

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

Научная статья

УДК 535.6.08(004.932)

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-2-77-98>



Исследование линейности методов измерений цвета в колориметрии цифровых изображений

Е. Н. Савкова  

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

 savkova@bntu.by

Аннотация: Метрология цвета неуклонно развивается в интересах фундаментальной и прикладной науки, совершенствования производственных процессов в промышленности. Автор статьи рассматривает проблему обеспечения метрологической прослеживаемости измерений цвета в натуральных условиях.

В частности, методы колориметрии цифровых изображений показывают хорошие валидационные характеристики – линейность и прецизионность – в относительно небольших диапазонах применения при исследованиях однотипных и преимущественно несамосветящихся объектов. Для сложных сцен с широким диапазоном яркостей применяют нелинейные функциональные модели цветопередачи, ориентированные на зрительные восприятия, пиковую яркость монитора и эталонные условия просмотра, что затрудняет обработку результатов измерений и снижает уровень доверия.

Описанный в статье метод измерений координат цветности объекта по его цифровому изображению основан на тензорном исчислении и заключается в многократной регистрации объекта и наборов опорных образцов с различным временем экспозиции, а также построении градуировочных зависимостей, формирующих многомерную колориметрическую шкалу в цветовом пространстве. Кроме того, метод состоит в определении координат цветности как точек пересечения цветовых тензоров с плоскостью цветового локуса. Для обеспечения точности и достоверности результатов измерений в программно-аппаратных средах автор провел валидационное исследование показателей эффективности данного метода, одним из которых является линейность. В итоге данный эксперимент, основанный на сличении разработанного метода с референтной методикой измерений, показал эффективность разработанного широкодиапазонного метода измерений с хорошей линейностью (коэффициент корреляции $R = 0,97...0,99$, остаточное относительное стандартное отклонение $s_0 \approx 1-2\%$) при отстройке от субъективного фактора и устройства отображения.

Материалы эксперимента могут быть полезны специалистам – метрологам, решающим задачи по определению метрологической прослеживаемости цвета цифровых изображений в средах. Статья будет интересна широкому кругу читателей, чьи профессиональные интересы или увлечения связаны с колориметрией цифровых изображений.

Ключевые слова: цифровое изображение, цвет, колориметрия, линейность, функциональная модель

Ссылка при цитировании: Савкова Е. Н. Исследование линейности методов измерений цвета в колориметрии цифровых изображений // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 2. С. 77–98. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-2-77-98>

Статья поступила в редакцию 09.10.2023; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 25.06.2024.

MODERN METHODS OF ANALYSIS OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Research Article

Linearity Study of Color Measurement Methods in Digital Image Colorimetry

Yauheniya N. Saukova  

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
 savkova@bntu.by

Abstract: Color metrology is steadily developing in the interests of fundamental and applied science, improving industrial production processes. The author considers the problem of ensuring metrological traceability of color measurements under natural conditions.

Digital image colorimetry methods demonstrate good linearity and precision in relatively small application ranges in studies of same type and mainly non-luminous objects. For complex scenes with a wide range of brightnesses, nonlinear functional color rendering models are used that are focused on visual perception, peak brightness of the monitor and reference viewing conditions, which complicates the processing of measurement results and reduces a confidence interval.

The described method of measuring the chromaticity coordinates of an object by its digital image is based on tensor calculus and consists of multiple registration of an object and sets of reference samples with different exposure times, building calibration dependencies forming a multidimensional colorimetric scale in color space and determining chromaticity coordinates as points of intersection of color tensors with the plane of the color locus. In order to ensure accuracy and reliability of the measurement results in the software and hardware environments, a validation study of the performance indicators of this method was carried out, one of which is linearity. An experiment based on comparing the developed method with the reference measurement method showed the effectiveness of the developed wide-range measurement method with good linearity (correlation coefficient $R = 0.97 \dots 0.99$, residual relative standard deviation $s_{\rho} \approx 1-2\%$) when adjusting from the subjective factor and display device.

The experimental materials may be useful to metrologists solving problems of determining the metrological traceability of the color of digital images in media. The article will be of interest to a wide range of readers with professional interests related to the colorimetry of digital images.

Keywords: digital image, color, colorimetry, linearity, functional model

For citation: Saukova Y. N. Linearity study of color measurement methods in digital image colorimetry. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(2):77–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-2-77-98>

The article was submitted 09.10.2023; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 25.06.2024.

Введение

Цифровые изображения являются информационными моделями объектов с дискретно-непрерывной упорядоченной структурой конечного числа элементов (пикселей). На микроуровне – это совокупности отсчетов яркости, идентифицируемые в физическом, виртуальном и функциональном цветовом пространствах. На макроуровне – это неточечные первичные излучатели, контенты, несущие смысловую нагрузку, описываемые ансамблем состояний в пространстве случайных событий.

Колориметрия цифровых изображений позволяет определять цвет объектов в условиях физической и дополненной реальности, предоставляя новые возможности по сравнению со стандартными методами в исследованиях новых микро- и макрообъектов, таких как квантовые точки, световые лучи, ореолы, светящиеся среды, в различных условиях и временных режимах.

В последние годы фиксируется тенденция внедрения экономических экспресс-методов измерений цвета в натуральных условиях с помощью мобильных телефонов,

совмещающих в себе функциональные свойства телефона и портативного компьютера, и обычных форматов сжатия (например, JPEG). Однако существует проблема объективного ограничения динамического диапазона яркости цифрового изображения цветовыми охватами (гаммутами) передающих устройств, что снижает точность и достоверность результатов измерений. С целью максимального приближения к динамическому диапазону человеческого зрения ($0,0005\text{--}10\,000$ кд/м²) в областях, не связанных с измерениями (телевидение, компьютерные игры и дизайн), этого достигают применением многослойных HRDI-изображений, диапазон яркости которых превышает возможности стандартных технологий, позволяющих добиваться эффектов «улучшения» восприятия. Указанная проблема влечет за собой потерю метрологической прослеживаемости, которая обеспечивается применением условных шкал. Поскольку всякий объект может иметь множество реализаций в виде цифровых изображений, а любое цифровое изображение может быть каким угодно образом обработано, в измерениях необходимо решить проблему метрологической прослеживаемости. С точки зрения фундаментальной и прикладной метрологии на первый план выходит потребность в систематизации и обобщении его описательного аппарата для качественных и количественных методов колориметрии цифровых изображений.

В данной работе рассматриваются методы измерений цвета, основанные на тензорном исчислении, заключающиеся в цифровой регистрации объекта и наборов образцов сравнения с различным временем экспозиции, построении градуировочных зависимостей, формирующих многомерную колориметрическую шкалу в цветовом пространстве, и определении координат цветности как точек пересечения цветовых тензоров с плоскостью цветового локуса. Так как методы используют линейную интерполяцию и масштабирование, представляет интерес их линейность как валидационная характеристика (наряду с селективностью, пределами обнаружения и количественного определения, рабочим диапазоном, точностью, робастностью, чувствительностью, диапазоном применения). В статье не делается акцент на конкретной цифровой камере (упоминаемая камера используется лишь как констатация в качестве примера), поскольку собственно камера не является средством измерений, а изображение объекта может быть получено также с помощью сканера или путем компьютерного моделирования.

Цель работы – исследовать линейность методов измерений цвета объектов по их цифровым изображениям и предложить подходы к управлению ею.

Материалы и методы

Обзор методов колориметрии цифровых изображений

Методы колориметрии цифровых изображений можно разделить на пять групп в зависимости от шкалы свойств и ширины диапазона применения.

Методы первой группы. Методы первой группы используют номинальную шкалу для идентификации и классификации объектов: пример – цифровая мультисенсорная колориметрия, основанная на визуальной селективности цифровых изображений [1]. К данной группе относятся детекторные методы (обнаружение, наличие/отсутствие признака, превышение порогового значения): пример – в методе титрования авторы [2] используют в качестве индикатора показатель цветового перехода IP (равен или меньше единицы в зависимости от направления единичных векторов цветового пространства RGB). В работе [3] при определении следов Cr (VI) с помощью УФ-детектора цифровое изображение применяется в цветовом режиме отображения видимого и ультрафиолетового излучений с пороговым значением длины волны 581 нм. В методе измерения общей антиоксидантной способности образцов яблочного сока [4] пороговое значение задается резким и переходным пиками на аналитической длине волны 450 нм. В данных методах относительное стандартное отклонение составляет примерно от 5 до 10 % с коэффициентом корреляции $R \leq 0,900$ в диапазоне значений примерно одного порядка.

