

## Оценка качества цветовоспроизведения медицинских 3D изображений

Р.Е. Макажанов<sup>1</sup>, М.И. Курячий<sup>1</sup>, А.В. Каменский<sup>1</sup>

*<sup>1</sup> Томский Государственный университет Систем управления и радиоэлектроники, пр. Ленина, 40, г. Томск, 634050, Россия*

### Аннотация

В работе рассматривается проблема оценки качества цветовоспроизведения на медицинских 3D изображениях. В контексте медицинских изображений точное и соответствующее цветовоспроизведение играет важную роль в правильной интерпретации и диагностике. Представлен обзор существующих стандартов и метрик, используемых для оценки цветовоспроизведения в области медицинской визуализации. Рассмотрены такие аспекты, как выбор цветового пространства, точность передачи цветов, согласованность между различными устройствами отображения, восприятие цвета человеком и другие факторы, влияющие на качество цветовоспроизведения. Выполнено тестирование и улучшение качественных характеристик цветовоспроизведения монитора с использованием программно-аппаратных средств, для стандартизации его цветовых параметров. Цветовое расстояние монитора в цветовом пространстве CIE L\*a\*b\* до калибровки составляло 14,84, а после калибровки 1,23.

### Ключевые слова

Оценка, цветовоспроизведение, медицинское изображение, стандарты, калибровка мониторов, эндоскопическая хирургия.

## Assessment of the Quality of Color Reproduction of 3D Medical Images

R.E. Makazhanov<sup>1</sup>, M.I. Kuryachij<sup>1</sup>, A.V. Kamenskij<sup>1</sup>

*<sup>1</sup> Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia*

### Abstract

This article discusses the problem of assessing the quality of color reproduction in 3D medical images. In the context of medical images, accurate and appropriate color reproduction plays an important role in correct interpretation and diagnosis. The article provides an overview of existing standards and metrics used to evaluate color reproduction in the field of medical imaging. Aspects such as the choice of color space, the accuracy of color transmission, and consistency between different display devices, human perception of color and other factors affecting the quality of color reproduction are considered. Testing and improvement of the qualitative characteristics of the color reproduction of the monitor using software and hardware to standardize its color parameters has been performed. The color distance of the monitor in the CIE L\*a\*b\* color space before calibration was 14.84, and after calibration 1.23.

### Keywords

Assessment, color reproduction, medical image, standards, calibration of monitors, endoscopic surgery

---

*ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия*

EMAIL: rustam\_makazhanov@mail.com (Р.Е. Макажанов); kurtusur@mail.ru (М.И. Курячий); andru170@mail.ru (А.В. Каменский)  
ORCID: 0009-0003-7076-8883 (Р.Е. Макажанов); 0000-0002-3970-5644 (М.И. Курячий); 0000-0001-6587-7776 (А.В. Каменский)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

## 1. Введение

Оценка качества цветовоспроизведения медицинских 3D изображений является важной задачей в медицинской визуализации. Точное и достоверное цветовоспроизведение имеет решающее значение при интерпретации и анализе медицинских данных. Введение этого процесса оценки качества цветовоспроизведения поможет обеспечить точность и достоверность визуализации цветных 3D изображений в медицинской области.

Цветовоспроизведение в 3D медицинских изображениях связано с отображением анатомических структур, тканей или других важных деталей с использованием точных и соответствующих цветов. Цветовая информация может быть полезной при диагностике, планировании операций, обучении и визуализации медицинских процедур. Правильное цветовоспроизведение обеспечивает врачам и специалистам возможность более точно интерпретировать изображения и принимать достоверные решения.

В контексте 3D медицинских изображений, где требуется точное представление анатомических структур и тканей, качественное цветовоспроизведение является необходимым для достижения следующих целей.

