвета, чистоты и размеров) за счет установленных оптимальных режимов освещения цветных ДК, регистрации и цифровой обработки их изображений, полученных как в отраженном, так и проходящем свете, и позволяющий повысить степень автоматизации, увеличить скорость и точность анализа.

Практическая значимость

1. Разработанный метод и экспериментальный оптико-электронный стенд позволяет проводить автоматизированный анализ цветных ДК с подтвержденной стабильностью и точностью измерения их параметров и осуществлять высокопроизводительную предварительную классификацию крупных партий для ускорения и упрощения работы специалистов-геммологов.

2. Разработанная база цифровых двойников мер-имитаторов набора GIA GemSet, которая содержит 324 цифровых двойника с кодировками и расположением на цветовых шкалах, обеспечивает автоматическое определение цвета ДК с помощью систем машинного зрения.

Личный вклад автора

Автором работы проведен основной объем теоретических и экспериментальных исследований, в том числе создание набора цифровых мер-имитаторов для экспериментального стенда, разработка оптической схемы и конструкции экспериментального стенда, разработка методики калибровки стенда и методики проведения измерений, экспериментальное исследование эффективности стенда на представительной пробе цветных ДК.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены на Международной конференции «Прикладная оптика - 2018» (Санкт-Петербург, 2018), VI Международной конференции и молодёжной школе «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, 2020), VII Всероссийском конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2018), VIII Всероссийском конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2019), IX Конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2020), X Конгрессе молодых ученых (Санкт-Петербург, 2021), XVI Международной конференции «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации (Суздаль, 2023).

По теме диссертации соискателем опубликовано 16 научных работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК и/или входящих в базы Scopus и Web of Science, и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Общая структуры работы

Диссертационное исследование представлено на 150 страницах текста, включающего 50 рисунков и 17 таблиц. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 80 источников.

В настоящем введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель, задачи, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа нормативной документации, используемой для оценки показателей качества ДК, и существующих методов и технических средств для решения данной задачи.

Вторая глава посвящена разработке основных принципов построения пространственных моделей набора Gemset, содержащего данные о таких характеристиках, как светлота, насыщенность и тон ДК, применительно к зрительному аппарату человека и разрабатываемому экспериментальному стенду для оптического анализа.

В третьей главе описан разработанный экспериментальный стенд для анализа показателей качества цветных ДК.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям ДК с помощью разработанного стенда.

Пятая глава посвящена анализу погрешности результатов, получаемых с помощью разработанного экспериментального стенда для оптического анализа показателей качества цветных ДК.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

ГЛАВА 1. ФОРМИРОВАНИЕ ПОДХОДА К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

1.1 Анализ нормативной базы для оценки качества драгоценных камней

Анализ нормативной документации, регламентирующей оценку показателей качества цветных ДК, был проведен на основании документов Государственного учреждения по формированию Государственного фонда драгоценных металлов и драгоценных камней Российской Федерации, хранению, отпуску и использованию драгоценных металлов и драгоценных камней при Министерстве финансов Российской Федерации (ГОХРАН).

Существующие нормативные документы – ТУ, СТО и ГОСТ – устанавливают, что для цветных камней, как в сырье, так и в обработанном виде, выделяют такие основные показатели качества, как цвет, цветовые характеристики (цветовой тон, светлота, насыщенность) и чистота.

Основными нормативными документами являются СТО 45866412-16- 2014 «Драгоценные камни. Термины и определения» и «Набор цветных мер-имитаторов драгоценных камней» (Государственный реестр средств измерений, № 20855-01, 2000) [5]. Единственным методом оценки, закреплённым во всех нормативных документах, является экспертный метод, основанный на визуальном наблюдении, знаниях и опыте эксперта-геммолога, а основными инструментами – простейшие оптические инструменты и физические эталоны сравнения. Эталоны сравнения могут быть специально отобранные для этой цели ДК (так называемые мастер-камни) или меры-имитаторы того или иного показателя качества, например, наборы GIA GemSet цветных имитаторов ДК по тону, оттенку и насыщенности.

Подобный подход в силу своей субъективности не способен обеспечить единство измерений показателей качества природных ДК и является одной из ключевых проблем соответствующего рынка, поскольку без объективных количественных критериев невозможно реализовать прозрачные и понятные всем участникам рынка механизмы оценки качества, купли-продажи, оборота, учёта и использования ДК. Можно констатировать, что в настоящий момент нормативная база для

оценки показателей качества цветных ДК не готова для перехода от экспертного метода к цифровому. Тем не менее она является базовым источником информации для проведения соответствующих исследований.

Для оценки цвета ДК в Российской Федерации в настоящее время используют три цветовые модели.

Цветовой атлас GIA [6] имеет две модификации, физически реализованные в виде наборов мер-имитаторов GIA Gem Set: полного (GIA GemSet Hue Set), содержащего 324 образца, и усечённого (GIA GemSet Hue Wheel Version), содержащего всего 50 образцов. Код цвета по GIA содержит обозначения трёх характеристик: оттенка, тона и насыщенности. Например, «сильно насыщенный средний тёмный слабо пурпурновато красный» имеет код slpR 6/5, где slpR – код оттенка (слабо пурпурновато красный), 6 – номер по шкале тонов (средний тёмный), 5 – номер по шкале насыщенностей (сильно насыщенный). Основным недостатком цветового атласа GIA и мер GemSet является то, что на них не существует никаких количественных данных, и, следовательно, они предназначены исключительно для оценки цвета ДК экспертом на основании визуального сравнения.

Набор цветных мер-имитаторов ДК, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений № 20855-01 от 20.12.2000 г. (далее – набор мер-имитаторов из Госреестра СИ), содержащий 50 образцов (31 образец для описания оттенка, 7 образцов для описания тона и 12 образцов для описания насыщенности), изготовленных по технической документации GIA GemSet (GIA Gem Instruments, США). Для описания цвета используется та же терминология, что и у цветового атласа GIA. По сути, набор мер-имитаторов из Госреестра СИ представляет собой усечённый цветовой атлас GIA (GIA GemSet Hue Wheel Version). Набор мер-имитаторов из Госреестра СИ содержит не только физические меры-имитаторы ДК, но и их координаты цвета и цветности в колориметрической системе XYZ МКО 1931 г. для двух стандартных источников освещения (источник типа А и источник типа С). Таким образом, теоретически данный набор мер-имитаторов может быть использован как основа для формирования подхода количественного анализа.

В ходе исследования в данных Госреестра СИ выявлен ряд несогласованностей, показанных на рисунке 1.1. А именно, что в различных цветовых диапазонах расстояние между эталонными образцами шкалы оттенков разное. Следует отметить, что указанная разница не определяется одинаковым контрастом между цветами эталонов (равным количеством эллипсов Мак-Адама – физиологических порогов цветового восприятия).

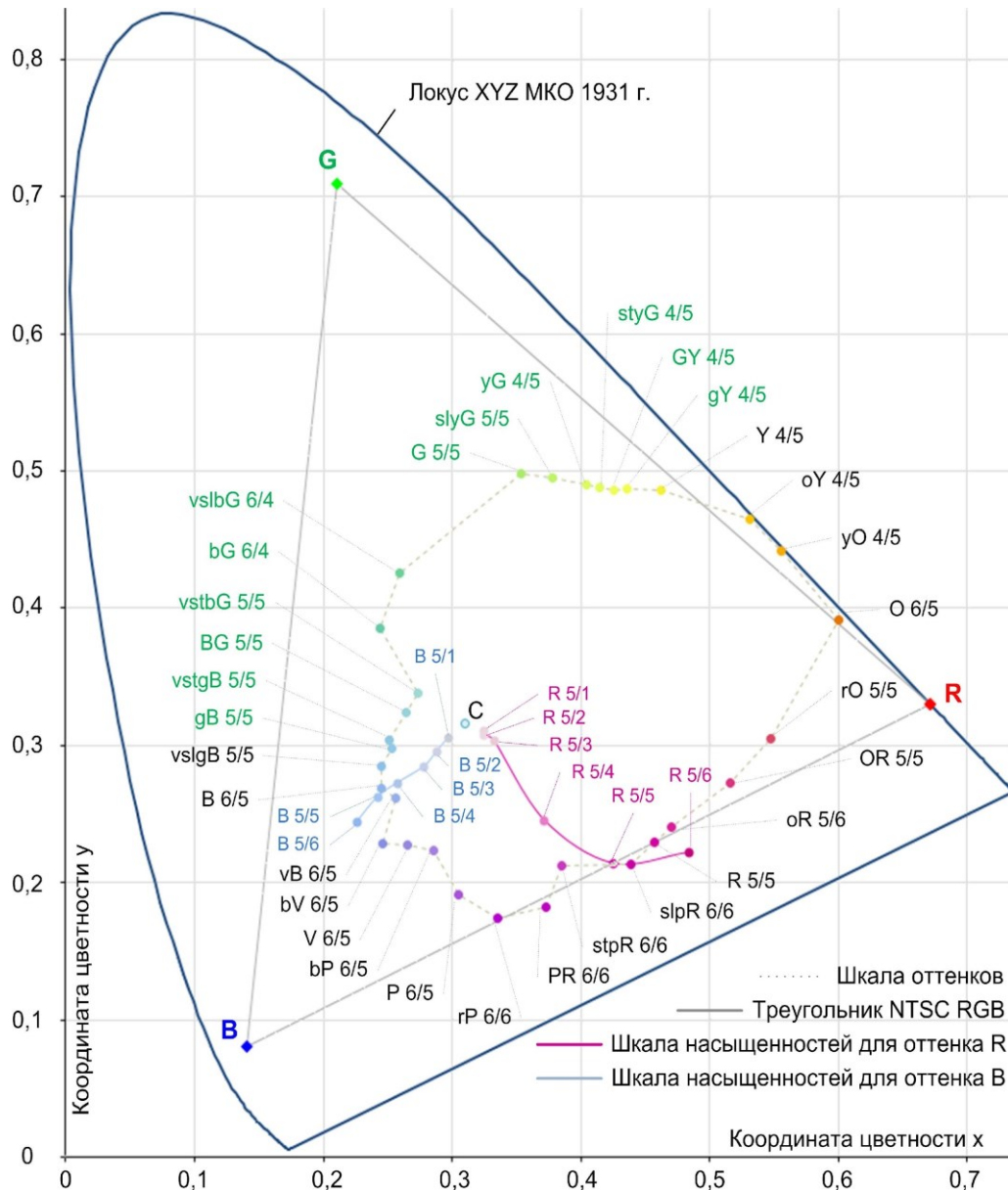


Рисунок 1.1 Графическое представление шкал оттенков, тонов и насыщенностей, приведенных в наборе мер-имитаторов из Госреестра СИ для колориметрической системы XYZ МКО 1931 г. при освещении источников типа С

Кроме того, неоднозначным является выбор мер и их количества. С точки зрения количественной оценки подобная система эталонов является причиной того, что, во-первых, ДК разной природы (например, изумруды и рубины) можно охарактеризовать и классифицировать с различной точностью, так как расстояние между опорными точками непостоянно [7]. И, во-вторых, на практике неизбежна ситуация, когда на анализ может поступить ДК, цвет которого находится между точками эталонных цветов, и возникнет проблема определения оттенка данного ДК, требующая принятия нетривиального решения.

Также на Рисунке 1-1 приведены два частных случая шкал насыщенностей: для красного R и синего B оттенков. Характер кривых неодинаков: близкая к линейной кривая для синих оттенков и кривая сложного характера – для красных [8,9]. При этом две точки R 5/1 и R 5/2 на кривой красных оттенков расположены в пределах двух эллипсов Мак-Адама, что на практике приводит к высокой сложности различия этих оттенков зрительным аппаратом человека. В то же время другие аналогичные точки на кривой расположены более равномерно и на сравнительно больших расстояниях друг от друга.

В расположение кодировок набора мер-имитаторов из Госреестра СИ также есть недостатки, которые могут привести к ошибкам в определении кода цвета ДК, например, цвета с одной и той же кодировкой R 5/5 в шкале оттенков и шкале насыщенностей красного расположены друг от друга на расстоянии, превышающем расстояние до ближайших цветовых классов по шкале цветовых оттенков slpR 6/6 и oR 5/6.

Таким образом, набор мер-имитаторов из Госреестра СИ для оценки цвета ДК как набор эталонов представляет собой довольно узкую и метрологически неоптимальную систему координат, не подходящую для использования в автоматизированных системах оценки.

Набор цветных карточек World of Color производства GemGuide, воспроизводящий возможные цвета ДК аналогично цветовой системе Манселла и предназначенный для визуального сравнения, как и в случае с наборами GIA GemSet.

Специализированное программное обеспечение (ПО) Gem Wizard [10] для оценки огранённых камней, позволяющее на основании анализа изображения обработанного (огранённого) камня определить его цветовые характеристики в соответствии со стандартами GIA и ввести ДК в соответствующую базу данных. Однако в нормативных документах к данному ПО отсутствуют требования как к процедуре получения цифровых изображений ДК, так и к соответствующему оборудованию. В результате ответственность за получение пригодного к обработке и анализу изображения и выбор параметров оценки ДК перекладывается на оператора. Таким образом, Gem Wizard, по сути, является инструментом для визуализации и обучения специалистов-геммологов, помощником экспертам при оценке ДК, но не инструментальным средством оценки ДК.

1.2 Обзор методов и инструментов для анализа качества цветных драгоценных камней

Расширение рынка драгоценных камней (ДК), включая увеличение производства синтетических ДК и широкое распространение подделок, требует от специалистов в области геммологии и оценки не только постоянного улучшения своих профессиональных навыков, но и применения качественного, точного и современного оборудования для диагностики.

Проведенный анализ показал, что наиболее представленным является оборудование для алмазов и бриллиантов (природных и синтетических), а вот для цветных ДК очевиден недостаток современных средств диагностики и оценки качества. Для удобства выделим и проанализируем несколько групп оборудования и инструментов, которые используются в настоящее время.

К классу диагностического можно отнести оборудование, предназначенное для диагностики ДК по свойству теплопроводности.

Presidium Gem Indicator портативный тестер в отрасли, специально предназначенный только для цветных ДК (Рисунок 1.2). Он отображает до 31 различных типов цветных ДК на основе их теплопроводности, имеет функцию ввода цвета,

которая позволяет пользователям выбирать из 12 общих цветов, тем самым обеспечивая более точные результаты анализа [11].



Рисунок 1.2 Внешний вид прибора Presidium Gem Indicator (PGI)

Presidium Gem Tester/ Colored Stone Estimator [12] предназначен для диагностики цветных ДК и идентификации алмазов на основании их термических свойств. До некоторого времени он был единственным цветовым термометром для ДК в промышленности. Внешний вид прибора показан на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 Внешний вид прибора Presidium Gem Tester/ Colored Stone Estimator

Оценщик цветного камня берет складной наконечник зонда, который обеспечивает постоянное давление на ДК во время испытаний для получения более надежных результатов. С самым тонким зондирующим зондом в области 0,6 мм, прибор тестирует алмазы размером 0.02 карат, но не проводит различия между натуральными и синтетическими цветными ДК.

К классу оптического оборудования можно отнести следующие устройства и

ПО.

Gemmological Digital Analyzer – устройство, предназначенное для экспертизы, оценки и классификации ДК, его внешний вид приведен на Рисунке 1-4.

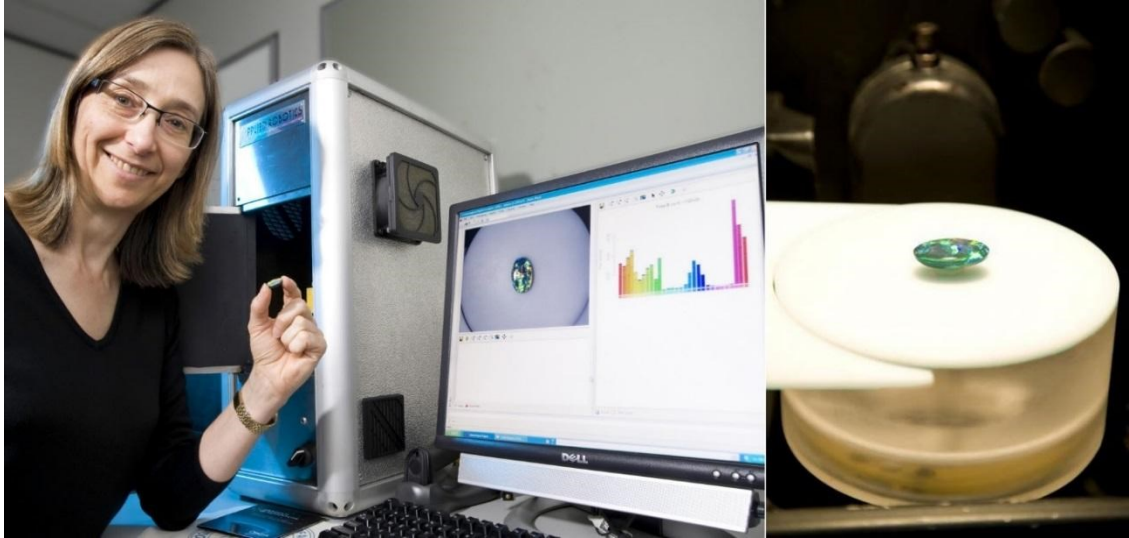


Рисунок 1.4 Внешний вид прибора Gemmological Digital Analyzer

Примечательно оно тем, что, фактически, это единственное устройство, основанное на принципах машинного зрения и цифрового анализа. Однако несмотря на то, что авторами отмечается универсальность устройства, оно создавалось для работы с опалами. Анализ патента «Устройство для экспертизы, оценки и классификации драгоценных камней» RU 2476862 C2 [13] позволяет судить об общем научно-техническом уровне разработки, ее достоинствах и недостатках:

- ограниченное количество регистрируемых устройством показателей качества (рассматриваются только «цвет» и «световые вспышки»);
- сложное устройство позиционирования и изменения ориентации изучаемого образца относительно узла регистрации, требующее также и нетривиальной методики сканирования, которая, в свою очередь, напрямую зависит от особенностей структуры поверхности самого изучаемого образца;
- используемая авторами патента методика цветовой калибровки. Указано, что для этого применяется цветовая мишень Munsell или Macbeth. Однако

использование подобного калибровочного эталона, содержащего ограниченное количество «опорных» цветов (как правило, 24), не способно обеспечить колориметрически верную регистрацию всех возможных цветовых оттенков ДК.

Presidium Synthetic Ruby Identifier [14] – устройство, предназначенное для идентификации синтетических рубинов по коэффициенту пропускания ими УФ излучения (Рисунок 1.5). Время анализа составляет порядка 2 секунд. При этом исследовать можно как отдельные камни, так и ювелирные вставки с рубинами.



Рисунок 1.5 Внешний вид устройства Presidium Synthetic Ruby Identifier

В конструкции устройства предусмотрено приспособление из вспененной основы для защиты от скольжения и предотвращения царапин на поверхности ДК или изделия с ним.

Также широко применяются для исследования оптических свойств ДК **геммологические микроскопы**. Они мало чем отличаются от традиционных, но иногда требуют дополнительных насадок и приспособлений. Для детального экспертного анализа ДК подойдет, например, простой темнопольный оптический микроскоп, имеющий увеличение 5–40 крат (Рисунок 1.6). Естественно, что в данном случае речь идет о визуальном методе анализа ДК.



Рисунок 1.6 Геммологический темнопольный микроскоп

Другим традиционным оптическим инструментом, также нашедшим применение в сфере оценки ДК, являются **инфракрасные (ИК) фурье-спектрометры** [15] (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 Измерительная установка на основе фурье-спектрометра

ИК спектроскопия позволяет определять природу ДК, устанавливая факты облагораживания и выявлять имитации ДК по различиям в ИК-спектрах. Данный метод используется, в частности, для выявления синтетических флюсовых изумрудов и александритов по отсутствию кристаллизационной воды; синтетических гидротермальных изумрудов – по наличию в них хлора, отсутствующего в природных изумрудах; синтетических сапфиров и рубинов по наличию характерных полос ОН групп.

К оптическим средствам можно отнести и ранее упоминавшееся программное обеспечение GeneWizard, с помощью которого возможно определить цвет ДК

по его загружаемому в программу изображению.

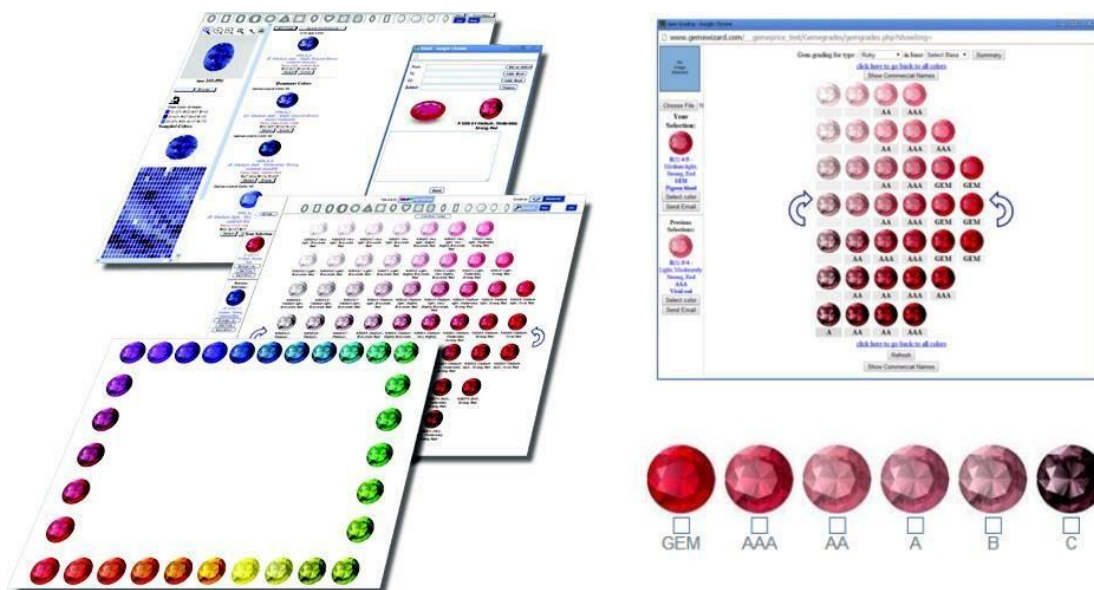


Рисунок 1.8 Внешний вид графического пользовательского интерфейса ПО GemWiz

Ключевыми недостатками GemWiz, ограничивающими его использование, является отсутствие:

- требований к условиям получения загружаемых изображений ДК;
- соответствующего аппаратного обеспечения данного программного продукта.

Получается, что некорректно снятое и/или предварительно обработанное изображение ДК полностью исключает пользу от использования GemWiz. Поэтому оно мало подходит для экспертной оценки цвета драгоценных камней и в основном используется для обучения персонала.

На основании представленного обзора основных инструментальных средств, используемых для оценки качества ДК можно сделать общий вывод о низкой обеспеченности рынка ДК автоматизированными интеллектуальными устройствами [А7]. Если для диагностики (определения подлинности) ДК еще используются современные методы и оборудование, то при оценке качества, как и прежде, можно полагаться, главным образом, только на экспертность специалистов-геммологов,

ювелиров и оценщиков [16-18].

1.3 Исследование возможности перехода от субъективной к объективной оценке качества цветных драгоценных камней

Для перехода от визуальной оценки параметров качества цветных ДК к количественной можно руководствоваться следующим. Приведенное в нормативной документации определение «цвет» не противоречит классическому колориметрическому термину [А8] из ГОСТ 13088-67 «Колориметрия. Термины, буквенные обозначения» [19]:

1. Цвет – аффинная векторная величина трех измерений, выражающая свойство, общее всем спектральным составам излучения, визуально неразличимым в колориметрических условиях наблюдения. Под словом "излучение" следует понимать также свет, отраженный и пропускаемый несамосветящимися телами. При этом колориметрические условия наблюдения – физические условия визуального сравнения, в которых любые одинаковые по спектральному составу излучения неразличимы глазом.

2. Координаты цвета – три числа, указывающие, в каких количествах следует смешать излучения, отвечающие единичным цветам, чтобы получить колориметрическое равенство с измеряемым цветом.

3. Координаты цветности – отношение каждой из координат цвета к их сумме.

С точки зрения классической колориметрии [20] все цветовое пространство оттенков объектов можно представить в виде атласа Манселла – системы описания цветов объектов через три параметра: hue (тон), chroma (интенсивность/глубина цвета) и value (уровень).

Тон – основополагающая характеристика цвета, описываемая словами: красный, синий и т.п. Дополнительно он может описываться четырьмя различными терминами: «основной», «промежуточный», «вторичный промежуточный» и «специальный промежуточный». Интенсивность – сила или слабость цвета. В терминах

глубины цвет описывается как слабый (weak), умеренный (moderate) и сильный (strong).

Градации уровня напрямую связаны с интегральным коэффициентом отражения или пропускания объекта в видимой области спектра.

Исходя из ранее рассмотренного в разделе 1.1 описания цвета цветных ДК, можно сделать вывод о том, что они представляют собой некоторую выбранную часть атласа Манселла. При этом наиболее полным является расширенный каталог цветов атласа GIA, а набор мер-имитаторов из Госреестра СИ является перечнем физических характеристик основных цветов усеченного атласа GIA.

Для описания цветов ДК используются количественные характеристики, полученные колориметрическими методами, которые основаны на сравнении цвета исследуемого камня с цветовыми эталонами в цветовых таблицах DIN и атласах Оствальда и Манселла. Наиболее точным и объективным является метод цветовых координат [21-23], основанный на исследовании спектров оптического поглощения или отражения. Используется диаграмма цветности, принятая МКО из трех основных цветов. Для определения места ДК на диаграмме цветности записывается его спектр поглощения и производится расчет цветовых коэффициентов спектрального тона их трех основных цветов.

Теперь обратимся к стандартам ГОХРАН и рассмотрим оптические параметры и классификационные признаки ДК, указанные в СТО 45866412-16-2014 «Драгоценные камни. Термины и определения» и имеющие значение для перехода на принципы количественного анализа показателей качества цветных ДК [12].

Цветовой тон ДК – компонент цвета, отличающий его от белого, черного и серого цвета, который определяется длиной волны видимой части спектра.

Цветовой оттенок ДК – дополнительный к основному цветовой тон, образованный смешением основного цветового тока со смежным цветовым тоном.

Светлота ДК – компонент цвета, соответствующий количеству цвета по отношению к нейтральному серому, определяющий его положение на шкале от абсолютно черного до абсолютно белого.

В таблице 1.1 приведены описание и условные обозначения светлоты по системе GIA, которые имеет смысл взять за основу при переходе на цифровой анализ.

Таблица 1.1 Классификация светлоты

Тип по шкале	Описание	Условные обозначения GIA
0	Бесцветный или белый	c(w)
1	Чрезвычайно светлый	exl
2	Очень светлый	vl
3	Светлый	l
4	Средне светлый	ml
5	Средний	m
6	Средне темный	mdk
7	Темный	dk
8	Очень темный	vdk
9	Чрезвычайно темный	exdk
10	Черный	bl

При этом степень темноты оценивается по десятибалльной шкале либо в процентах (0% – бесцветный, 100% – самый темный, непрозрачный).

Насыщенность – компонент цвета, характеризующийся интенсивностью спектрального цвета [24-26].

В таблице 1.2 приведены условные обозначения и описание степеней насыщенности цвета по системе GIA, которые предполагается использовать при переходе к цифровому методу анализа показателей качества ДК.

Таблица 1.2 Классификация насыщенности

П/п	GIA			
	Холодные цвета		Теплые цвета	
	Описание	Условн. обознач.	Описание	Условн. обознач.
1	Сероватый оттенок	gr	Коричневатый оттенок	br
2	Слегка сероватый	slgr	Слегка коричневатый	slbr
3	Очень слабый сероватый	vslgr	Очень слабо коричневатый	vslbr
4	Умеренно сильная	mst	Умеренно сильная	mst
5	Сильная	st	Сильная	st
6	Яркая	v	Яркая	v

Масштаб насыщенности GIA представлен шкалой от 1 до 6. При насыщенности, выраженной низкими числами по шкале (1, 2 или 3), камни с теплыми цветами – красным, оранжевым или желтым – имеют тенденцию выглядеть коричневатыми. Камни с прохладными цветами – голубым и зеленым – имеют тенденцию выглядеть сероватыми.

Камни с насыщенностью 4 уровня и выше уже не проявляют ни сероватость, ни коричневатость, вне зависимости от оттенка и тона. Уровень 5 соответствует сильной насыщенности, а уровень 6 – очень сильной, экстремальной насыщенности.

Чистота – основной классификационный признак цветных ДК, определяющий степень их прозрачности, а также степень обнаружения, размеры и количество внутренних дефектов.

Прозрачность определяется степенью поглощения световых лучей в ДК, которая, в свою очередь, зависит от структуры, химического состава вещества, наличия в нем примесей, различных дефектов, агрегатного состояния, а также длины волны падающего света.

В настоящее время прозрачность ДК определяется путем просмотра его на просвет, также могут использоваться количественно-спектроскопические методы в оптическом диапазоне длин волн.

Внутренние дефекты – внутренние особенности, целиком заключенные внутри камня или частично выходящие на его поверхность твердые минеральные, жидкие газово-жидкие включения, трещины, структурные неоднородности (подсинтетические двойники, ростовая зональность).

В международных лабораториях GIA, осуществляющих оценку цветных камней, выделяются следующие группы чистоты:

1. Чистота камня FL – безупречной чистоты камень, абсолютно идеальный. Полное отсутствие включений и внешних дефектов (сколы трещинки, ямочки), которые можно рассмотреть при десятикратном увеличении.
2. Чистота камня IF – камень, в котором не видно включений, если рассматривать его в лупу с десятикратным увеличением. Однако камень может иметь незначительные, слабозаметные внешние дефекты – сколы трещинки, ямочки. Зачастую такие погрешности можно устранить дополнительной полировкой камня.
3. Чистота камня VVS – это обозначение указывает на то, что в камне есть незначительные включения, которые очень и очень сложно обнаружить с использованием десятикратного увеличительного стекла.
4. Чистота камня VS – в камне присутствуют незначительные включения, которые сложно разглядеть при десятикратном увеличении.
5. Чистота камня Si1 – включения, легко заметные при десятикратном увеличении.
6. Чистота камня Si2 – камень, в котором есть включения, очень легко заметные при десятикратном увеличении.
7. Чистота камня I1 – камень с такой характеристикой чистоты имеет включения, которые можно разглядеть невооружённым глазом. При этом внешний вид драгоценного камня портиться.

8. Чистота камня I2 – включения, которые легко различимы невооружённым глазом. При этом внешний вид самоцвета сильно портится.
9. Чистота камня I3 – включения, которые очень легко различимы невооружённым глазом. При такой степени включений камень становится достаточно хрупким, подверженным физическому воздействию. Прочность камня снижается.

Данную информацию можно использовать для определения базовых количественных порогов разделения классификационных групп ДК по чистоте

Выводы по главе 1

Анализ применяемой в сфере оценки ДК нормативной документации позволил выявить ряд недостатков общепринятой методологии. К ним, прежде всего, относится неоптимальный выбор эталонов сравнения цвета и их количества, который приводит к невозможности определения показателя качества «цвет» ДК в цветовых диапазонах зеленого, красного и синего оттенков с одинаковой точностью вследствие их неоднородного расположения на локусе. Кроме того, существенно осложняют оценку ДК высокая сложность различения зрительным аппаратом человека цветовых оттенков одного ряда, находящихся близко друг к другу, как в случае с R 5/1 и R 5/2, и высокая вероятность ошибки в присвоении кода цвета для ДК цветовых оттенков, расположенных друг к другу дальше по шкале насыщенностей, чем цветовые оттенки соседних цветовых классов, например, как в случае с R 5/5, slpR 6/6 и oR 5/6.

