

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»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре уникального приборостроения Российской академии наук (ФГБУН НТЦ УП РАН).

Научный  
руководитель

**Мачихин Александр Сергеевич**

д.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории акустооптической спектроскопии ФГБУН НТЦ УП РАН

Официальные  
оппоненты

**Шакин Олег Васильевич**

д.т.н., старший научный сотрудник, старший научный сотрудник ФГБУН Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе);

**Петроченков Дмитрий Александрович**

к.г.-м.н, доцент, заведующий кафедрой минералогии и геммологии, заведующий лабораторией геммологии и технологии художественной обработки материалов ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

Ведущая  
организация

ФГБУН Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН)

Защита диссертации состоится «22» мая 2024 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 002.135.01 (Д 002.135.01) на базе НТЦ УП РАН по адресу: 117342, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 15, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НТЦ УП РАН и на сайте <https://ntcup.ru/dissertations/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.135.01, к.т.н.



В.И. Батшев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы**

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.

### **Цель и задачи исследования**

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.

### **Научная новизна диссертационного исследования**

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 диссертационного исследования**

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.

### **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%.

## **Личный вклад автора**

Автором работы проведен основной объем теоретических и экспериментальных исследований, в том числе создание набора цифровых меримитаторов 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.

## **Объем и структура 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Во **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.

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 (рис. 1). Кроме того, существенно осложняют оценку ДК высокая трудность 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 дальше друг от друга по шкале насыщенностей, чем цветовые оттенки соседних цветовых классов, например, как в случае с R 5/5, slpR 6/6 и oR 5/6.