1. Точность диагностирования заболеваний. Достоверное цветовоспроизведение позволяет врачам и специалистам более точно оценивать состояние пациента и определять наличие патологий или заболеваний. Корректное воспроизведение цвета может помочь выявить различные оттенки и текстуры тканей, что может быть важным для правильного диагноза.
2. Планирование и навигация во время операций. В хирургии и других медицинских процедурах, требующих точной навигации и планирования, качественное цветовоспроизведение 3D изображений является критически важным. Оно позволяет хирургам и медицинским специалистам лучше визуализировать анатомические детали и принимать достоверные решения во время операций.
3. Образование и обучение. Качественное цветовоспроизведение в 3D медицинских изображениях играет важную роль в образовании и обучении медицинского персонала. Оно позволяет студентам и специалистам изучать анатомию и различные патологии, используя реалистичные и точные цветовые представления.
4. Визуализация и коммуникация с пациентами. Качественное цветовоспроизведение помогает визуализировать и объяснить пациентам их состояние, планы лечения и результаты исследований. Понятное и точное цветовоспроизведение может помочь в улучшении коммуникации между медицинскими специалистами и пациентами.

Все эти факторы подчеркивают актуальность и важность оценки качества цветовоспроизведения 3D медицинских изображений. Необходимость достоверного и точного отображения цвета подтверждает его значимость для медицинской практики и обеспечения качественного ухода за пациентами.

## 2. Стандарты оценки качества 3D изображения

Существует несколько стандартов и методологий, используемых для оценки качества 3D изображений. Они помогают оценить различные аспекты, такие как точность моделирования, реалистичность, визуальное восприятие и детализацию. Ниже перечислены некоторые из наиболее распространенных стандартов и методологий оценки качества 3D изображений.

1. Structural Similarity Index (SSIM). SSIM является методом, используемым для оценки визуального качества 3D изображений. Он сравнивает оригинальное изображение с реконструированным изображением и оценивает их структурную схожесть, контрастность и яркость [1].
2. Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR). PSNR используется для оценки качества компрессии и восстановления 3D изображений. Он измеряет отношение между максимальной мощностью сигнала (исходное изображение) и мощностью искажений (реконструированное изображение) [2].

3. RootMeanSquareError (RMSE). RMSE является мерой разницы между оригинальным и реконструированным 3D изображениями. Он вычисляет квадратный корень из среднеквадратичной ошибки между соответствующими пикселями изображений [3].
4. Методы субъективной оценки. В некоторых случаях, особенно при оценке реалистичности и визуального восприятия 3D изображений, применяются методы субъективной оценки. Они включают эксперименты с наборами испытуемых, которые оценивают изображения на основе своего восприятия и предпочтений.
5. Физические метрики. В ряде случаев применяются физические метрики, такие как размеры объектов, детализация поверхностей и воспроизведение цвета. Они могут быть использованы для оценки качества моделирования и точности передачи атрибутов 3D объектов.
6. Стандарты визуальных эффектов. В развлекательной индустрии существуют специальные стандарты, такие как Academy Color Encoding System (ACES), которые устанавливают рекомендации и принятые практики для оценки качества 3D визуальных эффектов в кино и телевидении.

## 2.1. Стандарты ACES

Academy Color Encoding System представляет набор стандартов и рекомендаций для унификации и управления цветовым представлением в кино- и видеопроизводстве, включая 3D изображения. Некоторые из основных стандартов и руководств, связанные с ACES и применением его в 3D изображениях: ACES 1.0, ACEScg, ACES Proxy, ACES MetadataFileFormat (AMF), ACES OutputTransforms.

На рисунке 1 изображена диаграмма цветности CIE 1931 (показана ось y) со сравнением цветовых гамм ACES (черный цвет), профессиональных цифровых кинокамер (красный цвет) и эталонного цветового охвата дисплея (синий цвет) [4].