Установлено, что приведенное в нормативной документации определение «цвет» не противоречит классическому колориметрическому термину, что позволяет согласовать стандартное цветовое пространство с цветовой палитрой ДК и разработать на основании полученных данных методику для определения цветовых характеристик ДК уже на принципах цифрового анализа. При этом определение чистоты ДК осуществляется через определение формы и дефектов (включения и трещины) во всем объеме камня с использованием существующей классификации.

Эта классификация может быть использована в качестве основы для перехода к количественному анализу чистоты через формализацию оптических показателей прозрачности и количества включений и трещин в ДК. Использование совокупности этих данных позволяет присвоить группу чистоты [А9].

Проведенный аналитический обзор технических средств, доступных специалистам ювелирной области для решения задач определения и контроля показателей качества цветных ДК, выявил их малое разнообразие и ограниченный функционал.

Таким образом, показано, что существующая нормативная документация, ни немногочисленные инструментальные средства, доступные в настоящее время специалистам-геммологам и ювелирам, и используемые для решения частных задач контроля показателей качества цветных ДК, в полной мере не обеспечивают объективность этого процесса. Способствовать преодолению данного ограничения может переход от существующих экспертных методов контроля качества цветных ДК к бесконтактным методам и приборам, основанным на принципах машинного зрения и колориметрии [27].

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОПИСАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ ДЛЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ

Как было показано в Главе 1, в настоящее время отсутствует общепринятая система количественной оценки показателей качества цветных ДК, а также специализированные технические средства, используемые в ювелирной отрасли, которые возможно было бы применить также и для создания подобной системы.

Очевидно, что в таком случае ключом для реализации перехода от качественного анализа к цифровому являются существующие наборы мер-имитаторов и мастер-камней для визуальной оценки.

Однако, если для определения показателя качества «цвет» такие наборы существуют, то для «чистоты» – нет. Соответственно, для данного показателя необходимо предлагать новую методологию.

Что касается определения еще одного показателя качества ДК – размерности, то цифровые методы к определению размерных параметров объектов различной формы уже давно применяются, и для решения задачи настоящей работы их нужно всего лишь интегрировать в создаваемую общую систему количественной оценки показателей качества цветных ДК.

Последовательно рассмотрим каждую из частных задач.

2.1 Построение системы координат для цифровой оценки цвета цветных ДК

Система координат для цифровой оценки цвета цветных ДК с одной стороны должна обеспечивать возможность определения параметров цвета в общепринятой международной системе координат (измерение цвета в соответствии с рекомендациями МКО), с другой стороны должна обеспечивать взаимосвязь с существующими на данный момент времени наборами мер-имитаторов цветных ДК, представляющими общепринятые наименования цветовых оттенков для оценщиков.

Согласно классической теории колориметрии, цветовое тело объектов располагается в области, ограниченной цветовым телом излучений с одной стороны, и единичной плоскостью с другой (Рисунок 2.1). Единичная плоскость проходит через вершины векторов, характеризующих базу системы измерения. При этом векторная система измерения \vec{XYZ} основана нереальными цветами, расположенными так, чтобы любая точка цветового тела излучений имела положительные координаты (полностью вмещает в себя цветовое тело излучений). Векторная система измерений \vec{RGB} основана на реальных цветах, расположенных внутри цветового тела излучений, поэтому цвета, близкие к линии спектральных цветностей имеют одну или две отрицательных координаты.

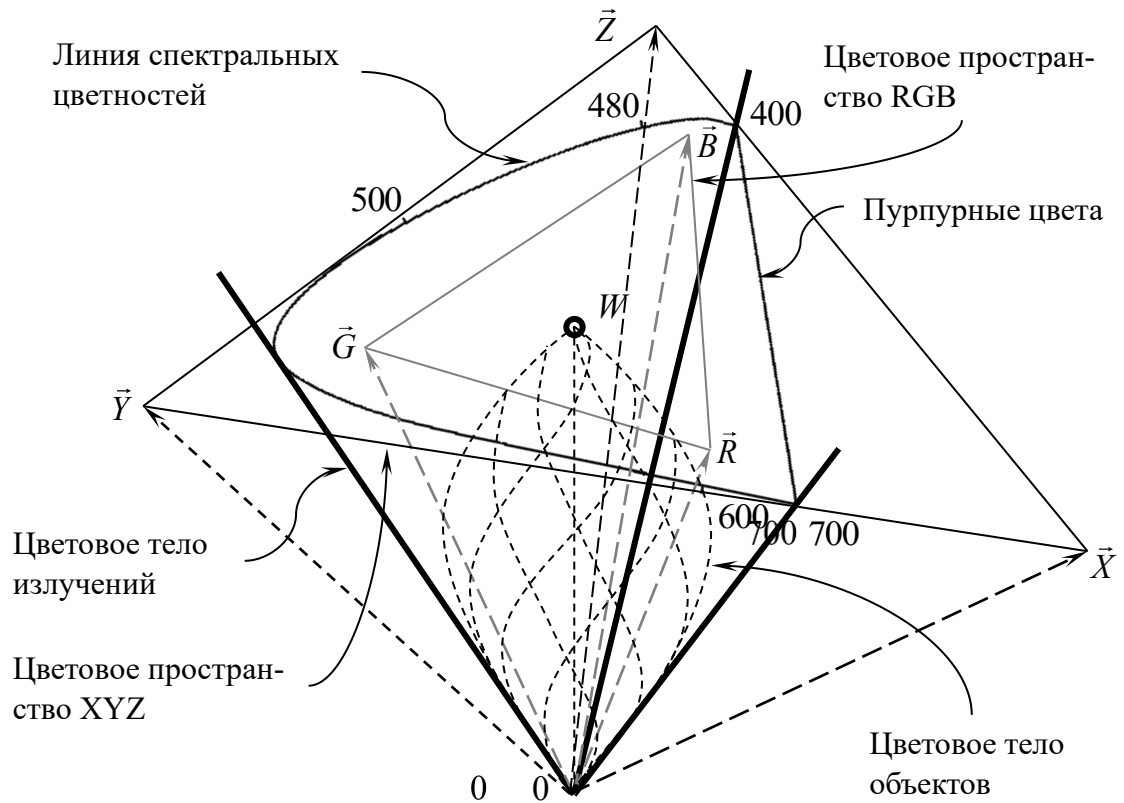


Рисунок 2.1 Цветовые тела объектов и излучений для зрительного аппарата человека и векторные пространства их представления

Поскольку кривые сложения заданы в численном виде, то формулы для расчета координат цвета (X, Y, Z) для объектов по рекомендациям МКО [28-30] имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 X &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \omega(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\
 Y &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \omega(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda, \\
 Z &= k_c \sum_{i=1}^n P_{\lambda}(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \omega(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

где $P_{\lambda}(\lambda_i)$ – спектральная плотность мощности излучения источника подсветки; $\omega(\lambda_i)$ – функция, характеризующая цветовые свойства объекта в зависимости от его пропускания и/или отражения, а также схемы измерения; k_c – коэффициент коррекции, рассчитываемый по формуле

$$k_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_\lambda(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda} \quad (2.2)$$

Аналогичный расчет имеет место и для векторной системы измерений $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$ МКО, кривые сложения которой представлены на Рисунке 2.3.

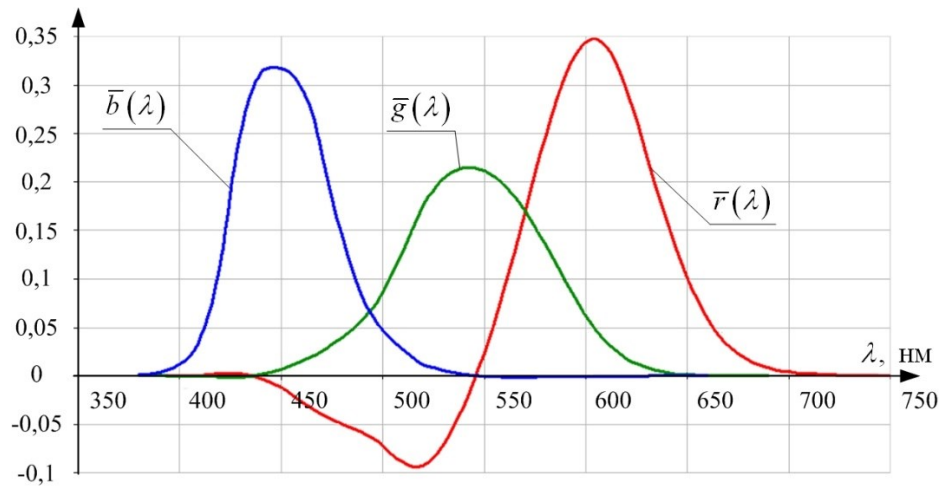


Рисунок 2.3 Кривые сложения физиологической системы $\vec{R}\vec{G}\vec{B}$

Для системы машинного зрения в качестве кривых сложения используются кривые чувствительности $S_r(\lambda)$, $S_g(\lambda)$ и $S_b(\lambda)$ каналов цветности камеры (Рисунок 2.4).

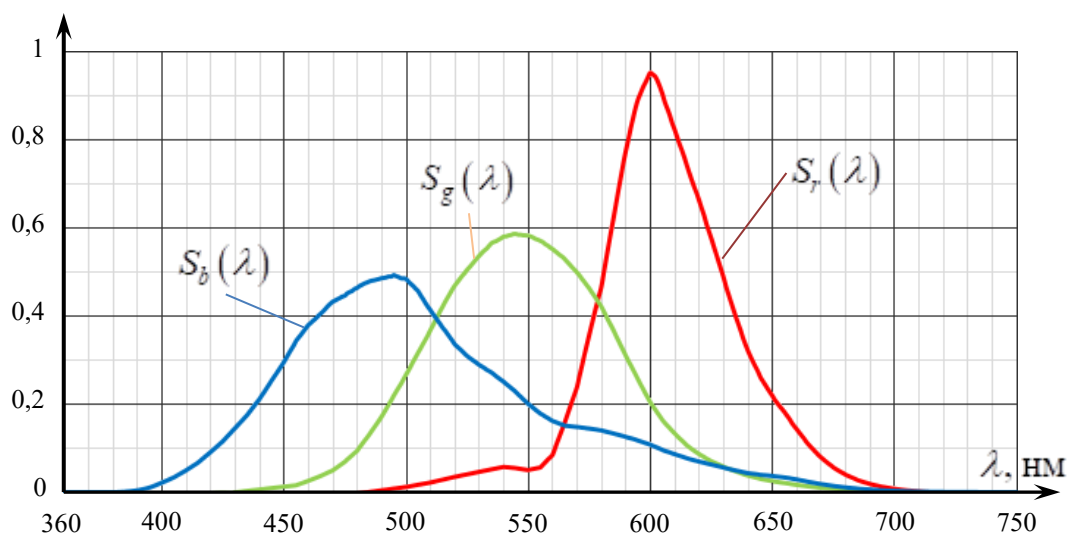


Рисунок 2.4 Кривые чувствительности матрицы OV5620 камеры VEI-545 фирмы EVS с учетом ИК-фильтра

Поскольку все перечисленные системы являются векторными, то возможен пересчет из одной системы в другую, то есть согласование цветового тела системы технического зрения с известными кривыми чувствительности и тела системы зрительного восприятия с известными кривыми сложения.

Итак, кривые чувствительности матрицы определяют основные цвета, являющиеся метрикой системы измерения цвета [31-33] – красный, зеленый и синий. По графикам, представленным на рисунке 2.4 можно рассчитать координаты основных цветов в координатной системе МКО XYZ 1931г.:

- основной красный $X_r^{TV} = 1,48552$, $Y_r^{TV} = 1$, $Z_r^{TV} = 0,00753$;
- основной зеленый $X_g^{TV} = 0,60406$, $Y_g^{TV} = 1$, $Z_g^{TV} = 0,12973$;
- основной синий $X_b^{TV} = 0,68266$, $Y_b^{TV} = 1$, $Z_b^{TV} = 1,43857$.

При известных спектральных характеристиках излучения источника подсветки, используемой в системе технического зрения $P_\lambda^{TV}(\lambda)$ по классической методике можно рассчитать его координаты цвета в координатной системе МКО XYZ 1931г.:

$$\begin{aligned} X_W^{TV} &= k_c^{TV} \sum_{i=1}^n P_\lambda^{TV}(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\ Y_W^{TV} &= k_c^{TV} \sum_{i=1}^n P_\lambda^{TV}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \\ Z_W^{TV} &= k_c^{TV} \sum_{i=1}^n P_\lambda^{TV}(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \quad (2.3)$$

где

$$k_c^{TV} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_W^{TV}(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \cdot \Delta\lambda} \quad (2.4)$$

Полученные значения определяют коэффициенты искажения координат K_r^{TV} , K_g^{TV} и K_b^{TV} в каналах цветности системы технического зрения с данными основными цветами при использовании данного источника подсветки:

$$\begin{bmatrix} \kappa_r^{TV} \\ \kappa_g^{TV} \\ \kappa_b^{TV} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r^{TV} & X_g^{TV} & X_b^{TV} \\ Y_r^{TV} & Y_g^{TV} & Y_b^{TV} \\ Z_r^{TV} & Z_g^{TV} & Z_b^{TV} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_W^{TV} \\ Y_W^{TV} \\ Z_W^{TV} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Коэффициенты искажения координат κ_r^{TV} , κ_g^{TV} и κ_b^{TV} , а также координаты основных цветов системы технического зрения $(X_r^{TV}, Y_r^{TV}, Z_r^{TV})$, $(X_g^{TV}, Y_g^{TV}, Z_g^{TV})$ и $(X_b^{TV}, Y_b^{TV}, Z_b^{TV})$ определяют матрицу пересчета $[MX]$ из координатной системы представления цветов, заданной основными цветами системы технического зрения, в координатную систему МКО XYZ 1931г. следующим образом:

$$[MX] = \begin{bmatrix} \kappa_r^{TV} \cdot X_r^{TV} & \kappa_g^{TV} \cdot X_g^{TV} & \kappa_b^{TV} \cdot X_b^{TV} \\ \kappa_r^{TV} \cdot Y_r^{TV} & \kappa_g^{TV} \cdot Y_g^{TV} & \kappa_b^{TV} \cdot Y_b^{TV} \\ \kappa_r^{TV} \cdot Z_r^{TV} & \kappa_g^{TV} \cdot Z_g^{TV} & \kappa_b^{TV} \cdot Z_b^{TV} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Данная матрица пересчета $[MX]$ определяет правила согласования координат цвета пространства системы технического зрения и системы МКО XYZ 1931г. для всех цветовых оттенков, расположенных внутри конуса, образованного векторами основных цветов каналов чувствительности системы технического зрения.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [MX] \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Оттенки, расположенные за пределами конуса теоретически должны подчиняться тому же правилу, но в силу того, что система технического зрения в принципе не может эти оттенки определить корректно (искажается либо одна, либо две координаты), следовательно, для них правило $f(R, G, B)$ соответствия возможно определить исключительно по опорным точкам – эталонным образцам цвета объектов с максимальной насыщенностью. Такое правило можно записать в следующем виде:

$$[\Xi] = f(R, G, B) \cdot [\xi] \quad (2.8)$$

где $[\xi]$ – множество координат (R, G, B) в системе технического зрения эталонных образцов цвета; $[\Xi]$ – множество координат (X, Y, Z) указанных эталонных образцов.

Следует отметить, что полученные координаты (X, Y, Z) описывают цвета объектов при освещении их источником, используемым для подсветки в системе технического зрения. По рекомендациям МКО классическая система XYZ 1931г. представляет цвета объектов при их освещении источником типа D65. Также могут использоваться колориметрический эталон белого излучения (источник типа E) и эталон естественного света №1 (источник типа C).

При известных координатах цвета источника подсветки системы технического зрения и источника типа D65 можно провести колориметрическую коррекцию полученных координат цвета объектов по классической методике с использованием одного из методов: масштабирование XYZ , Бредфорда или Вон-Крайса. Считается, что метод Бредфорда наиболее качественный.

Наиболее известным атласом для оценки цвета ДК является атлас GIA, содержащий 324 типовых цвета, стандартизированных в соответствующем наборе эталонных образцов GIA GemSet 324. Именно его и следует рассматривать в качестве основы для создания цифровой системы оценки данного показателя качества.

Один из таких наборов был исследован методами спектральным и машинного зрения с разрешения, и при поддержке Московской геммологической лаборатории (г. Москва).

Спектральным методом измерялась только плоская часть каждого образца, т.к. для ограненной такие измерения смысла не имеют. Затем выполнялось моделирование спектральных характеристик пропускания для ограненных частей из расчета увеличения в них длины оптического пути проходящего излучения. По измеренным (для плоских частей) и рассчитанным (для ограненных частей) спектральным характеристикам пропускания выполнялся расчет цветовых характеристик для всех элементов набора GIA GemSet 324.

Для спектральных измерений использовалось оборудование компании Ocean Optics – спектрометр USB4000 и оптический зонд отражения/обратного рассеяния R200-12-MIXED – а также лампа накаливания в качестве источника излучения.

Проекция полученного цветового тела для набора GIA GemSet 324 на единичную плоскость (диаграмму цветности) представлена на Рисунке 2.5 [A11].

Кроме того, полученные спектральные данные легли в основу математической модели изменения свойств пропускания ДК при изменении величины оптического пути в них. Указанная модель необходима для определения палитры цветовых оттенков, которые имеют место у ограненных образцов прозрачных и полупрозрачных ДК.

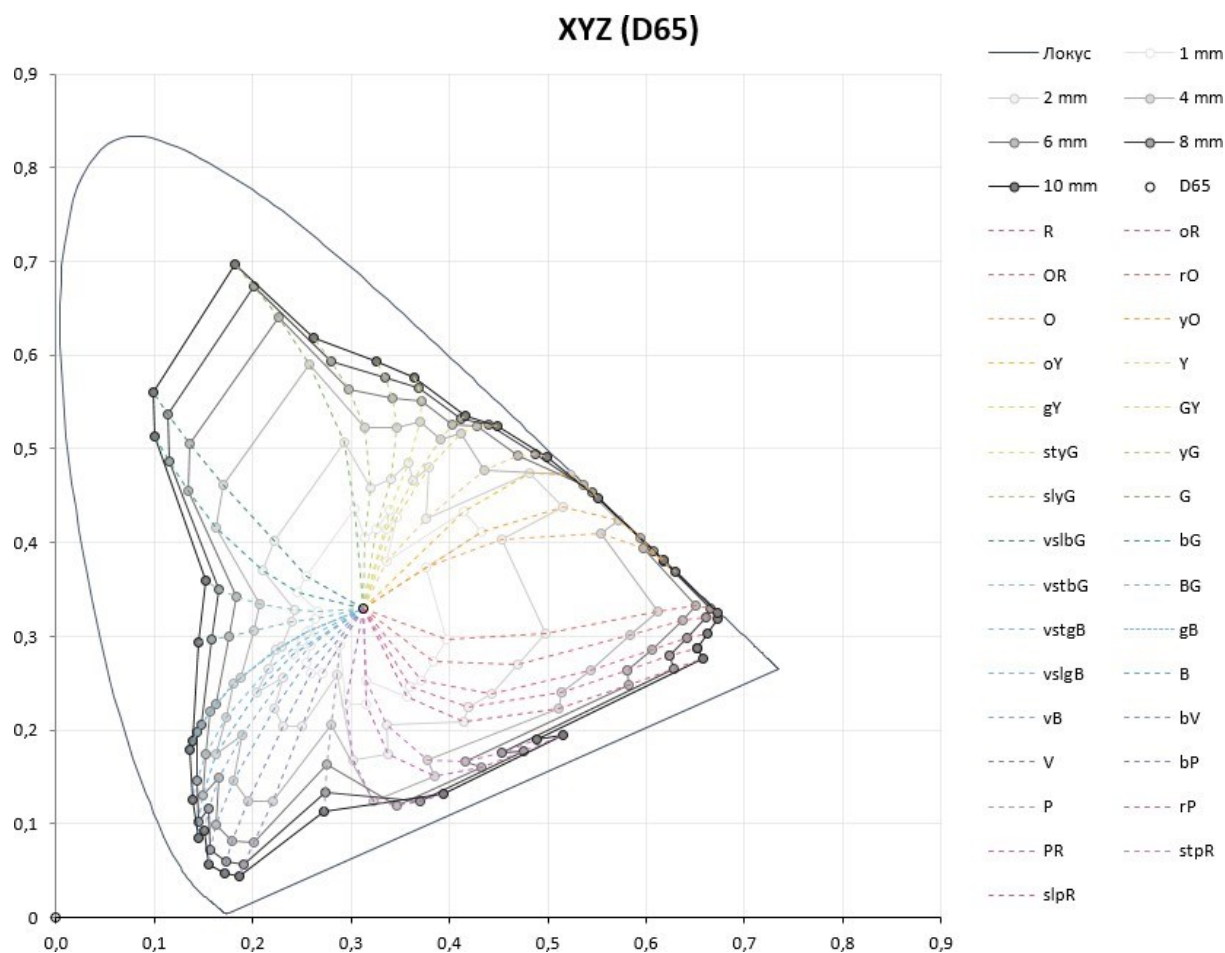


Рисунок 2.5 Цветовое тело, образованное мерами-имитаторами набора GIA GemSet, рассчитанное по результатам спектральных измерений в условиях освещения стандартным колориметрическим источником D65

Значение коэффициента пропускания τ_2 при новой толщине d_2 рассчитывается исходя из известного значения измеренного коэффициента пропускания τ_1 при известной толщине d_1 в соответствии с представленной формулой:

$$\tau_2 = \exp\left\{\frac{d_2}{d_1} \cdot \ln(\tau_1)\right\} \quad (2.9)$$

Таким образом, возможно построение ряда спектральных характеристик пропускания образца при различных толщинах, как представлено на Рисунке 2.6.

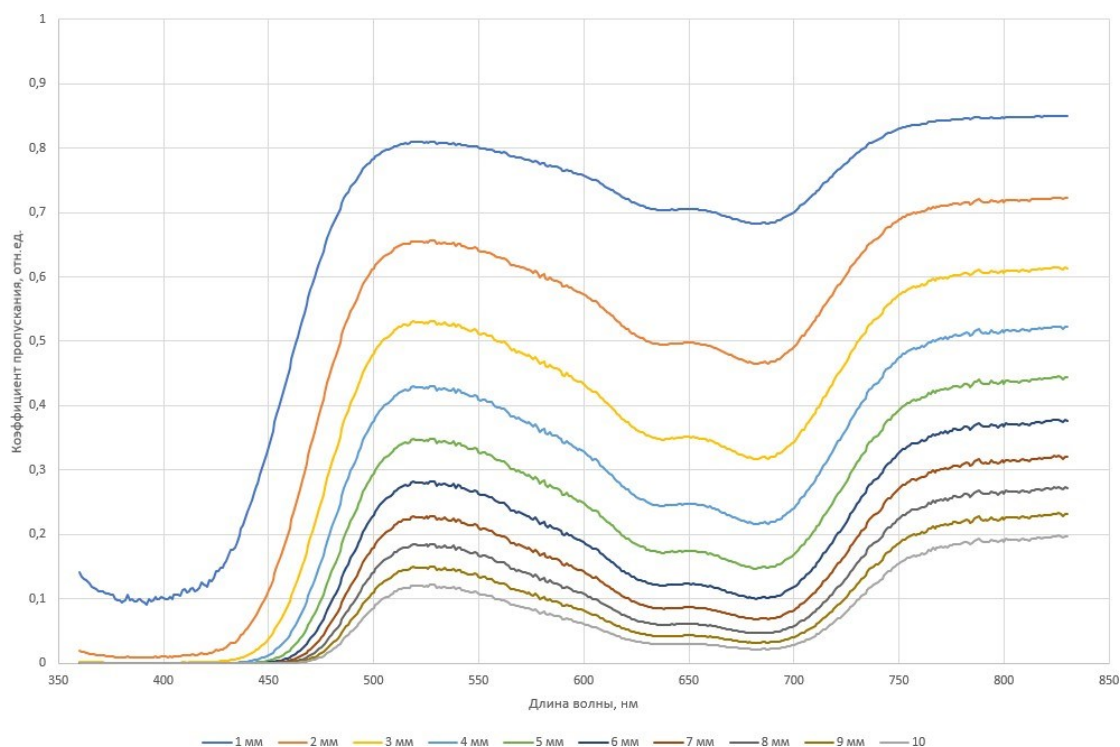


Рисунок 2.6 Изменение коэффициента пропускания образца уG 4/5 набора GIA GemSet при изменении оптического пути в образце

Полученные при математическом моделировании спектральные характеристики используются для определения цветовых параметров палитры при помощи стандартной методики расчета цветовых координат XYZ с учетом спектральных характеристик источника подсветки.

Для иллюстрации процесса использования рассчитанных оттенков палитры приведен на Рисунке 2.7. На нем представлены рассчитанные цвета образцов цветового круга набора GIA GemSet при различных толщинах (палитры изменения

цвета), а также изображение ограненной части плашки набора GIA GemSet с маркировкой vslbG 6/4, полученной в режиме «на пропускание» с изменением цветовых оттенков, вызванным изменением толщины плашки [A12].

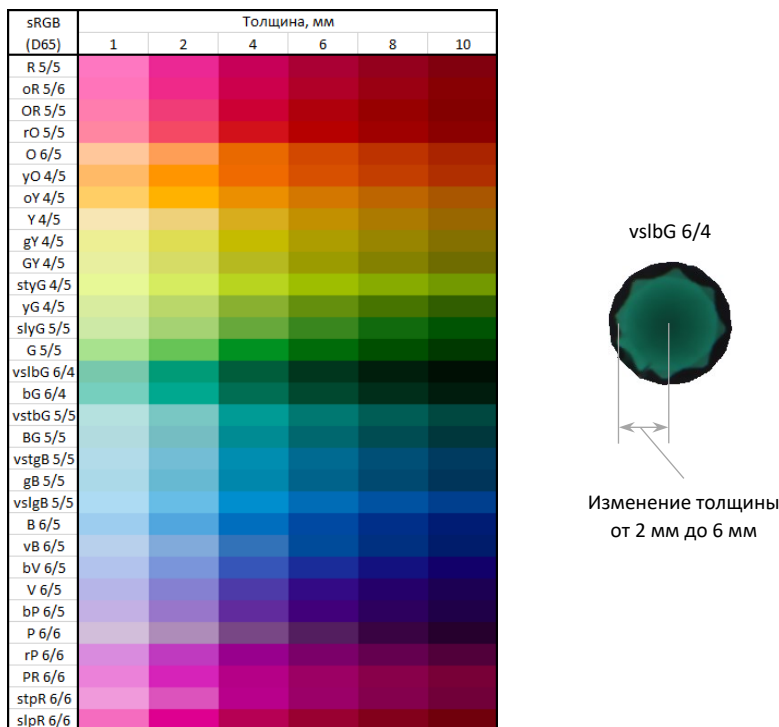


Рисунок 2.7 К вопросу анализа палитры при измерении ограненных объектов

На втором этапе исследований набора GIA GemSet 324 регистрировались цифровые изображения каждого из 324 образцов набора, и для плоской, и для ограненной частей. Для этого использовалась измерительная схема на базе камеры VEI-545 фирмы ЭВС и светодиодных линеек ф. Avago Technologies. После этого рассчитывались координаты цвета изображений каждого образца.

Перед проведением измерений для системы машинного зрения выполнялся ряд калибровочных процедур:

- энергетическая калибровка для исключения влияния неравномерности засветки зоны анализа,
- колориметрическая калибровка для определения базовых точек оценки цвета (точки белого и точки черного),

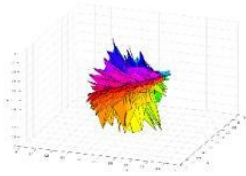
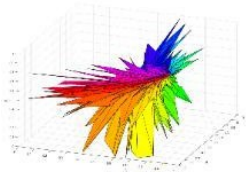
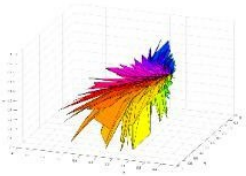
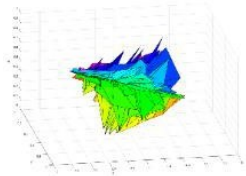
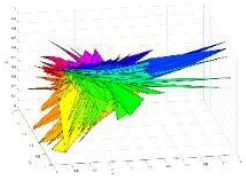
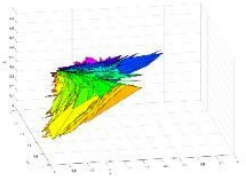
- метрическая калибровка для сохранения пропорций анализируемых объектов.

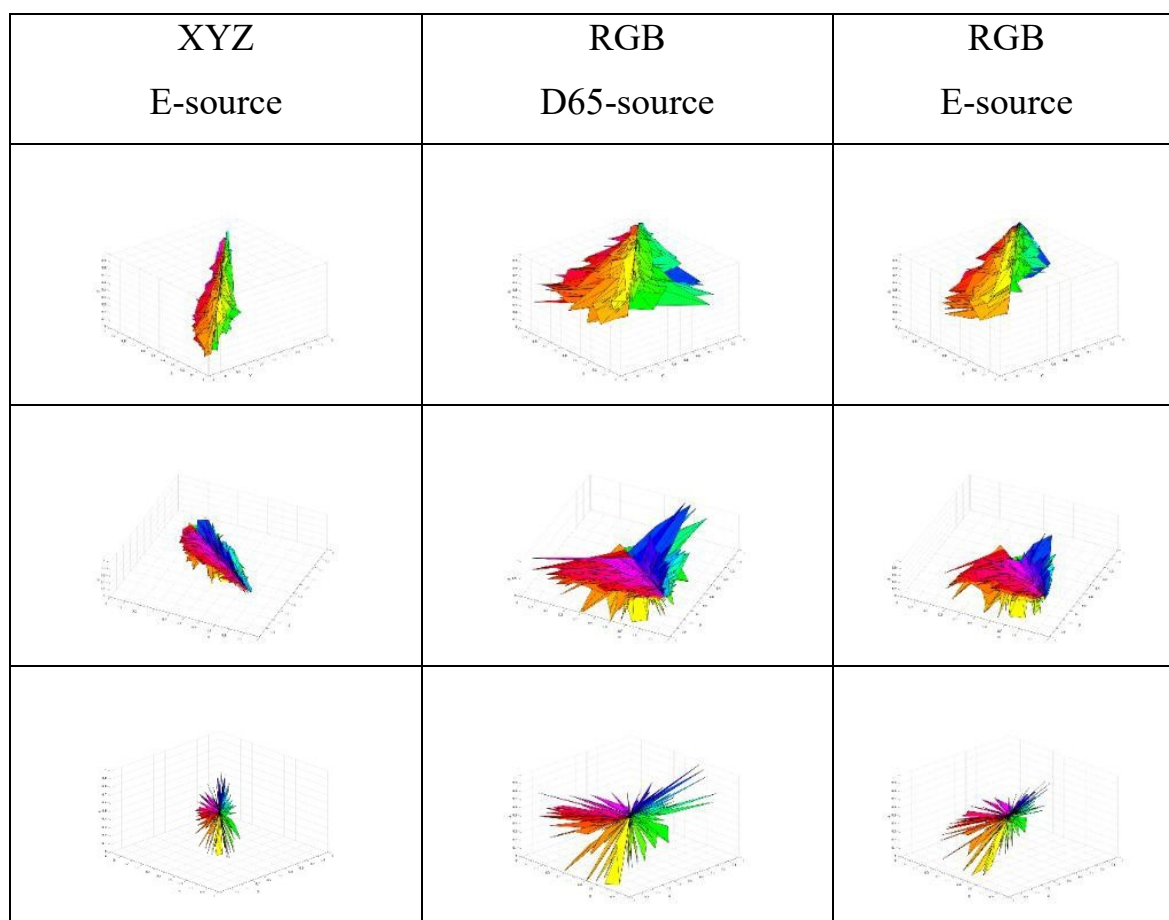
Далее результаты определения цвета, полученные методами спектрофотометрическим и машинного зрения [34], сравнивались, и для камеры выполнялась окончательная калибровка для приведения цветового тела ее воспроизведения максимально близко к эталонному [35].