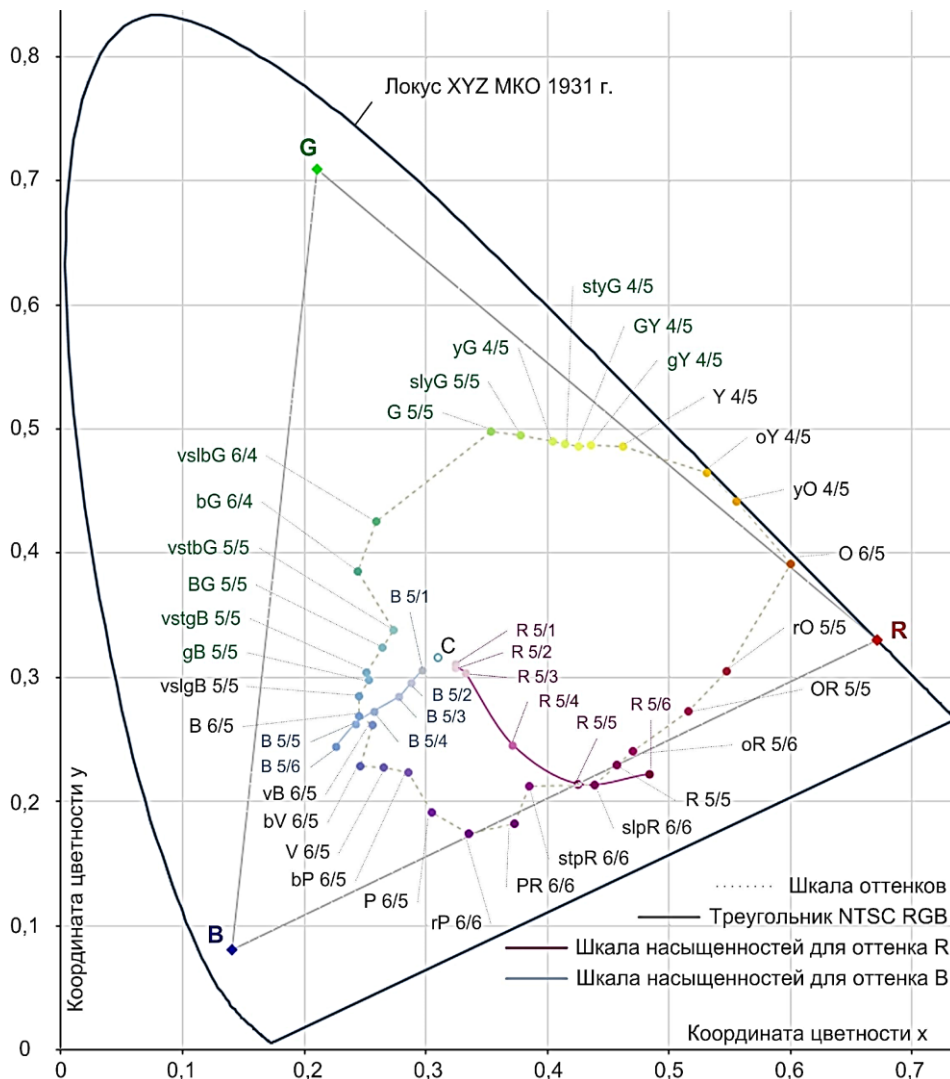


Рисунок 1 – Графическое представление шкал оттенков, тонов и насыщенностей, приведенных в атласе Госреестра СИ для колориметрической системы XYZ МКО 1931 г. при освещении источников типа С

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 объёме 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.

Проведенный сравнительный обзор технических средств, доступных специалистам ювелирной области для решения задач определения и контроля показателей качества цветных ДК, выявил их малое разнообразие и ограниченный функционал. Показано, что существующая нормативная документация и 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.

**Вторая глава** посвящена разработке основных принципов построения пространственных моделей набора Gemset, содержащего данные о светлоте, насыщенности и тоне ДК, применительно к зрительному аппарату человека и разрабатываемому экспериментальному стенду для оптического анализа.

По результатам проведенного анализа набора мер-имитаторов GIA GemSet 324 спектральными методами и методами машинного зрения получена база координат цвета всех образцов этого набора. Её ценность заключается в возможности моделирования условий анализа цвета ДК для любого источника освещения (в том числе, стандартных источников типа А, В, С, D65, Е), видеокамеры с любой спектральной зависимостью квантовой эффективности приемника излучения и любого эталона белого с известными характеристиками отражения.

Проанализированы принципы цветовоспроизведения зрительного аппарата человека с помощью системы машинного зрения (рис. 2) для перехода от качественного к количественному анализу цвета ДК. Показано, что они согласуются с международными колориметрическими стандартами, учитывают спектральные свойства используемого источника освещения, спектральную кривую чувствительности используемой системы машинного зрения, и позволяют представлять результаты в выбранной цветовой модели.



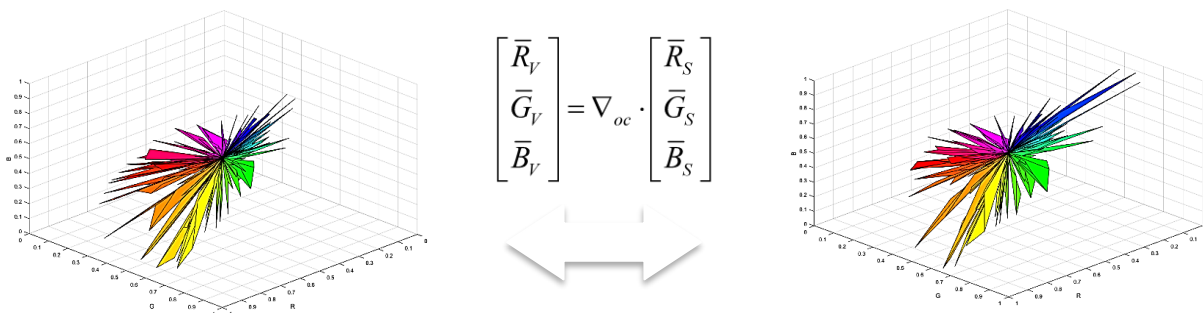


Рисунок 2 – Согласование цветовых тел набора GIA GemSet для зрительного аппарата человека и системы машинного зрения