Методы второй группы. Методы второй группы для построения калибровочных кривых используют ранговую (условную) шкалу при исследованиях изохромных объектов только в одном цветовом канале в основном канале цветового пространства RGB. Например, в [5] описана технология оценки уровней обесцвечивания красителя с помощью штамма бактерий BSH по калибровочным кривым в зеленом канале, а в методе определения палладия в качестве хелата металла [6] калибровочные кривые строятся в синем канале. Функциональные зависимости данных методов линейны в диапазонах примерно один–два порядка значений величин с коэффициентом корреляции R от 0,99 до 0,9974 и относительным стандартным отклонением ниже 4,0 %.

Методы третьей группы. Методы третьей группы также направлены на исследования изохромных объектов, но используют два и более канала цветового пространства для построения шкал. К таким методам можно отнести технологию зондирования для количественного определения нейтрализатора в образцах

молока [7], методы определения общего содержания хрома в пробах воды на основе точечного теста в оптимальных условиях [8], методы определения общего содержания фенола в плодах фруктов с использованием реагента Фолина-Дени [9], определения концентрации этанола по изменению степени ионизации раствора гидроксида [10]. Линейность аналитических кривых описывается коэффициентом корреляции $R > 0,99$ в диапазоне значений примерно одного порядка с относительным стандартным отклонением примерно 5%. Усложненная модификация методов третьей группы характеризуется применением шкал нескольких цветовых пространств. Например, в методе количественного определения содержания воды в топливном этаноле [11] используется абсолютная шкала, созданная на основе цветовых пространств RGB и HSV, показывая линейность для R , G и S с коэффициентами корреляции 0,9613; 0,9431; 0,8835 и стандартными отклонениями (0,56; 0,92; 2,05) % соответственно. Аналогичный принцип положен в основу метода определения суммарной концентрации белка в водных растворах [12], когда оцениваются линейные комбинации векторов в двух цветовых пространствах с коэффициентом корреляции $R \geq 0,97$ и относительным стандартным отклонением 3,5%.

Методы четвертой группы. Методы четвертой группы позволяют определять цвет объектов в условиях дополненной реальности и имеют диапазон применения от одного до двух порядков значений величины с линейностью $R \geq 0,98$ и относительным стандартным отклонением примерно 4,0%. Так, в работе [13] описана методика анализа трансформации сельской среды и общественного пространства с учетом влияния космоса. Авторами [14] представлен метод определения непрерывных деформаций или перемещений объектов в динамическом режиме с помощью структурированного света и искусственных пятен.

Методы пятой группы. Интерес представляют широкодиапазонные методы пятой группы, ориентированные на определение цвета объектов различной природы, входящих в одну зону интереса. Функциональные модели цветопередачи методов пятой группы ориентированы на зрительные восприятия, пиковую яркость эталонного монитора и эталонные условия просмотра. Их можно разделить на нижеследующие четыре группы:

- 1) передаточные функции технических устройств;
- 2) таблицы цветового поиска;
- 3) рабочие цветовые пространства;
- 4) функции субъективных восприятий.

Передаточные функции стандартизованы ICC.1:2022¹ типов A, B, M и ITU-R BT.2446-0² типов OETF световой сцены в видеосигнал, EOTF конвертации видеосигнала в линейную свет-сигнальную передаточную характеристику отображающего устройства, OOTF конвертации относительного линейного света сцены в отображаемую сцену. Краткое описание функций ITU-R BT.2390-7³ для систем PQ и Log-Gamma (HLG) приведено в табл. 1.

Поясним функцию E' (нелинейное представление E) из табл. 1.

E' – нелинейное представление E (цветовое значение $\{R', G', B'\}$ или $\{L', M', S'\}$ в пространстве PQ в диапазоне [0:1]):

$$E' = OETF[E] = EOTF^{-1}[OOTF[E]] = EOTF^{-1}[F_D]. \quad (1)$$

Согласно ITU-R BT.2100-2⁴, применяя функцию OOTF только для компонента яркости, можно избежать изменения цвета на дисплее:

$$F_D = OOTF[E] = \alpha Y_s^{\gamma-1} E, \quad (2)$$

$$R_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} R_s; G_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} G_s; B_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} B_s, \quad (3)$$

где α – пользовательская регулировка яркости дисплея «Управление контрастом», представляющая L_W для ахроматических пикселей в кд/м²;

γ – экспонента (гамма), которая изменяется в зависимости от L_W , $\gamma = 1,2$ при $L_W = 1\,000$ кд/м².

Как правило, передаточные функции разделяют на сегменты с указанием точек разрыва. В ICC.1:2022⁵ приведены следующие типы функций в пределах сегментов:

$$Y = (aX + b)^\gamma + c, \quad (4)$$

$$Y = a \log_{10}(bX^\gamma + c)^\gamma + d, \quad (5)$$

$$Y = ab^{cX^d + e}. \quad (6)$$

¹ Specification ICC.1:2022 (Profile version 4.4.0.0) Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure.

² Report ITU-R BT.2446-0 (04/2019) Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa.

³ Report ITU-R BT.2390-7 (07/2019) – High dynamic range television for production and international programme exchange.

⁴ Recommendation ITU-R BT.2100-2 (07/2018) Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange.

⁵ Specification ICC.1:2022 (Profile version 4.4.0.0) Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure.

Таблица 1. Описание функций цветопередачи
Table 1. Description of color rendering functions

Вид функции	PQ	Log-Gamma (HLG)
<i>EOTF</i>	$EOTF^{-1}[F_D] = \left(\frac{c_1 + c_2 Y^{m_2}}{1 + c_3 Y^{m_1}} \right)^{m_2}$ $Y = F_D / 10000$	$F_D = EOTF \left[\max(0, (1 - \beta) E' + \beta) \right] =$ $= OOTF \left[OETF^{-1} \left[\max(0, (1 - \beta) E' + \beta) \right] \right]$ $\beta = \sqrt{3(L_B / L_W)^{1/\gamma}}$
<i>OETF</i>	$F_D = EOTF[E'] = 10000Y$ $Y = \left(\frac{\max \left[(E'^{1/m_2} - c_1), 0 \right]}{c_2 - c_3 E'^{1/m_2}} \right)^{1/m_1}$	$E' = OETF[E] =$ $= \begin{cases} \sqrt{3E} & 0 \leq E \leq 1/2 \\ a \cdot \ln(12E - b) + c & 1/12 < E \leq 1 \end{cases}$
<i>OOTF</i>	$F_D = OOTF[E] = G_{1886} [G_{706} [E]]$ $(1 > E > 0, 0003024);$ $E' = 267,84E; 0, 0003024 \geq E \geq 0$	$F_D = OOTF[E] = \alpha Y_s^{\gamma-1} E$ $R_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} R_s; G_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} G_s; B_D = \alpha Y_s^{\gamma-1} B_s$ $Y_s = 0, 2627 R_s + 0, 6780 G_s + 0, 0593 B_s$

Примечание:

F_D – яркость отображаемого линейного компонента $\{R_D, G_D, B_D\}$, или Y_D , или I_D , кд/м²;

Y – нормализованное линейное значение цвета в диапазоне [0;1];

$m_1 = 2610/16384$;

$m_2 = 2523/4096$;

$c_1 = 3424/4096 = c_3 - c_2 + 1$;

$c_2 = 2413/4096$;

$c_3 = 2392/4096$;

$E = \{R_s, G_s, B_s; Y_s$ или $I_s\}$ – сигнал, определяемый светом сцены и масштабируемый экспозицией камеры (находится в диапазоне [0;1]);

E' – нелинейное представление E (цветовое значение $\{R', G', B'\}$ или $\{L', M', S'\}$ в пространстве PQ в диапазоне [0;1]): см. формулу ниже.

Показатель γ (гамма) описывается нижеследующими моделями:

1) согласно ITU-R BT.2390-9⁶ – для дисплеев с $L_w \geq 1000$ кд/м²:

$$\gamma = 1,2 + 0,42 \lg \left(\frac{L_w}{1000} \right), \quad (7)$$

2) согласно ITU-R BT.2390-7 – за пределами диапазона пиковой яркости:

$$\gamma = 1,2 k^{\log_2(0,001 L_w)}, \quad (8)$$

где $k = 1,111$;

3) в условиях просмотра, отличных от эталонных (ITU-R BT.2390-9):

$$\gamma_{bright} = \gamma_{ref} - 0,076 \lg \left(\frac{L_{amb}}{5} \right), \quad (9)$$

где γ_{bright} – системная гамма для окружения дисплея более 5 кд/м²;

γ_{ref} – системная гамма для эталонной среды;

L_{amb} – уровень яркости окружающей среды;

4) альтернативная модель Борера (ICC.1:2022):

$$\gamma = \gamma_{ref} k^{\log_2(L_w/L_{ref})} \cdot \mu^{\log_2(L_s/L_{sref})}, \quad (10)$$

где $\gamma_{ref} = 1,2$;

$\mu = 0,98$;

эталонная яркость окружения $L_{sref} = 5$ кд/м².