В качестве эталонных принимались значения координат цвета, полученные в результате расчета по полученным спектральным характеристикам отражения.

Итоговая база координат цвета набора эталонов GIA GemSet 324 является основой для реализации цветового анализа цветных ДК. При этом она может быть пересчитана автоматически для получения координат цвета при использовании любого источника освещения (в том числе, стандартных источников типа А, В, С, D65, Е), а также любого другого эталона белого с известными характеристиками отражения (таблица 2.1).

Таблица 2.1 Изменения формы цветового тела воспроизведения камерой VEI-545 оттенков цвета набора GIA GemSet при изменении системы представления цвета и источника подсветки, рассчитанные с учетом всех калибровок

XYZ E-source	RGB D65-source	RGB E-source
		
		



Данная таблица иллюстрирует изменения формы цветового тела, образованного одними и теми же объектами, в зависимости от используемого источника подсветки (источник типа E или D65) и системы представления цвета (XYZ или RGB) [35].

Разумеется, на наблюдаемый цвет образца оказывает влияние целый ряд его собственных физических параметров, в том числе, структура поверхности, а также условия наблюдения. Разумеется, цифровая система оценки должна учитывать возможных диапазон изменений параметров решения задачи и их влияние на результирующий цвет.

Для иллюстрации данной ситуации на Рисунке 2.8 в качестве примера представлена визуализация теоретического изменения наблюдаемого цветового оттенка образца изумруда в зависимости от параметров шероховатости его поверхности в условиях равномерного освещения (интегрирующая сфера).

По результатам проведенных исследований набор GIA GemSet был оцифрован с целью его последующего использования в качестве базы сравнения при анализе цвета образцов цветных ДК уже методом машинного зрения, в автоматическом режиме. При этом были сохранены принцип организации набора по каталогам и все кодировки образцов GIA GemSet. База представляет собой инструмент для автоматического определения цвета ДК с помощью системы машинного зрения [A2, A11].

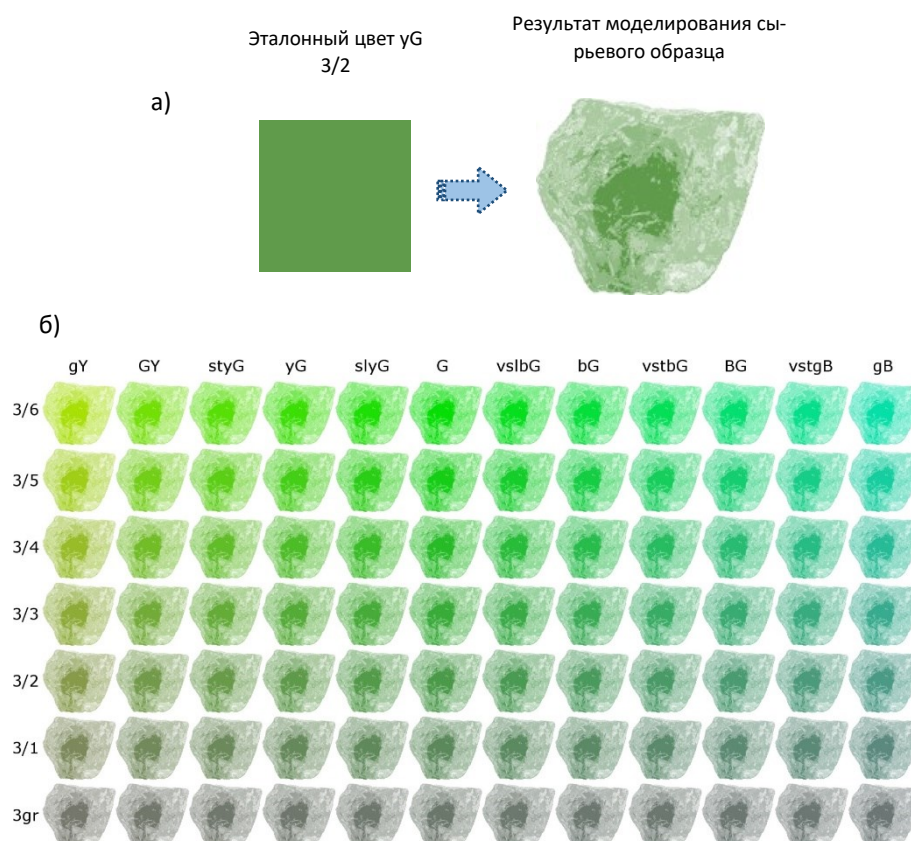


Рисунок 2.8 Результаты математического моделирования прозрачного образца изумрудного сырья с шероховатой поверхностью для эталонного цвета uG 3/2 и оценки цвета для образцов прозрачного изумрудного сырья с шероховатой поверхностью и средней светлотой при изменении цветового оттенка

На Рисунках 2.9, 2.10 и 2.11 в качестве примера показан каталог отдельных цветов созданной базы данных.

База сравнения GIA GemSet

Сектора		1	2	3	4	5	6	XYZ координаты			
								Код GIA	X	Y	Z
R											
oR	2							69,083	74,603	63,661	
RO/OR								57,391	61,847	54,99	
rO								46,008	56,094	32,821	
O								55,099	67,146	44,978	
yO	3							37,736	43,037	31,12	
oY								40,716	50,145	35,87	
Y								34,184	52,618	15,738	
gY								34,759	37,84	31,06	
YG/GY	4							28,643	38,033	19,052	
styG								21,899	37,82	5,486	
yG								4,574	5,83	3,557	
slyG								14,902	24,383	8,435	
G	5							3,816	4,482	3,153	
vslbG								12,057	18,062	9,524	
bG								3,633	4,666	3,545	
vstbG											
GB/BG											
vstgB											
gB	6										
vslgB											
B											
vB											
bV	7										
V											
bP											
P											
rP											
PR/RP	8										
stpR											
slpR											

Выход

Рисунок 2.9 Цифровой каталог G набора GIA GemSet 324

База сравнения GIA GemSet

Сектора		1	2	3	4	5	6	XYZ координаты		
								Код GIA	X	Y
R										
oR	2							54,106	47,02	44,302
RO/OR								49,853	43,528	40,388
rO								54,907	39,4	38,747
O								53,696	40,815	39,94
yO	3							30,836	13,442	11,301
oY								46,203	39,309	38,403
Y								44,679	36,358	37,203
gY								39,171	27,708	29,336
YG/GY	4							36,259	14,462	17,503
styG								17,426	5,993	4,658
yG								14,001	4,927	1,941
slyG								35,031	22,955	24,238
G	5							17,142	6,952	9,724
vslbG								21,029	13,465	16,014
bG								17,622	7,231	12,445
vstbG								4,366	2,23	2,729
GB/BG										
vstgB										
gB	6									
vslgB										
B										
vB										
bV	7									
V										
bP										
P										
rP										
PR/RP	8									
stpR										
slpR										

Выход

Рисунок 2.10 Цифровой каталог R набора GIA GemSet 324

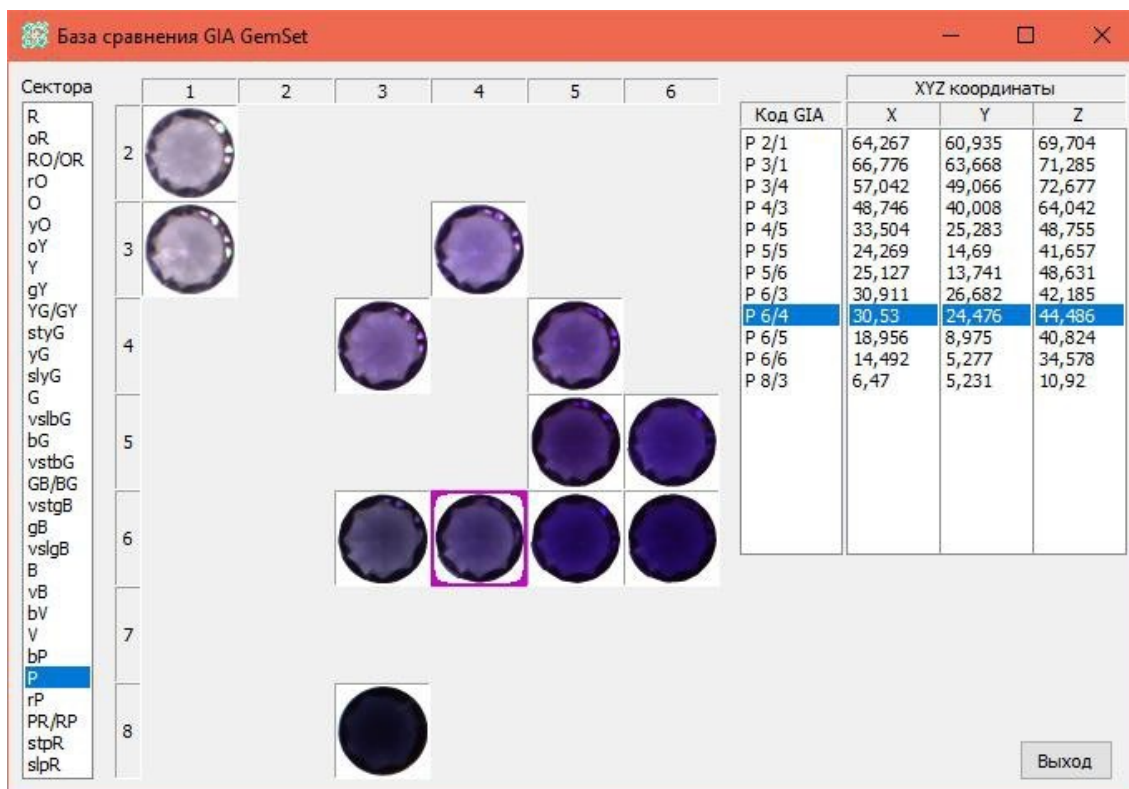


Рисунок 2.11 Цифровой каталог P набора GIA GemSet 324

Таким образом, впервые предложена базы данных цифровых двойников, аналогичных мерам-имитаторам набора GIA GemSet 324, предназначенная для автоматического определения цвета ДК с помощью системы машинного зрения.

2.2 Теоретические основы определения показателя качества «чистота» в количественном виде

Как было сказано выше, мер-имитаторов показателя качества «чистота» для цветных ДК не существует. Соответственно, для разработки метода количественной оценки данного показателя методом машинного зрения не остается ничего иного, как использовать существующие общепринятые и закрепленные в нормативных документах описания.

Рассмотрим их более подробно.

Термины «чистота» и «дефекты» в разных СТО имеют **различную трактовку**. Для сырья ДК «чистота» является **классификационным признаком**, а для обработанных драгоценных камней – **показателем качества**.

В соответствие с [37- 44] имеем:

Чистота – основной **классификационный признак** цветных ДК, определяющий степень их прозрачности, а также степень обнаружения, размеры и количество внутренних дефектов.

Внутренние дефекты – внутренние особенности, целиком заключенные внутри камня или частично выходящие на его поверхность твердые минеральные, жидкие газовой-жидкие включения, трещины, структурные неоднородности (подсинтетические двойники, ростовая зональность).

В соответствие с [45] имеем:

- Чистота – **показатель качества**, характеризующийся наличием или отсутствием внутренних дефектов.
- Внутренние дефекты – различные дефекты, находящиеся полностью внутри или частично выходящие на поверхность сапфира.

В международных лабораториях GIA, осуществляющих оценку цветных камней, выделяются следующие группы чистоты:

- Чистота FL. Безупречной чистоты камень, абсолютно идеальный. Полное отсутствие включений и внешних дефектов (сколы трещинки, ямочки), которые можно рассмотреть при десятикратном увеличении.
- Чистота IF. Камень, в котором не видно включений, если рассматривать его в лупу с десятикратным увеличением. Однако камень может иметь незначительные, слабозаметные внешние дефекты – сколы трещинки, ямочки. Зачастую такие погрешности можно устранить дополнительной полировкой камня.
- Чистота VVS. Это обозначение указывает на то, что в камне есть незначительные включения, которые очень и очень сложно обнаружить с использованием десятикратного увеличительного стекла.
- Чистота VS. В камне присутствуют незначительные включения, которые сложно разглядеть при десятикратном увеличении.
- Чистота Si1. Включения, легко заметные при десятикратном увеличении.

- Чистота Si2. Камень, в котором есть включения, очень легко заметные при десятикратном увеличении.
- Чистота I1. Камень с такой характеристикой чистоты имеет включения, которые можно разглядеть невооружённым глазом. При этом внешний вид драгоценного камня портится.
- Чистота I2. Включения, которые легко различимы невооружённым глазом. При этом внешний вид самоцвета сильно портится.
- Чистота I3. Включения, которые очень легко различимы невооружённым глазом. При такой степени включений камень становится достаточно хрупким, подверженным физическому воздействию. Прочность камня снижается.

В таблице 2.2 представлена характеристика групп чистоты в трех типовых группах камней по GIA. Выделено три типа чистоты и несколько групп чистоты с указанием цветных камней, принадлежащим к каждому из них.

Таблица 2.2 Классификация чистоты по GIA

Типы	I	II	III
GIA	Берилл, хризоберилл, кварц дымчатый, топаз, турмалин зеленый, циркон голубой, цоизит, сподумен.	Андалузит, александрит, корунд, гранаты, иолит, хризолит, кварц, шпидель, турмалин, циркон.	Изумруд, турмалин, красный и арбузный.
VVS	Мельчайшие включения: трудно видимые либо невидимые при 10х увеличении; невидимые невооруженным глазом.	Небольшие включения: несколько легче просматриваемые при 10х увеличении; обычно невидимые невооруженным глазом.	Заметные включения: легко видимые под 10х увеличением; обычно невидимые невооруженным глазом.

Типы	I	II	III
VS	Небольшие включения: несколько легче просматриваемые при 10х увеличении; обычно невидимые невооруженным глазом.	Заметные включения: легко просматриваемые при 10х увеличении; иногда заметны невооруженным глазом.	Очевидные включения: очень легко видимые при 10х увеличении; часто заметны невооруженным глазом.
I ₁	Умеренное влияние включений на внешний вид или потенциальную долговечность.		
I ₂	Сильное влияние включений на внешний вид или потенциальную долговечность.		
I ₃	Сильное влияние включений на внешний вид или потенциальную долговечность.		
Dcl	Камень утратил прозрачность.		

В Таблице 2.3 указаны параметры внутренних дефектов цветных ДК по GIA.

Таблица 2.3 Классификация внутренних дефектов по GIA

п\п	Внутренний дефект	Описание
1	Кристалл (включенный)	Прозрачное или непрозрачное, часто угловатое минеральное включение или угловатая пустота.
2	Точечное включение	Очень мелкие включения (темные или светлые), при 10х увеличении выглядят как точки. Встречаются в одиночку и группами.
3	Полость	Природное углубление (отверстие), проникающее в камень.

п\п	Внутренний дефект	Описание
4	Скол	Повреждения (маленькие, большие) по краю камня (чаще на рундисте).
5	Включение (жидкое)	Пустота, заполненная либо жидкостью (однофазное), либо жидкостью и газом (двухфазное), либо жидкостью с кристаллом и газом.
6	Игла	Длинное, тонкое иногда напоминающее волокно кристаллическое тело или канал, заполненный жидкостью или газом.
7	Отпечаток пальца	Залеченные трещины, с включениями, напоминающими по виду отпечаток пальца Человека
8	Перо	Не залеченные естественным образом следы раскалывания, растрескивания и расщепления, напоминающие белые птичьи перья.
9	Зона кристаллического роста	Линии роста, двойниковая и цветовой зональности. Бывают равномерные, неравномерные или угловатые.
10	Облако	Любая туманная либо молочная область.
11	Дендрит	Включение, напоминающее ветвь или мох.

Кроме того, есть несколько дополнительных параметров оценки, имеющих отношение к определению чистоты.

Это **прозрачность** и **локализация дефектов** в объеме камня.

В соответствии с существующими нормативными документами параметр «прозрачность» не является показателем качества при оценке ДК.

Однако в том числе, данный параметр используется при определении чистоты для определенных видов драгоценных камней [46].

Понятие «локализация дефекта» в нормативных документах отсутствует. В то же время, оно используется экспертами при описании особенностей ДК. При необходимости его использования при автоматизированном анализе потребуются внедрять новый термин с разработкой его математического описания.

Выводы по главе 2

Таким образом, в результате проведенных исследований набора мер-имитаторов GIA GemSet 324 методами спектральным и машинного зрения получена база цифровых двойников. Ее ценность заключается в возможности моделирования условий анализа цвета цветных ДК для любого источника освещения (в том числе, стандартных источников типа А, В, С, D65, E), любой камеры и любого эталона белого с известными характеристиками отражения, т.е становится возможным просчитывать частные технические решения для решения конкретных задач анализа цветных ДК [47].

Для перехода к автоматическому анализу показателя качества «чистота» цветных ДК с помощью машинного зрения предложено определять прозрачность, а также влияющее на нее количество дефектов и включений в объеме камня. Совокупность данных о прозрачности и наличии дефектов косвенно характеризуют показатель качества «чистота» и позволяет присвоить класс чистоты. Для цифрового анализа ограненных цветных ДК, конечно, такого упрощенного подхода недостаточно. В этом случае необходимо разрабатывать отдельные алгоритмы и экспериментально определять решающие правила для включений и внутренних дефектов.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

3.1 Принципы построения экспериментального стенда

Разрабатываемый экспериментальный стенд для анализа показателей качества цветных ДК является разновидностью системы машинного зрения, допускающей использование различных классических схем расположения источников освещения относительно узла регистрации (Рисунок 3.1) при анализе оптических свойств прозрачных и непрозрачных объектов [48-51].

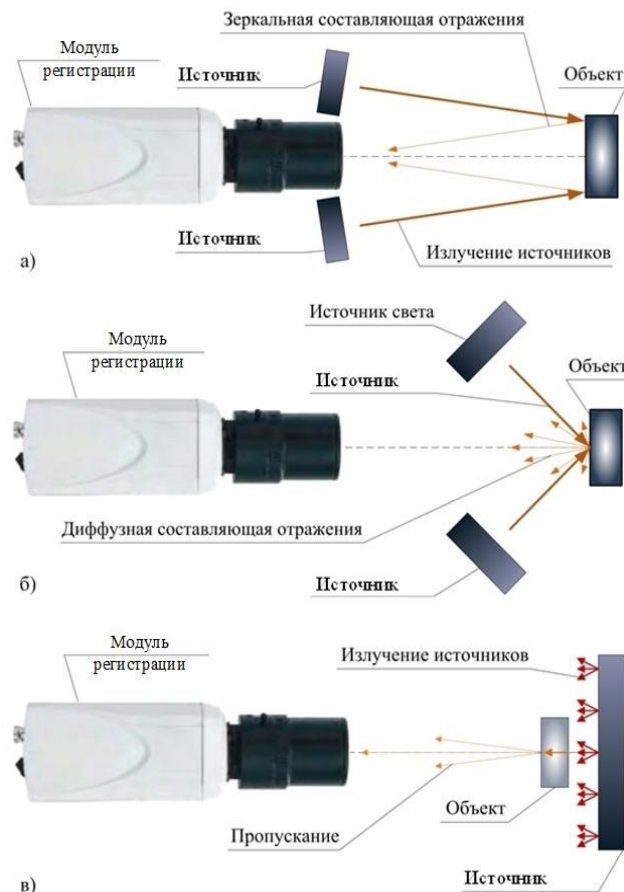


Рисунок 3.1 Варианты схемы расположения источников освещения объекта относительно узла регистрации экспериментального стенда

Анализ зеркальной составляющей отражения цветных ДК, являющейся одним из основных информативных признаков, определяющих их показатели качества, предполагает анализ яркости и цветности получаемого изображения. В качестве источников в данном случае могут использоваться источники с широким спектром излучения (лампы, белые люминесцентные светодиоды и т.п.), а также различные сложные спектрально-зональные источники подсветки, включающие в себя множество узкоспектральных источников излучения (как правило, излучающие диоды, работающие в узких диапазонах спектра от длинноволнового УФ до ближнего ИК).

Источники освещения должны располагаться таким образом, чтобы зеркальная составляющая отражения поверхности цветного ДК попадала в оптическую систему узла регистрации. При этом угол наклона источников будет определяться размерами анализируемого цветного ДК и удаленностью самого камня от узла регистрации системы машинного зрения [52].

Анализ диффузной составляющей отражения поверхности цветного ДК как основного информативного признака, определяющего принадлежность камня тому или иному классу, является наиболее распространенным методом анализа цветных ДК. При этом источники освещения должны располагаться симметрично относительно узла регистрации системы машинного зрения и быть ориентированы таким образом, чтобы в оптическую систему узла регистрации попадала преимущественно диффузная составляющая отражения от поверхности анализируемого цветного ДК.

По представленным на Рисунок 3.1 схемам могут быть реализованы как классическая, так и спектрально-зональная системы освещения, а также специализированная система подсветки, позволяющая проводить анализ свойств люминесценции цветных ДК.

Анализ свойств пропускания и внутренней структуры цветных ДК предполагает использование фоновой подсветки. Т.е., источники освещения объекта располагаются позади цветного камня и напротив узла регистрации системы ма-

шинного зрения. По полученным изображениям могут выделяться области прозрачности или другие нарушения внутренней структуры, в частности трещины, непрозрачные включения, загрязнения, кристаллические сrostки и т.п. Также при реализации такого рода подсветки возможно определение цветовых параметров прозрачных и полупрозрачных зон. Можно судить об однородности внутренней структуры объекта или даже наличии каких-либо внутренних пустот.

Конкретное используемое расположение источников освещения объектов в экспериментальном стенде относительно узла регистрации определяется свойствами анализируемого цветного ДК и значимых селективных признаков. Очевидно, что не может быть единой, универсальной схемы для анализа всех возможных типов цветных ДК, как в сырье, так и подвергшихся обработке и огранке.

В экспериментальном стенде предлагается использовать схемы, представленные на Рисунках 3.2 и 3.3, поскольку ДК, содержащие большое количество примесей и дефектов, не являются прозрачными объектами, как и возможные минеральные включения, которые ДК, теоретически, могут содержать. Для таких объектов схема анализа будет выглядеть так, как показано на Рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 Схема анализа непрозрачных цветных ДК

Для образцов цветных ДК высокой прозрачности или полупрозрачных будет возможен анализ по схеме, представленной на Рисунке 3.3.

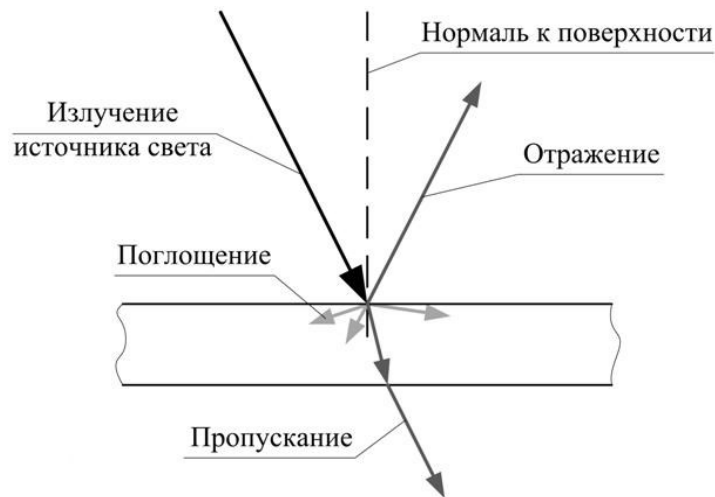


Рисунок 3.3 Схема анализа прозрачных и полупрозрачных цветных ДК

Экспериментальный стенд должен обеспечивать определение основных показателей качества цветных ДК – цвета, цветовые компонент (цветовой тон, светлота, насыщенность) и чистоты [53].

Можно записать следующее выражение для методики определения показателей качества с помощью экспериментального стенда на основании известных спектрофотометрических данных об анализируемом образце:

$$\begin{aligned}
 R &= V_{TR} k_R \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) R_{SP}(\lambda) \bar{R}(\lambda) S_{IR}(\lambda) d\lambda \\
 G &= V_{TR} k_G \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) R_{SP}(\lambda) \bar{G}(\lambda) S_{IR}(\lambda) d\lambda, \\
 B &= V_{TR} k_B \int_0^{\infty} P_{\lambda}(\lambda) R_{SP}(\lambda) \bar{B}(\lambda) S_{IR}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

где V_{TR} – коэффициент пропускания объектива; k_R, k_G, k_B – множители по каждому каналу цветности; $P_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная характеристика источника освещения зоны анализа; $R_{SP}(\lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{S_{WH}(\lambda)}$ – спектральная характеристика отражательной способности анализируемого объекта; $\rho(\lambda)$ – спектральная характеристика отражения образца; $S_{WH}(\lambda)$ – спектральная характеристика отражения эталона белого; $\bar{R}(\lambda), \bar{G}(\lambda), \bar{B}(\lambda)$ – спектральная чувствительность каналов камеры; $S_{IR}(\lambda)$ – спектральная характеристика пропускания ИК-фильтра объектива камеры.

Выражение (3.1) при наличии набора спектральных характеристик отражательных способностей компонентов цветного ДК позволяет, в частности, смоделировать изображение плоской поверхности образца для любой цифровой камеры с определенной оптической системой при использовании определенного фона и с учетом особенностей освещения зоны анализа.

3.2 Описание конструкции экспериментального стенда

На Рисунке 3.4 представлен внешний вид в разрезе прототипа экспериментального стенда, реализованный по результатам проведенных теоретических исследований [А4].

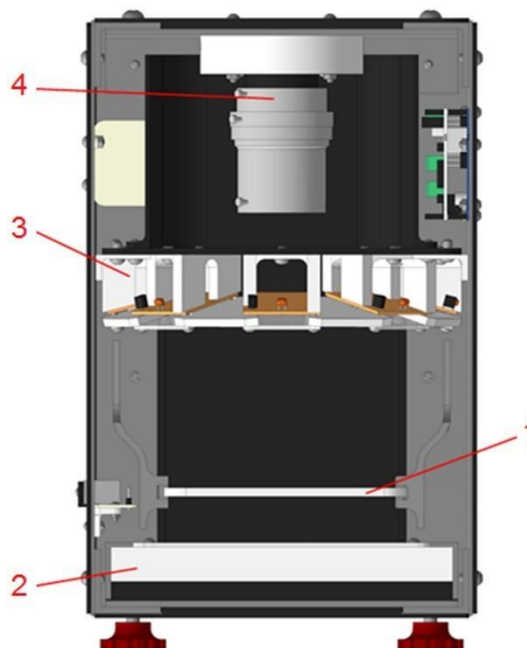


Рисунок 3.4 Прототип экспериментального стенда:

1 – сменная кассета для размещения анализируемых образцов; 2 – модуль нижней подсветки; 3 – модуль верхней подсветки; 4 – узел регистрации

Основными узлами прототипа экспериментального стенда являются: модуль регистрации со сменными объективами, модуль верхней подсветки, модуль нижней подсветки и модуль обработки данных на базе персонального компьютера.

Анализируемые ДК располагаются в сменной кассете (1). Узел регистрации (4) предназначен для получения цветных изображений ДК с требуемым увеличением представляет собой цветную видеокамеру с объективом с фокусным расстоянием 4 мм. Трехмерная модель узла регистрации в сечении представлена на Рисунке 3-5.

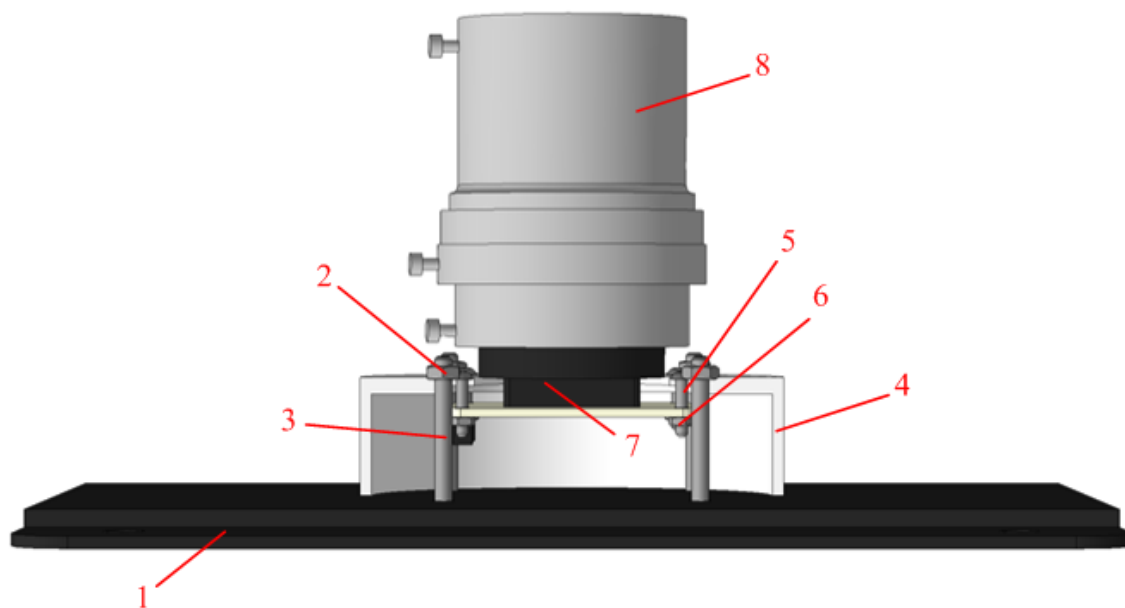


Рисунок 3.5 Трехмерная модель узла регистрации

Узел регистрации состоит из следующих компонентов: платформы (1), к которой винтами и гайками размера М3 (2, 3) крепится корпус для видеокамеры (4). К корпусу (4) винтами и гайками размера М3 (5, 6) крепится видеокамера VEC-545 фирмы "ЭВС" (7) с объективом (8). Разработанные верхний (2) и нижний (3) модули подсветки обеспечивают пространственно равномерное и спектрально однородное освещение образцов ДК в пределах зоны анализа размером $60 \times 80 \text{ мм}^2$ независимо от их положения.

Корпус для видеокамеры изготовлен методом 3D печати из пластика типа PLA. Платформа изготовлена из черного «глухого» оргстекла (акрила) методом фрезерования.

В состав прототипа экспериментального стенда также входят:

- блок питания на базе сетевого адаптера APV-12-24 фирмы «Mean Well Enterprises»,
- модуль управления источниками света, образованный отладочной платой Arduino Uno и драйвером «Motor Shield»,
- набор специализированных кассет для проведения анализа одного образа и множества.

Основным назначением экспериментального стенда является получение изображений образцов цветных ДК, освещенных равномерным световым потоком. Использование специализированных модулей подсветки необходимо для обеспечения максимального контраста изображения, получаемого с помощью видеокамеры, и исключения влияния бликов. При этом подсветка реализована таким образом, чтобы имелась возможность получать изображения образца как в отраженном, так и в проходящем свете. Изображения, формируемые видеокамерой, передаются в персональный компьютер, где обрабатываются в специализированном программном обеспечении [53-56].