$\bar{R}_V, \bar{G}_V, \bar{B}_V$  и  $\bar{R}_S, \bar{G}_S, \bar{B}_S$  – координаты цвета образца в цветовых пространствах sRGB и RGB после нелинейной коррекции;  $\Delta_{oc}$  – оператор согласования цветовых тел

В **третьей главе** описан разработанный экспериментальный стенд для анализа показателей качества цветных ДК. Его внешний вид в разрезе приведен на рис. 3. Предложенные принципы его построения позволяют получать изображения образцов цветных ДК в режимах «на отражение» и «на пропускание». Первый режим используется для определения цветовых параметров ДК, второй – для анализа прозрачности и наличия внутренних включений и трещин, которые в совокупности характеризуют показатель качества «чистота».

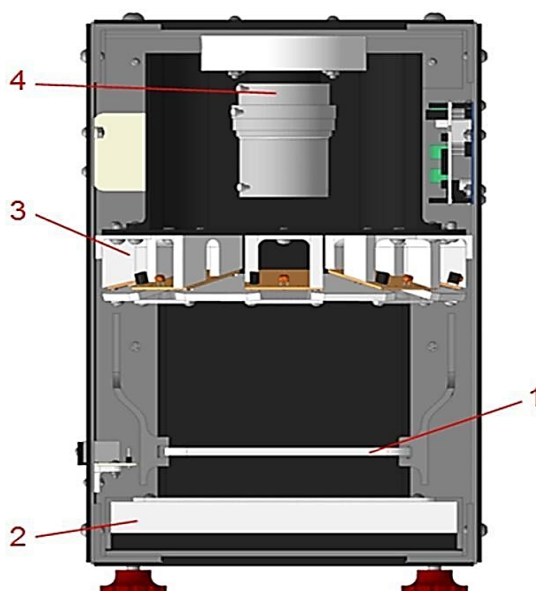


Рисунок 3 – Внешний вид разработанного экспериментального стенда  
1 – сменная кассета для размещения анализируемых образцов, 2 – модуль нижней подсветки, 3 – модуль верхней подсветки, 4 – узел регистрации

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. Разработанные верхний (2) и нижний (3) модули подсветки обеспечивают пространственно равномерное и спектрально однородное освещение образцов ДК в пределах зоны анализа размером  $60 \times 80$  мм<sup>2</sup> независимо от их положения.

Верхний модуль (рис. 4) реализован в виде кольцевого источника белого света диаметром 120 мм. По результатам математического моделирования величина освещенности в зоне анализа (рис. 5) составила 1300 лк, а разница в освещенности между краями и центром зоны анализа не превышает 6%.

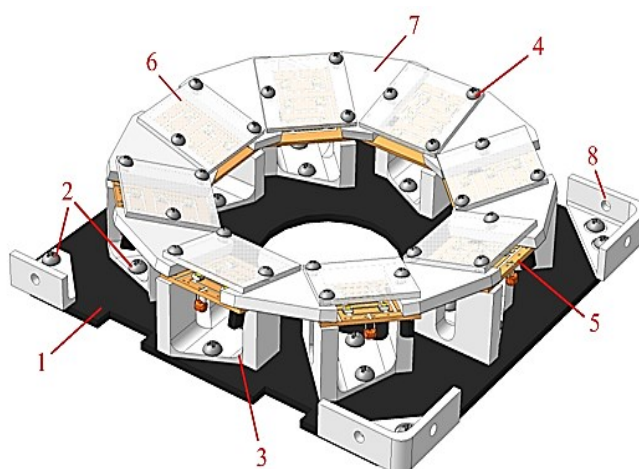


Рисунок 4 – Трехмерная модель верхнего модуля подсветки  
 1 – основание, 2 – винты М4, 3 – держатель излучающих элементов модуля,  
 4 – винты М3, 5 – печатная плата с излучающим элементом,  
 6 – акриловый рассеиватель, 7 – защитные экраны, 8 – кронштейны