Характеристики рабочих цветовых пространств

Документ ITU-R BT.2446-0 определяет, что таблицы цветового поиска (CLUT) – многомерные матрицы 8-разрядных или 16-разрядных неподписанных значений, нормализованные в диапазоне от 0 до 255 или от 0 до 65535. CLUT описываются в ICC.1:2022 массивами с переменным количеством точек сетки в каждом измерении, соответствующих количеству входных каналов в преобразовании передаточных функций и цветовых пространств:

⁶ Report ITU-R BT.2390-9 (03/2021) High dynamic range television for production and international programme exchange.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \dots & e_{1p} \\ e_{21} & e_{22} & \dots & e_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{q1} & e_{q2} & \dots & e_{qp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_q \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Обобщим ниже сведения о рабочих цветовых пространствах, используемых в цветопередаче:

1) определенные ICC, основанные на ISO 13655:2017⁷ и осветителе пространства соединения профиля PCS – PCSXYZ и PCSLAB (значения, рассчитанные по PCSXYZ X=0,9642; PCSXYZ Y=1,0, PCSXYZ=0,8249 для белого носителя HLG);

2) применяемые в архаичных (устаревших) устройствах – YCbCr; PQICtCr;

3) применяемые в устройствах с широким динамическим диапазоном HLG – ICtCr; Y'Cr'Cb';

4) квантованные пространства, например, ICC.1:2022 pCIEXYZ с равномерным масштабированием $Y=1,0$ для принятого белого. В качестве рабочего пространства рекомендовано ICtCr, оттенки которого остаются постоянными при изменении насыщенности или интенсивности.

Чтобы соответствовать зрительной системе человека, нейтральная (серая) ось I (CI) цветового пространства ICtCr, согласно DICOM PS3.14 2023e⁸, кодируется нелинейностью PQ или HLG, основываясь на модели цветовосприятия Бартена [15]. Модель учитывает нейронный шум (верхний предел контрастной чувствительности на высоких пространственных частотах), боковое торможение, фотонный шум, внешний шум, ограниченную интеграционную способность, оптическую функцию переноса модулей, ориентацию и временную фильтрацию. При низких уровнях света контрастная чувствительность пропорциональна квадратному корню светимости согласно закону де Вриса-Роуза. DICOM PS3.14 2023e использует термины оптической, пиковой и пороговой модуляции. Согласно данному документу, пороговая модуляция – минимальная модуляция яркости, необходимая среднему наблюдателю для обнаружения стандартной цели при заданном среднем уровне яркости. Пороговая модуляция соответствует только что заметной разности светимости стандартной цели. В соответствии с PS3.14 2022a, комбинация этих эффектов дает уравнение контраста:

⁷ ISO 13655:2017 Graphic technology – Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images.

⁸ DICOM PS3.14 2023e – Grayscale Standard Display Function.

$$S(L) = \frac{q_1 \cdot M_{opt}(L)}{\sqrt{d^2(L) + q_3}}, \quad (12)$$

где u – пространственная частота;

d – диаметр зрачка;

q_1, q_2, q_3 – константы.

$M_{opt}(L)$ – функция передачи оптической модуляции:

$$M_{opt}(L) = e^{-\pi^2 \sigma^2 u^2} \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + (C_{sph} \cdot d^3)^2}, \quad (14)$$

где σ_0 – представляет собой значение при малых размерах зрачка;

C_{sph} – основной компонент, зависящий от диаметра зрачка.

Стандартная функция отображения оттенков серого, которую можно применять и для цветовых каналов, определяется в DICOM PS3.14 2023e математической интерполяцией 1023 уровней яркости, полученных из модели Бартена путем вычисления пороговой модуляции S_j как функции средней яркости решетки, а затем наложения этих значений друг на друга. Один уровень яркости, согласно модели, соответствует показателю JND – разности яркости данной цели при заданных условиях наблюдения, которые средний наблюдатель может едва воспринимать. Средняя яркость следующего более высокого уровня вычисляется путем сложения пиковой модуляции со средней яркостью L_j предыдущего уровня [15]:

$$L_{j+1} = L_j \frac{1 + S_j}{1 - S_j}, \quad (15)$$

где S_j – пороговая модуляция глаза.

В DICOM PS3.14 2023e рекомендовано использовать линейные матрицы хроматической адаптации Брэдфорда для введения поправок на погрешности точки белого, основанных на корректировке значений в цветовом пространстве pCIEXYZ. В ICC.1:2022 и ITU-R BT.2408-2⁹ описана технология расширения динамического диапазона применительно к яркости:

$$Y_s = 0,2627R_s + 0,6780G_s + 0,0593B_s, \quad (16)$$

где Y_s – нормализованная линейная яркость сцены;

⁹ Report ITU-R BT.2408-2 (04/2019) Guidance for operational practices in HDR television production.

R_S , G_S и B_S – нормализованные линейные цветовые компоненты освещенности сцены (до применения ОETF).

Обобщенный вид свет-сигнальной характеристики цифрового изображения показан на рис. 1.

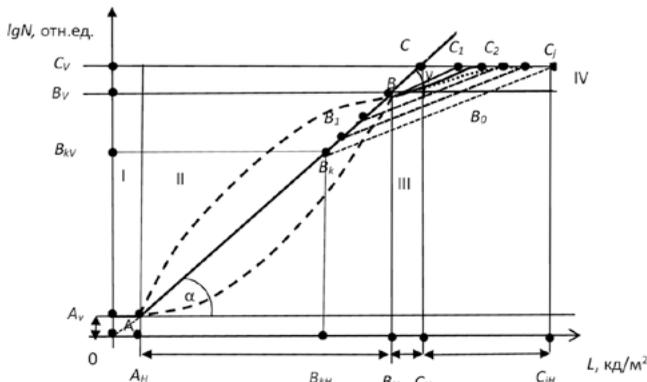


Рис. 1. Графическое представление динамического диапазона цифрового изображения: I – область собственных шумов (отрезок OA_V); II – рабочая область или исходный динамический диапазон (отрезок $A_V B_V$); III – область насыщения (отрезок $B_V B_0$); IV – дополнительная область расширения (отрезок $B_V C_V$)

Fig. 1. A graphical representation of the dynamic range of a digital image: I – an area of inherent noise (OA_V segment); II – a working area or initial dynamic range ($A_V B_V$ segment); III – a saturation range ($B_V B_0$ segment); IV – an additional expansion area ($B_V C_V$ segment)

Уточним обозначения, которые применяются на рис. 1:

I – область собственных шумов (отрезок OA_V);

II – рабочая область или исходный динамический диапазон (отрезок $A_V B_V$);

III – область насыщения (отрезок $B_V B_0$);

IV – дополнительная область расширения (отрезок $B_V C_V$).

Для увязки шкал в качестве опорных маркеров используют следующие эталонные уровни:

1) «белый» (точка B) как сигнал от 100 % ламбертовского отражателя при освещении источником CIE D50¹⁰ согласно ITU-R BT.2408-2, устанавливаемый согласно ITU-R BT.2245-4 как 90 % сигнала для пиковых яркостей L_W на мониторах 500, 1 000, 2 000, 2 500, 3 500 и 4 000 кд/м² и варьированием в диапазоне от 10 до 50 кд/м²;

2) «серый» – согласно ITU-R BT.2245-4¹¹ установленный 18 %, 75 % на HLГ или 58 % на PQ мониторах,

¹⁰ CIE standard illuminant D50, 1 nm wavelength steps, original source: ISO/CIE FDIS 11664-2:2022.

¹¹ Report of ITU-R BT.2245-4 – HDTV and UHDTV including HDR-TV test materials for assessment of picture quality.

средние уровни яркости 268 и 363 кд/м² на дисплее 1 000 кд/м², средняя арифметическая яркость 65,47 кд/м²;

3) «черный» – 0,004 кд/м² по Ремпелю для размера черной области 6° или $\sim 2,4 \log_{10}$ кд/м² (0,0039 кд/м²) по Стеккермену, а в общем случае принимаемого 0,1 кд/м².

Также в качестве опорного маркера применяют параметр «гамма», характеризующий угол наклона участка BC_j и имеющий вид функций (6–9).

Таким образом, большинство функциональных моделей цветопередачи направлены на субъективные восприятия контента, и потому являются нелинейными, строятся по модульному принципу и записываются специальными кодами, обеспечивая возможность расшифровки цвета цифровых изображений. Операции линейризации, разработанные в большей степени для технической совместимости, не обеспечивают условие единства измерений в нижней и верхней частях динамического диапазона, близким к собственным шумам и насыщению, в связи с ограничениями цветовых охватов технических устройств. Передаточные функции удобно разделять на сегменты с допущением линейности различной степени чувствительности. Для фиксации точек перегибов между сегментами необходимо решить проблему метрологической прослеживаемости.