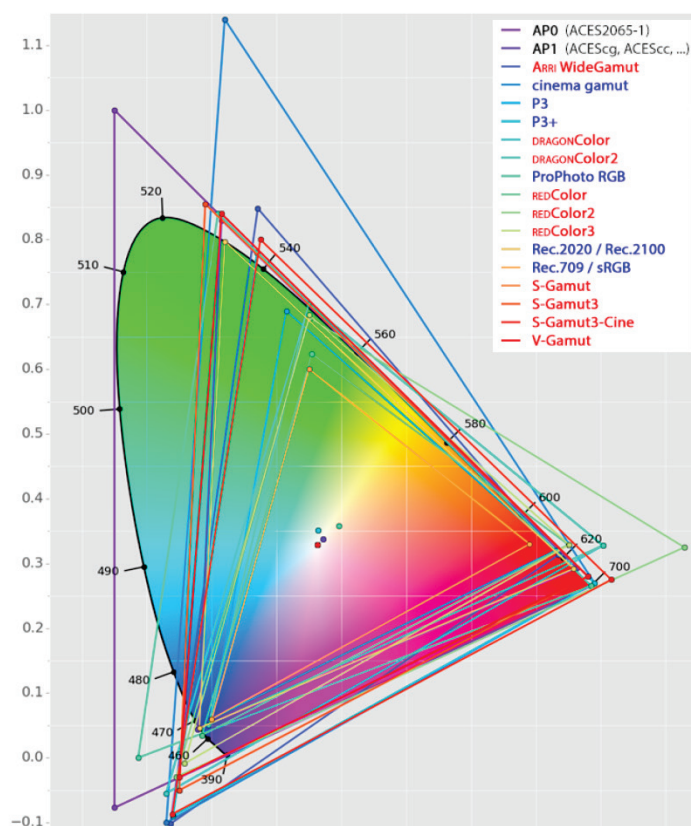


Рисунок 1– Диаграмма цветности CIE 1931

Стандарты ACES обеспечивают стандартизацию и единообразие в управлении цветом для 3D изображений в кино- и видеопроизводстве. Они помогают достичь точного и согласованного цветовоспроизведения, а также обеспечивают совместимость и передвижение изображений в различных рабочих процессах и платформах.

AcademyColorEncodingSystem 1.0 (ACES 1.0) является основным стандартом и реализацией цветовой модели ACES. Он предоставляет общую инфраструктуру для управления и обработки цветового представления в кино- и видеопроизводстве. Вот некоторые ключевые аспекты ACES 1.0.

1. Цветовое пространство ACES. ACES 1.0 определяет цветовое пространство, основанное на широком цветовом гаммате (WideGamut RGB), которое позволяет записать и сохранить широкий диапазон цветов, присутствующих в реальном мире. Цветовое пространство ACES предназначено для обеспечения точного и непрерывного представления цвета в производственном потоке.
2. Линейность и рабочее пространство. ACES 1.0 работает в линейном цветовом пространстве, что обеспечивает точную математическую модель цветовых операций. ACES 1.0 также определяет рабочее пространство (ACES2065-1), которое обеспечивает единообразие в представлении и обработке цвета в производственном потоке.
3. Трансформации цвета. ACES 1.0 определяет рекомендуемые трансформации цвета, которые позволяют перекодировать изображения из ACES в другие цветовые пространства или стандарты отображения. Это включает преобразования в стандарты, такие как sRGB, Rec.709 и другие, чтобы обеспечить согласованное отображение ACES изображений на различных устройствах и мониторах.
4. Метаданные ACES. ACES 1.0 определяет формат и структуру метаданных ACES, которые могут содержать информацию о цветовой обработке, устройствах, трансформациях и других атрибутах ACES. Метаданные ACES позволяют обмен и сохранение информации о цвете вместе с 3D изображениями.

ACES 1.0 обеспечивает стандартизацию и единообразие в управлении цветом в кино- и видеопроизводстве. Он помогает достичь точного и непрерывного цветовоспроизведения, обеспечивает согласованность в производственных потоках и обеспечивает совместимость между различными системами и приложениями для обработки 3D изображений.

Academy Color Encoding System - linear color space (ACEScsg) является цветовым пространством в рамках Academy Color Encoding System (ACES). Оно было разработано специально для компьютерной графики и 3D моделирования, обеспечивая высокую точность цветовоспроизведения и согласованность с ACES.

Вот некоторые ключевые особенности ACEScsg.

1. Линейное цветовое пространство. ACEScsg представляет собой линейное цветовое пространство, что означает, что значения цвета в нем соответствуют физической светимости и линейной модели освещения. Это обеспечивает более предсказуемое и точное поведение при выполнении операций с цветом и освещением.
2. Широкий цветовой гаммут. ACEScsg обладает широким цветовым гаммутом, который позволяет сохранять и передавать широкий диапазон цветов. Он способен воспроизводить цвета, присутствующие в реальном мире, и обеспечивает высокую точность цветового представления.
3. Согласованность с ACES. ACEScsg тесно связано с другими цветовыми пространствами в рамках ACES, такими как ACES2065-1. Это обеспечивает согласованность и совместимость между различными цветовыми пространствами в производственном потоке, позволяя эффективно обрабатывать и обмениваться 3D изображениями в рамках ACES.
4. Использование в компьютерной графике. ACEScsg широко применяется в компьютерной графике и 3D моделировании. Оно предоставляет точное цветовоспроизведение и надежность при создании и рендеринге компьютерных графических сцен. ACEScsg облегчает интеграцию компьютерной графики в производственные потоки, согласовывая ее с остальными элементами ACES.