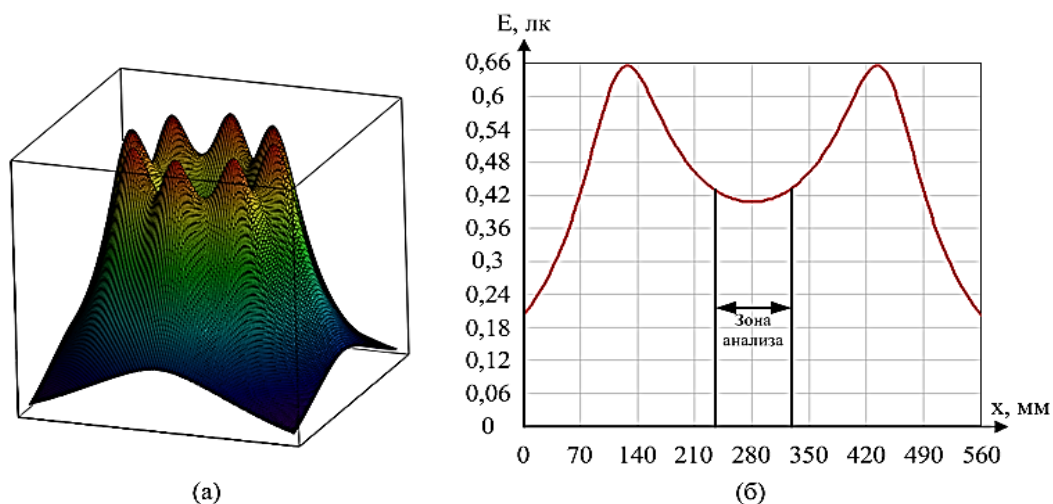


Рисунок 5 – Пространственное распределение освещенности, создаваемое верхним модулем подсветки: трехмерная модель (а) и её осевое сечение (б)

Нижний модуль подсветки (рис. 6) 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 (рис. 7) составила также 1300 лк, а разница в освещенности краёв и центра зоны анализа не превышает 8%.

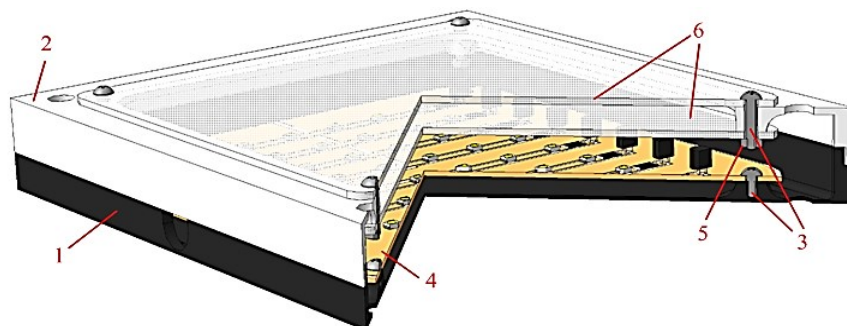


Рисунок 6 – Трехмерная модель нижнего модуля подсветки  
1 – основание, 2 – крышка, 3 и 5 – винты М3, 4 – печатная плата,  
6 – акриловые рассеиватели