Подсветка обеспечивается светодиодами ARL-3528×W (белого свечения), входящими в состав печатных плат, установленных в модули нижней и верхней подсветки. Управление яркостью модулей верхней и нижней подсветок производится программно. Яркость каждого светодиода изменяется в диапазоне от 0 до 255 единиц, где 0 соответствует полностью выключенному состоянию (питание не подается), 255 – полностью включенному. Яркость промежуточных состояний регулируется с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в цепях питания светодиодов.

Управление источниками осуществляется посредством отладочной платы Arduino Uno и драйвера «Motor Shield».

Описанный прототип экспериментального стенда реализован на базе экспериментальной установки, предназначенной для анализа объектов различной природы видеоинформационным методом анализа, разработанной командой разработчиков НИЦ оптико-электронного приборостроения Университета ИТМО. Однако для решения поставленной задачи анализа показателей качества цветных ДК он

был доработан в части схем освещения, методик настройки и обработки полученных изображений, а также режима работы [А3].

3.2.1 Описание технической реализации модуля верхней подсветки

Для обеспечения равномерного освещения поверхности анализируемых цветных ДК в режиме съемки «на отражение» для модуля верхней подсветки предложен кольцевой принцип организации, с диаметром кольца 120 мм.

Трехмерная модель источника света представлена на Рисунке 3.6.

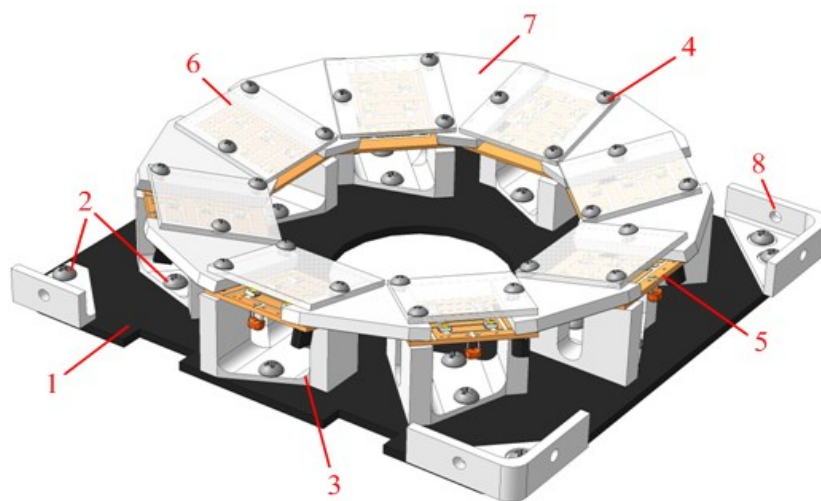


Рисунок 3.6 Трехмерная модель модуля верхней подсветки

Осветительный модуль состоит из следующих компонентов: платформы (1), к которой винтами размера М4 (2) крепятся восемь держателей (3). К каждому держателю (3) с помощью винтов размера М3 (4) крепятся печатные платы (5) и рассеиватели (6). Рассеиватели (6) изготовлены из молочного оргстекла (акрила) толщиной 2 мм. Для того чтобы выдержать расстояние 4 мм между печатными платами (5) и рассеивателями (6), установлены экраны (7), позволяющие скрывать соединительные провода между печатными платами. Платформа крепится с помощью специализированных кронштейнов (8).

Трехмерная модель печатных плат (5) представлена на Рисунке 3.7.

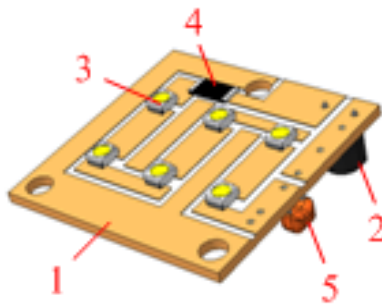


Рисунок 3.7 Трехмерная модель печатной платы

В состав модуля верхней подсветки входят восемь печатных плат. Каждая печатная плата состоит из следующих компонентов: базы (1), изготовленной из одностороннего текстолита, на который припаиваются драйвер для светодиодов (2), шесть светодиодов белого свечения (3), резистор (4) и конденсатор (5). Светодиодный драйвер (2) выступает в качестве фильтра, т.е. данный компонент платы пропускает через себя только 20 мА. Все компоненты на плате соединены последовательно. Параметры питания для данной платы: 30 мА, +24 В.

Для обеспечения равномерного освещения в зоне анализа размером 80×60 мм необходимо оптические оси всех излучающих элементов направить в центр зоны анализа [57-58]. Такое расположение излучающих элементов позволит исключить блики от поверхности объекта.

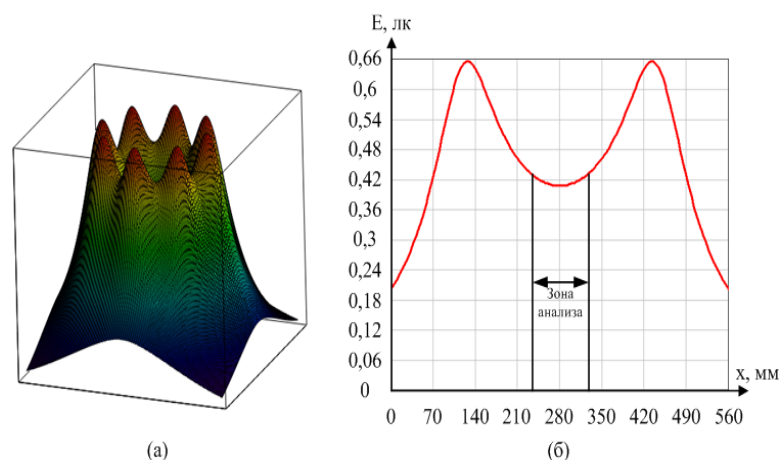


Рисунок 3.8 Модель пространственного распределения освещенности от модуля верхней подсветки: трехмерная модель (а) и осевое сечение (б)

Модуль верхней подсветки расположен на расстоянии 80 мм от зоны анализа, где расположен исследуемый объект – цветной камень. На расстоянии 80 мм данный модуль способен освещать зону 560×560 мм. На Рисунке 3.8 б выделена область, соответствующая размерам зоны анализа.

Согласно математическому моделированию:

- величина освещенности в зоне анализа составляет 1300 лк,
- величина энергетического провала между краями и центром зоны анализа не превышает 6%.

Модуль является универсальным источником света для исследования объектов со сложной формой и/или структурой поверхности. Взаимозаменяемость отдельных компонентов модуля дает возможность использовать в его составе различные источники излучения, выполненные на базе светодиодов (белые различной цветовой температуры, RGB или моноцветные).

3.2.2 Описание технической реализации модуля нижней подсветки

Модуль нижней подсветки предназначен для создания равномерной фоновой подсветки объекта в режиме анализа «на пропускание». Как и в модуле верхней подсветки, в качестве источника излучения используются светодиоды белого свечения. Трехмерная модель данного источника света представлена на Рисунке 3.9. Модель представлена в сечении.

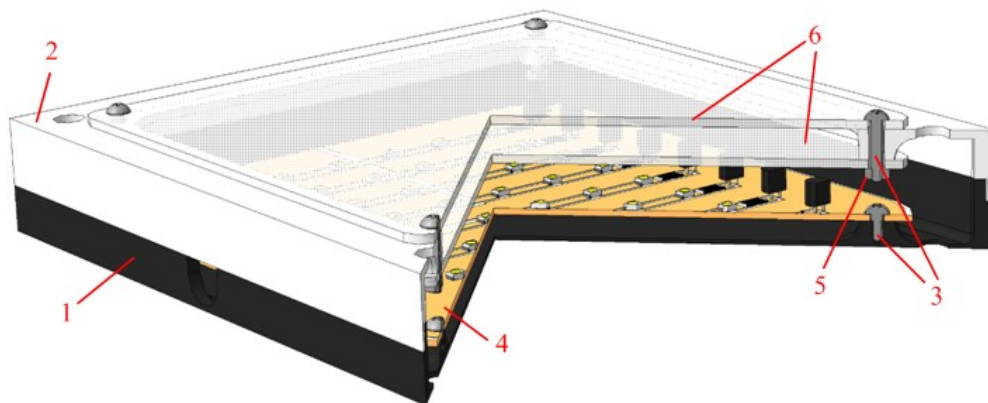


Рисунок 3.9 Трехмерная модель модуля нижней подсветки

Модуль нижней подсветки состоит из корпуса, образованного основанием (1) и крышкой (2). К основанию (1) с помощью винтов размера М3 (3) крепится печатная плата (4). К крышке, имеющей сквозное квадратное отверстие в центре, винтами с гайками размера М3 (3, 5) крепятся два рассеивателя (6), расположенных на расстоянии 7 мм друг относительно друга. Рассеиватели (6) изготовлены из молочного оргстекла (акрила) толщиной 2 мм. Основание и крышка корпуса изготовлены методом 3D печати из пластика типа PLA. Применение данного метода позволяет получить объект с внутренней структурой, состоящей из переплетения спеченных нитей пластика, уложенных под углом друг к другу.

Трехмерная модель печатной платы для модуля нижней подсветки представлена на Рисунке 3.10.

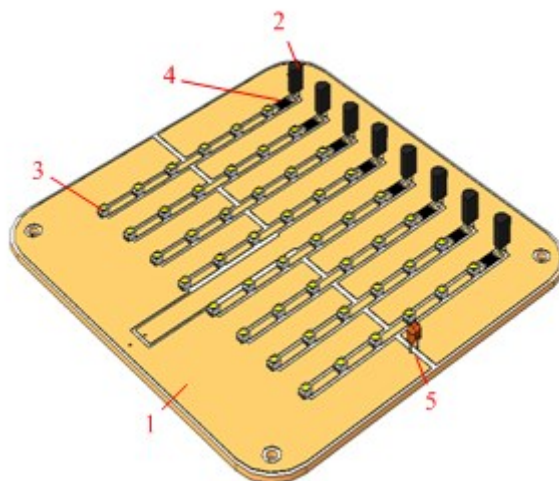


Рисунок 3.10 Трехмерная модель печатной платы модуля нижней подсветки

Печатная плата состоит из следующих компонентов: базы (1), изготовленной из одностороннего текстолита, на который припаиваются восемь драйверов для светодиодов (2), 48 светодиодов белого свечения (3), 8 резисторов (4) и конденсатор (5). 48 светодиодов (3) разделены на 8 групп (по 6 светодиодов в каждой группе). Светодиоды в каждой группе соединены последовательно друг с другом, группы соединены параллельно. Параметры питания для данной платы: 240 мА, +24 В.

Такое расположение излучающих элементов на печатной плате, в совокупности с использованием 2 рассеивателей, обеспечивает равномерную фоновую подсветку объекта. Для оценки пространственного распределения освещенности от модуля нижней подсветки разработана математическая модель, представленная на Рисунке 3.11.

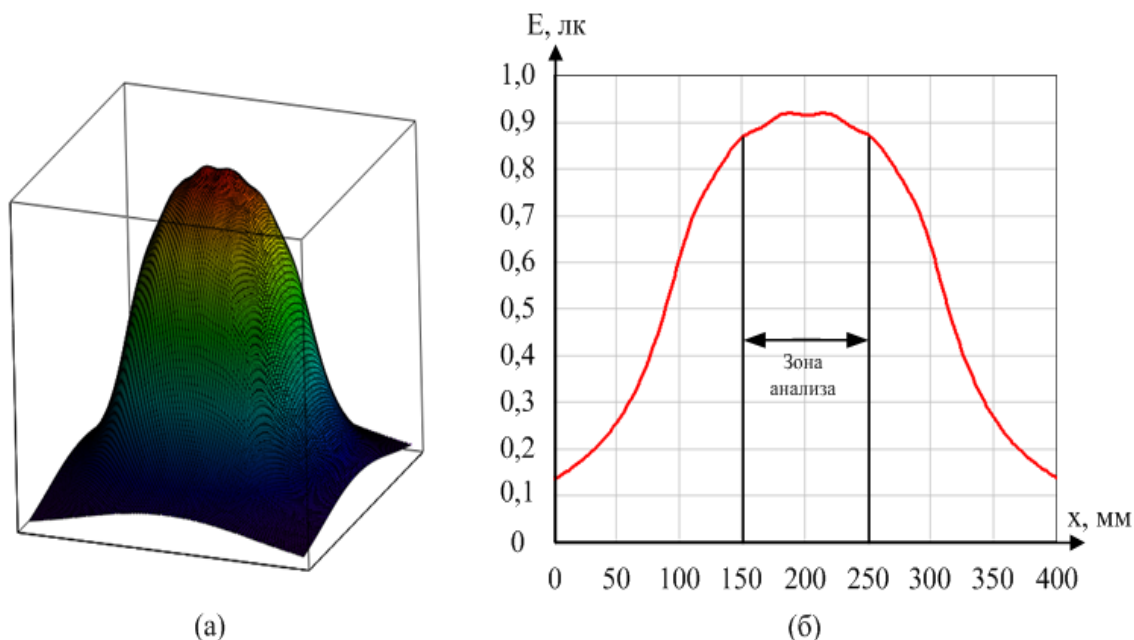


Рисунок 3.11 Пространственное распределение освещенности от модуля нижней подсветки: трехмерная модель (а) и осевое сечение (б)

Модуль нижней подсветки расположен на расстоянии 30 мм до исследуемого объекта. На расстоянии 30 мм данный модуль способен освещать зону 400×400 мм. На Рисунке 3.10 б выделена область, соответствующая размерам зоны анализа. Согласно математическому моделированию:

- величина освещенности в зоне анализа составляет 1300 лк,
- величина энергетического провала между краями и центром зоны анализа не превышает 8%.

Как показало моделирование, предложенные технические решения для модулей верхней и нижней подсветки позволяют добиться высокой равномерности освещения анализируемых объектов в зоне анализа, независимо от их положения внутри зоны.

3.3. Разработка принципов обработки и анализа изображений образцов цветных ДК с помощью экспериментального стенда

Для реализации анализа показателей качества цветных ДК с помощью модернизированного прототипа экспериментального стенда были реализованы специальные алгоритмы обработки и анализа изображений [59], а именно:

- колориметрической коррекции изображений образцов цветных ДК, в режимах «на отражение» и «на пропускание»;
- метрической калибровки изображений образцов цветных ДК;
- анализа показателей качества образцов цветных ДК.

Для эффективного анализа показателей качества цветных ДК [60-62] в количественном виде была предложена следующая схема обработки исходных изображений (Рисунок 3.12), полученных с помощью экспериментального стенда в режимах съемки «на отражение» и «на пропускание».

При этом также используются предварительно полученные изображения белого фона, колориметрического эталона белого, фонового изображения, полученного в режиме «на пропускание», и равномерной сетки для проведения колориметрической коррекции и коррекции пространственных искажений изображений [63].

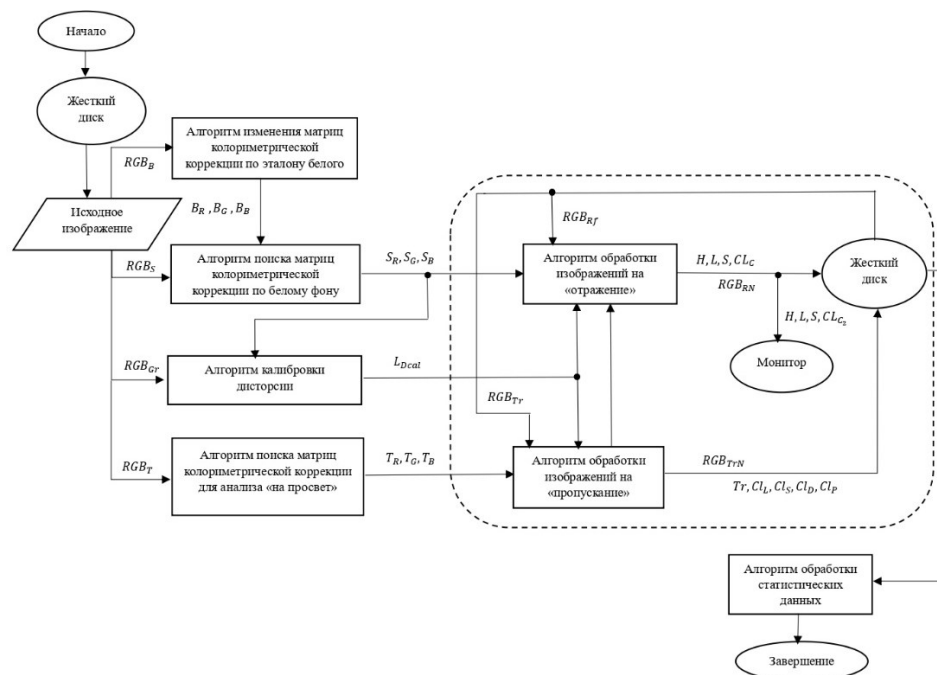


Рисунок 3.12 Схема обработки исходных изображений:

1 – блок предобработки и коррекции изображения, 2 – блок обработки изображений, визуализации и сохранения результатов анализа

Обозначения, используемые при описании обработки изображений [63]:

1. *START* – команда на запуск;

2. *INITIAL IMAGE* – исходное изображение, свободное от ошибок захвата, выраженных в смещении данных по одному или более каналам по изображению в горизонтальном направлении. К данному классу относятся следующие изображения:

- RGB_B – цветное изображение белого или светло-серого фона, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на отражение».
- RGB_S – цветное изображение колориметрического эталона белого, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на отражение».
- RGB_T – цветное изображение рассеивателя нижней подсветки, используемое для колориметрической калибровки узла регистрации при анализе «на пропускание».
- RGB_{Gr} – цветное изображение калибровочной сетки, используемое для метрической калибровки узла регистрации.
- RGB_{Tr} – цветное изображение образца в режиме «на пропускание».
- RGB_{Rf} – цветное изображение образца в режиме «на отражение».

B_R, B_G, B_B – матрицы колориметрической коррекции изображений образцов по белому фону.

S_R, S_G, S_B – итоговые матрицы колориметрической коррекции изображений образцов.

T_R, T_G, T_B – матрицы колориметрической коррекции по рассеивателю источника нижней подсветки.

L_{DCal} – канал светлоты после определения и коррекции искажений оптики (дисторсии), содержащий параметры указанной калибровки.

RGB_{TrN} – обрезанное цветное изображение образца в режиме «на пропускание».

RGB_{RfN} – обрезанное цветное изображение образца в режиме «на отражение»,

$STATISTIC$ – статистические данные обработки исходных изображений образцов, в состав которых входят следующие характеристики объектов:

- Cl_D – класс размера (крупность) образца.
- Cl_S – класс формы (правильность) образца.
- Tr – коэффициент прозрачности образца.
- Cl_L – класс прозрачности образца.
- Cl_P – класс чистоты образца.
- H, L, S – параметры цвета изображения всей поверхности образца (цветовой тон, светлота и насыщенность).
- Cl_C – цветовой класс образца.
- H_i, L_i, S_i – параметры цвета зон цветности на изображении поверхности образца (цветовой тон, светлота и насыщенность).
- Cl_{Cz} – цветовой класс образца с учетом его зональности.

В данном случае, количество циклов определяется количеством пар изображений «на пропускание» и «на отражение» анализируемых образцов или количеством пар изображений «на пропускание» и «на отражение» анализируемых кассет.

Алгоритмы, используемые для обработки изображений образцов, можно условно разделить на три группы [А5]:

- алгоритмы предобработки и коррекции изображений,
- алгоритмы определения показателей качества,
- алгоритмы обработки статистики.

В ходе обработки статистических данных формируются следующие протоколы измерений:

- сводная таблица,
- общий протокол.

3.3.1 Алгоритмы предобработки и коррекции изображений

В программном обеспечении экспериментального стенда реализованы следующие, последовательно применяемые алгоритмы предобработки и коррекции изображений [64]:

- алгоритм колориметрической коррекции по однородному фону для режима «на отражение»,
- алгоритм колориметрической коррекции по эталону белого для режима «на отражение»,
- алгоритм колориметрической коррекции для режима «на пропускание»;
- алгоритм метрической коррекции изображений.

Рассмотрим их более подробно.

3.3.1.1 Алгоритм колориметрической коррекции по однородному фону для режима «на отражение»

RGB' является откорректированным цветным изображением. Коррекция изображения проводится в соответствии с правилами:

$$[R'] = \frac{[R]}{[B_R]}, \quad [G'] = \frac{[G]}{[B_G]}, \quad [B'] = \frac{[B]}{[B_B]} \quad (3.1)$$

где $[R']$, $[G']$, $[B']$ – матрицы цветовых каналов откорректированного изображения образца цветного ДК; $[R]$, $[G]$, $[B]$ – матрицы цветовых каналов исходного изображения образца цветного ДК; B_R , B_G , B_B – матрицы колориметрической коррекции цветовых каналов изображения по белому фону, приведенные к относительным значениям по уровням эталонной поверхности однородного фона светло-серого цвета, имеющего одинаковые координаты цвета величиной 190 (с учетом того, что данный

фон не является колориметрическим эталоном белого), и рассчитывающиеся по следующим формулам

$$[B_R] = \frac{M_R}{190} \cdot [h_R], \quad [B_G] = \frac{M_G}{190} \cdot [h_G], \quad [B_B] = \frac{M_B}{190} \cdot [h_B] \quad (3.2)$$

где $[h_R]$, $[h_G]$, $[h_B]$ – матрицы цветовых каналов изображения однородного фона, приведенные к относительным значениям (по отношению к максимальному значению в каждом из каналов);

M_R , M_G , M_B – средние уровни в красном, зеленом и синем каналах изображения однородного фона в ходе коррекции, рассчитанные исходя из следующих правил:

$$M_R = \frac{\sum_M \sum_N \frac{R_B}{h_R}}{M \cdot N}, \quad M_G = \frac{\sum_M \sum_N \frac{G_B}{h_G}}{M \cdot N}, \quad M_B = \frac{\sum_M \sum_N \frac{B_B}{h_B}}{M \cdot N} \quad (3.3)$$

где $[R_B]$, $[G_B]$, $[B_B]$ – матрицы цветовых каналов исходного изображения однородного фона; M и N – размеры исходного изображения по горизонтали и вертикали.

3.3.1.2 Алгоритм колориметрической коррекции по эталону белого в режиме «на отражение»

Колориметрическая коррекция по эталону белого – завершающая процедура колориметрической коррекции изображений образцов цветных ДК, полученных в режиме «на отражение». Данная процедура проводится в следующем порядке [65].

S_R, S_G, S_B – итоговые матрицы колориметрической коррекции, измененные в соответствии с коррекцией баланса между каналами цвета изображения поверхности колориметрического эталона белого и колориметрическими координатами указанного эталона ($W = 243 / 0,8$ для всех каналов цвета: 243 – цветовая координата колориметрического эталона белого для всех каналов цвета; 0,8 – коэффициент, учитывающий различия между свойствами отражения матовой поверхности колориметрического эталона белого и шероховатой поверхности минералов, обладающей 20% составляющей зеркального отражения).

Расчет итоговых матриц производится в соответствии с правилом

$$[S_R] = [B_R] \cdot \frac{M_R^S}{W}, \quad [S_G] = [B_G] \cdot \frac{M_G^S}{W}, \quad [S_B] = [B_B] \cdot \frac{M_B^S}{W} \quad (3.4)$$

где M_R^S , M_G^S , M_B^S – средние уровни в каналах цвета изображения поверхности колориметрического эталона белого, полученные после применения колориметрической коррекции по белому фону. Определение указанных значений производится в соответствии с правилом

$$M_R^S = \frac{\sum R_S'^m}{N_S}, \quad M_G^S = \frac{\sum G_S'^m}{N_S}, \quad M_B^S = \frac{\sum B_S'^m}{N_S} \quad (3.5)$$

где $R_S'^m$, $G_S'^m$, $B_S'^m$ – красный, зеленый и синий каналы цвета изображения поверхности колориметрического эталона белого, полученные при проведении коррекции изображения колориметрического эталона белого по однородному фону; N_S – количество элементов изображения поверхности колориметрического эталона белого.

3.3.1.3 Алгоритм колориметрической коррекции для режима «на пропускание»

Коррекция изображения проводится в соответствии с правилами [66]:

$$[R'_T] = \frac{[R_T]}{[T_R]}, \quad [G'_T] = \frac{[G_T]}{[T_G]}, \quad [B'_T] = \frac{[B_T]}{[T_B]} \quad (3.6)$$

где $[R'_T]$, $[G'_T]$, $[B'_T]$ – матрицы цветовых каналов откорректированного изображения в режиме «на пропускание»; $[R_T]$, $[G_T]$, $[B_T]$ – матрицы цветовых каналов исходного изображения в режиме «на пропускание»; T_R, T_G, T_B – матрицы колориметрической коррекции цветовых каналов изображения по рассеивателю источника нижней подсветки экспериментального стенда, приведенные к относительным значениям по уровням эталонной пропускающей поверхности белого матового оргстекла, имеющего одинаковые координаты цвета величиной 250 (с учетом того, что 5 единиц из 255 нужны для исключения появления «абсолютно» прозрачных объектов из-за зашумленности изображения), и рассчитывающиеся по формулам

$$[T_R] = \frac{M_{TR}}{250} \cdot [h_{TR}], \quad [T_G] = \frac{M_{TG}}{250} \cdot [h_{TG}], \quad [T_B] = \frac{M_{TB}}{250} \cdot [h_{TB}] \quad (3.7)$$

где $[h_{TR}]$, $[h_{TG}]$, $[h_{TB}]$ – матрицы цветовых каналов изображения однородного рассеивателя нижней подсветки экспериментального стенда в режиме «на пропускание», приведенные к относительным значениям (по отношению к максимальному значению в соответствующем канале);

M_{TR} , M_{TG} , M_{TB} – средние уровни в красном, зеленом и синем каналах цвета изображения однородного рассеивателя нижней подсветки экспериментального стенда в режиме «на пропускание» в ходе коррекции, рассчитанные исходя из следующих правил:

$$M_{TR} = \frac{\sum_M \sum_N \frac{R_T}{h_{TR}}}{M \cdot N}, \quad M_{TG} = \frac{\sum_M \sum_N \frac{G_T}{h_{TG}}}{M \cdot N}, \quad M_{TB} = \frac{\sum_M \sum_N \frac{T_B}{h_{TB}}}{M \cdot N} \quad (3.8)$$

где $[R_T]$, $[G_T]$, $[B_T]$ – матрицы цветовых каналов исходного изображения однородного рассеивателя нижней подсветки экспериментального стенда в режиме «на пропускание»; M и N – размеры изображения по горизонтали и вертикали.

3.3.1.4 Алгоритм метрической коррекции изображений

В ходе метрической коррекции определяется L_{DCal} – канал светлоты после определения и коррекции искажений оптики (дисторсии), содержащий параметры указанной калибровки. Калибровка применяется ко всему изображению. Производится нелинейная коррекция дисторсии. Откалиброванное изображение масштабируется по параметрам сетки. Шаг узлов сетки составляет 5мм по горизонтали и 5мм по вертикали. Для реализации определения центров узлов сетки используется нижний порог в 0 и верхний порог в 128 единиц. L_{DCal} определяется исходя из значений L_{Th} – канала светлоты после пороговой фильтрации. Пороговая фильтрация для каждого элемента изображения с координатами (i, j) производится по следующему правилу

$$L_{Th}(i, j) = \begin{cases} 255 & \text{если } L'_{Gr}(i, j) \geq Th_L \\ 0 & \text{если } L'_{Gr}(i, j) < Th_L \end{cases}, \quad (3.9)$$

где Th_L – нижний порог фильтра, значение которого равно 100 (для того, чтобы выделить только узлы сетки в виде кругов); L'_{Gr} – канал светлоты цветного изображения калибровочной сетки после колориметрической коррекции по эталону белого и однородному фону. Расчет для каждого элемента изображения производится в соответствии со следующим правилом

$$L'_{Gr}(i, j) = \frac{MAX(i, j) + MIN(i, j)}{2}, \quad (3.10)$$

где $MAX(i, j)$ – максимум из значений каналов цвета R'_{Gr} , G'_{Gr} , B'_{Gr} для элемента изображения сетки с координатами i и j ; $MIN(i, j)$ – минимум из значений каналов цвета R'_{Gr} , G'_{Gr} , B'_{Gr} для элемента изображения с координатами i и j ; R'_{Gr} , G'_{Gr} , B'_{Gr} – красный, зеленый и синий каналы цвета изображения калибровочной сетки после колориметрической коррекции. Коррекция производится в соответствии с правилом

$$\left[R'_{Gr} \right] = \frac{\left[R_{Gr} \right]}{\left[S_R \right]}, \quad \left[G'_{Gr} \right] = \frac{\left[G_{Gr} \right]}{\left[S_G \right]}, \quad \left[B'_{Gr} \right] = \frac{\left[B_{Gr} \right]}{\left[S_B \right]}, \quad (3.11)$$

где $\left[R_{Gr} \right]$, $\left[G_{Gr} \right]$, $\left[B_{Gr} \right]$ – красный, зеленый и синий каналы цвета исходного изображения калибровочной сетки.

Приведенная последовательность позволяет подготовить полученные изображения образцов цветных ДК к процедурам обработки и анализа информативных признаков, характеризующих показатели качества.

3.3.2 Алгоритмы определения показателей качества цветных ДК

К алгоритмам определения показателей качества цветного ДК [67] следует отнести следующие:

- алгоритм определения класса крупности образца,
- алгоритм определения коэффициента прозрачности образца,
- алгоритм определения класса прозрачности образца,

- алгоритм расчета цветowych координат поверхности образца,
- алгоритм определения цветового класса,
- определение класса чистоты и параметров зональности.

3.3.2.1 Алгоритм определения класса крупности

Параметр класса крупности образца цветного ДК определяется размером указанного образца и является одним из основных показателей качества. Для образцов ДК в сырье классы крупности могут быть разделены на следующие: -5+2, -10+5, -15+10, -20+15 и +20. Поэтому определить класс крупности Cl_D можно по следующему правилу:

$$\begin{array}{l}
 \text{if } (D_{\max} \cdot 0,8 \leq 5) \wedge (a_r \leq 5) \wedge (b_r \leq 5) \\
 Cl_D = "-5+2" \\
 \text{else} \\
 \quad \text{if } (D_{\max} \cdot 0,8 \leq 10) \wedge (a_r \leq 10) \wedge (b_r \leq 10) \\
 \quad Cl_D = "-10+5" \\
 \quad \text{else} \\
 \quad \quad \text{if } (D_{\max} \cdot 0,8 \leq 15) \wedge (a_r \leq 15) \wedge (b_r \leq 15) \\
 \quad \quad Cl_D = "-15+10" \\
 \quad \quad \text{else} \\
 \quad \quad \quad \text{if } (D_{\max} \cdot 0,8 \leq 20) \wedge (a_r \leq 20) \wedge (b_r \leq 20) \\
 \quad \quad \quad Cl_D = "-20+15" \\
 \quad \quad \quad \text{else} \\
 \quad \quad \quad \quad Cl_D = "+20"
 \end{array} \tag{3.12}$$

где D_{\max} – максимальный размер образца; a_r – высота оптимального прямоугольника; b_r – ширина оптимального прямоугольника.

Оптимальный прямоугольник – прямоугольник, площадь которого ($S_r = a_r \cdot b_r$) наиболее близка к площади объекта (S_o).

3.3.2.2 Алгоритм определения коэффициента прозрачности

Параметры прозрачности оцениваются по изображению образца, полученного в режиме «на пропускание». Коэффициент прозрачности определяется исходя из наиболее представленной по прозрачности области изображения.