ACEScg является важной составной частью ACES и предлагает высокую точность и согласованность цветового представления в компьютерной графике и 3D моделировании. Оно помогает обеспечить единообразие и точность цветопроизведения при работе с 3D изображениями в рамках ACES [5].

## 2.2. Стандарты оценки качества 3D изображения в эндоскопической хирургии

При оценке качества 3D изображений в эндоскопической хирургии, можно использовать общепринятые стандарты и методы, применяемые для оценки качества медицинских изображений и визуализации. Ниже представлены некоторые из них.

1. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). DICOM предоставляет стандартные методы и протоколы для обработки, хранения, передачи и отображения медицинских изображений. Он может быть использован для оценки качества 3D изображений в эндоскопической хирургии, позволяя проверить соответствие изображений DICOM-стандарту, а также выполнить анализ метаданных и атрибутов изображения.
2. Индустриальные стандарты. Возможно, использование широко распространенных индустриальных стандартов, таких как ISO 9241 (Human-centered design for interactive systems), ISO/IEC 25010 (Systems and software engineering – Systems and software Quality Requirements and Evaluation), и других стандартов, ориентированных на оценку качества программного обеспечения и визуализации.
3. Операционные критерии. Можно определить набор операционных критериев, которые оценивают определенные аспекты качества 3D изображений в эндоскопической хирургии. Эти критерии могут включать резкость изображения, детализацию, цветовое воспроизведение, глубину, плавность обновления, разрешение и другие факторы, важные для эффективной визуализации и выполнения хирургических процедур.
4. Субъективная оценка. Можно провести субъективную оценку качества 3D изображений, обратившись к мнению хирургов и медицинского персонала, которые работают с этими изображениями в реальных условиях. Это может включать использование опросников, шкал оценок или семантических дифференциалов для оценки различных аспектов качества, таких как четкость, детализация, цветопередача, глубина и др.

Важно отметить, что оценка качества 3D изображений в эндоскопической хирургии может быть специфичной для конкретного клинического контекста, требований и применяемого оборудования. Поэтому выбор методов и стандартов оценки качества должен быть основан на этих факторах и учитывать специфику эндоскопической хирургии.

DICOM – это стандарт для обработки, хранения, передачи и отображения медицинских изображений и связанных с ними данных. Он разработан и поддерживается специальной организацией под названием DICOM Standards Committee, которая состоит из представителей из медицинской и технической областей [6].

DICOM стандартизирует формат данных и протоколы обмена медицинскими изображениями и информацией, такой как рентгенограммы, компьютерная томография, магнитно-резонансная томография, ультразвуковые изображения и другие медицинские изображения. Он обеспечивает совместимость между различными системами и оборудованием в медицинской сфере, что позволяет обмениваться данными и изображениями между разными участниками здравоохранения.

DICOM определяет специальный формат файла для хранения медицинских изображений, который включает информацию о пациенте, типе изображения, параметрах съемки и других медицинских данных. Он также определяет протоколы коммуникации, которые обеспечивают стандартизированный обмен медицинскими данными между различными системами, такими как медицинские информационные системы (МИС), рабочие станции врачей, архивы изображений и другие устройства.

Преимущества использования DICOM включают стандартизацию формата данных, обеспечение целостности и безопасности данных, возможность совместного использования изображений и легкость интеграции с другими системами здравоохранения. DICOM также поддерживает различные функционалы, такие как хранение, поиск, извлечение и передача медицинских изображений и данных.

DICOM стандарт широко применяется в медицинской индустрии и является основой для взаимодействия между различными устройствами и системами, что обеспечивает эффективность и точность обработки и обмена медицинской информацией.

### 3. Калибровка мониторов

Медицинские изображения часто просматриваются на мониторах, поэтому важно, чтобы мониторы были правильно калиброваны. Калибровка монитора включает настройку параметров цветопроизведения, яркости, контрастности и других настроек, чтобы обеспечить точное и надежное отображение медицинских изображений.