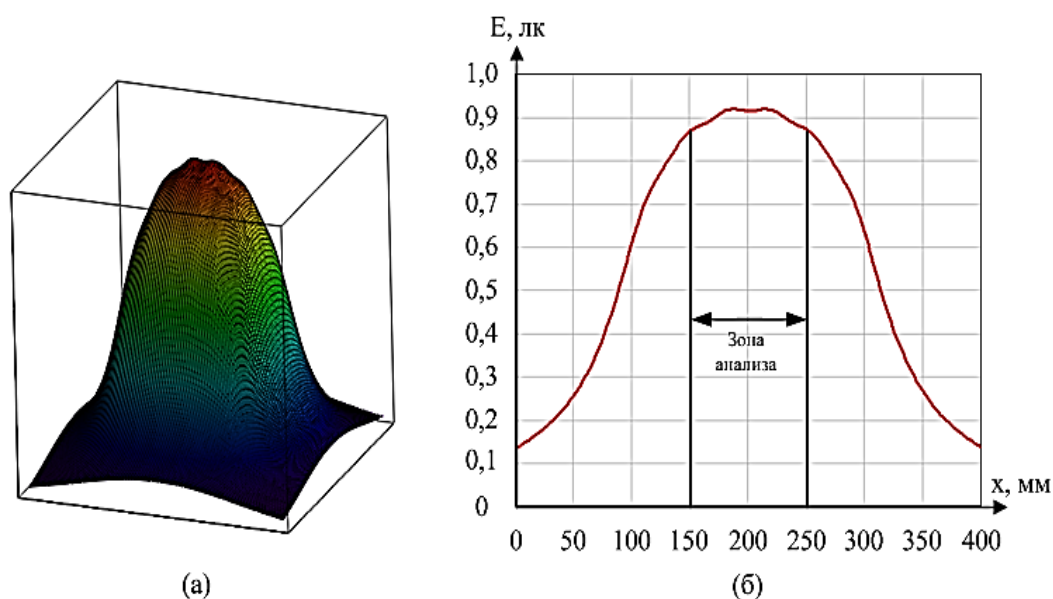


Рисунок 7 – Пространственное распределение освещенности, создаваемое нижним модулем подсветки: трехмерная модель (а) и сечение (б)

Предложен подход к определению показателей качества цветных ДК с помощью разработанного экспериментального стенда. Для этого разработаны алгоритмы обработки и анализа получаемых с его помощью изображений (рис. 8):

– 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 со зрительным 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.