Метрологическая прослеживаемость цвета в программно-аппаратных средах

Опорное значение цвета. В цифровой колориметрии опорное (истинное, эталонное, принятое, приписанное или согласованное) значение цвета получают в виде цифрового кода путем цифровой регистрации образцов сравнения в установленных условиях с основой для сравнения «эталон», «стандартный образец» или «референтный метод измерений». Цифровое изображение является результатом свертки функций спектрального распределения элементов «осветитель», «освещаемая поверхность», «регистрирующее устройство», «программное обеспечение», «устройство отображения» в цветовом пространстве и информационной моделью любого из них при условии, что все остальные элементы валидированы [16]. Поэтому понятие истинного значения цвета в программно-аппаратных средах рассматривается в более широком контексте – для конкретных условий, периода времени, наблюдателя, неопределенности и интервалов допуска, поэтому необходимо рассмотреть источники прослеживаемости всех элементов информационно-измерительного канала.

Элемент «Осветитель». Для элемента «Осветитель» наиболее точное значение воспроизводится первичными

эталоны, например, ГЭТ 81-2023¹², который включает, согласно Государственной поверочной схеме¹³, спектро-радиометрическую установку и наборы мер единиц для передачи координат цветности самосветящихся объектов с $Up(x) = 0,00177-0,00299$, $Up(y) = 0,00216-0,00324$. В качестве вторичного эталона единиц координат цветности, коррелированной цветовой температуры, общего индекса цветопередачи самосветящихся объектов применяют комплекс, состоящий из спектро-радиометрической установки, наборов мер (суммарное среднее квадратическое отклонение результата сличений с ГПСЭ при 10 независимых наблюдениях ($S_{x\Sigma}, S_{y\Sigma}$) не превышает от 0,0006 до 0,0010). В качестве рабочих эталонов координат цветности самосветящихся объектов для элемента «Осветитель» стандартизованы источники ISO 11664-2:2022¹⁴, A (2856 K, $x = 0,448$, $y = 0,407$), C ($x = 0,310$; $y = 0,316$) D65 (6504 K, $x = 0,313$, $y = 0,329$), D₅₀, «стандартное небо» (ISO 15469:2004¹⁵) – набор распределений яркости для моделей неба в широком диапазоне погодных условий.

Также могут применяться излучатели, в том числе – селективные и полупроводниковые – в диапазонах измерений координат цветности, коррелированной цветовой температуры (только для источников белого цвета) и общего индекса цветопередачи (x : 0,004–0,734; y : 0,005–0,83) – светодиодные светильники LED-B1, LED-B2, LED-B3, LED-B4, LED-B5 с максимумом на длине волны 460 нм; и LED-RGB1 (640 нм) и LED-BH1 (630 нм); LED-V2 (550 нм) и LED-V1 (550 нм), которые описаны в CIE15:2018¹⁶, но пока не получили статус стандартных. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей (Δ_x, Δ_y) для излучателей и излучателей полупроводниковых составляют от 0,002 до 0,005. Эталонные значения длин волн для описания оптических материалов, оптических систем и средств (ISO 7944:1998¹⁷) составляют: UV Hg e-line (365,01 нм), Violet Hg h-line (404,66 нм), Blue Hg g-line (435,83 нм), Blue Cd F'-line (479,99 нм), Blue

H F-line (486,13 нм), Green Hg e-line (546,07 нм), Yellow He d-line (587,56 нм), Red H c-line (656,27 нм), Red He r-line (706,52), линия ртути (mercury-e-line) – 546,07 нм. Для лазерного излучения: He-Ne – 543,5 нм; He-Ne – 632,8 нм; Nd: YAG – 1064,1 нм. Также в состав эталонов входят спектро-радиометры-колориметры. Новыми источниками метрологической прослеживаемости могут стать стандартные образцы, созданные на основе квантовых точек, светящихся красок, лазерных и светодиодных проекторов.

Элемент «Освещаемая поверхность». Для элемента «Освещаемая поверхность» (вторичный излучатель) используют наборы мер для передачи единиц координат цвета и координат цветности несамосветящихся объектов – стандартные образцы цвета, направленного пропускания ($U = 0,12\%$) и диффузного отражения ($U = 0,5\%$), совершенные отражающие рассеиватели, спектральный коэффициент отражения которых равен единице для всех длин волн (ISO 7724–2:1984¹⁸), по которым калибруют прецизионные спектрофотометры. ГПСЭ помимо наборов мер включает также спектрофотометрическую установку для воспроизведения единиц координат цвета и координат цветности несамосветящихся (стандартные геометрии освещения/наблюдения 8°/D, D/8°, 00/45°, 45/0° и измерения под любыми углами освещения/наблюдения) с $Up(x) = 0,07064-0,00706$, $Up(y) = 0,07064-0,00706$.

В качестве вторичного эталона единиц координат цвета (X, Y, Z), координат цветности (x, y), светового коэффициента пропускания ($T_{sv} = Y$), интегральной оптической плотности (D) в геометрии освещения/наблюдения 45/0, белизны (W) несамосветящихся объектов применяют спектроколориметрические установки и наборы мер, обеспечивающие геометрии освещения/наблюдения 8°/D, D/8°, 00/45°, 45/0°. Суммарные средние квадратические отклонения результатов сличений с ГПСЭ при 10 независимых наблюдениях ($S_{x\Sigma}, S_{y\Sigma}$) для стандартных источников A, C, D65 составляют $S_{x\Sigma}$: 0,007–0,0007; $S_{y\Sigma}$: 0,006–0,0006.

В качестве рабочих эталонов используют наборы мер координат цвета и координат цветности и колориметры. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей координаты цветности (Δ_x, Δ_y) составляют от 0,002 до 0,020. Эталоны сравнения цветовых характеристик подвержены старению, что может привести со временем к заметным изменениям цвета. В программно-аппаратных средах источниками прослеживаемости применительно

¹² ГЭТ 81-2023 Государственный первичный эталон единиц координат цвета, координат цветности и светового коэффициента пропускания.

¹³ Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений координат цвета и координат цветности, белизны, блеска: приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 27 ноября 2018 года № 2516.

¹⁴ ISO 11664-2:2022 Colorimetric methods – Part 2: Standard CIE Illuminants.

¹⁵ ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky.

¹⁶ CIE 15:2018 Colorimetry, 4th ed.

¹⁷ ISO 7944:1998 Optics and optical instruments – Reference wavelengths.

¹⁸ ISO 7724-2:1984 Paints and varnishes – Colorimetry – Part 2: Colour measurement.

к элементу «Освещаемая поверхность» могут быть также аттестованные стандартные образцы – фрагменты поверхностей, в том числе градиентных и текстурных, различной протяженности, включая точечные.

Элемент «Регистрирующее устройство». В качестве элемента «Регистрирующее устройство» предполагается использование цифровой камеры или сканера профессионального или полупрофессионального класса, откалиброванных с помощью юстировочных тестовых таблиц, штриховых миш и цветовых палитр (например, DSC Labs CamAlign CDM Fairburn 3D VS10.2 и др.) с созданием «Паспорта калибровки», или «Карты сбойных пикселей», (ISO 12233:2023¹⁹). «Эталонная сетка» для калибровки сканера обеспечивает пространственное разрешение 1–2 мкм.

Элемент «Программное обеспечение». Источники прослеживаемости для элемента «Программное обеспечение» – это стандартные цветовые модели: для зрительного анализатора – актиничные функции $\rho(\lambda)$ и функции стандартных наблюдателей XYZ_2° и XYZ_{10}° ; аппаратно независимые цветовые пространства: XYZ (1931 г.), $xyz 2^\circ$ (1931), *HunterLab* (1958), $CIEYuv$ (1960), $CIExyY 10^\circ$ (1964), $CIEY_u'v'$ (1976), $CIELa^*b^*$ (1976) [29], $CIELu^*v^*$ (1976), JPC 79, YIQ (PAL), YCbCr (SECAM); аппаратно зависимые пространства: RGB, HLS, HSB, CMYK; комбинированные модели цветосприятия – модели «Наятани» (1981 г.), «Ханта» (1982 г.), CIE94, CIECAM97s CIELAB (CIEDE2000), CIEDE2000, CAT02, CIECAM02 (CAM02-UCS), CIECAM16 [5]. Большинство функций являются эмпирическими и совершенствуются с точки зрения введения поправок и поправочных коэффициентов при переходе от стандартных к реальным условиям наблюдения [17] с учетом факторов возраста наблюдателей и условий «ближнего» и «дальнего» окружения.

Элемент «Устройство отображения». Для элемента «Устройство отображения» основными источниками прослеживаемости являются референтные методы измерений, основанные, например, на применении спектрофотометра типа GretagMacbeth Eye-One Pro, который «позволяет рассчитывать цветовые координаты в различных цветовых системах», создавать профили сканера, принтера и монитора в условиях, определенных в ISO 13655:2017: M1 (CIE D_{50}), M2 (CIE D_{50} с UV-фильтром свечения), и M3 (D_{50} с UV-фильтрами свечения и поляризации).