Tr – коэффициент прозрачности объекта. Данный коэффициент определяется посредством определения положения (абсциссы) максимума гистограммы $Hist_L$ в соответствии с правилом:

$$\begin{array}{l}
 A = \max(Hist_L) \\
 \left| \begin{array}{l}
 \text{for } i = 0..100 \\
 \quad \left| \begin{array}{l}
 \text{if } Hist_L[i] = A \\
 Tr = i
 \end{array} \right.
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \quad (3.13)$$

3.3.2.3 Алгоритм определения класса прозрачности

Класс прозрачности образца рассчитывается, исходя из известного значения коэффициента прозрачности.

Cl_L – класс прозрачности образца. При определении прозрачности с шагом в 2,5 единицы, класс прозрачности рассчитывается в соответствии с правилом

$$Cl_L = \left\lfloor \frac{Tr}{2,5} \right\rfloor \cdot 2,5 \quad (3.14)$$

3.3.2.4 Алгоритм расчета цветовых координат

Расчет параметров цветового тона (H_{Rf}), светлоты (L_{Rf}) и насыщенности (S_{Rf}) для каждого элемента изображения поверхности образца цветного ДК выполняется в соответствии с правилом

если $R_{RfN} > 0 \wedge G_{RfN} > 0 \wedge B_{RfN} > 0$

$$\left| \begin{array}{l} L_{Rf} = \frac{MAX + MIN}{2} \\ S_{Rf} = \begin{cases} \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} & \text{если } L_{Rf} \leq 0,5 \\ \frac{MAX - MIN}{2 - MAX - MIN} & \text{если } L > 0,5 \end{cases} \\ H_{Rf} = \begin{cases} cb - cg & \text{если } MAX = R_{RfN} \\ 2 + cr - cb & \text{если } MAX = G_{RfN} \\ 4 + cg - cr & \text{если } MAX = B_{RfN} \end{cases} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

где $MAX = \max(R_{RfN}, G_{RfN}, B_{RfN})$ – максимальное значение из трех координат цвета для данного элемента изображения объекта; $MIN = \min(R_{RfN}, G_{RfN}, B_{RfN})$ – минимальное значение из трех координат цвета для данного элемента изображения объекта;

$$cr = \frac{MAX - R_{RfN}}{MAX - MIN}, \quad cg = \frac{MAX - G_{RfN}}{MAX - MIN}, \quad cb = \frac{MAX - B_{RfN}}{MAX - MIN} \quad (3.16)$$

3.3.2.5 Алгоритм определения цветового класса

Определение цветового класса Cl_C следует оценивать по наиболее представленному на поверхности образца цветного ДК цветовому оттенку [A15, A16].

Например, для образца изумруда в сырье цветовой класс, в соответствии с действующей нормативной документацией, должен определяться в соответствии с принадлежностью цветовым координатам поверхности объекта к одному из основных цветов: белому (0), светло-зеленому (1), зеленому (2), темно-зеленому (3), светлому (4) и остальным (5). Тогда цветовой класс будет определяться в соответствии с правилами

$$Cl_C = 0 \quad \text{если} \quad (L > 70) \wedge (S < 5) \quad (3.17)$$

$$Cl_C = 1 \quad \text{если} \quad \begin{array}{l} (45 < L \leq 70) \wedge (60 \leq H \leq 140) \wedge (5 \leq S) \\ \vee \\ (70 < L) \wedge (60 \leq H \leq 140) \wedge (5 \leq S) \end{array} \quad (3.18)$$

$$Cl_C = 2 \quad \text{если} \quad (25 < L \leq 45) \wedge (60 \leq H \leq 140) \wedge (5 \leq S) \quad (3.19)$$

$$Cl_C = 3 \quad \text{если} \quad (0 < L \leq 25) \wedge (60 \leq H \leq 140) \wedge (5 \leq S) \quad (3.20)$$

$$Cl_C = 4 \quad \text{если} \quad \begin{aligned} & (45 < L \leq 70) \wedge (S \geq 5) \wedge ((H < 60) \vee (H > 140)) \\ & \vee \\ & (70 < L) \wedge (S \geq 5) \wedge ((H < 60) \vee (H > 140)) \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$Cl_C = 5 \quad \text{если} \quad \begin{aligned} & (H, L, S \notin (Cl_C = 0)) \wedge (H, L, S \notin (Cl_C = 1)) \wedge (H, L, S \notin (Cl_C = 2)) \wedge \\ & \wedge (H, L, S \notin (Cl_C = 3)) \wedge (H, L, S \notin (Cl_C = 4)) \end{aligned} \quad (3.22)$$

Можно аналогичным образом установить правила для любых примеров цветных ДК.

3.3.2.6 Чистота и зональность

Чистота образца цветного ДК в сырье [68-71] определяется наличием внутренних вкраплений различных размеров: чистый образец (0), образец с мельчайшими включениями (2), образец с небольшими включениями (3), образец с заметными включениями (4), грязный образец (5).

Cl_p – класс чистоты образца предложено рассчитывать исходя из отношения количества площади S_{PI} , занимаемой вкраплениями различной этимологии, к площади прозрачности S_{T0} образца по следующему правилу:

$$Cl_p = 0 \quad \text{если} \quad \frac{S_{PI}}{S_{T0}} < 0,01 \quad (3.23)$$

$$Cl_p = 1 \quad \text{если} \quad 0,01 \leq \frac{S_{PI}}{S_{T0}} < 0,05 \quad (3.24)$$

$$Cl_p = 2 \quad \text{если} \quad 0,05 \leq \frac{S_{PI}}{S_{T0}} < 0,1 \quad (3.25)$$

$$Cl_p = 3 \quad \text{если} \quad 0,1 \leq \frac{S_{PI}}{S_{T0}} < 0,15 \quad (3.26)$$

$$Cl_p = 4 \quad \text{если} \quad 0,15 \leq \frac{S_{PI}}{S_{T0}} < 0,4 \quad (3.27)$$

$$Cl_p = 5 \quad \text{если} \quad 0,4 \leq \frac{S_{PI}}{S_{T0}} \quad (3.28)$$

Зональность является одним из важнейших показателей качества цветного ДК. Чем больше зон, отличающихся по цвету и прозрачности, тем менее ценен образец.

Количество зон предложено определять исходя из количества перепадов координат цвета на изображении в режиме «на отражение» и перепадов прозрачности на изображении в режиме «на пропускание». Для каждой выделенной зоны определяются параметры цвета H_i (цветовой тон), L_i (светлота) и S_i (насыщенность).

Cl_{CZ} – цветовой класс образца с учетом его зональности определяется исходя из наиболее представленной цветовой зоны (по величине занимаемой площади поверхности образца):

$$Cl_{CZ} = \max_{S_i \rightarrow \max} (Cl_i) \quad (3.29)$$

3.4 Выводы по главе 3

В результате проведенных исследований разработан экспериментальный стенд и предложены принципы его построения позволяющие получать изображения образцов цветных ДК в режимах «на отражение» и «на пропускание». Первый режим используется для определения цветовых параметров ДК по полученным изображениям, второй – для анализа прозрачности и наличия внутренних включений и трещин, которые в совокупности характеризуют показатель качества «чистота».

Разработаны технические решения для верхнего и нижнего модулей подсветки. Они обеспечивают пространственно равномерную и спектрально однородную засветку образцов ДК в пределах зоны анализа размером $60 \times 80 \text{ мм}^2$ независимо от их положения. Верхний модуль реализован в виде кольцевого источника белого света диаметром 120 мм. По результатам математического моделирования

величина освещенности в зоне анализа составила 1300 лк, а разница в освещенности между краями и центром зоны анализа не превысила значение в 6%. Нижний модуль подсветки реализован в виде плоского источника с регулярным расположением светодиодов на поверхности печатной платы. В этом случае по результатам математического моделирования величина освещенности в зоне анализа составила также 1300 лк, а разница в освещенности между краями и центром зоны анализа не превысила значение в 8%.

Предложен подход к определению показателей качества цветных ДК с помощью разработанного экспериментального стенда. Для этого разработаны алгоритмы обработки и анализа полученных изображений:

- алгоритм колориметрической коррекции изображений образцов цветных ДК, полученных в режиме «на отражение», позволяющий оценивать цветовые параметры поверхности образцов, их чистоту и цветовые зоны по аналогии с визуальным аппаратом человека;
- алгоритм колориметрической коррекции изображений образцов цветных ДК, полученных в режиме «на пропускание», позволяющий количественно оценивать характеристики прозрачности образцов и их внутренние дефекты;
- алгоритм геометрической калибровки изображений образцов с целью получения данных об их размерах в метрическом выражении;
- алгоритм определения основных параметров качества образцов цветных ДК: коэффициента прозрачности, класса прозрачности, класса крупности, цветовых координат поверхности, цветового класса, чистоты и зональности.

Разработана методика калибровки, поиска оптимальных параметров и режимов работы экспериментального стенда. Рекомендуется следовать предложенной схеме перед каждой серией измерений для обеспечения метрологически корректного определения качества цветных ДК [32].

Методика калибровки проводится в несколько этапов. На первом этапе производится коррекция влияния полевых аберраций оптической системы с помощью тест-объекта, имеющего равномерный белый фон и обеспечивающего определение и компенсацию перепадов освещенности в зоне анализа. На втором этапе для обеспечения достоверного определения цвета по всей зоне анализа осуществляется колориметрическая коррекция с помощью эталона белого цвета. При этом учитываются спектральные характеристики излучения источников подсветки и чувствительности приемника излучения. В результате формируются итоговые матрицы колориметрической коррекции, измененные в соответствии с коррекцией баланса между каналами цвета изображения поверхности колориметрического эталона белого и колориметрическими координатами используемого эталона. На третьем этапе производится коррекция геометрических искажений оптической системы с помощью пластины с нанесенной на нее регулярной сеткой точек. Кроме того, не реже одного раза в год необходимо проводить периодическую калибровку, которая приводит цветное тело воспроизведения цвета ДК максимально близко к цветному телу воспроизведения оттенков зрительного аппарата человека в заданном диапазоне цветов. Для этого подходят такие эталоны, как, например, Color Mansell Color Check или меры-имитаторы цветных камней GIA GemSet.

Представлены результаты анализа набора мер-имитаторов GIA GemSet 324 и методика создания базы данных цифровых двойников, аналогичных мерам-имитаторам набора GIA GemSet 324. База представляет собой инструмент для автоматического определения цвета ДК с помощью системы машинного зрения. Для перехода к автоматическому анализу показателя качества «чистота» цветных ДК с помощью машинного зрения предложено определять прозрачность, а также влияющее на нее количество дефектов и включений в объеме камня. Совокупность данных о прозрачности и наличии дефектов косвенно характеризуют показатель качества «чистота» и позволяет присвоить класс чистоты.

ГЛАВА 4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Экспериментальные исследования предложенных принципов анализа показателей качества цветных ДК с помощью экспериментального стенда проводились в несколько этапов.

На первом этапе исследовалась стабильность результатов определения размерных и цветовых параметров, а также параметров чистоты. Для этого использовались образцы бериллового сырья.

На втором этапе проводилось определение показателей качества синтетических минералов и изумрудных мастер-камней в присутствии экспертов-геммологов. Результаты, полученные экспертным (визуальным) методом анализа и с помощью экспериментального стенда сравнивались, эксперты давали своё заключение по применимости разработанного экспериментального стенда для оценки показателей качества цветных ДК.

4.1. Исследование стабильности работы экспериментального стенда

Для исследования стабильности работы экспериментального стенда использовалась представительная проба необработанного бериллового сырья с неоднородным распределением показателей качества внутри пробы [Аб].

Исследовались повторяемость результатов определения основного цвета, класса чистоты, прозрачности, крупности, характеристик цветовой зональности образцов в зависимости от их положения в зоне анализа.

Положение образцов бериллов в зоне анализа экспериментального стенда представлены на Рисунке 4.1.

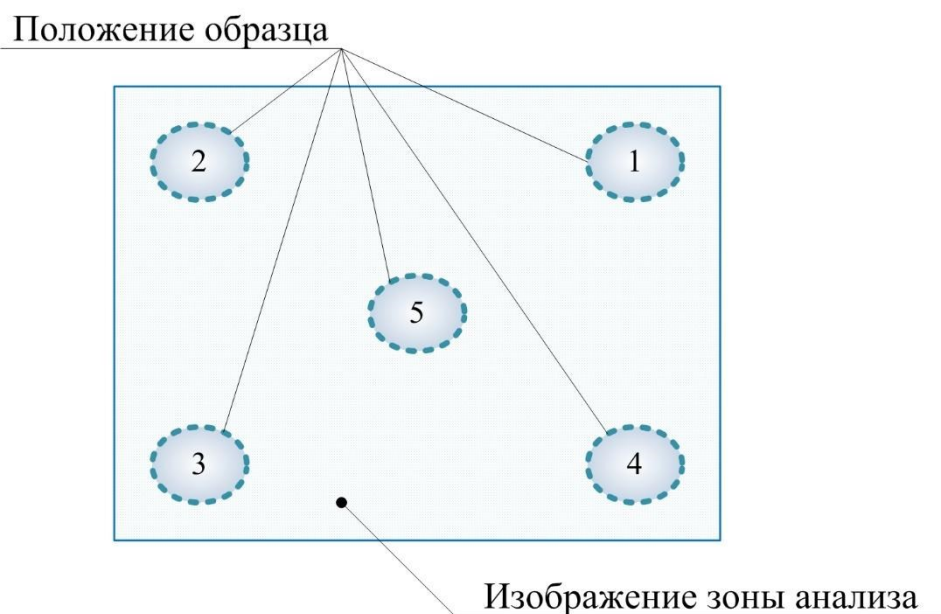


Рисунок 4.1. Нумерация областей зоны анализа при проведении экспериментальных исследований на представительной пробе бериллового сырья

Ниже приведены результаты исследований 4 образцов бериллового сырья, соответствующие требованиям к исследуемой пробе и обладающих следующими особенностями:


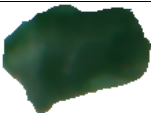
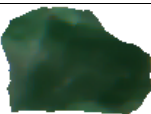



- образец №2 характеризует небольшой (класс крупности 5-10 мм) берилл после химической проклейки с присутствием нескольких оттенков зеленого цвета и доминирующими темными оттенками, позволяющими отнести его к изумрудам 3-й категории чистоты. Следует отметить, что данный образец имеет небольшую (занимающую примерно четверть образца) сравнительно прозрачную зону;
- образец № 3 характеризует небольшой (класс крупности 5-10 мм) фактически непрозрачный берилл после химической проклейки с одним ярко выраженным оттенком среднего зеленого цвета, позволяющим отнести его к изумрудам 3-й категории чистоты;
- образец №8 характеризует небольшой (класс крупности 5-10 мм) фактически непрозрачный берилл без какой-либо предварительной механической обработки или обработки химическими реагентами с присутствием вмещающей породы и выраженным наличием оттенков зеленого цвета,





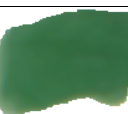
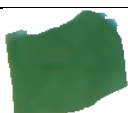





позволяющим отнести его к изумрудам 3-й категории чистоты;


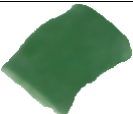









- образец №17 характеризует большой (класс крупности более 20 мм) фактически непрозрачный берилл после химической проклейки с присутствием нескольких оттенков зеленого цвета, позволяющим отнести его к изумрудам 3-й категории чистоты.












Результаты экспериментальных исследований стабильности измерений **цветовых параметров** [A13] указанных образцов бериллового сырья представлены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1 Результаты анализа цветовых параметров и класса цвета образцов бериллового сырья в зависимости от их положения в зоне анализа

Номер образцы и его ориентация	Положение	Изображение	Параметры цвета			Код цвета
			Тон (H)	Светлота (L)	Насыщенность (S)	GIA
2.1	1		140	15	37	vstbG 7/3
	2		141	15	41	vstbG 7/4
	3		139	16	34	vstbG 7/3
	4		139	16	37	vstbG 7/3
	5		141	16	45	vstbG 7/4
2.2	1		145	17	37	vstbG 7/3

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Параметры цвета			Код цвета
			Тон (H)	Светлота (L)	Насыщенность (S)	GIA
	2		141	15	26	vstbG 7/3
	3		142	18	29	vstbG 7/3
	4		143	16	29	vstbG 7/3
	5		143	16	44	vstbG 7/4
	3.1	1		135	33	34
2			132	32	32	bG 6/3
3			133	33	29	bG 6/3
4			132	32	32	bG 6/3
5			134	33	37	bG 6/3
3.2	1		134	34	32	bG 6/3
	2		132	33	30	bG 6/3

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Параметры цвета			Код цвета
			Тон (H)	Светлота (L)	Насыщенность (S)	GIA
	3		133	34	28	bG 6/3
	4		132	32	31	bG 6/3
	5		134	34	35	bG 6/3
8.1	1		138	42	11	bG 5/2
	2		138	45	11	bG 4/2
	3		138	42	11	bG 5/2
	4		138	42	11	bG 5/2
	5		138	44	12	bG 5/2
8.2	1		134	56	12	bG 3/2
	2		135	48	10	bG 4/1
	3		136	54	11	bG 3/2

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Параметры цвета			Код цвета
			Тон (H)	Светлота (L)	Насыщенность (S)	GIA
	4		138	54	12	bG 3/2
	5		136	51	12	bG 4/2
17.1	1		151	20	39	BG 7/4
	2		151	19	39	BG 7/4
	3		150	19	34	BG 7/3
	4		148	20	36	BG 7/3
	5		149	19	40	BG 7/4
17.2	1		151	24	39	BG 6/4
	2		151	21	37	BG 7/3
	3		150	24	32	BG 6/3
	4		149	24	39	BG 6/4

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Параметры цвета			Код цвета
			Тон (H)	Светлота (L)	Насыщенность (S)	GIA
	5		150	24	39	BG 6/4

По полученным результатам видно, что диапазон изменения координат цвета при измерениях одного и того же объекта в разных областях зоны анализа не является критически большим и систематическим (3 единицы для тона, 3 для светлоты и 6 для насыщенности – не превышают половины шага изменения координат цветовых классов).







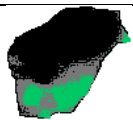
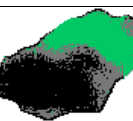
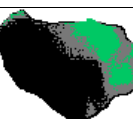
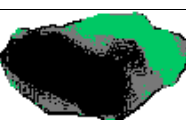
По результатам статистической обработки были получены следующие значения для средних отклонений значений координат цвета измеренных образцов бериллового сырья:






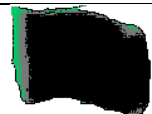


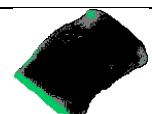
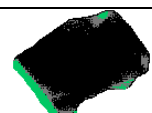


- для цветового тона (H) $\Delta_H = 3,3$ (0,9 % от диапазона изменения);
- для светлоты (L) $\Delta_L = 1,5$ (1,5 % от диапазона изменения);
- для насыщенности (S) $\Delta_S = 1,5$ (1,5 % от диапазона изменения).

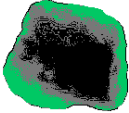
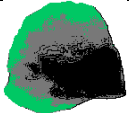
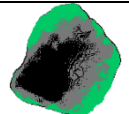



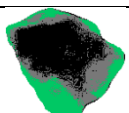





Следует отметить, что указанные отклонения могут привести к изменению кода цвета для тех образцов бериллового сырья, цвет которых находится на границе разделения классов качества.



Результаты экспериментальных исследований стабильности измерений параметров чистоты для указанных образцов бериллового сырья приведены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 Результаты анализа параметров относительной площади, занимаемой включениями и трещинами, и класса чистоты образцов бериллового сырья в зависимости от положения в зоне анализа

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	% включений	% трещин	Класс чистоты
2.1	1		58	17	3 (непрозрачный)
	2		58	17	3 (непрозрачный)
	3		60	14	3 (непрозрачный)
	4		57	18	3 (непрозрачный)
	5		54	15	3 (непрозрачный)
2.2	1		56	22	3 (непрозрачный)
	2		66	19	3 (непрозрачный)
	3		50	22	3 (непрозрачный)
	4		63	20	3 (непрозрачный)
	5		58	20	3 (непрозрачный)

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	% включений	% трещин	Класс чистоты
3.1	1		78	13	3 (непрозрачный)
	2		88	10	3 (непрозрачный)
	3		83	12	3 (непрозрачный)
	4		77	16	3 (непрозрачный)
	5		83	13	3 (непрозрачный)
3.2	1		86	10	3 (непрозрачный)
	2		75	13	3 (непрозрачный)
	3		87	11	3 (непрозрачный)
	4		84	9	3 (непрозрачный)
	5		85	8	3 (непрозрачный)
8.1	1		74	20	3 (непрозрачный)
	2		39	36	3 (непрозрачный)

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	% включений	% трещин	Класс чистоты
	3		43	33	3 (непрозрачный)
	4		38	36	3 (непрозрачный)
	5		35	38	3 (непрозрачный)
8.2	1		70	22	3 (непрозрачный)
	2		49	31	3 (непрозрачный)
	3		47	27	3 (непрозрачный)
	4		44	29	3 (непрозрачный)
	5		53	28	3 (непрозрачный)
17.1	1		86	12	3 (непрозрачный)
	2		79	15	3 (непрозрачный)
	3		74	19	3 (непрозрачный)
	4		82	14	3 (непрозрачный)

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	% включений	% трещин	Класс чистоты
	5		75	18	3 (непрозрачный)
17.2	1		80	15	3 (непрозрачный)
	2		82	13	3 (непрозрачный)
	3		72	18	3 (непрозрачный)
	4		78	16	3 (непрозрачный)
	5		76	16	3 (непрозрачный)

На основании анализа данных таблицы 4-2 можно утверждать, что диапазоны изменения относительных площадей изображения образца, занимаемых выявляемыми дефектами (включениями и трещинами) может варьироваться в зависимости от ориентации анализируемого объекта и достигает до 30% для включений и 20% для трещин. Указанные изменения не носят систематический характер относительно положения в зоне анализа.

По результатам статистической обработки были получены следующие значения для средних отклонений значений относительных площадей дефектов измеренных образцов бериллового сырья:

– для включений $\Delta_{inc} = 5 \%$;


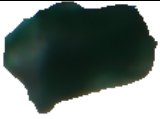





– для трещин $\Delta_{cr} = 3 \%$;

– для суммы площадей включений и трещин $\Delta_{def} = 3,3 \%$.


Таким образом, можно заключить, что указанные отклонения фактически не влияют на присваиваемый образцу бериллового сырья класс чистоты.







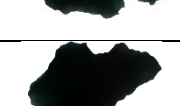


Результаты экспериментальных исследований стабильности измерений **параметров крупности** для указанных образцов бериллового сырья представлены в Таблице 4.3.

Таблица 4.3 Результаты анализа размерных параметров (длины, ширины и максимального размера), а также класса крупности образцов бериллового сырья в зависимости от положения в зоне анализа

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. р-р, мм	Класс крупности
2.1	1		5,9	3,8	6,1	5-10 мм
	2		5,5	3,7	5,7	5-10 мм
	3		5,4	3,8	5,7	5-10 мм
	4		5,9	3,7	6	5-10 мм
	5		5,7	3,7	5,9	5-10 мм
2.2	1		5,6	3,3	5,6	5-10 мм
	2		5,2	3,9	5,7	5-10 мм

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. р-р, мм	Класс крупности
	3		5,6	3,2	5,7	5-10 мм
	4		4,5	4,3	5,7	2-5 мм
	5		5,6	3,2	5,7	5-10 мм
3.1	1		6,2	4,2	7	5-10 мм
	2		5,2	4,3	6,2	5-10 мм
	3		5,6	4,4	6,4	5-10 мм
	4		5,7	4,4	6,8	5-10 мм
	5		5,4	4,1	6,4	5-10 мм
3.2	1		5,7	4,6	7	5-10 мм
	2		5,9	4,3	6,5	5-10 мм
	3		5,2	4,1	6,1	5-10 мм
	4		5,9	4,2	6,8	5-10 мм

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. р-р, мм	Класс крупности
	5		5,6	4,2	6,4	5-10 мм
8.1	1		7,4	6,8	8,1	5-10 мм
	2		7,1	6,1	7,3	5-10 мм
	3		7,1	6	7,6	5-10 мм
	4		7	6,2	7,4	5-10 мм
	5		7	6	7,3	5-10 мм
8.2	1		7	6,2	7,3	5-10 мм
	2		6,8	6	7,3	5-10 мм
	3		7,1	5,8	7,4	5-10 мм
	4		6,8	5,7	7,4	5-10 мм
	5		7	5,8	7,4	5-10 мм
17.1	1		22,3	12,6	23	Более 20 мм

Номер образца и его ориентация	Положение	Изображение	Длина, мм	Ширина, мм	Макс. р-р, мм	Класс крупности
	2		21,9	12,9	22,2	Более 20 мм
	3		22,3	12,9	22,8	Более 20 мм
	4		21,9	12,6	22,2	Более 20 мм
	5		22	12,8	22,5	Более 20 мм
17.2	1		21,7	12,9	22	Более 20 мм
	2		22,4	13,1	23,2	Более 20 мм
	3		21,8	12,5	22,2	Более 20 мм
	4		21,8	13,2	22	Более 20 мм
	5		22	13	22,5	Более 20 мм

На основании данных, представленных в Таблице 4-3, можно утверждать, что для рассматриваемых образцов изменение в полученных значениях длины и ширины не превышает 1 мм, при этом измеренный максимальный размер объекта может изменяться в пределах 0,8 мм.

По результатам статистической обработки были получены следующие значения средних отклонений значений размеров образца:

– для ширины $\Delta_{\text{wid}} = 0,22$ мм (6% для самой маленькой крупности, 1,1% для самой большой крупности);



– для длины $\Delta_{\text{len}} = 0,3$ мм (8% для самой маленькой крупности, 1,5% для самой большой крупности);







– для максимального размера $\Delta_{\text{md}} = 0,19$ мм (5% для самой маленькой крупности, 0,9% для самой большой крупности).








Таким образом, можно заключить, что указанные отклонения не влияют на принятие решения о принадлежности образца к тому или иному классу крупности.




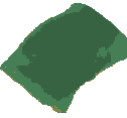



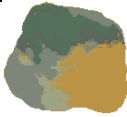
Результаты экспериментальных исследований стабильности измерений параметров **зональности цвета** для указанных минеральных образцов бериллового сырья представлены в Таблице 4.4.

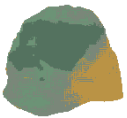





Таблица 4.4 Результаты анализа характеристик зональности цвета для образцов бериллового сырья в зависимости от положения образцов в зоне анализа







Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдо-изображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
2.1	1		vstbG 8/4	vstbG 7/4	Умеренная (vstbG 8/4 у vstbG 7/4)
	2		vstbG 8/4	vstbG 7/4	Умеренная (vstbG 8/4 у vstbG 7/4)






Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код ГИА цветов (главный)	Код ГИА цветов (дополнительный)	Класс зональности
	3		vstbG 8/4	vstbG 7/3	Умеренная (vstbG 8/4 у vstbG 7/3)
	4		vstbG 8/4	vstbG 7/3	Умеренная (vstbG 8/4 у vstbG 7/3)
	5		vstbG 7/4	vstbG 6/3	Слабая (vstbG 7/4 с vstbG 6/3)
2.2	1		BG 7/4	vstbG 7/3	Умеренная (BG 7/4 у vstbG 7/3)
	2		vstbG 8/4	vstbG 7/3	Умеренная (vstbG 8/4 у vstbG 7/3)
	3		vstbG 8/3	vstbG 7/3	Сильная (vstbG 8/3)

Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
					о vstbG 7/3)
	4		vstbG 7/3	vstbG 6/3	Слабая (vstbG 7/3 с vstbG 6/3)
	5		vstbG 8/4	vstbG 7/4	Сильная (vstbG 8/4 о vstbG 7/4)
3.1	1		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	2		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	3		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	4		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	5		bG 6/4	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)

Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
3.2	1		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	2		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	3		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	4		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
	5		bG 6/3	bG 5/3	Слабая (bG 6/3 с bG 5/3)
8.1	1		vstbG 5/2	G 4/1	Равная (vstbG 5/2 = G 4/1)
	2		vstbG 5/2	bG 4/2	Умеренная (vstbG 5/2 у bG 4/2)
	3		vstbG 5/2	G 4/1	Умеренная

Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
					(vstbG 5/2 у G 4/1)
	4		vstbG 5/2	slyG 4/1	Слабая (vstbG 5/2 с slyG 4/1)
	5		vstbG 5/2	vslbG 4/2	Умеренная (vstbG 5/2 у vslbG 4/2)
8.2	1		vstbG 5/2	yG 3/2	Умеренная (vstbG 5/2 у yG 3/2)
	2		vstbG 5/2	G 4/1	Умеренная (vstbG 5/2 у G 4/1)
	3		vstbG 5/2	G 4/1	Умеренная (vstbG 5/2 у G 4/1)
	4		vstbG 5/2	yG 3/2	Умеренная

Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
					(vstbG 5/2 у уG 3/2)
	5		vstbG 5/2	vslbG 4/2	Умеренная (vstbG 5/2 у vslbG 4/2)
17.1	1		BG 7/4	BG 6/3	Слабая (BG 7/4 с BG 6/3)
	2		BG 7/4	BG 6/3	Слабая (BG 7/4 с BG 6/3)
	3		BG 7/4	BG 6/3	Умеренная (BG 7/4 у BG 6/3)
	4		BG 7/4	BG 6/3	Равная (BG 7/4 = BG 6/3)
	5		BG 7/4	BG 6/3	Слабая (BG 7/4 с BG 6/3)

Номер образца и его ориентация	Положение	Псевдоизображение	Код GIA цветов (главный)	Код GIA цветов (дополнительный)	Класс зональности
17.2	1		BG 7/4	BG 6/3	Равная (BG 7/4 = BG 6/3)
	2		BG 7/4	BG 6/3	Равная (BG 7/4 = BG 6/3)
	3		BG 7/3	BG 6/3	Слабая (BG 7/3 с BG 6/3)
	4		BG 7/4	BG 6/3	Слабая (BG 7/4 с BG 6/3)
	5		BG 7/4	BG 6/3	Равная (BG 7/4 = BG 6/3)

На основании данных, представленных в Таблице 4-4, можно утверждать, что главный (наиболее ценный) цветовой оттенок не зависит от положения образца в зоне анализа и его ориентации относительно визирной оси модуля регистрации.

Положение образца и его ориентация определяют дополнительный цветовой оттенок, который рассчитывается как наиболее представленный оттенок на изображении образца, исключая цветовой оттенок, определенный как главный.

Соответственно, при изменении ориентации образцов в зоне анализа экспериментального стенда может изменяться степень смешения при классе зональности (отсутствует, сильная, слабая, равная или умеренная), при этом:

- зональность отсутствует, если главный цветовой оттенок занимает на 60% больше площади изображения поверхности образца, по сравнению с дополнительным цветовым оттенком;
- зональность равная, если главный цветовой оттенок и дополнительный цветовой оттенок занимают примерно одинаковую площадь изображения образца (в пределах 5 %);
- зональность слабая, если главный цветовой оттенок занимает большую площадь изображения поверхности образца, по сравнению с дополнительным цветовым оттенком (площади отличаются в пределах от 5 % до 60 %);
- зональность умеренная, если главный цветовой оттенок занимает меньше площади изображения поверхности образца, чем дополнительный цветовой оттенок (площади отличаются в пределах от 5 % до 60 %);
- зональность сильная, если главный цветовой оттенок занимает на 60 % меньше площади изображения поверхности образца, чем дополнительный цветовой оттенок.

Таким образом, по результатам проведенного комплекса экспериментальных исследований можно утверждать, что для экспериментального стенда обеспечивается достаточная точность и достоверность по всем определяемым параметрам образцов бериллового сырья: цвету, чистоте, размерам и зональности.