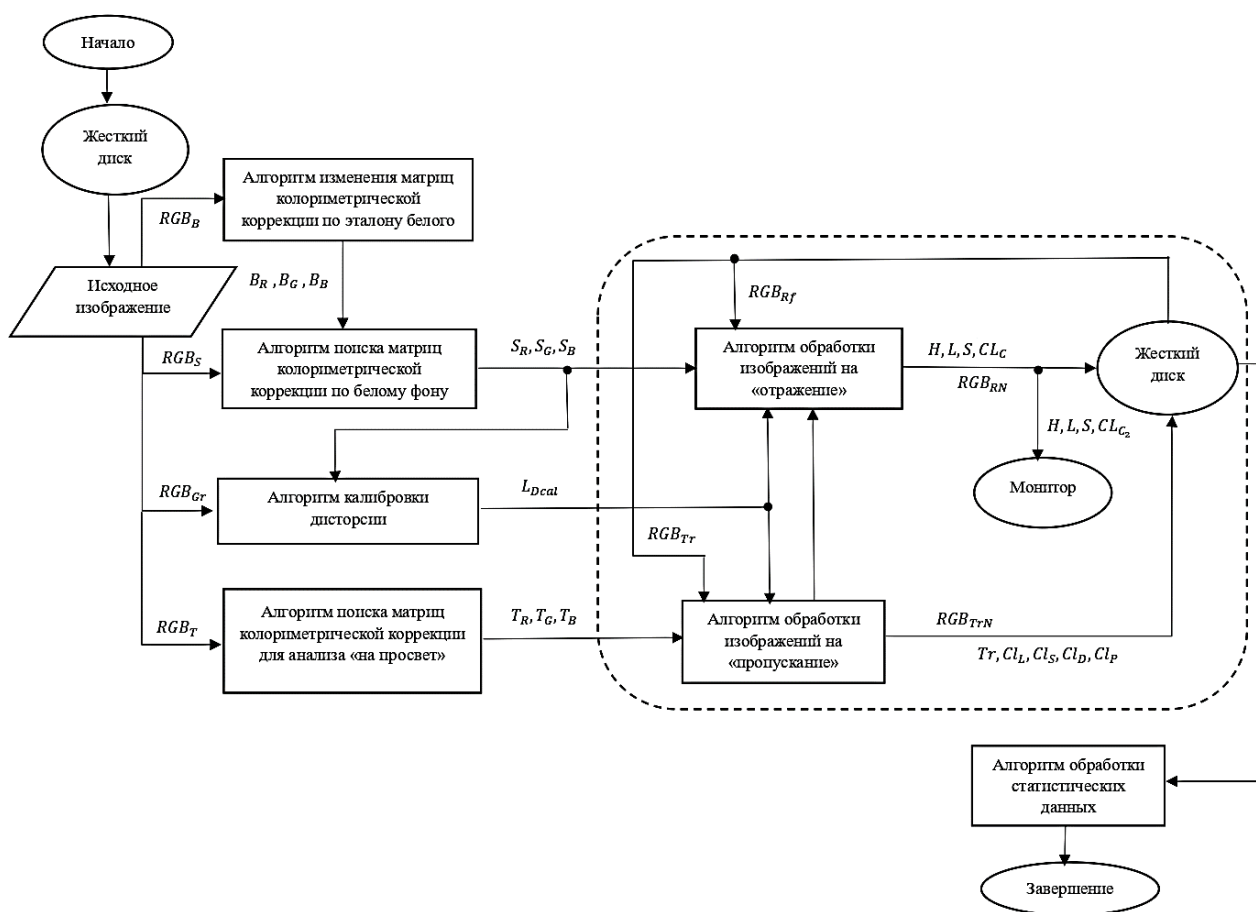


Рисунок 8 – Схема обработки изображений

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

Разработана методика калибровки, определения оптимальных параметров и режимов работы экспериментального стенда. Рекомендуется следовать предложенному методике перед каждой серией измерений для обеспечения метрологически корректного определения качества цветных ДК. Методика

калибровки проводится в несколько этапов. На первом этапе производится коррекция влияния полевых aberrаций 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 спектры излучения источников освещения и спектральная зависимость квантовой эффективности 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 цветовую 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 эталоны, например, Color Mansell Color Check, или меры-имитаторы цветных камней GIA GemSet.

The screenshot shows the 'База сравнения GIA GemSet' window. On the left is a list of sectors (R, oR, RO/OR, rO, O, oY, Y, gY, YG/GY, styG, yG, slvG, G, vslbG, bG, vstbG, GB/BG, vstgB, gB, vslgB, B, vB, bV, v, bP, P, rP, PR/RP, stpR, slpR). The main area displays a grid of stones numbered 1 to 6. The 'G' sector is highlighted in blue. To the right is a table of XYZ coordinates for various GIA codes.

Код GIA	XYZ координаты		
	X	Y	Z
G 2/2	69,083	74,603	63,661
G 3/1	57,391	61,847	54,99
G 3/3	46,008	56,094	32,821
G 3/4	55,099	67,146	44,978
G 4/2	37,736	43,037	31,12
G 4/3	40,716	50,145	35,87
G 4/5	34,184	52,618	15,738
G 5/1	34,759	37,84	31,06
G 5/3	28,643	38,033	19,052
G 5/5	21,899	37,82	5,486
G 6/2	4,574	5,83	3,557
<b>G 6/4</b>	<b>14,902</b>	<b>24,383</b>	<b>8,435</b>
G 7/1	3,816	4,482	3,153
G 7/4	12,057	18,062	9,524
G 8/2	3,633	4,666	3,545









Рисунок 9 – Цифровой каталог G набора GIA GemSet 324

Представлены результаты анализа набора мер-имитаторов GIA GemSet 324 и методика создания базы данных цифровых двойников, аналогичных мерам-

имитаторам набора GIA GemSet 324. База необходима для автоматического определения цвета ДК с помощью систем машинного зрения. Пример одного из каталогов базы представлен на рис. 9. 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.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям ДК с помощью разработанного стенда. На первом этапе исследовалась стабильность результатов определения геометрических и цветовых параметров ДК, а также параметров их чистоты. Для этого использовались образцы бериллового сырья.