Принятое опорное значение, воспроизводимое материальной мерой, должно отвечать требованиям в части

¹⁹ISO 12233:2023 Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses.

однородности, стабильности, например, приведенным в ISO 13528:2022²⁰ и неопределенности согласно СТБ ISO 5725-4-2022²¹:

$$u \leq 0,3A_y\sigma_R,$$

где A_y – отношение стандартного отклонения общего среднего в эксперименте к стандартному отклонению воспроизводимости метода измерений;

σ_R – стандартное отклонение воспроизводимости метода измерений.

В программно-аппаратных средах предусмотрены операции обработки изображений, позволяющие добиваться требуемых показателей.

Процедура исследования

Разработанный дифференциальный метод измерений цвета основан на численном моделировании условной многомерной колориметрической шкалы, обеспечивающей метрологическую прослеживаемость результатов измерений путем ссылки на стандартные образцы или референтный метод измерений [18]. Метод заключается в том, что с помощью матричного фотоприемного устройства осуществляют многократную регистрацию объекта и аттестованных опорных образцов (источников света) с пошагово увеличивающимся временем экспозиции. Далее выполняют компьютерную обработку полученных цифровых изображений, при которой координаты цвета исследуемой области цифрового изображения определяют из градуировочных графиков в цветовом пространстве RGB по формулам:

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{R_{02} - R_{01}}{N_{0R2} - N_{0R1}} N_{Rx}; \\ G_x &= \frac{G_{02} - G_{01}}{N_{0G2} - N_{0G1}} N_{Gx}; \\ B_x &= \frac{B_{02} - B_{01}}{N_{0B2} - N_{0B1}} N_{Bx}, \end{aligned} \quad (17)$$

где $R_{01}, R_{02}, G_{01}, G_{02}, B_{01}, B_{02}$ – аттестованные значения координат цвета, «первого» и «второго» опорных образцов в цветовом пространстве RGB;

$N_{0R1}, N_{0R2}, N_{0G1}, N_{0G2}, N_{0B1}, N_{0B2}$ – значения усредненной интенсивности цвета соответствующих участков

²⁰ISO 13528:2022 Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison.

²¹СТБ ISO 5725-4-2022 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений.

цифрового изображения «первого» и «второго» опорных образцов в рабочем цветовом пространстве, отн. ед.:

$$N = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad (18)$$

где N_i – интенсивность i -го пикселя цифрового изображения, отн. ед.;

N_{Rx}, N_{Gx}, N_{Bx} – значения интенсивности цвета искомой точки в координатах рабочего цветового пространства.

На первом этапе измерительной процедуры разделение градуировочных зависимостей на сегменты с последующей линейризацией и масштабированием позволяет «отстроиться» от устройства отображения и субъективного фактора.

На втором этапе необходимо перейти к тензорному исчислению цветового пространства XYZ и расчету координат цветности. Внутривлабораторный сравнительный эксперимент проводился на базе Научно-исследовательской лаборатории фотоники Варшавского технического университета (г. Варшава, Польша) [19].

Объекты измерений – аттестованные изохроматические образцы площадью 100×100 мм, воспроизводимые в центральной области панели жидкокристаллического монитора с широкой гаммой, откалиброванного с помощью спектрофотометра Datacolor Spyder 3 Elite callibrator.

Координаты цветности объектов измерялись с помощью бесконтактного колориметра Minolta CS-100A и одновременно регистрировались фотокамерой Nikon серии D610, матрицей КМОП $35,9 \times 24$ мм, оснащенной стандартным массивом цветного фильтра типа Bayer RGB разрешением 24,7 миллиона пикселей (6016×4016 эффективных пикселей). Принцип реализации процесса измерений показан на рис. 2.

Действительные фотометрические параметры цветовой панели на мониторе определялись с помощью бесконтактного колориметра Minolta CS-100A. На предварительном этапе камера была протестирована на наличие сбойных пикселей и определение оптимальной области усреднения пикселей по критерию минимума неопределенности [20]. Для каждого набора из четырех образцов выполнялась серия снимков с варьируемым временем экспозиции. За результат измерения принималось усредненное значение трех показаний, сделанных на трех соседних точках исследуемой области панели. Полученные изображения были сохранены в виде 16-битного файла TIFF. Измерения параметров изображения выполнялись с помощью программного обеспечения Image J после обрезки ROI (области интереса) размером 585×585 пикселей (определены по критерию минимума неопределенности) в центре изображения.

По горизонтальной оси для каждого образца откладывался фактор времени (время экспозиции по логарифмической шкале со значениями от -5 до $+4$).

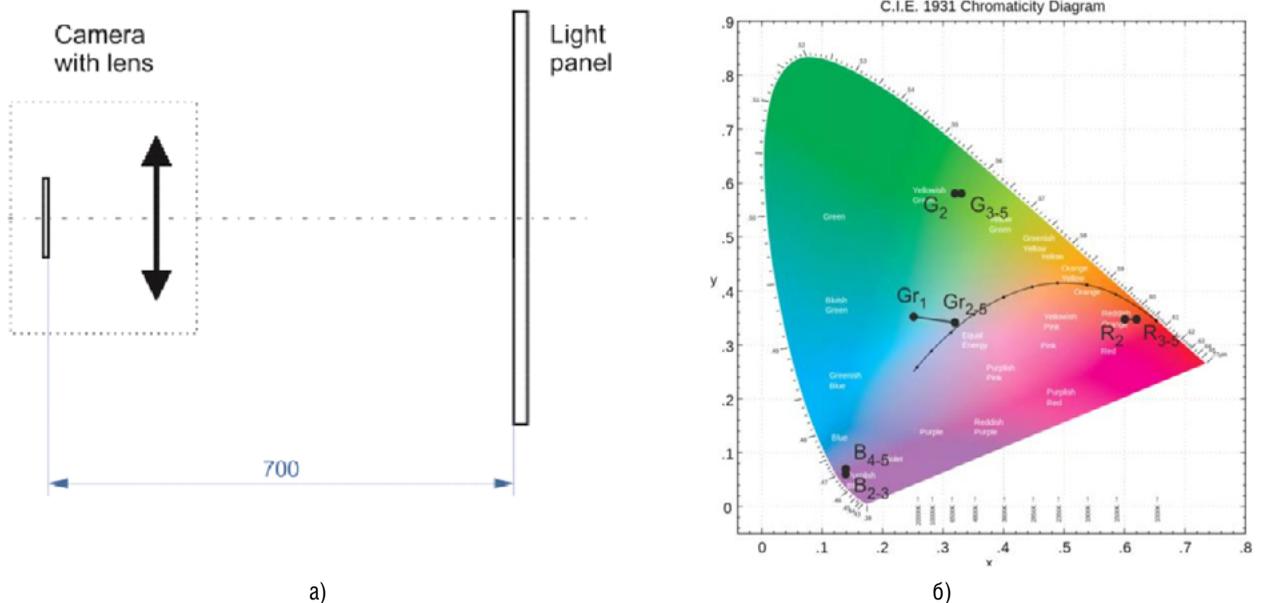


Рис. 2. Принцип реализации процесса исследования динамического диапазона цифровых изображений: а – схема расположения камеры и монитора; б – отображение результатов измерений образцов на графике цветностей CIE1931

Fig. 2. The implementation principle of the research process of the dynamic range of digital images: a – a layout of the camera and monitor; b – a display of sample measurement results on the CIE1931 chromatic diagram

По вертикальной оси откладывались значения интенсивности в трех цветовых каналах.

Полученные зависимости на уровнях 0; 64 (1); 128 (2); 196 (3) и 255 (4) для серого Gr и цветовых каналов R, G, B для трех наборов из четырех образцов были объединены в три сектора виртуальной цветовой палитры по принципу превалирования R, G или B составляющих [21].

Операция отнесения исследуемого участка изображения к определенному сектору позволяет снизить методическую составляющую неопределенности.

Работали с образцами трех типов:

- 1) тип «RBG» (сектор II) – $R^1B^1G^1$, $R^2B^2G^2$, $R^3B^3G^3$, $R^4B^4G^4$;
- 2) тип «GRB» (сектор IV) – $G^1R^1B^1$, $G^2R^2B^2$, $G^3R^3B^3$, $G^4R^4B^4$;
- 3) тип «BGR» (сектор VI) – $B^1G^1R^1$, $B^2G^2R^2$, $B^3G^3R^3$, $B^4G^4R^4$.

Передаточные функции изображений образца типа «GRB» (сектор IV) показаны на рис. 3.

На рис. 3 видно, что оптимальный режим экспозиций для проведения измерений соответствует сегменту, где все три передаточные функции – линейные. В случае перехода функции в каком-либо цветовом канале в стадию насыщения необходимо перейти к масштабированию и нормализованным координатам.