4.2. Экспериментальные исследования определения показателей качества ДК с помощью разработанного экспериментального стенда

Экспериментальные исследования были проведены в ювелирных компаниях RusGems и Gemlovers в г. Москве, чтобы определить, насколько эффективны разработанные технические решения для оценки показателей качества ДК.

В RusGems проводились исследования (эксперименты №1-4) на синтетических минералах, с участием в качестве геммолога Дмитрия Токарчука, ведущего эксперта-геммолога, директора по оценке цветного сырья RusGems.

В Gemlovers проводились исследования (эксперименты №5-6) на природных

ограниченных изумрудных мастер-камнях, с участием в качестве эксперта-геммолога Михаила Пшеничного, ведущего эксперта-геммолога Gemlovers.




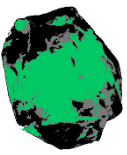



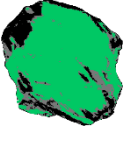
Ниже приведены результаты выполненных экспериментов, а также описание каждой задачи, которую необходимо было решить в процессе оценки.

С полученными результатами привлечённые эксперты согласились, что подтверждено утвержденными протоколами, представленными в Приложениях 1 и 2, соответственно.

В эксперименте №1 стояла задача определить есть ли разница в цветах двух необработанных образцов синтетического кварца разных зеленых оттенков.

Результаты эксперимента представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Результаты анализа образцов синтетического кварца

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
+2 0			vslb G 5/2	124 / 44 / 13		15		35, 4	17, 1	2 (деф)
+2 0			slyG 6/2	116 / 29 / 18		34		18, 3	13, 1	2 (деф)

Результаты первого эксперимента демонстрируют различия в образцах синтетического кварца по всем трем параметрам цвета:








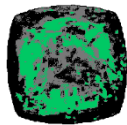
- цветовой тон: первый образец «голубее» второго на 2 категории цвета (по классификации GIA);
- светлота: первый образец светлее второго на 1 градацию;
- насыщенность: цвет второго образца насыщеннее, чем цвет первого, однако они находятся в одной категории цвета по градации GIA.

В качестве непрозрачных включений определились неровности рельефа.

В эксперименте № 2 необходимо определить зафиксирует ли экспериментальный стенд разницу в цветах двух ограненных образцов синтетических изумрудов при расположении вниз площадкой на прозрачной подставке в зоне анализа (режим измерения «образец»).

Результаты эксперимента представлены в Таблице 4.6.

Таблица 4.6 Результаты анализа ограненных образцов синтетических изумрудов при расположении в зоне анализа вниз площадкой

Кр.	Отражение	Цвет	Код д GI А	Н/Л/ S	Пропускание	% пр.	Чи- стота	% вкл .	% тр.	Кл. чист.
-15 +1 0			BG 7/6	150 / 21 / 99		27		9,9	1,9	1 (чист)
-15 +1 0			BG 8/6	149 / 14 / 99		8		40, 7	30, 3	3 (гряз.)

Второй эксперимент показал, что ограненные образцы синтетических изумрудов имеют различия в двух параметрах цвета.

- цветовой тон: первый и второй образцы находятся в одной группе по классификации GIA, однако отличаются на 1 единицу по шкале измерения цветового тона (H), используемой в экспериментальном стенде;
- светлота: первый образец светлее второго на 1 градацию по классификации GIA;









- насыщенности образцов одинаковы и максимальны для определенных групп цвета по шкале измерения насыщенности, используемой в разработанном экспериментальном стенде.

Довольно значительную часть непрозрачных включений составляет влияние эффекта полного внутреннего отражения на клиньях короны и павильона.

Задача эксперимента №3 определить изменяются ли цвета двух ограненных образцов синтетических изумрудов при изменении ориентации образца в зоне анализа (расположение на одном из клиньев павильона на прозрачной подставке в зоне анализа).

Результаты эксперимента представлены в Таблице 4.7.

Таблица 4.7 Результаты анализа ограненных образцов синтетических изумрудов при расположении в зоне анализа на одном из клиньев павильона

Кр.	Отражение	Цвет	Код д GI А	H/L/ S	Пропускание	% пр .	Чи- стота	% вкл .	% тр.	Кл. чист.
-15 +1 0			BG 7/6	152 / 17 / 99		21		10, 9	2,6	1 (чист .)
-15 +1 0			BG 8/6	148 / 10 / 99		5		74, 9	10, 3	3 (гряз.)

Третий эксперимент показал, что образцы по-разному изменяют параметры цвета, но остаются в одной и той же категории цвета по классификации GIA, они различаются по параметрам цвета. Рассмотрим отдельно первый образец наблюдаем, что при изменении положения образца, значение цветового тона H изменилось на 2 градации шкалы измерения, в сторону увеличения синего нацвета, а также

при изменении положения образца, значение светлоты L уменьшилось на 3 градации по шкале измерения. У второго образца при изменении положения образца, наблюдается изменение значение цветового тона H на 1 градацию шкалы измерения, в сторону увеличения желтого нацвета, а также значение светлоты L уменьшилось на 4 градации по шкале измерения, используемой в экспериментальном стенде.




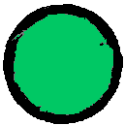




По результатам определения классификации чистоты при изменении положения образца в зоне анализа зафиксировано изменение количества непрозрачных включений и трещин. Первый образец: количество включений увеличилось на 1%, количество трещин увеличилось на 0,7%. Второй образец: количество включений увеличилось на 34,2%, количество трещин уменьшилось на 20%.









Следует отметить, что увеличение доли трещин и включений конкретно в данном эксперименте не повлияло на присвоение категории чистоты.

Эксперимент №4 нацелен на определение разницы в цветах двух образцов синтетических изумрудов, ограненных неклассической изумрудной огранкой, и изменяется ли она при изменении положения образца в зоне анализа.

Результаты эксперимента представлены в Таблице 4.8.

Таблица 4.8. Результаты анализа синтетических изумрудов, ограненных неклассической изумрудной огранкой, при разных положениях в зоне анализа

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
-10 +5			BG 7/6	150 / 21 / 99		3		29, 8	1, 0	3 (гряз.)
-10 +5			vstg B 7/6	154 / 23 / 99		3		36, 3	7, 9	3 (гряз.)

-20			BG	152 /		3		27, 8	0, 7	3 (гряз.)
+1			6/6	26 /						
5				99						
-20			BG	153 /		27		12, 2	2, 9	1 (чист)
+1			6/6	26 /						
5				99						

Результаты эксперимента 4 показали, что образцы синтетических изумрудов по-разному изменяют параметры цвета в зависимости от используемой огранки. У первого образца изменяется категория цвета по классификации GIA, при изменении положения образца, значение цветового тона H изменилось на 4 градации по шкале измерения, в сторону увеличения синего нацвета, что привело к изменению градации оттенка по GIA от BG до vstgB. При изменении положения образца, значение светлоты L увеличилось на 2 градации шкалы измерения, при этом определенные категории светлоты остались неизменными. У второго образца градация цвета по GIA не изменилась. При изменении положения образца, значение цветового тона H изменилось на 1 градацию по шкале измерения в сторону увеличения синего нацвета.

Когда положение образцов было изменено в зоне анализа, наблюдалось изменение количества непрозрачных включений и трещин. В первом образце количество включений возросло на 6,5%, а количество трещин - на 6,9%. Во втором образце число включений снизилось на 15,6%, в то время как количество трещин повысилось на 2,2%.

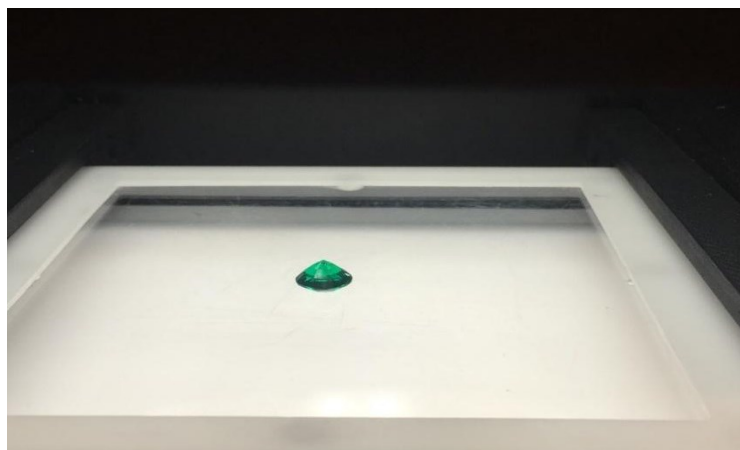


Рисунок 4.2 Изображение образца синтетического изумруда, находящегося в зоне анализа экспериментального стенда

Совместно с экспертом-геммологом был сделан вывод о том, что наиболее точная оценка ограненных образцов достигается, когда они ориентированы на подставке площадкой вниз. Это объясняется тем, что изменения цвета при различной ориентации не имеют систематического характера и уникальны для каждого ограненного камня. Вероятно, на цвет камня влияют неглубокие светлые и темные включения различных цветов.

Цель эксперимента №5 была в измерении цветовых характеристик мастер-камней изумрудной огранки, предположительно из Малышевского месторождения. Результаты эксперимента представлены в Таблице 4-9. Внешний вид мастер-камней представлен на Рисунке 4.3.

Таблица 4.9 Результаты анализа изумрудных мастер-камней изумрудной огранки

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
- 10 +5			vstb G 7/6	146 / 21 / 99		24		22, 0	2,6	2 (деф.))

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
- 10 +5			vstb G 8/6	140 / 9 / 99		4		47, 1	8,3	3 (гряз.)
- 10 +5			vstb G 9/6	146 / 6 / 99		3		46, 7	7,4	3 (гряз.)
- 10 +5			vstg B 6/4	156 / 29 / 55		26		19, 5	9,7	2 (деф.)
- 10 +5			BG 7/6	149 / 20 / 99		6		27, 0	13, 5	3 (гряз.)
- 10 +5			BG 7/6	150 / 19 / 99		24		27, 5	12, 6	2 (деф.)
- 10 +5			BG 5/3	151 / 41 / 36		51		19, 0	1,3	2 (деф.)
- 10 +5			BG 5/6	152 / 43 / 99		44		25, 3	2,4	2 (деф.)
- 10 +5			BG 5/6	150 / 36 / 99		4		32, 2	2,4	3 (гряз.)
- 10			vstg B	158 / 51 /		65		0,9	0,1	1 (чист)

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
+5			4/2	21						.)
- 10 +5			vstg B 4/3	160 / 50 / 22		64		6,6	4,1	1 (чист .)
- 10 +5			vstg B 4/3	160 / 50 / 22		64		3,7	2,4	1 (чист .)
- 10 +5			vstg B 3/2	156 / 61 / 21		71		5,1	3,8	1 (чист .)
-5 +2			vstg B 3/2	155 / 62 / 20		68		7,1	7,0	1 (чист .)
- 10 +5			vstg B 3/3	155 / 57 / 26		70		8,8	9,2	1 (чист .)



Рисунок 4.3 Изображение мастер-камней изумрудов изумрудной огранки

Выводы эксперимента указывают на то, что наиболее точная оценка цвета

достигается, когда камень ориентирован площадкой вниз на подставке в зоне анализа. В результате была составлена цветовая палитра образцов (Рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 Цветовой ряд изумрудных мастер-камей изумрудной огранки, полученный в ходе измерений при помощи экспериментального стенда

Обозначенная цветовая палитра образцов линейно варьирует по светлоте от 7 (темный) до 3 (светлый) согласно классификации GIA. Стоит отметить, что два наиболее светлых образца не квалифицируются как изумруды, согласно принятому методу разделения изумруда/берилла.

При этом образцы изумрудных мастер-камней изумрудной огранки различаются по цветовому тону и подтверждены экспертом-геммологом:

- очень сильно голубовато-зеленый (vstbG 7/6);
- сине-зеленый (BG 5/3);
- очень сильно зеленовато-голубой (vstgB 6/4, vstgB 4/2 и vstgB 3/2).

Цель эксперимента №6 была в измерении цветовых характеристик мастер-камней круглой огранки, предположительно из Малышевского месторождения.

Результаты эксперимента представлены в Таблице 4.10.

Таблица 4.10. Результаты измерений изумрудных мастер-камней круглой огранки

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
-5 +2			vstb G	145 / 6 /		4		27, 5	5, 7	3 (гряз.

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
			9/6	99)
-5 +2			vstb G 8/6	142 / 9 / 99		3		36, 2	9, 8	3 (гряз.))
-5 +2			BG 5/4	152 / 35 / 50		38		25, 6	2, 5	2 (деф.))
-5 +2			vstb G 6/4	146 / 31 / 54		5		28, 3	8, 8	3 (гряз.))
-5 +2			BG 4/3	151 / 49 / 34		54		6,5	9, 9	1 (чист.))
-5 +2			BG 4/4	152 / 46 / 38		5		36, 9	4, 7	3 (гряз.))
-5 +2			vstb G 4/3	142 / 48 / 34		7		39, 4	7, 6	3 (гряз.))
-5 +2			vstb G 4/3	144 / 49 / 26		11		24, 0	3, 9	2 (деф.))
-5 +2			BG 3/2	150 / 64 / 21		73		29, 8	2, 4	2 (деф.))

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
-5 +2			vstb G 1/6	146 / 85 / 99		73		44, 0	2, 6	2 (деф.)

Выводы эксперимента 7 подтвердили, что наиболее точная оценка цвета достигается при ориентации камня площадкой вниз на подставке в зоне анализа. Это позволило составить цветовую палитру образцов (Рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 Цветовой ряд изумрудных мастер-камней круглой огранки, полученный в ходе измерений при помощи экспериментального стенда

Указанный цветовой ряд нелинейно изменяет светлоту (по классификации GIA) с 9 (extremal dark) для самого темного камня прыгает до 5 (middle) для второго камня, затем следуют два камня с одинаковой светлотой в 4 (middle light) и оканчивается ряд камнем со светлотой 3 (light). Следует отметить, что согласно принятой методике разделения изумруд / берилл, три самых светлых образца не являются изумрудами. При этом образцы изумрудных мастер-камней круглой огранки различаются по цветовому тону, что также отмечено экспертом-геммологом:

- очень сильно голубовато-зеленый (vstbG9/6 и vstbG 4/3);
- сине-зеленый (BG 5/4, BG 4/3 и BG 3/2).

Выводы по главе 4

На этапе исследования стабильности результатов определения геометрических и цветовых параметров ДК, а также параметров их чистоты установлено, что:

- среднее отклонение значений цветовых параметров образцов не превышает 1,5% от диапазона измерений при их смещениях в пределах зоны анализа. Однако даже в этом случае возможно изменение кода цвета для тех образцов ДК в сырье, цвет которых находится на границе разделения классов качества;
- среднее отклонение значений относительных площадей дефектов образцов при их смещении в пределах зоны анализа для суммы площадей включений и трещин составляет 3,3%. Таким образом, влияние на присваиваемый класс чистоты отсутствует;
- среднее отклонение значений максимальных размеров образцов при их смещении в пределах зоны анализа составляет от 0,9% для самой большой крупности до 5% для самой маленькой крупности. Таким образом, можно заключить, что указанные отклонения не влияют на принятие решения о принадлежности образца к тому или иному классу крупности;
- главный (наиболее ценный) цветовой оттенок не зависит от положения образца в зоне анализа и его ориентации относительно визирной оси модуля регистрации. Однако при изменении ориентации образцов в зоне анализа может изменяться степень смешения при классе зональности (отсутствует, сильная, слабая, равная или умеренная).

В большинстве случаев заключение экспертов по показателям качества анализируемых ДК совпало с данными, полученными с помощью разработанного экспериментального стенда. Сложности возникали только при определении показателей чистоты ограненных ДК, которые имеют гораздо более развернутую классификацию по сравнению с сырьевыми образцами. Исследования по совершенствованию стенда в данном направлении были отмечены экспертами как перспективные.

Таким образом, проведенные исследования подтвердили эффективность разработанного стенда для решения задач оценки показателей качества цветных ДК и возможность его внедрения в практическую деятельность геммологических лабораторий, центров и ювелирных компаний.

Однако при этом в перспективе необходимо решить следующие задачи:

- привести существующую классификацию дефектов (реализованную на базе существующих стандартов для сырья к классификации дефектов драгоценных камней;
- выявить признаки дефектов драгоценных камней на их изображениях;
- разработать алгоритмы анализа изображений обработанных ДК для выявления указанных дефектов;
- реализовать классификатор чистоты в соответствии с классификатором чистоты обработанных ДК;
- реализовать более совершенный классификатор мерности для ограненных ДК, учитывающий свойства огранки;
- реализовать более совершенные алгоритмы анализа параметров ограненных ДК, учитывающие особенности и свойства разных типов огранки.

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЦВЕТНЫХ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

В этой главе основное внимание уделено основным факторам, которые влияют на эффективность анализа качественных показателей ДК. Более того, была проведена оценка погрешностей при определении качественных показателей ДК с использованием экспериментального стенда.

5.1. Анализ критических состояний работы экспериментального стенда

Установлено, что основными факторами, влияющими на эффективность его работы, являются метамеризм цвета, спектральные характеристики подсветки (отличные от стандартных источников типа А и С, приведенных в Госреестре), а также нестабильность работы механических и электронных компонентов. Метамеризм цвета определяется как свойство спектральных распределений (излучения, пропускания, отражения) одинакового цвета, но имеющих выраженные различия в распределении энергии по длинам волн [72].

Описываемое явление метамеризма двух объектов для экспериментального стенда, реализующей цветовой анализ, может быть описано для случая применения коррекции пространственных искажений цвета при помощи следующей системы равенств:

$$\begin{aligned}
 \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_1(\lambda) \cdot S_R(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda &= \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda) \cdot S_R(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda \\
 \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_1(\lambda) \cdot S_G(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda &= \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda) \cdot S_G(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda \\
 \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_1(\lambda) \cdot S_B(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda &= \int_{360}^{780} P(\lambda) \cdot \rho_2(\lambda) \cdot S_B(\lambda) \cdot \tau_{IRf}(\lambda) d\lambda
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

где $P(\lambda)$ – спектральное распределение излучения источника подсветки объектов; $\rho_1(\lambda)$ и $\rho_2(\lambda)$ – спектральные распределения отражения (или пропускания) первого и второго объекта соответственно; $S_R(\lambda)$, $S_G(\lambda)$ и $S_B(\lambda)$ – спектральные распределения чувствительности красного, зелёного и синего цветовых каналов системы технического зрения соответственно; $\tau_{IRf}(\lambda)$ – спектральное распределение пропускания используемого ИК фильтра (например, стекла СЗС-23).

Важно подчеркнуть, что описанная система равенств может нарушаться по различным причинам. Это может быть связано с изменением спектрального распределения излучения источника света (например, выгорание люминофора, перегрев излучающего элемента и т.д.), характеристиками поверхности или тела изучаемого образца (например, матовые и глянцевые поверхности, объекты угловатых и сферических форм, различные ориентации объектов и т.д.), а также стабильностью воспроизведения спектральных распределений чувствительности из-за несовершенств кристалла используемого многоэлементного детектора и применяемого алгоритма цветовой интерполяции.

Необходимо уточнить, что указанная система равенств не учитывает влияние качества используемой оптической системы в силу глубокой изученности данного явления и существования множества методик ее устранения или сведения к минимуму. Кроме того, возможно появление обратного эффекта – уменьшение цветового различия между двумя образцами до нуля вследствие тех же причин.

Таким образом, влияние метамеризма носит систематический характер при стабильной работе источников освещения и узла регистрации и, соответственно, колориметрическая калибровка для используемой конфигурации позволяет перевести погрешность, вызываемую данным эффектом, в разряд незначительных.

Данное влияние обусловлено различиями между реальными спектральными характеристиками излучения используемого источника подсветки (в случае прототипа экспериментального стенда - белыми светодиодами) и стандартного источника излучения (в документации набора мер-имитаторов из Госреестра СИ приведены

цветовые координаты для источника типа А и источника типа С). Спектральные характеристики излучения указанных источников представлены на Рисунке 5.1. Излучение белого светодиода является комбинацией излучения контакта светодиода (левый пик спектральной характеристики излучения), возбуждающей люминесценцию люминофора (правый пик характеристики излучения).

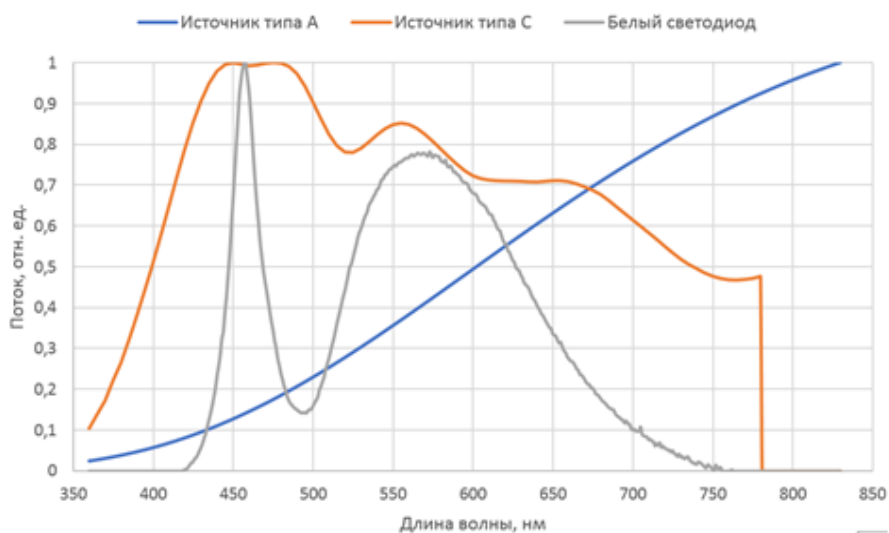


Рисунок 5.1 Спектральное распределение источников излучения

Рассчитаем относительную погрешность воспроизведения цвета некоторого минерального образца со сложной спектральной характеристикой, представленной на Рисунке 5.2. Для более углублённого анализа пусть данная характеристика смещается во всей видимой области спектра (от 360 нм до 830 нм), а ее форма при этом остаётся постоянной.

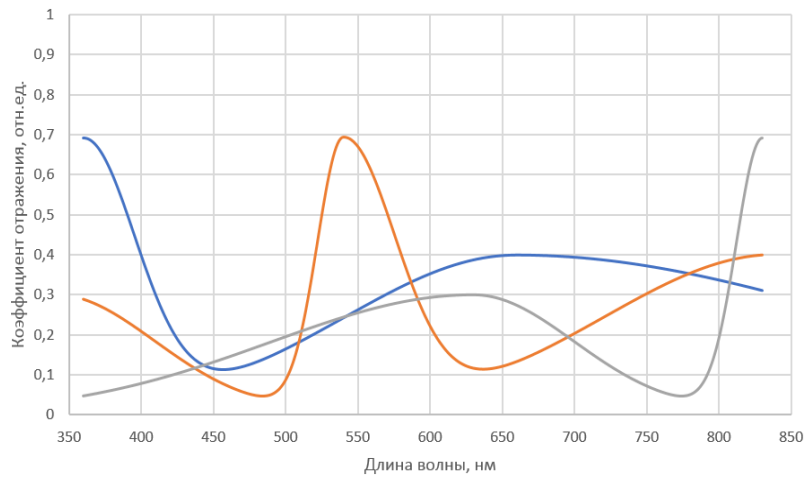


Рисунок 5.2 Варианты спектральных распределений коэффициента отражения, возможные для объекта анализа

Пусть данный расчёт относительной погрешности воспроизведения цвета при помощи используемой в экспериментальном стенде светодиодной подсветки относительно источника типа А и источника типа С будет проведен для цветового пространства XYZ, поскольку это пространство является классическим для колориметрических расчетов, изменение основных цветов (как при пересчёте в цветовое пространство RGB) существенно не изменит значения полученных погрешностей.

Функции сложения для цветового пространства XYZ приведены на рисунке 5.3.

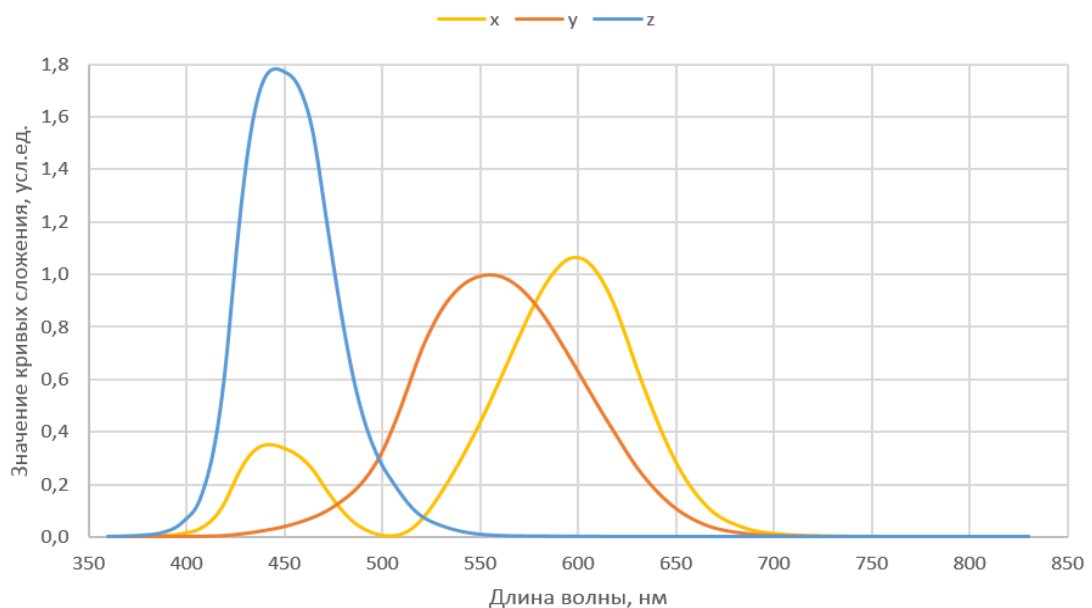


Рисунок 5.3 Кривые сложения цветов для цветового пространства XYZ

При этом методика расчёта цветовых координат образца для каждого из рассматриваемых источников излучения является классической.

$$\begin{cases} X = \frac{1}{N} \cdot \int_{\lambda} P(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = \frac{1}{N} \cdot \int_{\lambda} P(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = \frac{1}{N} \cdot \int_{\lambda} P(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (5.2)$$

где X , Y и Z – цветовые координаты объекта; N – калибровочный коэффициент, рассчитываемый по формуле:

$$N = \int_{\lambda} P(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (5.3)$$

Координаты цветности x , y образца определяются как

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5.4)$$

Относительная погрешность цветовоспроизведения координаты цветности x светодиодным источником излучения относительно источника типа А ($\gamma_{x_S/B}$) или источника типа С ($\gamma_{x_S/C}$) рассчитывается по следующему соотношению

$$\gamma_{x_S/I} = \frac{x_S - x_I}{x_S} \cdot 100\% \quad (5.5)$$

где x_S – координата цветности образца, получаемая при использовании светодиодного источника освещения; x_I – координата цветности образца, получаемая при использовании источника типа А или источника типа С.

Полученные зависимости значений относительной погрешности воспроизведения цвета образцов всех возможных цветностей светодиодным источником освещения относительно стандартных источников излучения представлены на Рисунках 5.4 и 5.5.

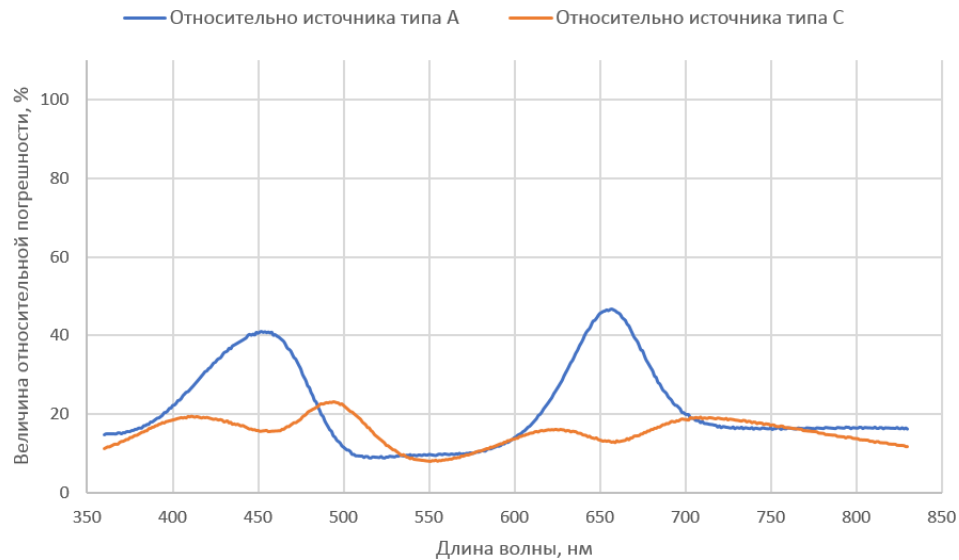


Рисунок 5.4 Зависимости относительной погрешности воспроизведения координаты цветности x при использовании светодиодного источника относительно источника типа А и источника типа С от максимальной длины волны спектрального распределения отражения объекта

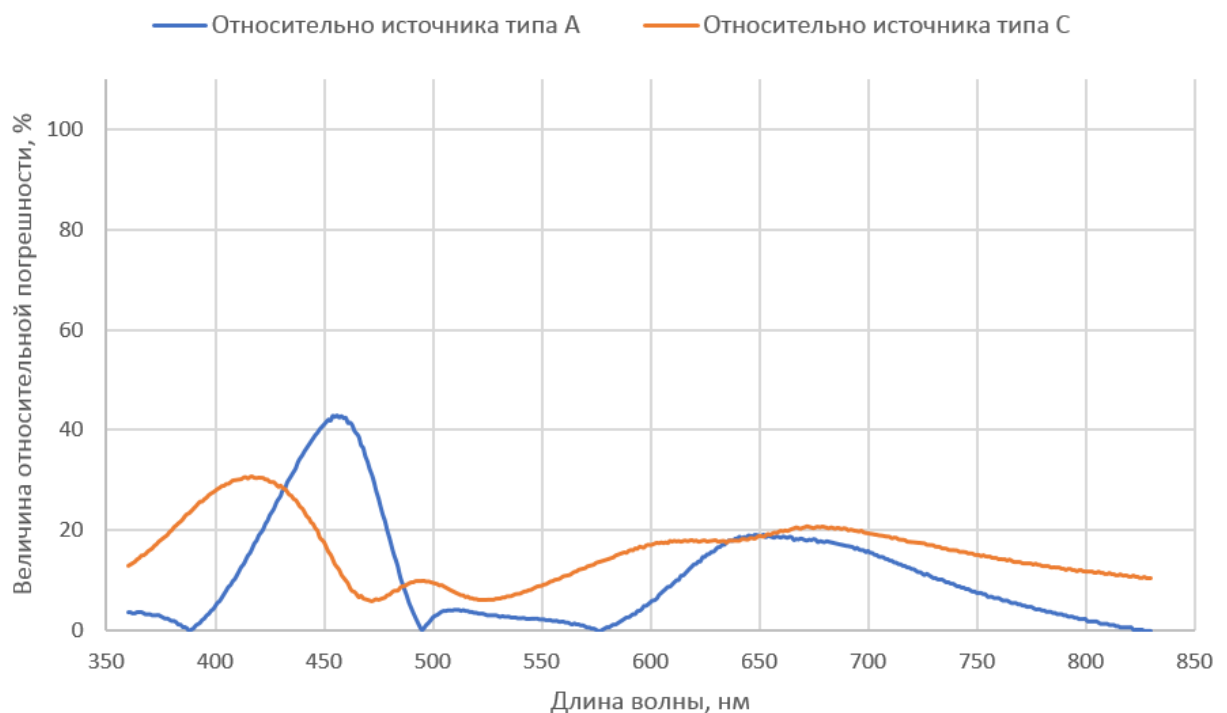


Рисунок 5.5 Зависимости относительной погрешности воспроизведения координаты цветности y при использовании светодиодного источника относительно источника типа А и источника типа С от максимальной длины волны спектрального распределения отражения объекта

Следовательно, можно заметить, что использование светодиодной подсветки для объекта анализа может вызвать значительные ошибки (до 45%) в точности воспроизведения цвета объекта.