Таблица 1 – Результаты исследований стабильности определения цветовых параметров ДК на примере образца 2 пробы бериллового сырья

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
	2		141	15	26	vstbG 7/3
	3		142	18	29	vstbG 7/3

Установлено, что среднее отклонение значений цветовых параметров образцов (табл.1) не превышает 1,5% от диапазона измерений при их смещениях в пределах зоны анализа. При этом 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 (табл. 2) при их смещении в пределах зоны анализа для суммы площадей включений и трещин составляет 3,3%, то есть влияние этого фактора на присваиваемый класс чистоты незначительно.

Таблица 2 – Результаты исследований стабильности определения параметров чистоты на примере образца 2 пробы бериллового сырья

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)

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).

На втором этапе проводилось определение показателей качества синтетических минералов (компания RusGems) и изумрудных мастер-камней (компания GemLovers) в присутствии экспертов-геммологов (табл. 3). Полученные результаты подтверждены протоколами испытаний.

Таблица 3 – Результаты исследований работы стенда на природных ограненных изумрудных мастер-камнях

Кр.	Отражение	Цвет	Код GIA	H/L/S	Пропускание	% пр.	Чистота	% вкл.	% тр.	Кл. чист.
-10 +5			vstbG 7/6	146 / 21 / 99		24		22,0	2,6	2 (деф.)
-10 +5			vstbG 8/6	140 / 9 / 99		4		47,1	8,3	3 (гряз.)
-10 +5			vstbG 9/6	146 / 6 / 99		3		46,7	7,4	3 (гряз.)
-10 +5			vstgB 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.)

В большинстве случаев заключение экспертов по показателям качества анализируемых ДК совпало с данными, полученными с помощью разработанного макета опико-электронного 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.

**Пятая глава** посвящена анализу погрешности результатов, получаемых с помощью разработанного экспериментального стенда для оптического анализа показателей качества цветных драгоценных камней. 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. При этом установлено, что влияние метамеризма носит систематический характер при стабильной работе источников освещения и узла регистрации и поэтому колориметрическая калибровка для используемой конфигурации позволяет перевести погрешность, вызываемую данным эффектом, в разряд незначительных. Выявлено, что использование светодиодной подсветки объекта анализа может приводить к значительным (до 45%) ошибкам в воспроизведении цветового оттенка объекта, однако их можно уменьшить переопределением точки белого. При этом назначается новый ахроматический ряд, связывающий точку черного цвета (точку начала измерений, нулевую отметку) и эталон белого цвета. Это позволяет уменьшить данную составляющую ошибки на порядок. Кроме того, следует отметить, что данная составляющая ошибки, является свойством используемого источника освещения, носит систематический характер и поэтому может быть исключена или сведена к минимуму при проведении соответствующей процедуры колориметрической калибровки с использованием эталонов основных определяемых цветовых оттенков.

Оценка погрешностей и классов точности экспериментального стенда 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.

**В заключении** сформулированы следующие основные результаты диссертационной работы.

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 обеспечить 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  $\pm 1,3\%$ .

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. 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.
2. 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.
3. 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. № 1. 012-019.
4. 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.
5. 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.
6. 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).
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Добриборщ Д.Э., 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.
16. Кушкочева А.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н., Добриборщ Д.Э., Горбачёв А.А., Алёхин А.А. Определение дефектов цветного зрительного восприятия человека. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019611198. Выдан 23.01.2019.