Построение характеристических зависимостей кода интенсивности цвета N_i , отн. ед., от яркости, кд/м², осуществлялось для пар образцов с яркостью « $L_{0j} < L_{0j+1}$ » и интенсивностью цвета (N_{0jR} , N_{0jG} , N_{0jB}) и ($N_{0(j+1)R}$, $N_{0(j+1)G}$, $N_{0(j+1)B}$), находящиеся в одном секторе цветового пространства. Параметры попарно взятых образцов по возрастанию яркости создают интервалы допусков (градации) виртуальной колориметрической шкалы

таким образом, чтобы значения интенсивности (N_{xR} , N_{xG} , N_{xB}) исследуемой области цифрового изображения удовлетворяли следующим условиям:

$$N_{0jR} \leq N_{xR} \leq N_{0(j+1)R};$$

$$N_{0jG} \leq N_{xG} \leq N_{0(j+1)G};$$

$$N_{0jB} \leq N_{xB} \leq N_{0(j+1)B}.$$

На рис. 4 показаны характеристические зависимости для пары образцов с яркостями L_{01} (R_{01} , G_{01} , B_{01}) и L_{02} (R_{02} , G_{02} , B_{02}) и интенсивностями (N_{01R} , N_{01G} , N_{01B}) и (N_{02R} , N_{02G} , N_{02B}) соответственно, динамический диапазон которых ограничивается областями шумов и насыщения (точки N_{min} и N_{max} , $L_{насR}$, $L_{насG}$, $L_{насB}$).

Набор координат цвета (R_x , G_x , B_x) с кодами (N_{xR} , N_{xG} , N_{xB}), соответствующие искомому значению яркости, выделены прямоугольником.

Характеристические зависимости $N_R(R)$, $N_G(G)$, $N_B(B)$ в пределах линейного сегмента с учетом рекомендаций ГОСТ Р ИСО 11843–2–2007²² и ГОСТ Р ИСО 11095–2007²³ имеют вид

$$N_{ijR} = a_R + b_R R_{ij} + s_{ijR},$$

$$N_{ijG} = a_G + b_G G_{ij} + s_{ijG},$$

$$N_{ijB} = a_B + b_B B_{ij} + s_{ijB}, \quad (19)$$

где S_{ij} – случайные составляющие, которые описывают отклонения, связанные с отбором выборок, подготовкой и ошибками измерений.

²² ГОСТ Р ИСО 11843–2–2007 Статистические методы. Способность обнаружения. Часть 2. Методология в случае линейной калибровки.

²³ ГОСТ Р ИСО 11095–2007 Статистические методы. Линейная калибровка с использованием образцов сравнения.

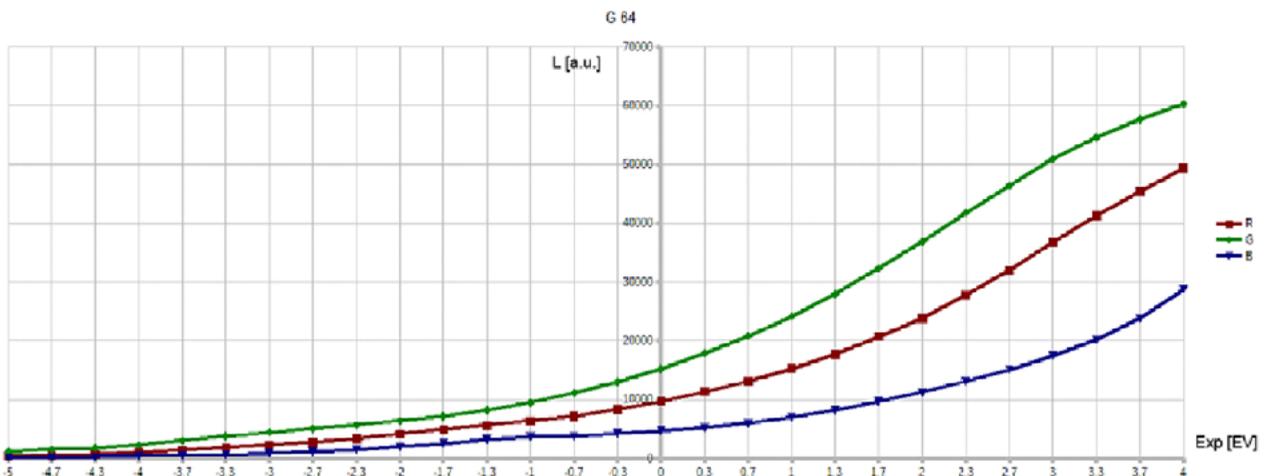


Рис. 3. Экспериментальные результаты построения передаточных функций цифровых изображений образца сравнения

Fig. 3. Experimental results of constructing transfer functions of digital images of a comparison sample

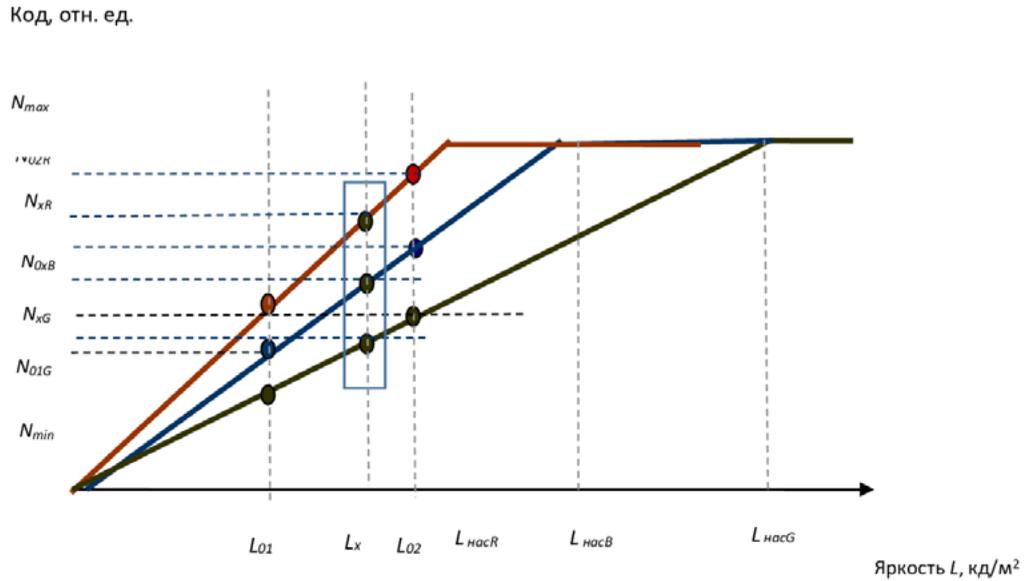


Рис. 4. Характеристические зависимости интенсивности цвета изображения от яркости опорных образцов

Fig. 4. Characteristic dependences of image color intensity on the brightness of reference samples

Для каждой исследуемой области пикселей были вычислены математические ожидания интенсивности по трем цветовым каналам (R , G , B), и их дисперсии $D(R)$, $D(G)$, $D(B)$. Внутриэкземплярное стандартное отклонение по каждому цветовому каналу в среднем составило $\hat{s} \approx 0,14\%$. Проверка экспериментальных данных на наличие выбросов относительно регрессионной модели осуществлялась с помощью t -критерия по каждому цветовому каналу [22]:

$$t_{exp} = \frac{|y_i - \hat{y}_i|_{max}}{SD_0 \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(y_j - \bar{y})^2}{(n-1)RSD_y^2}}}, \quad (20)$$

где $|y_i - \hat{y}_i|$ – разности между экспериментальным y_i и расчетным \hat{y}_i (по регрессионной зависимости) значением отклика среди всех точек данных (от $i = 1$ до n); n – количество экспериментальных точек.

Показатели, определяемые для оценки линейности

Показатели, определяемые для оценки линейности, – коэффициент корреляции и остаточное стандартное отклонение. В качестве критерия приемлемости для коэффициента линейной корреляции использовалось условие $r \in [0,9; 0,999]$ [22, 23]. Коэффициенты корреляции рассчитывались для R , G , B каналов по формуле [22]

$$r = \sqrt{1 - \frac{S_0^2}{RSD_y^2}}, \quad (21)$$

где s_0 – остаточное стандартное отклонение;

RSD_y – стандартное отклонение, рассчитываемое по формуле [23]

$$RSD_y = \sqrt{\frac{\sum (N_i - \bar{N})^2}{N^2 (g - 1)}} 100\%, \quad (22)$$

где N_i – значение интенсивности цвета i -го пикселя в пределах области усреднения;

\bar{N} – среднее значение интенсивности цвета в пределах области усреднения;

g – объем выборки (число точек прямой).