Однако, необходимо отметить, что указанные графики были получены для идеальной формы спектрального распределения отражения объекта. При анализе реальных природных объектов получение указанного спектрального распределения коэффициента отражения маловероятно. Кроме того, при анализе реальных объектов спектры отражения также являются различными. Следовательно, полученные графики можно считать условными, тем не менее, они отражают серьезность влияния цветового метамеризма на отображаемые экспериментальным стендом цветные параметры анализируемых объектов.

Указанные значения довольно велики, однако их можно уменьшить, переопределив точку белого цветам. При этом назначается новый ахроматический ряд, связывающий точку черного цвета (точку начала измерений, нулевую точку) и эталон белого цвета.

Основная формула коррекции при этом имеет вид;

$$\begin{bmatrix} X_{new} \\ Y_{new} \\ Z_{new} \end{bmatrix} = [M_C] \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

где X , Y и Z – рассчитанные ранее координаты цвета образца; $[M_C]$ – матрица колориметрической коррекции; X_{new} , Y_{new} и Z_{new} – координаты цвета образца после переназначения точки белого.

Матрица колориметрической коррекции рассчитывается следующим образом

$$[M_C] = [M_a]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mu_{new}/\mu & 0 & 0 \\ 0 & \xi_{new}/\xi & 0 \\ 0 & 0 & \psi_{new}/\psi \end{bmatrix} \cdot [M_a] \quad (5.7)$$

где $[M_a]$ – прямая матрица пересчета, определяемая используемым методом коррекции (XYZ Scaling, по Бредфорду или по Вон Крайсу);

$[M_a]^{-1}$ – обратная матрица пересчета; μ , ξ и ψ – вектора коррекции пространства с исходной точкой белого (точкой, характеризующей источник типа А или С);

μ_{new} , ξ_{new} и ψ_{new} – вектора коррекции пространства с используемой точкой белого (точкой, характеризующей используемый источник – белый светодиод).

Вектора коррекции рассчитываются по известным координатам цвета источника излучения (X_W , Y_W и Z_W), используемого в качестве точки белого следующим образом

$$\begin{bmatrix} \mu \\ \xi \\ \psi \end{bmatrix} = [M_a] \cdot \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Относительная погрешность цветовоспроизведения координаты цветности x и y светодиодным источником излучения относительно источника типа А или источника типа С после колориметрической коррекции рассчитывается аналогично расчету относительной погрешности цветовоспроизведения до проведения коррекции. Результаты расчетов при использовании матрицы пересчета по Бредфорду представлены на Рисунках 5.6 и 5.7.

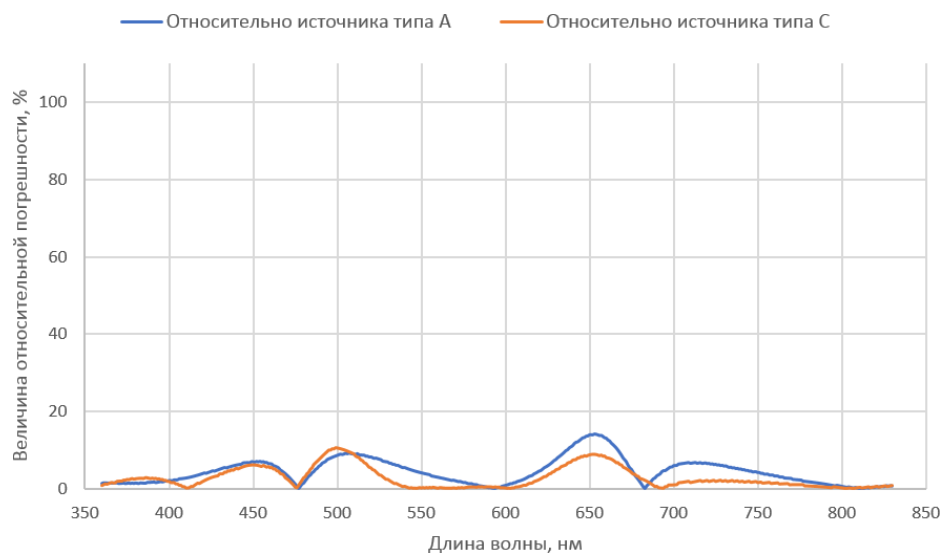


Рисунок 5.6 Зависимости относительной погрешности воспроизведения координаты цветности x при использовании светодиодного источника относительно источника типа А и источника типа С от максимальной длины волны спектрального распределения отражения объекта после колориметрической коррекции при помощи матрицы пересчета по методу Бредфорда

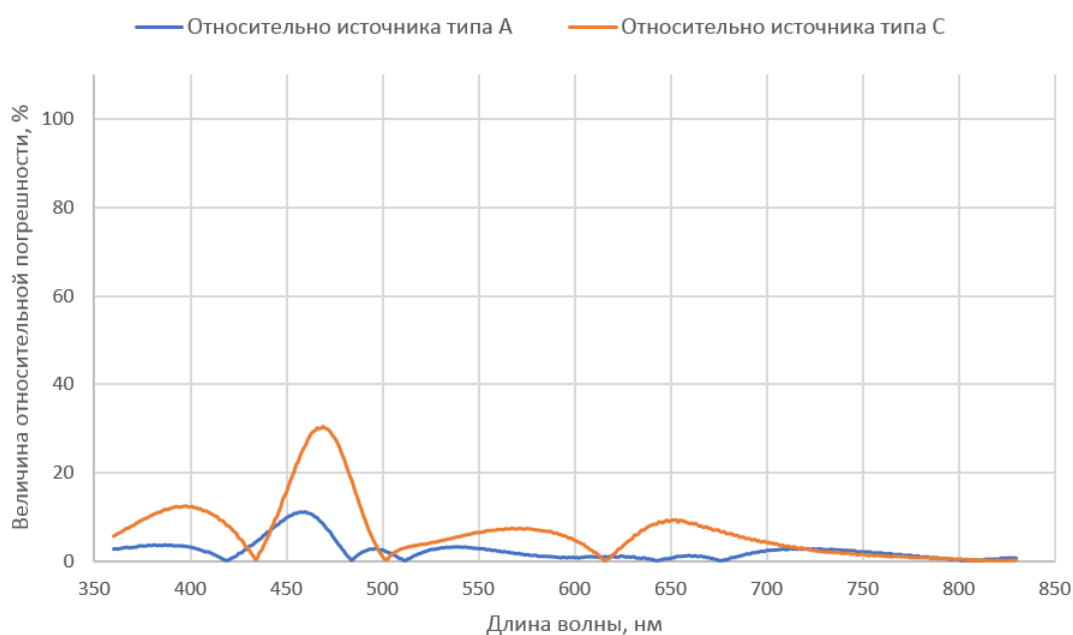


Рисунок 5.7 Зависимости относительной погрешности воспроизведения координаты цветности y при использовании светодиодного источника относительно источника типа А и источника типа С от максимальной длины волны спектрального распределения отражения объекта после колориметрической коррекции при помощи матрицы пересчета по методу Бредфорда

Как видно, погрешность цветовоспроизведения уменьшилась на порядок относительно исходных значений.

Помимо всего вышеописанного следует отметить, что при использовании конкретного источника излучения для освещения объектов, ошибка, вносимая в получаемые экспериментальным стендом цветовые параметры объектов, носит систематический характер и может быть исключена или сведена к минимуму при проведении соответствующей процедуры колориметрической калибровки, переопределяющей цветовое пространство и использующей не только эталон белого цвета, но и эталоны основных определяемых цветовых оттенков.

Нормированный к максимуму спектр излучения используемых при формировании нижней и верхней подсветок белых светодиодов представлен на Рисунке 5-8. Видно, что излучение данных светодиодов формируется двумя излучающими компонентами:

- излучением контакта светодиода (первый максимум);
- излучением люминофора (второй максимум).

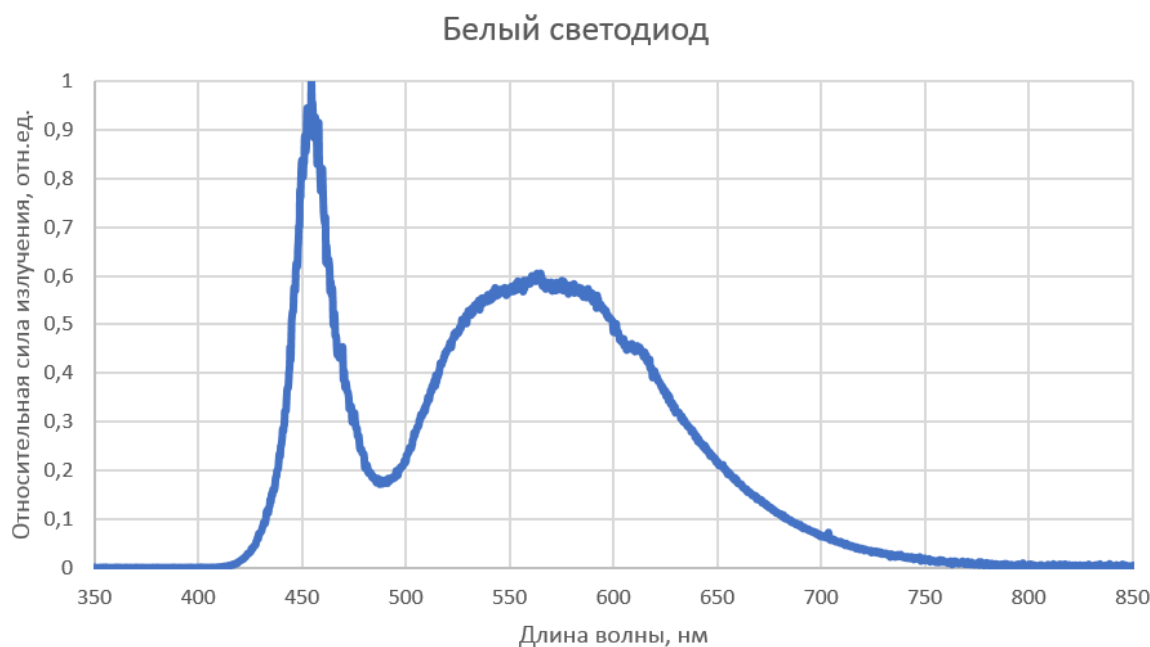


Рисунок 5.8 Измеренная спектральная характеристика излучения белых светодиодов, используемых для создания верхней и нижней подсветок

Стабильность цветовоспроизведения данного источника зависит от поведения указанных максимумов в зависимости от времени работы. Таким образом, для определения погрешности узла освещения необходимо оценить изменения положения и высоты максимумов и минимума излучения, а также изменения координат цветности излучения указанного источника с течением времени в ходе постоянной работы.

Условия эксперимента – лабораторные. Длительность эксперимента 4 часа. Периодичность измерений – 3 минуты.

Измерения проводились при помощи оптоволоконного спектрометра USB4000 и соединительного волоконно-оптического кабеля высшей категории QR600-2-UV-VIS производства фирмы OceanOptics. Результаты эксперимента представлены в Таблице 5.1.

Изменения характеристик излучения светодиода в течение эксперимента показаны на Рисунках 5.9–5.13.

Таблица 5.1 Результаты измерения параметров работы светодиодов подсветки при непрерывной работе

Параметр	Максимальное значение	Минимальное значение	Среднее значение	Диапазон изменения	Отношение диапазона к среднему значению, %
$\lambda_{\max 1}, \text{ нм}$	455	455	455	0	0
$E_{\max 1}, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{нм})$	1,371159	1,364714	1,366996	0,006445	0,47
$\lambda_{\min}, \text{ нм}$	490	490	490	0	0
$E_{\min}, \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{нм})$	0,337739	0,335186	0,337016	0,002553	0,76
$\lambda_{\max 2}, \text{ нм}$	563	563	563	0	0

$E_{\max 2},$ Вт/(см ² ·нм)	1,038897	1,035461	1,036876	0,003436	0,33
$E_0,$ Вт/см ²	188,9174	187,5526	188,1783	1,364797	0,73
X	71,543	71,435	71,507	0,107842	0,15
Y	100	100	100	0	0
Z	80,883	80,442	80,823	0,441736	0,55
x	0,283879	0,283215	0,283388	0,000664	0,23
y	0,396871	0,39619	0,396305	0,000681	0,17

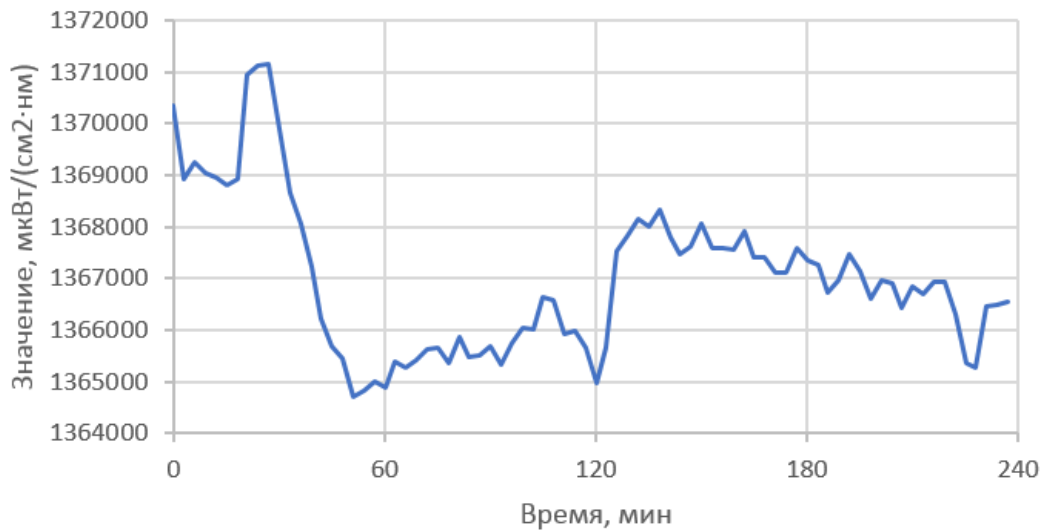


Рисунок 5.9 Изменение значения первого максимума излучения светодиода

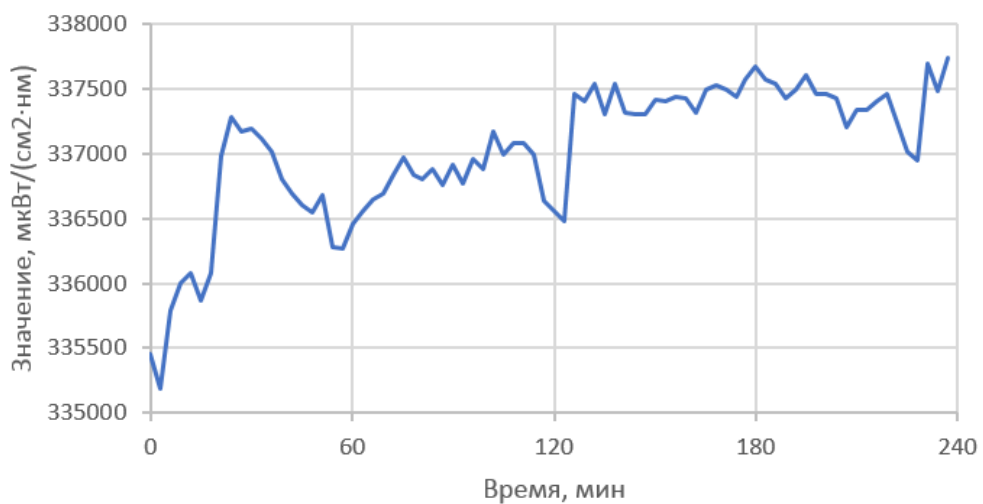


Рисунок 5.10 Изменение значения минимума излучения светодиода

Характер изменений значений обоих максимумов похож, что говорит о плотной энергетической взаимосвязи излучения люминофора и излучения контакта светодиода и, соответственно, качестве указанного светодиода. То есть, на излучение люминофора в ходе измерений напрямую не влияют внешние условия, только возбуждающее излучение контакта. Поэтому при сравнительно резких переменах спектра, координата цветности остается фактически постоянной.

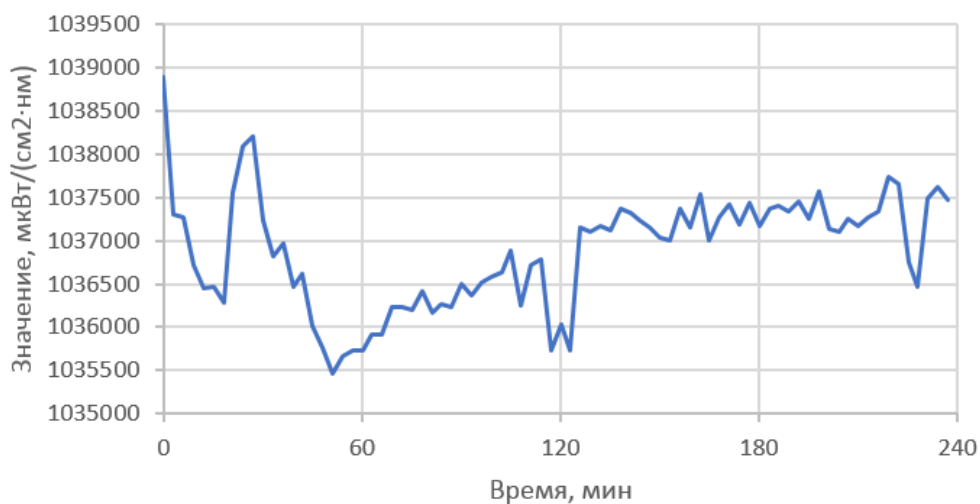


Рисунок 5.11 Изменение значения второго максимума излучения светодиода

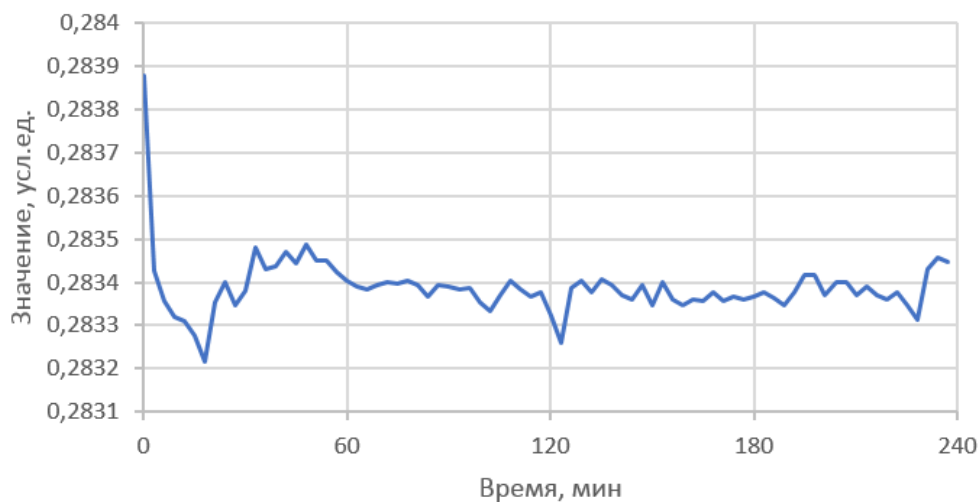


Рисунок 5.12 Изменение значения координаты цветности x излучения светодиода

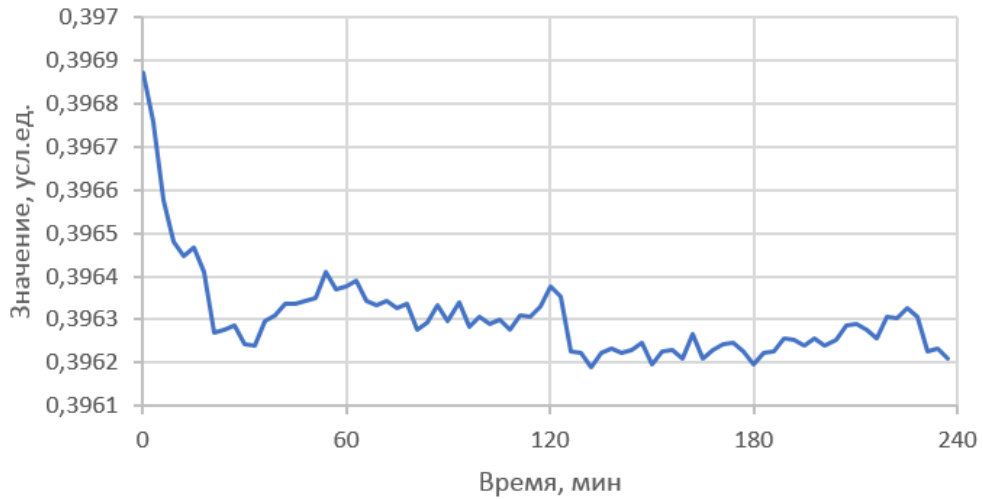


Рисунок 5.13 Изменение значения координаты цветности y излучения светодиода

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наибольшие отклонения от средних значений параметров излучения происходят в начале эксперимента, что объясняется тем, что источники еще не достигли оптимального режима работы. Однако указанные отклонения не являются критическими, поскольку все измеренные значения находятся в пределах одного эллипса Мак-Адама, как порога восприятия цветов зрительным аппаратом человека (Рисунок 5.14).

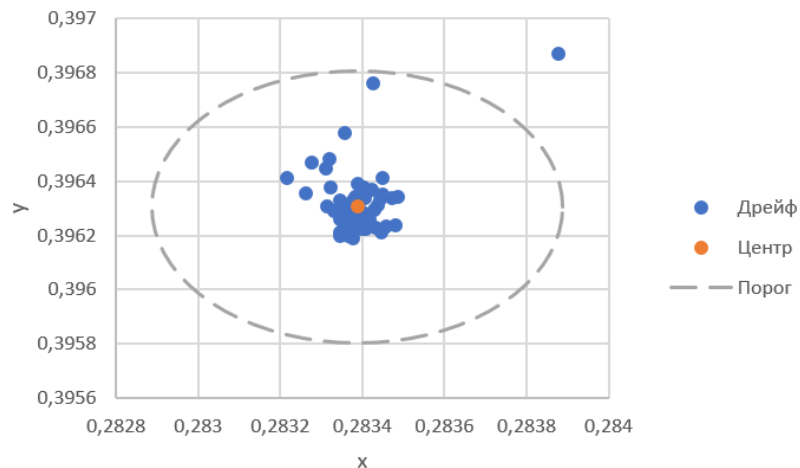


Рисунок 5. Изменение положения цвета излучения светодиода на диаграмме цветностей в ходе эксперимента относительно порога цветовосприятия зрительного аппарата человека (эллипса Мак-Адама)

5.2 Определение погрешностей и классов точности измеряемых параметров

Эффективность использования разработанных технических решений экспериментального стенда [73-79] для оценки качественных показателей цветных ДК определяется следующими составляющими:

1. погрешности узла освещения;
2. погрешности узла регистрации;
3. достоверность алгоритмов обработки данных, реализуемых разработанным программным обеспечением;
4. доверительная вероятность, как оценка достоверности анализа образцов при помощи экспериментального стенда.

5.2.1 Оценка погрешности цветового анализа

В данном подразделе рассмотрена оценка погрешности цветового анализа цветных ДК в сырь. Оценку влияния узла освещения можно провести посредством определения зависимостей спектральных, энергетических и цветовых параметров используемых источников освещения (белых светодиодных модулей) от времени работы и изменения условий их эксплуатации.

Воспользовавшись результатами анализа стабильности работы используемых светодиодов, для цветовых измерений наибольшее значение максимальной погрешности составляет относительная погрешность определения координаты цвета Z , значение которой составляет 0,55%. Следовательно, погрешность узла освещения $\gamma_{source1} = 0,0055$.

Погрешность узла регистрации определяется свойствами и характеристиками используемого приёмника оптического излучения и зависит от уровня шумов и алгоритма оцифровки изображения (алгоритма дискретизации уровней сигналов цветности аналого-цифровым преобразователем и дальнейшего пересчёта из цветового пространства RGB в цветовое пространство HLS).

Узел регистрации экспериментального стенда построен на базе цветной КМОП матрицы VEI-545 фирмы ЭВС. Согласно технической документации, динамический диапазон цветových каналов данной матрицы составляет 60 дБ.

Следовательно, отношение сигнал/шум каждого цветového канала можно найти из следующего соотношения

$$P_{din} = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_s}{U_n} \right) \quad (5.9)$$

где P_{din} – динамический диапазон цветového канала, U_s/U_n – отношение сигнал/шум. При известном значении динамического диапазона в 60 дБ, отношение $U_s/U_n = 10^6$.

Для определения величины градации сигнала используемым АЦП, используются приведенные данные в технической документации. Используемый АЦП имеет 255 ненулевых градаций для каждого цветového канала, следовательно, величина градации сигнала U_{sh} составляет:

$$U_{sh} = \frac{U_s}{255} \quad (5.10)$$

Сравнение величин градации сигнала и шума показывает, что

$$\frac{U_{sh}}{U_n} = \frac{10^6}{U_s} \cdot \frac{U_s}{255} = \frac{10^6}{255} = 3921 \approx 4000 \quad (5.11)$$

Следовательно, напряжение шума используемого приёмника оптического излучения в 4000 раз меньше величины градации сигнала, определяемой используемым АЦП. Таким образом, величиной шума цветových каналов данной КМОП матрицы можно пренебречь при расчёте погрешности экспериментального стенда ввиду её очень малого значения.

Далее, основываясь на теоретических основах определения цвета в цветovém пространстве RGB и, принимая на единицу величину высоты равностороннего треугольника RGB, можно утверждать, что диапазоны изменения каналов цветности в относительных единицах равны, соответственно

$$\begin{aligned}
 R &= 1,90 \quad (\text{отн.ед.}) \\
 G &= 1,68 \quad (\text{отн.ед.}) \\
 B &= 1,03 \quad (\text{отн.ед.})
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Указанные значения получены при аффинном преобразовании единичной плоскости цветового пространства RGB для реализации построения равностороннего треугольника с вершинами, отображающими основные цвета цветовых каналов используемой КМОП матрицы. После этого оценивались значения диапазонов изменения каждого из каналов цвета для воспроизведения всех возможных цветов.

Для данных значений диапазонов уровни градации сигнала для цветовых каналов составляют соответственно:

$$\begin{aligned}
 R_{sh} &= \frac{R}{255} = 0,00745 \quad (\text{отн.ед.}) \\
 G_{sh} &= \frac{G}{255} = 0,00659 \quad (\text{отн.ед.}) \\
 B_{sh} &= \frac{B}{255} = 0,00404 \quad (\text{отн.ед.})
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

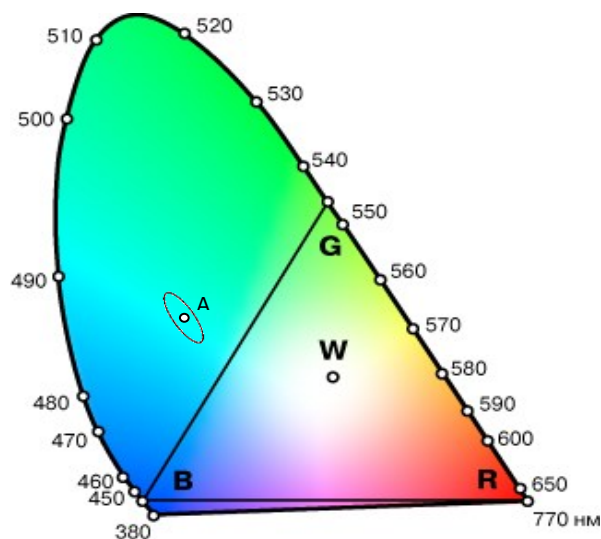


Рисунок 5.15. Область погрешности определения цвета A в цветовом пространстве RGB матрицы VEI-545 фирмы ЭВС (масштаб x10)

В соответствии с теорией метрологии погрешность определения [80] градации АЦП составляет половину уровня градации, следовательно, погрешность определения цвета в цветовом пространстве RGB составляет соответственно:

$$\begin{aligned}\Delta R &= \pm 0,5 R_{sh} = \pm 0,00373 \quad (\text{отн.ед.}) \\ \Delta G &= \pm 0,5 G_{sh} = \pm 0,00329 \quad (\text{отн.ед.}) \\ \Delta B &= \pm 0,5 B_{sh} = \pm 0,00202 \quad (\text{отн.ед.})\end{aligned}\tag{5.14}$$

Полученные величины погрешностей можно представить на преобразованной единичной плоскости пространства RGB в виде эллипса с указанными размерами по цветовым координатам (Рисунок 5.12).

Погрешность пересчёта из цветового пространства RGB в цветовое пространство HLS. Цвет оценивается в цветовом пространстве HLS. Пересчет между цветовыми пространствами осуществляется по следующему правилу

$$\begin{aligned}\text{если } R_{RfN} > 0 \wedge G_{RfN} > 0 \wedge B_{RfN} > 0 \\ \left| \begin{aligned} L_{Rf} &= \frac{MAX + MIN}{2} \\ S_{Rf} &= \begin{cases} \frac{MAX - MIN}{MAX + MIN} & \text{если } L_{Rf} \leq 0,5 \\ \frac{MAX - MIN}{2 - MAX - MIN} & \text{если } L > 0,5 \end{cases} \\ H_{Rf} &= \begin{cases} cb - cg & \text{если } MAX = R_{RfN} \\ 2 + cr - cb & \text{если } MAX = G_{RfN} \\ 4 + cg - cr & \text{если } MAX = B_{RfN} \end{cases} \end{aligned} \right.\end{aligned}\tag{5.15}$$

где $MAX = \max(R_{RfN}, G_{RfN}, B_{RfN})$ – максимальное значение из трех координат цвета для данного элемента изображения объекта; $MIN = \min(R_{RfN}, G_{RfN}, B_{RfN})$ – минимальное значение из трех координат цвета для данного элемента изображения объекта;

$$cr = \frac{MAX - R_{RfN}}{MAX - MIN}, \quad cg = \frac{MAX - G_{RfN}}{MAX - MIN}, \quad cb = \frac{MAX - B_{RfN}}{MAX - MIN}\tag{5.16}$$

Таким образом, погрешности определения координат HLS составляют

$$\begin{aligned}\Delta L &= \sqrt{\Delta R^2 + \Delta B^2} = 0,00424 \\ \Delta S &= \Delta L = 0,00424 \\ \Delta H &= \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2} = 0,00537\end{aligned}\quad (5.17)$$

5.2.2. Оценка достоверности алгоритма цветового анализа

К основным источникам погрешностей программного обеспечения можно отнести:

- ошибки записи исходного текста программ и алгоритмов ПО и ошибки преобразования программы в объектный код,
- ошибки преобразования форматов данных,
- ошибки округления.

При этом ошибки округления можно принять равными:

$$\Delta_o = \frac{1}{255} \cdot 100[\%] = 0,4[\%]\quad (5.18)$$

Поскольку все рассмотренные источники инструментальных погрешностей разработанного экспериментального стенда можно считать независимыми, то общую погрешность цветового анализа γ_{col} можно вычислить по следующей формуле

$$\gamma_{col} = \sqrt{(\gamma_{source1})^2 + (\gamma_{POI1})^2 + (\gamma_{al1})^2}\quad (5.19)$$

где $\gamma_{source1}$ – погрешность узла освещения при цветовом анализе, γ_{POI1} – погрешность узла регистрации при проведении цветового анализа, γ_{al1} – погрешность алгоритма цветового анализа.