Произведена оценка цветопроизведения монитора до и после калибровки с использованием тестовой таблицы [7]. В таблице 1 сведены результаты до калибровки монитора.

**Таблица 1** – Основные результаты до калибровки монитора

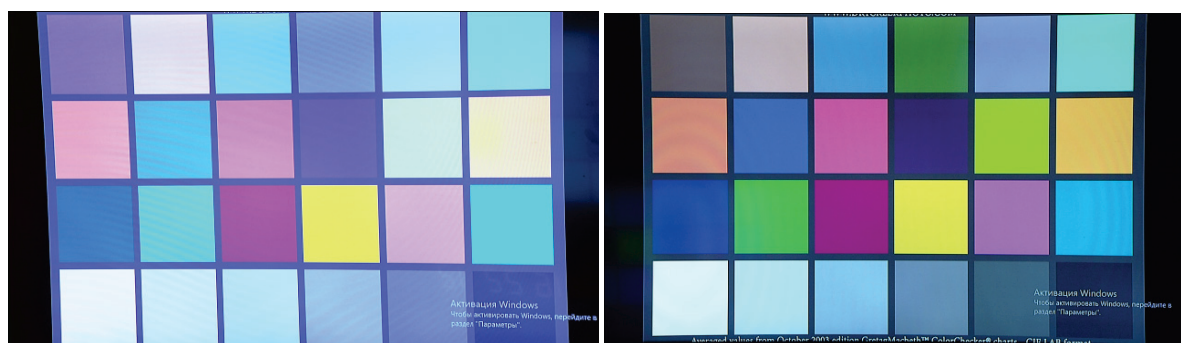
Критерии	Номинальные	Действительные
Среднее значение $\Delta E_{00}$	$\leq 1,5$	14,84
Максимальное $\Delta E_{00}$	$\leq 4$	29,75

В таблице 2 сведены результаты после калибровки монитора.

**Таблица 2** – Основные результаты после калибровки монитора

Критерии	Номинальные	Действительные
Среднее значение $\Delta E_{00}$	$\leq 1,5$	1,23
Максимальное $\Delta E_{00}$	$\leq 4$	2,5

Из результатов таблицы 1 и 2 наблюдается значительное различие между параметрами цветопроизведения монитора до калибровки и после ее проведения. На рисунке 2 продемонстрировано визуальное отличие формируемого изображения монитором до калибровки (рисунок 2, а) и после проведения процедуры калибровки тестового монитора (рисунок 2, б).



а

б

**Рисунок 2** – Цветовая карта на экране монитора: (а) до калибровки монитора, (б) после калибровки монитора

На рисунке 3, а изображен график цветового пространства CIELAB до калибровки [8], где белым цветом выделены номинальные значения, а цветными измеренные значения, как видим, значения довольно сильно отличаются. На рисунке 3, б изображен график цветового

пространства CIELAB после калибровки, где белым цветом выделены номинальные значения, а цветными измеренные значения, как видим, значения совпадают с номинальными [9].