Установлено, что значение коэффициента корреляции в цветовых каналах составило $R = 0,97...0,99$.

Относительное стандартное отклонение составило $s_0 \approx 1-2\%$. Требования к остаточному стандартному отклонению (s_0) устанавливались на основе трех подходов:

1) односторонний доверительный интервал не должен превышать предельно допустимую неопределенность методики анализа Δ_{As} (число степеней свободы точек прямой равно $f = n - 2$) [23]:

$$\frac{S_0}{b} \leq \frac{\Delta_{As}}{t(95\%, n - 2)} \%, \quad (23)$$

где b – угол наклона для рассчитанной регрессионной прямой;

2) критерий статистической незначимости: доверительный интервал Δ_2 является значимым на уровне $p = 5\%$, незначимым на уровне $100 - p\% = 95\%$ по сравнению с доверительным интервалом Δ_1 . Если суммарный доверительный интервал превышает Δ_1 не более чем на $p\%$, т. е. выполняется неравенство [24]

$$\Delta_2 \leq 0,32 \cdot \Delta_1, \quad (24)$$

свободный член a статистически незначимо отличается от нуля, если он не превышает свой доверительный интервал (Δ_A). Для цветовых каналов RGB [23, 25]

$$\begin{aligned} |a_R| &\leq \Delta_{AR} = t(95\%, n-2)S_{aR}, \\ |a_G| &\leq \Delta_{AG} = t(95\%, n-2)S_{aG}, \\ |a_B| &\leq \Delta_{AB} = t(95\%, n-2)S_{aB}, \end{aligned} \quad (25)$$

где S_{aR}, S_{aG}, S_{aB} – стандартные отклонения для отрезков, которые отсекаются на осях ординат градуировочных зависимостей (для рассчитанных регрессионных прямых);

t – коэффициент Стьюдента для одностороннего распределения, доверительной вероятности 95% и числа степеней свободы $f = n - 2$;

2) критерий практической незначимости [24, 26]:

$$\begin{aligned} |a|_R &\leq \frac{0,32\Delta_{As}(\%) }{1 - (R_{\min}/100)} \\ |a|_G &\leq \frac{0,32\Delta_{As}(\%) }{1 - (G_{\min}/100)} \\ |a|_B &\leq \frac{0,32\Delta_{As}(\%) }{1 - (B_{\min}/100)}, \end{aligned} \quad (26)$$

где $R_{\min}, G_{\min}, B_{\min}$ – минимальные значения входных величин для диапазона, в котором валидируется метод (как правило, предел количественного определения).

Результаты исследования

Переход к градуировочным зависимостям цветового пространства XYZ

Целевой показателем был изменен по яркости и цветности в пять этапов от значения 0 до 255 (обозначен Gr – для теоретически нейтральных оттенков серого, R, G, B – для базовой красной, зеленой, синей составляющих соответственно и пронумерован от 1 до 5). На каждом уровне были выполнены следующие преобразования цветовых пространств $RGB \rightarrow XYZ$ [27]:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,768 & 1,752 & 1,130 \\ 1,000 & 4,591 & 0,060 \\ 0 & 0,057 & 5,594 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Координаты цветности рассчитывались по формулам [27]

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}; y = \frac{Y}{X+Y+Z}; z = \frac{Z}{X+Y+Z}, \quad (28)$$

$$x + y + z = 1. \quad (29)$$

На рис. 5 показан скриншот полученных значений координат цветности.

Построение зависимостей координат цвета X, Y от пошагово увеличивающегося времени экспозиции допускает следующие действия:

а) определять координаты цвета R_j, G_j, B_j для каждой реализации;

б) объединять их в семейства векторов (тензор $R_j^T G_j^T B_j^T$);

в) трансформировать их в семейства векторов $X_j Y_j Z_j$ (тензор $X_j^T Y_j^T Z_j^T$), перемещаясь от нулевой точки к плоскости цветового локуса, расширяя динамический диапазон, не теряя при этом метрологической прослеживаемости.

Применяя технологию тензорного исчисления, данные зависимости можно объединить в группы для образцов, относящихся к одному типу.

В цветовом пространстве RGB получим векторные поля:

для сектора II: $R_1 R_2 R_3 R_4$ – векторное поле R_{II} ; $B^1 B^2 B^3 B^4$ – векторное поле B_{II} ; $G^1 G^2 G^3 G^4$ – векторное поле G_{II} ;

для сектора IV: $G^1 G^2 G^3 G^4$ – векторное поле G_{IV} ; $R^1 R^2 R^3 R^4$ – векторное поле R_{IV} ; $B^1 B^2 B^3 B^4$ – векторное поле B_{IV} ;

для сектора VI: $B^1 B^2 B^3 B^4$ – векторное поле B_{VI} ; $G^1 G^2 G^3 G^4$ – векторное поле G_{VI} ; $R^1 R^2 R^3 R^4$ – векторное поле R_{VI} .

Векторные поля $R_{II}, B_{II}, G_{II}; G_{IV}, R_{IV}, B_{IV}$ и B_{VI}, G_{VI}, R_{VI} , создаваемые изображениями наборов образцов одного типа, формируют тоновые хроматические палитры в секторах пространства RGB, а цветные тензоры $G_{R}^{II}, G_{B}^{II}, G_{G}^{II}; G_{B}^{IV}, G_{R}^{IV}, G_{G}^{IV}; G_{G}^{VI}, G_{R}^{VI}, G_{B}^{VI}$ описывают параллельные переносы цветовых векторов $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$. Пересчет координат цвета RGB образцов в координаты цветового пространства XYZ позволяет создать наборы виртуальных мер.

	Displayed sample values		Gray (Gr)			R			G			B					
			Y	x	y	Y	x	y	Y	x	y	Y	x	y			
1	R	0	0,17	0,2527	0,3527	0	X			0	X			0	X		
	G	0				0				0				0			
	B	0				0				0				0			
2	R	64	11,00	0,3207	0,3437	64	2,93	0,6040	0,3527	64	8,02	0,3220	0,5833	64	1,49	0,1433	0,0600
	G	64				0				0				0			
	B	64				0				0				0			
3	R	128	31,43	0,3217	0,3467	128	9,05	0,6190	0,3490	128	25,77	0,3333	0,5810	128	2,48	0,1423	0,0620
	G	128				0				0				0			
	B	128				0				0				0			
4	R	196	74,23	0,3240	0,3437	196	19,20	0,6217	0,3497	196	53,77	0,3347	0,5813	196	5,66	0,1443	0,0670
	G	196				0				0				0			
	B	196				0				0				0			
5	R	255	121,00	0,3233	0,3437	255	31,40	0,6210	0,3520	255	88,03	0,3343	0,5813	255	9,73	0,1453	0,0713
	G	255				0				0				0			
	B	255				0				0				0			

Рис. 5. Фрагмент скриншота обработки результатов: Gray (Gr) – цветовой показатель для теоретически нейтральных оттенков серого; R, G, B – цветовой показатель для базовой красной, зеленой, синей составляющих соответственно

Fig. 5. A screenshot fragment of processing the results: Gray (Gr) – a color index for theoretically neutral shades of gray; R, G, B – a color index for the base red, green, blue components, respectively

Произведем перегруппировку:

для сектора II: $R_{II}^1 B_{II}^1 G_{II}^1 \rightarrow X_{II}^1 Y_{II}^1 Z_{II}^1$;
 $R_{II}^2 B_{II}^2 G_{II}^2 \rightarrow X_{II}^2 Y_{II}^2 Z_{II}^2$; $R_{II}^3 B_{II}^3 G_{II}^3 \rightarrow X_{II}^3 Y_{II}^3 Z_{II}^3$;
 $R_{II}^4 B_{II}^4 G_{II}^4 \rightarrow X_{II}^4 Y_{II}^4 Z_{II}^4$;

для сектора IV: $G_{IV}^1 R_{IV}^1 B_{IV}^1 \rightarrow X_{IV}^1 Y_{IV}^1 Z_{IV}^1$;
 $G_{IV}^2 R_{IV}^2 B_{IV}^2 \rightarrow X_{IV}^2 Y_{IV}^2 Z_{IV}^2$;
 $G_{IV}^3 R_{IV}^3 B_{IV}^3 \rightarrow X_{IV}^3 Y_{IV}^3 Z_{IV}^3$;
 $G_{IV}^4 R_{IV}^4 B_{IV}^4 \rightarrow X_{IV}^4 Y_{IV}^4 Z_{IV}^4$;

для сектора VI: $B_{VI}^1 G_{VI}^1 R_{VI}^1 \rightarrow X_{VI}^1 Y_{VI}^1 Z_{VI}^1$;
 $B_{VI}^2 G_{VI}^2 R_{VI}^2 \rightarrow X_{VI}^2 Y_{VI}^2 Z_{VI}^2$;
 $B_{VI}^3 G_{VI}^3 R_{VI}^3 \rightarrow X_{VI}^3 Y_{VI}^3 Z_{VI}^3$;
 $B_{VI}^4 G_{VI}^4 R_{VI}^4 \rightarrow X_{VI}^4 Y_{VI}^4 Z_{VI}^4$.