В соответствии с вышеописанным, имеем $\gamma_{source1} = 0,0055$, $\gamma_{al1} = 0,004$ и

$$\gamma_{POI1} = \sqrt{\Delta H^2 + \Delta L^2 + \Delta S^2} = 0,00805\quad (5.20)$$

Следовательно

$$\gamma_{col} = \sqrt{(0,0055)^2 + (0,00805)^2 + (0,004)^2} = 0,013\quad (5.21)$$

Таким образом, относительная погрешность цветового анализа составляет примерно $\pm 1,3\%$.

Класс точности, соответствующий рассчитанному значению погрешности – 1,5.

5.2.3 Оценка погрешности определения прозрачности образцов ДК

Исходя из полученных результатов испытаний стабильности параметров источников излучения, приведенных выше, можно утверждать, что максимальная погрешность источников при расчетах прозрачности определяется значением относительной погрешности изменения освещенности E_0 , значение которой составляет 0,73%. Следовательно, погрешность узла освещения $\gamma_{source2} = 0,0073$.

Погрешность узла регистрации определяется уже рассчитанными значениями погрешностей определения цвета в цветовом пространстве RGB, а также алгоритмом расчета прозрачности, который можно выразить при помощи следующей формулы

$$Lum_{Tr} = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \quad (5.22)$$

Таким образом, погрешность узла регистрации при расчете прозрачности определяется формулой

$$\Delta Lum = \sqrt{\Delta R^2 + \Delta G^2 + \Delta B^2} = 0,00537 \quad (5.23)$$

Оценка достоверности алгоритма реализации измерений прозрачности полностью соответствует оценке достоверности алгоритма реализации цветковых измерений и, соответственно, имеет то же значение $\Delta_o = 0,4\%$.

Поскольку все рассмотренные источники инструментальных погрешностей разработанного экспериментального стенда можно считать независимыми, то общую погрешность измерений прозрачности γ_{lum} можно вычислить по следующей формуле

$$\gamma_{lum} = \sqrt{(\gamma_{source2})^2 + (\gamma_{POI2})^2 + (\gamma_{al2})^2} \quad (5.24)$$

где $\gamma_{source2}$ – погрешность узла освещения при анализе прозрачности, γ_{POI2} – погрешность узла регистрации при проведении анализа прозрачности, γ_{al2} – погрешность алгоритма анализа прозрачности.

В соответствии с вышеописанным, имеем $\gamma_{source2} = 0,0073$, $\gamma_{al2} = 0,004$ и $\gamma_{POI2} = \Delta Lum = 0,00537$. Следовательно

$$\gamma_{col} = \sqrt{(0,0073)^2 + (0,00537)^2 + (0,004)^2} = 0,0099 \quad (5.25)$$



Таким образом, относительная погрешность анализа прозрачности составляет примерно $\pm 1,0\%$, класс точности 1,0.

5.2.4 Оценка погрешности определения размеров ДК

При оценке точности результатов, получаемых в ходе анализа размеров исследуемых образцов [48], практически были получены следующие данные, представленные в таблице 5.2.

Таблица 5.2 Оценка результатов определения размерных параметров образцов

Образец	Крупность	Размер образца при различных поворотах, мм				Разброс значений
		0	90	180	270	
	-5+2	4,94	5,02	5,06	5,12	0,18мм (3,6%)
	-10+5	10,65	10,71	10,71	10,63	0,08мм (0,7%)
	-15+10	13,23	13,40	13,29	13,28	0,17мм (1,3%)

	-20+15	19,40	19,57	19,44	19,52	0,17мм (0,9%)
	+20	30,19	30,10	30,16	29,96	0,23мм (0,08мм)

Соответственно, в качестве погрешности определения размеров следует использовать полученное значение относительной погрешности определения размера для самой малой крупности от 2 до 5мм, составляющее 3,6%.

Таким образом, относительная погрешность анализа размеров составляет примерно $\pm 3,6\%$, класс точности 4,0.

5.3 Выводы по главе 5

Оценка погрешностей и классов точности экспериментального стенда [А14] ДК показала, что расчетная относительная погрешность цветового анализа соответствует классу точности 1,5, погрешность определения прозрачности – классу точности 1,0, погрешность определения размеров – классу точности 4,0.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа нормативной документации, применяемой в области анализа цветных ДК отрасли, установлено, что при определении показателей качества цветных ДК в настоящее время опираются на экспертный анализ, так как до сих пор не существует надежного инструментального метода, с помощью которого можно было бы автоматизировать процесс оценки и верифицировать заключение эксперта. Экспертный метод оценки не учитывает состояние созданных наборов природных образцов цветных ДК и мер-имитаторов показателей их качества.

2. Анализ показателей качества цветных ДК показал, что в нормативной документации ГОХРАН определение «цвет» не противоречит классическому колориметрическому термину «цвет», утвержденному в соответствующем порядке. Это позволяет согласовать стандартное цветовое пространство с цветовой палитрой ДК и разработать на основании полученных данных методику по определению цветовых характеристик. Идентифицировать форму включения позволяет существующая классификация с графическим представлением и перечень ДК, которым присущи данные включения. Количество включений и трещин позволяет присвоить ДК группу чистоты. Определение чистоты осуществляется через определение формы и вида включений и трещин во всем объеме камня.

3. Предложена методика перехода от качественного описания показателей качества к количественному, учитывающая нормативно-техническую базу, особенности описания показателей качества ДК, а также оптические свойства ДК, и позволяющая определить цвет и чистоту ДК по колориметрическим данным с помощью технологий машинного зрения. На основании исследования набора мер-имитаторов GIA GemSet реализована база цифровых двойников для анализа цвета ДК с помощью оптико-электронных систем, основанных на принципах машинного зрения и обработки изображений.

4. Разработан экспериментальный стенд для оптического анализа ДК, в том числе, технические решения для системы освещения ДК, которые позволяют обес-

печатить максимально контрастное изображение, получаемое с помощью видеокамеры, и исключить влияние бликов. При этом узел освещения реализован таким образом, чтобы имелась возможность получать изображения образца анализируемого ДК как в отраженном, так и в проходящем свете. Предложен и программно реализован алгоритм обработки получаемых с помощью стенда изображений ДК.

5. Определены оптимальные параметры и режимы работы экспериментального стенда. Предложена методика анализа показателей качества цветных ДК с его помощью, обеспечивающая метрологически корректный результат.

6. Проведенные экспериментальные исследования стенда для оптического анализа ДК на представительной пробе бериллового сырья показали высокую стабильность значений определяемых параметров анализируемых образцов при их смещении в пределах зоны анализа. Экспериментальные исследования на образцах ДК, проведенные совместно со специалистами-геммологами компаний RusGems и Gemlovers подтвердили эффективность применения предложенных технических решений для перехода к цифровому анализу качества цветных ДК.

7. Расчет погрешностей определения показателей качества цветных ДК с помощью разработанного стенда показал, что относительная погрешность анализа прозрачности составляет примерно $\pm 1,0\%$, относительная погрешность цветового анализа составляет примерно $\pm 1,3\%$.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

1. ГОСТ – государственный стандарт
2. ГОХРАН – Федеральное казенное учреждение «Государственное учреждение по формированию Государственного фонда драгоценных металлов и драгоценных камней Российской Федерации, хранению, отпуску и использованию драгоценных металлов и драгоценных камней при Министерстве финансов Российской Федерации»
3. ДК – драгоценный камень
4. ИК – инфракрасный
5. МКО – международная комиссия по освещению
6. ПО – программное обеспечение
7. СИ – средство измерения
8. СТО – стандарт организации
9. ТУ – технические условия
10. GIA – Геммологический институт Америки
11. slpR – слабо пурпурновато красный
12. oR – оранжево-красный
13. R- красный
14. D65 – источник освещения
15. vslbG – очень слабо голубовато-зеленый

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моргунов В.В. Применение машинного зрения в области контроля качества. /Моргунов В.В. // Международный студенческий научный вестник. – 2019. – № 2.
2. Чихутова А.Д., Бердникова К.Э., Карпова М.А., Седова А.С., Юрина В.М. Компьютерное зрение и области его применения. / Чихутова А.Д., Бердникова К.Э., Карпова М.А., Седова А.С., Юрина В.М. // Современные научные исследования и инновации. – 2019. – № 12 (104). – С. 5.
3. Мельников Е. П., Ножкина А. В. Состояние и проблемы диагностики драгоценных камней и промышленных минералов. / Мельников Е. П., Ножкина А. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – №S1. – С. 563 - 567.
4. СТО 45866412-16-2014 Драгоценные камни. Термины и определения. – М.: Гохран, 2014.
5. Государственный реестр средств измерений №20855-01. Набор цветных меримитаторов драгоценных камней. – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2018.
6. Atlas GIA [Электронный ресурс]. // GIA GEM Set GIA Gem Instrument. – Режим доступа: <https://www.gia.edu/gia-instrument>.
7. Носов А.В., Бузаев Д.В., Зотин А.Г. Оценка эффективности составляющих цветковых моделей при сегментации изображений по цветовым признакам. / Носов А.В., Бузаев Д.В., Зотин А.Г.// Решетневские чтения. – 2011. – Т.2. – С.629-630.
8. Ложкин Л.Д., Кузьменко А.А. Исследование цветковых пространств МКО на различия в порогах цветоразличения в разных областях цветового локуса. / Ложкин Л.Д., Кузьменко А.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2021. – Т.24. – С.107-110.
9. Стороженко А.И. Пересчет координат цветности из системы цветов колориметра в систему XYZ. / Стороженко А.И. // Научно-технический вестник Санкт-

- Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – №.26. – С.196-200.
10. GemWizard [Электронный ресурс]. // GIA. Communicating color. – Режим доступа: <https://www.gemewizard.com>.
 11. Presidium Gem Indicator [Электронный ресурс]. // Официальный сайт сингапурской компании Presidium Instruments Pte Ltd. – Режим доступа: <http://presidium.com.sg/psdproduct/gem-indicator-pgi>.
 12. Gem Tester Colored Stone Estimator [Электронный ресурс]. // Официальный сайт сингапурской компании Presidium Instruments Pte Ltd. – Режим доступа: <http://presidium.com.sg/psdproduct/gem-tester-colored-stone-estimator-pgt>.
 13. Хорнабрук Г.А., Марчант С.Н., Ламмис Р.Х., Приммер К.Э., Саттон П. Б., Хорнабрук А.Н., Бишоф Л., Лагерстром Р., Хилзенштейн Ф., Имри Р. Д. Устройство для экспертизы, оценки и классификации драгоценных камней. // Патент RU 2009140389/28. Выдан 27.02.2013.
 14. Synthetic Ruby Identifier [Электронный ресурс]. // Официальный сайт сингапурской компании Presidium Instruments Pte Ltd. – Режим доступа: <http://presidium.com.sg/psdproduct/synthetic-ruby-identifier-sri>.
 15. Ик-Фурье Спектрометры [Электронный ресурс]. // Официальный сайт Группы компаний «Гранат». – Режим доступа: http://granat-e.ru/catalog_ikfsp.html.
 16. Краснящих А.В. Обработка оптических изображений. / Краснящих А.В. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013.
 17. Потапов А.С. Системы компьютерного зрения. / Потапов А.С. – СПб.: Университет ИТМО, 2016.
 18. Асадулин В.А., Сальников А.Ю., Захаренков И.Г. Анализ методов компьютерного зрения. / Асадулин В.А., Сальников А.Ю., Захаренков И.Г. // Нейрокомпьютеры и их применение. XVII Всероссийская научная конференция. – 2019. – С. 439
 19. ГОСТ 13088-67 Колориметрия Термины, буквенные обозначения. – М.: Стандартиформ, 1967.

20. Юстова Е.Н. Цветовые измерения (Колориметрия). / Юстова Е.Н. – СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2000.
21. Ложкин Л.Д., Солдатов А.А., Вороной А.А., Кузьменко А.А., Анкина К.П., Балыкина Т.Г. Способ определения координат цвета и цветности по изображению оригинала. / Ложкин Л.Д., Солдатов А.А., Вороной А.А., Кузьменко А.А., Анкина К.П., Балыкина Т.Г. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2019. – Т.2. – С.62-68.
22. Артемов А.А., Кавалеров М.В., Кузнецов Г.С. Проблема поиска объектов на изображениях с помощью компьютерного зрения на основе информации о цвете. / Артемов А.А., Кавалеров М.В., Кузнецов Г.С. // Вестник Пермского государственного технического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2011. – №5. – С.70-79.
23. Домасев М.В., Гнатюк С.П. Цвет, управление цветом, цветовые расчеты и измерения. / Домасев М.В., Гнатюк С.П. – СПб.: Питер. – 2009.
24. Казиев И.А., Румянцев П.А., Саута О.И., Шмулевич В.Л. Оценка контраста в метрическом цветовом пространстве с координатами: светлота, насыщенность, цветовой тон. // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82. – № 9. – С. 69-74.
25. Романенко А.И. Методика оценки информационной насыщенности цифрового изображения как физического носителя информации. / Романенко А.И. // Евразийское Научное Объединение. – 2018. – № 1-1 (35). – С. 48-52.
26. Зубов Р.Н. Разработка критериев для определения насыщенности цвета ювелирных камней. / Зубов Р.Н. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2020. – № 1 (57). – С. 86-95.
27. Макаренко А.А. Вариант применения цифровой обработки изображений для распознавания текстур на оптикоэлектронном изображении. / Макаренко А.А. // Радиопромышленность. – 2021. – Т. 31. – № 2. – С. 15-21.
28. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Расчет цветовых координат из спектральных свойств источников излучения. / Горбунова Е.В., Чертов А.Н. – СПб.: Университет ИТМО, 2015.

29. Кириллов Е.А. Цветоведение: учебное пособие. / Кириллов Е.А. – М.: Легпромбытиздат, 1987.
30. Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Ольховский А.М. Влияние цветового пространства на эффективность оптической сепарации твердых полезных ископаемых / Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Ольховский А.М. // Обогащение руд. – 2015. – № 3(357). – С. 35-40.
31. Белодедов М.В., Чмутин А.М. Исследование точности контрастного преобразования цветовой насыщенности цифровых изображений. / Белодедов М.В., Чмутин А.М. // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 1(83). – С. 59-79.
32. Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Критерии применимости цветовых пространств оптико-электронных системах цветового анализа минералов. / Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В., Чертов А.Н. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 3 (79). – С. 156.
33. Борзяк Н.О., Беляев А.С. Нахождение линий и границ для разнообразных реальных / Борзяк Н.О., Беляев А.С. // Молодежь и современные информационные технологии. – 2016. – С. 357-358.
34. Кривошеев М.И., Кустарев А.К. Цветовые измерения. / Кривошеев М.И., Кустарев А.К. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
35. Чертов А.Н., Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В. Критерии применимости цветовых пространств в оптико-электронных системах цветового анализа минералов. / Чертов А.Н., Вакуленко А.Д., Горбунова Е.В. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – Т. 79. – № 3. – С. 156-157
36. Горбунова Е.В., Чертов А.Н. Расчет цветовых координат из спектральных свойств источников излучения. / Горбунова Е.В., Чертов А.Н. – СПб.: Университет ИТМО, 2015.
37. СТО 45866412-10-2008 Рубины природные необработанные (в сырье). – М.: Гохран, 2008.
38. СТО 45866412-06-2008 Рубины природные обработанные (ограненные вставки). – М.: Гохран, 2008.

- 39.СТО 45866412-09-2008 Сапфиры природные необработанные (в сырье). – М.: Гохран, 2008.
- 40.СТО 45866412-05-2008 Сапфиры природные обработанные (ограненные вставки). – М.: Гохран, 2008.
- 41.СТО 45866412-11-2009 Александриты природные обработанные. – М.: Гохран, 2009.
- 42.ТУ 7026-001-2642017194 Александриты природные в сырье. – М.: Гохран, 2009.
- 43.ТУ 951647-88. Изумруды природные в сырье. – М.: Гохран, 1988.
- 44.ТУ 95- 335-88. Изумруды природные обработанные. – М.: Гохран, 1988.
- 45.Куликова С.А. Справочник эксперта-геммолога и оценщика ювелирных изделий. /Куликова С.А. – М. : Клио, 2003.
- 46.Капошко И.А., Березюк В.Г., Синичкин А.М., Темных В.И. Оценка качественных характеристик и стоимости ювелирных камней, художественная ценность изделий в ценообразовании. / Капошко И.А., Березюк В.Г., Синичкин А.М., Темных В.И. – Красноярск.: Издательство СФУ, 2015.
- 47.Солодова Ю.П., Андреев Э.Д., Гранадчикова Б.Г. Определитель ювелирных и поделочных камней. /Солодова Ю.П., Андреев Э.Д., Гранадчикова Б.Г. – М.: Недра, 2008.
- 48.Печененко К.С., Покалякин З.В. Компьютерное зрение для анализа изображений спор папоротников семейства pteridaceae. / Печененко К.С., Покалякин З.В. // МАК: Математики - Алтайскому краю. –2021. –№ 3. – С. 225-227
- 49.Румянцев А.А., Ярмиев Р.Ф. Определение цвета крупы и муки в цифровом режиме RGB. / Румянцев А.А., Ярмиев Р.Ф. //Молодежь и наука. –2018. – № 1. – С. 34.
- 50.Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Лященко А.М., Глазунов Д.В. Использование средств компьютерного зрения для контроля сортировочных процессов. / Ольгейзер И.А., Суханов А.В., Лященко А.М., Глазунов Д.В. // Цифровые инфокоммуникационные технологии. сборник научных трудов. –2021. – С. 175-179.
- 51.Шмелев И.А. Разработка системы позиционирования робота-манипулятора с компьютерным зрением. / Шмелев И.А. //Междисциплинарный дискурс. Диалог

- поколений. сборник статей Международной научно-практической конференции. – 2023. – С. 77-79
- 52.Прозорова Е.В., Соловьев В.А. Связь погрешности определения координат цвета с точностью измерения спектральных коэффициентов пропускания (отражения)./ Прозорова Е.В., Соловьев В.А. // Труды международного симпозиума “Надежность и качество”.– 2012. – С. 380.
- 53.Dadong Wang, Bischof L., Lagerstrom R. Automated opal grading by imaging and statistical learning / Dadong Wang, Bischof L., Lagerstrom R. // IEEE Transact. On Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2016. – Vol. 46. – N. 2. – P. 185-201.
- 54.Алехин А.А., Перетягин В.С. Двухканальная оптико-электронная система цветового анализа минералов / Алехин А.А., Перетягин В.С. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 90-91.
- 55.Алехин А.А., Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Ольховский А.М., Петухова Д.Б., Чертов А.Н. Оптико-электронная система экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом. / Алехин А.А., Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Ольховский А.М., Петухова Д.Б., Чертов А.Н. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 15-20.
- 56.Alekhin A.A., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Petukhova D.B. Optical electronic system for express analysis of mineral raw materials dressability by color sorting method . / Alekhin A.A., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Petukhova D.B. // Proceedings of SPIE. – 2013. – Vol. 8791.– pp. 87911N
- 57.Андреев А.Л. Автоматизированные видеоинформационные системы. / Андреев А.Л. – СПб: НИУ ИТМО, 2011.
- 58.Mahendran R, Jayashree G, Alagusundaram K. Application of computer vision technique on sorting and grading of fruits and vegetables. / Mahendran R, Jayashree G, Alagusundaram K. // Food Processing & Technology. – 2012. – P. 1-7.
- 59.Магамедова Д.М. OpenCV – инструмент компьютерного зрения. / Магамедова Д.М. // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 63-3. – С. 42-48.
- 60.Форсайт Д.А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход./ Форсайт Д.А., Понс Ж. – М.: Издательский дом Вильямс, 2004.

61. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике (пер. с англ./под ред. д.т.н. Артюшина Р.Ф.). / Джадд Д., Вышецки Г. – М.: Издательство Мир, 1978.
62. Маг-Дональда Р. Цвет в промышленности / Маг-Дональда Р. – М.: Логос, 2002.
63. Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. К вопросу определения цвета различных пород древесины. / Рыбин Б.М., Завражнова И.А., Рыбин Д.Б. // Лесной вестник. Forestry Bulletin. –2017. –Т. 21. –№ 2. –С. 55-60.
64. Савкова Е.Н. Исследование точности колориметрических измерений в программно-аппаратных средах. / Савкова Е.Н. // Мир измерений. –2019. –№ 3. –С. 38-44.
65. Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Чертов А.Н., Шитов Д.Д. Коррекция цветопередачи систем технического зрения с помощью тетраэдризации их цветового пространства по методу Делоне. / Горбунова Е.В., Коротаев В.В., Чертов А.Н., Шитов Д.Д. // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2015. – № 4. – С. 20-24.
66. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде Matlab. / Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. – М.: Техносфера, 2006.
67. Sinkevicius S., Lipnickas A., Rimkus K. Amber gemstones sorting by colour / Sink-evicius S., Lipnickas A., Rimkus K. // Elektronika ir elektrotechnika. – 2017. – Vol. 23. – N 2. – P. 10-14.
68. Мир самоцветов и цветных камней [Электронный ресурс]. // Электронная библиотека Литмир. – Режим доступа: <https://litmir.club/br/?b=114783>
69. Корнилов Н. Ювелирные камни. / Корнилов Н.- М.: Недраб, 1983.
70. Шкалы чистоты драгоценных камней [Электронный ресурс]. // Официальный сайт Gemselect Россия. – Режим доступа: <https://www.gemselect-russia.com/russian/gem-info/clarity-scale.php>
71. Понимание цветового зонирования драгоценных камней: полное руководство [Электронный ресурс]. // Официальный сайт Gemselect Россия. – Режим доступа: <https://www.gemselect-russia.com/russian/other-info/gem-color-zoning.php>

72. Peter De Jong, Deurne, Ronald Geurts, Hove. Systems, apparatuses and methods for diamond color measurement and analysis. // Патент US 6,473,164 B1. НКИ: 356/30, 356/445, 356/446. МПК: G 01 N 21/00. Выдан 29.10.2002.
73. ГОСТ Р 1.4-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения. – М.: Стандартинформ, 2004.
74. ГОСТ 1.5-2001 Межгосударственная система стандартизации (МГСС). Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2001.
75. ГОСТ 1.3-2014 Межгосударственная система стандартизации (МГСС). Стандарты межгосударственные. Правила разработки на основе международных и региональных стандартов. – М.: Стандартинформ, 2014.
76. ГОСТ 8.205-2014 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Государственная поверочная схема для средств измерений координат цвета, координат цветности, показателей белизны и блеска. – М.: Стандартинформ, 2014.
77. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. – М.: Стандартинформ, 2002.
78. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений.
79. РМГ 29-99 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. – М.: Стандартинформ, 1999.
80. Кружилов И.С. О влиянии относительного размера изображения на погрешность определения координат. / Кружилов И.С. // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33. № 2. – С. 210-215.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА

- A1. Kushkoeva A.S. Results of the study of the possibility of replacing the Gia GemSet, designed for evaluating the color of precious stones, with digital simulators for automated control systems. / Kushkoeva A.S., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Veselov S.V. // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1745. No. 1. 012-019. – P.
- A2. Kushkoeva A.S. Quantitative assessment of the precious stones color by machine vision. / Kushkoeva A.S., Chertov A.N., Gorbunova E.V., Alekhin A.A., Peretyagin V.S., Troshkin D.E. // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11061. 110-610L. – P.
- A3. Kushkoeva A.S. Dome diagnostics system of optical parameters and characteristics of LED. / Peretyagin V.S., Pavlenko N.A., Kushkoeva A.S., Sycheva E.A., Korotaev V.V. // Proceedings of SPIE, IET. – 2018. – Vol. 10680. 106-802. – P.
- A4. Кушкочева А.С. Аппаратно-программный комплекс для сортировки и классификации минерального сырья по визуальным показателям. / Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Кушкочева А.С., Горбачев А.А. // Известия вузов. Приборостроение. – 2021. – №7. – С. 589-594.
- A5. Кушкочева А.С. Аппаратно-программный комплекс для оценки качества сырья цветных камней, его классификации и сертификации. / Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Перетягин В.С., Кушкочева А.С., Алёхин А.А., Морозов Ю.М. // Известия вузов. Приборостроение. – 2020. – Т.63. – №1. – С.55-60.
- A6. Кушкочева А.С. Экспериментальный стенд для оптического анализа основных показателей качества цветных драгоценных камней. / Кушкочева А.С., Мачихин А.С., Чертов А.Н. // Физические основы приборостроения. – 2023. – Т. 12. – № 4(50).
- A7. Кушкочева А.С. Существующая инструментальная база для оценки качества и идентификации драгоценных камней. / Кушкочева А.С., Чертов А.Н., Горбунова Е.В. // VII Всероссийский конгресс молодых ученых. – 2018.
- A8. Кушкочева А.С. Цвет драгоценных камней как количественный параметр оценки их качества. / Кушкочева А.С., Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Алёхин А.А., Перетягин В.С., Павленко Н.А // XIII Международная конференция "Прикладная оптика-2018". – 2018. – Т. 3. – С. 62-64.

- A9. Кушкочева А.С. Основные принципы перехода от анализа к измерению цвета драгоценных камней с помощью компьютерного зрения. / Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Веселов С.В. // X Конгресс молодых ученых. – 2021.
- A10. Кушкочева А.С. Цифровая технология оценки качества и классификации сырья драгоценных камней. / Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Кушкочева А.С., Алёхин А.А. // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2020). – 2020. – С. 324.
- A11. Кушкочева А.С. Создание цифрового цветового тела для калибровки систем технического зрения, предназначенных для измерения цвета матовых непрозрачных объектов. / Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Веселов С.В. // IX Конгресс молодых ученых. – 2020.
- A12. Кушкочева А.С. Результаты исследования возможности замены набора GIA GemSet, предназначенного для оценки цвета драгоценных камней, цифровыми мерами-имитаторами для автоматизированных систем контроля. / Кушкочева А.С., Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Веселов С.В. // VI Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии». – 2020. — Т. 1. – С. 497-503
- A13. Кушкочева А.С. Результаты экспериментальных исследований видеоинформационной системы анализа показателей качества цветных драгоценных камней. / Кушкочева А.С., Мачихин А.С., Чертов А.Н. // XVI Международная научно-техническая конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации». – 2023. – С. 318-322.
- A14. Кушкочева А.С. Задачи метрологического обеспечения оборудования для оценки качества цветных камней, /Кушкочева А.С., Горбунова Е.В. //VIII Всероссийский конгресс молодых ученых. – 2019. – С. 163-167.
- A15. Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Добриборщ Д., Горбачёв А.А., Алёхин А.А. Определение границ и визуализация цветовых зон на цифровых изображениях в цветовом пространстве RGB. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019611200. Выдан 23.01.2019.

А16. Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Добриборщ Д., Горбачёв А.А., Алёхин А.А. Определение дефектов цветного зрительного восприятия человека. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019611198. Выдан 23.01.2019.



ООО «Кристал Лайт»

Духовской пер. 17, стр.1, г.Москва.

«1» июля 2021 г.

**Протокол испытаний Оптико-электронной системы для количественной
оценки качества цветных драгоценных камней**

Объект испытаний: Оптико-электронная система для количественной оценки качества цветных драгоценных камней

Цель испытаний: Проверка достоверного определения показателей качества и эксплуатационных характеристик, разработанной Оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней, в рамках научных результатов диссертации Кушковой Анастасии Сергеевны на тему «Разработка и исследование оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Методика испытаний:

1. Эксперт-геммолог получает набор, включающий в себя образцы драгоценного, искусственного и минерального сырья. Используя, утвержденные методики оценки показателей качества, эксперт-геммолог методом визуальной оценки определяет показатели качества образцов, входящих в набор.

2. Полученные результаты записываются в Таблицу 1 (Приложение).
3. Набор, включающий в себя образцы драгоценного, искусственного и минерального сырья передается для оценки Оптико-электронной системой для количественной оценки качества цветных драгоценных камней.
4. Полученные результаты записываются в Таблицу 2 (Приложения).
5. По итогам испытания проводится сравнение показателей качества набора, полученных экспертом методом визуальной оценки, и результатов, полученных с помощью Оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней.

Результаты:

Результаты, полученные Кушковой А.С, к настоящему времени, подтверждают наличие нерешенных вопросов в области контроля качества драгоценных камней, как в части используемых образцов сравнения, так и объективности применяемого экспертного метода. Очевидно, что появление ОЭС ДК способно оказать положительное влияние на сложившуюся ситуацию: облегчить работу экспертов и увеличить доверие покупателей к приобретаемой продукции.

По результатам проведенного тестирования ОЭС ДК сделан вывод, что данная оптико-электронная система определяет тонкие цветовые различия между образцами ДК, находящимися в одной цветовой кодировки GIA, что позволит решить проблему подбора и создания ювелирных гарнитур.

Набор для проведения испытаний предоставлен ООО «КРИСТАЛЛ ЛАЙТ».

Дата начала тестирования: 30 июня 2021 г.

Дата окончания тестирования: 1 июля 2021 г.

Место проведения тестирования: Духовской пер. 17, стр.1, г.Москва.

Генеральный директор
ООО «Квадрант»

/Фролова Алина Ивановна/



Приложение 2. Протокол испытания



Пеликаантраат 78, Офис 509,
Антверпен, Бельгия

Представительство России

«25» июня 2021 г.

**Протокол испытаний Оптико-электронной системы для количественной
оценки качества цветных драгоценных камней**

Объект испытаний: Оптико-электронная система для количественной оценки качества цветных драгоценных камней

Цель испытаний: Проверка достоверного определения показателей качества и эксплуатационных характеристик, разработанной Оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней, в рамках научных результатов диссертации Кушкоевой Анастасии Сергеевны на тему «Разработка и исследование оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Методика испытаний:

1. Эксперт-геммолог получает набор, включающий в себя образцы драгоценного, искусственного и минерального сырья. Используя, утвержденные методики оценки показателей качества, эксперт-геммолог методом визуальной оценки определяет показатели качества образцов, входящих в набор.

2. Полученные результаты записываются в Таблицу 1 (Приложение).

3. Набор, включающий в себя образцы драгоценного, искусственного и минерального сырья передается для оценки Оптико-электронной системой для количественной оценки качества цветных драгоценных камней.

4. Полученные результаты записываются в Таблицу 2 (Приложения).

5. По итогам испытания проводится сравнение показателей качества набора, полученных экспертом методом визуальной оценки, и результатов, полученных с помощью Оптико-электронной системы для количественной оценки качества цветных драгоценных камней.

Результаты:

Вопросы оценки качества ДК, особенно цветных, безусловно являются актуальными. Появление специальных цифровых экспертных систем позволит увеличить объективность результатов оценки и скорость их получения, а также снизить нагрузку на эксперта.

По результатам проведенного тестирования ОЭС ДК сделан вывод, что данная оптико-электронная система определяет цветовые характеристики как сырья цветных драгоценных камней с использованием кодировок GIA, так и сырья минеральных образцов с использованием кодировок Атласа Манселла, что позволит решить проблему классификации образцов относящихся к 1 классификационной группе ДК и 2 классификационной группе полудрагоценных камней, влияющую на формирование стоимости и систему налогообложения при вывозу и ввозе на территорию РФ.

Набор для проведения испытаний предоставлен ООО «GemLovers».

Дата начала тестирования: 25 июня 2021 г.

Дата окончания тестирования: 26 июня 2021 г.

Место проведения тестирования: Лаборатория GemLovers,
Представительство России, г.Москва.

Главный геммолог Gemlovers



Пшеничный М.И.