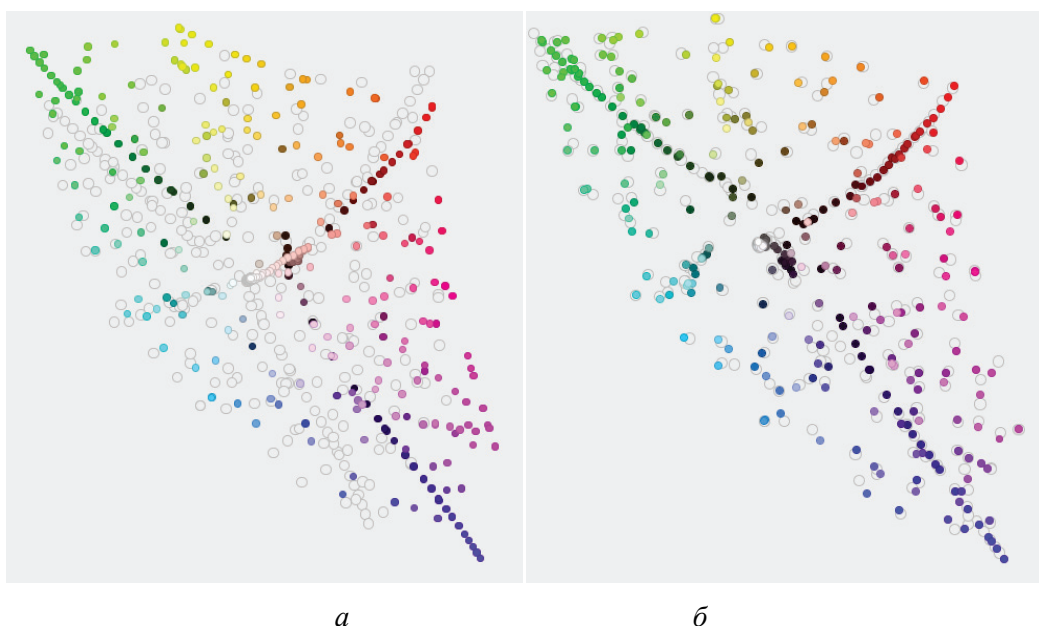


Рисунок 3 – График цветового пространства CIELAB, (а) до калибровки, (б) после калибровки

## 4. Заключение

Из результатов исследования по оценке качества цветовоспроизведения медицинских 3D изображений следует важность точного и соответствующего цветовоспроизведения в медицинской визуализации. Все больше и больше медицинских процедур и диагностических решений включают использование 3D изображений, и правильное воспроизведение цвета становится критическим фактором для успешных результатов.

На основе проведенных исследований и анализа различных метрик и стандартов оценки качества цветовоспроизведения можно сделать следующие выводы.

1. Выбор цветового пространства. Правильный выбор цветового пространства для конкретных медицинских изображений и используемых устройств отображения может существенно повлиять на точность и достоверность цветовоспроизведения. Необходимо выбирать оптимальное цветовое пространство, учитывая особенности изображений и характеристики отображающих устройств.
2. Точность передачи цветов. Оценка точности передачи цветов - ключевой аспект в оценке качества 3D медицинских изображений. Более высокая точность воспроизведения цвета позволяет более точно распознавать и интерпретировать анатомические структуры и патологии.
3. Согласованность между устройствами. Для обеспечения согласованности цветовоспроизведения между различными устройствами и системами, важно использовать стандарты и метрики оценки качества, а также проводить регулярную калибровку оборудования.
4. Визуальное восприятие. Важно учитывать визуальное восприятие человека при оценке качества цветовоспроизведения. Даже если метрики указывают на высокую точность передачи цветов, субъективное восприятие пользователей может отличаться, поэтому важно учитывать их мнение при оценке качества.
5. Показана возможность и определена методика калибровки мониторов с привидением качества цветовоспроизведения к номинальным.

## 5. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] SSIM [Электронный ресурс]: MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/ssim.html>. (дата обращения 12.05.2023).
- [2] PSNR [Электронный ресурс]: MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/images/ref/psnr.html>. (дата обращения 16.05.2023).
- [3] RMSE [Электронный ресурс]: MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html>. (дата обращения 19.05.2023).
- [4] Система кодирования цвета Academy (ACES): профессиональная структура управления цветом для производства, постпродакшна и архивирования неподвижных и движущихся изображений. [Электронный ресурс]: MDPI. URL: <https://www.mdpi.com/2313-433X/3/4/40/html>. (дата обращения 02.06.2023).
- [5] Что такое ACES и как его использовать в DaVinciResolve. [Электронный ресурс]: Dehancer. URL: <https://dehancerru.wordpress.com/2020/06/20/aces/>. (дата обращения 15.06.2023).
- [6] SpeziE., Lewis D.G. A DICOM-RT-based toolbox for the evaluation and verification of radiotherapy plans // Publishing Ltd. 2002. С. 11.
- [7] Макажанов Р.Е., Курячий М.И. Исследование цветопередачи и тестирование устройств вывода визуальной информации // Всероссийская научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей, г. Санкт-Петербург ПКМ – 2021, 2022 г. С. 365–368.
- [8] О цветовых пространствах [Электронный ресурс]: Habr. URL: <https://habr.com/ru/post/181580>, свободный (дата обращения: 12.12.2021).
- [9] Понимание цветового пространства YUV, RGB [Электронный ресурс]. RussianBlogs.. URL: <https://russianblogs.com/article/5685566681>, свободный (дата обращения: 13.12.2021).