В цветовом пространстве XYZ совокупности точек объединяются в скалярные поля, расположенные перпендикулярно оси Z:

на уровне $Gr = 64$ (условно): $X_{II}^1 Y_{II}^1 Z_{II}^1$;
 $X_{IV}^1 Y_{IV}^1 Z_{IV}^1$; $X_{VI}^1 Y_{VI}^1 Z_{VI}^1$ – скалярное поле A_I ;

на уровне $Gr = 128$ (условно): $X_{II}^2 Y_{II}^2 Z_{II}^2$;
 $X_{IV}^2 Y_{IV}^2 Z_{IV}^2$; $X_{VI}^2 Y_{VI}^2 Z_{VI}^2$ – скалярное поле A_2 ;

на уровне $Gr = 196$ (условно): $X_{II}^3 Y_{II}^3 Z_{II}^3$;
 $X_{IV}^3 Y_{IV}^3 Z_{IV}^3$; $X_{VI}^3 Y_{VI}^3 Z_{VI}^3$ – скалярное поле A_3 ;

на уровне $Gr = 255$ (условно): $X_{II}^4 Y_{II}^4 Z_{II}^4$;
 $X_{IV}^4 Y_{IV}^4 Z_{IV}^4$; $X_{VI}^4 Y_{VI}^4 Z_{VI}^4$ – скалярное поле A_4 .

Далее в цветовом пространстве XYZ выделим совокупности точек, представляющих наборы виртуальных мер, описываемые векторными полями и цветовыми тензорами:

для сектора II: $X_{II}^1 Y_{II}^1 Z_{II}^1$; $X_{II}^2 Y_{II}^2 Z_{II}^2$; $X_{II}^3 Y_{II}^3 Z_{II}^3$;
 $X_{II}^4 Y_{II}^4 Z_{II}^4$ – векторное поле A_{II} (структурный цветовой тензор G^{II});

для сектора IV: $X_{IV}^1 Y_{IV}^1 Z_{IV}^1$; $X_{IV}^2 Y_{IV}^2 Z_{IV}^2$;
 $X_{IV}^3 Y_{IV}^3 Z_{IV}^3$; $X_{IV}^4 Y_{IV}^4 Z_{IV}^4$ – векторное поле

A_{IV} (структурный цветовой тензор G^{IV});

для сектора VI: $X_{VI}^1 Y_{VI}^1 Z_{VI}^1$; $X_{VI}^2 Y_{VI}^2 Z_{VI}^2$;
 $X_{VI}^3 Y_{VI}^3 Z_{VI}^3$; $X_{VI}^4 Y_{VI}^4 Z_{VI}^4$ – векторное поле A_{VI} (структурный цветовой тензор G^{VI}).

Проекции структурных цветовых тензоров на плоскость графика цветностей (цветового локуса) цветового пространства XYZ могут быть записаны в виде

$$G^{II} = \left(\frac{\overline{\Sigma(X_{II}^2 + Y_{II}^2 + Z_{II}^2)}}{X_1 X_2 X_3 X_4 + Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 + Z_1 Z_2 Z_3 Z_4} \right), \quad (30)$$

$$G^{IV} = \left(\frac{\overline{\Sigma(X_{IV}^2 + Y_{IV}^2 + Z_{IV}^2)}}{X_1 X_2 X_3 X_4 + Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 + Z_1 Z_2 Z_3 Z_4} \right), \quad (31)$$

$$G^{VI} = \left(\frac{\overline{\Sigma(X_{VI}^2 + Y_{VI}^2 + Z_{VI}^2)}}{X_1 X_2 X_3 X_4 + Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 + Z_1 Z_2 Z_3 Z_4} \right), \quad (32)$$

Погрешность измерения координат цветности рассчитывалась по формуле

$$\Delta = \sqrt{(\Delta_x)^2 + (\Delta_y)^2 + (\Delta_z)^2}, \quad (33)$$

где $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$ – разности между измеренным и опорным значениями образца.

Оценки лабораторного смещения в соответствии с СТБ ISO 5725-4-2022 задаются в виде

$$\hat{\Delta}_x = \bar{\bar{x}} - \mu_x; \hat{\Delta}_y = \bar{\bar{y}} - \mu_y; \hat{\Delta}_z = \bar{\bar{z}} - \mu_z, \quad (34)$$

где $\bar{\bar{y}}$ – среднее арифметическое значение всех результатов, полученных лабораториями на определенном уровне эксперимента (серии);

μ_x, μ_y, μ_z – принятые эталонные значения, в качестве которых использованы $x_{ref}, y_{ref}, z_{ref}$.

Оценка внутрилабораторного стандартного отклонения рассчитывалась по формуле

$$s = \sqrt{s_{xi}^2 + s_{yi}^2 + s_{zi}^2}, \quad (35)$$

где

$$\begin{aligned} s_x &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}; \\ s_y &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2}; \\ s_z &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (z_k - \bar{z})^2}, \end{aligned} \quad (36)$$

где x_k, y_k, z_k – k -й результат измерений;

n – количество результатов измерений;

$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ – среднее значение результатов измерений.

Неопределенность измерений оценки лабораторного смещения, обусловленная вариацией результатов процесса измерений, а также вариацией принятого опорного значения, рассчитывалась в соответствии с СТБ ISO 5725-4-2022 по формуле

$$s_{\hat{\Delta}} = \sqrt{\frac{s^2}{n} + u^2(\mu)}. \quad (37)$$

Координаты цветности x, y, z измеряются одновременно одним и тем же методом, следовательно, коррелируют и имеют одни и те же источники неопределенности. Принимая в качестве интервалов варьирования пределы основной допускаемой погрешности измерительного прибора по цветности $(x, y) \pm 0,002$ ед.; точность

по яркости $(Y) \pm 2\%$, приписывая равномерное распределение исходя из рекомендаций ГОСТ Р 54500.1-2011²⁴, неопределенность опорного значения $u(\mu) = 0,0012$ ед. Тогда $s_{\hat{\Delta}} = 0,014$ ед.; 0,95-й доверительный интервал согласно СТБ ISO 5725-4-2022 для смещения метода

$$[\hat{\Delta} - A_i s_i; \hat{\Delta} + A_i s_i]. \quad (38)$$

Если этот доверительный интервал содержит ноль, то лабораторное смещение является незначимым при уровне доверия $\alpha = 0,05$; в противном случае – значимым. В соответствии со СТБ ISO 5725-4-2022,

$$A_i = 1,96 \sqrt{\frac{1}{n} + A_0^2}, \quad (39)$$

где 1,96–0,975-квантиль стандартного нормального распределения;

A_0 – отношение стандартной неопределенности измерений принятого опорного значения к стандартному отклонению повторяемости метода измерения:

$$A_0 = \frac{u(\mu)}{s_r}, \quad (40)$$

$$s_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_i. \quad (41)$$

В результате вычислений по формулам (35, 36) получили $A_0 = 0,136$; $A_i = 1,02$.

Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Результаты исследования 0,95-х доверительных интервалов для лабораторных смещений представлены в табл. 3.

Согласно СТБ ISO 5725-4-2022, если стандартное отклонение стандартного метода измерений σ_r было предварительно определено, то проверка s_i^2 может быть выполнена посредством вычисления критерия

$$C = \frac{s_r^2}{\sigma_r^2}. \quad (42)$$

Статистика критерия C сравнивается с критическим значением

$$C_{crit} = \frac{\chi_{(1-\alpha)}^2(v)}{v}, \quad (43)$$

²⁴ ГОСТ Р 54500.1-2011 / Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения.

Таблица 2. Расчетные параметры, полученные в результате эксперимента
Table 2. Calculated parameters obtained as a result of the experiment

Ахроматический режим	$x_{II}^T, y_{II}^T, z_{II}^T$, ед. цв.			$x_{IV}^T, y_{IV}^T, z_{IV}^T$, ед. цв.			$x_{VI}^I, y_{VI}^I, z_{VI}^I$, ед. цв.		
уровень 64 (T=1)	x_{II}^I	y_{II}^I	z_{II}^I	x_{IV}^I	y_{IV}^I	z_{IV}^I	x_{VI}^I	y_{VI}^I	z_{VI}^I
измеренное значение	0,604	0,353	2,933	0,322	0,583	8,023	0,143	0,06	1,49
уровень 128 (T=2)	x_{II}^2	y_{II}^2	z_{II}^2	x_{IV}^2	y_{IV}^2	z_{IV}^2	x_{VI}^2	y_{VI}^2	z_{VI}^2
A_2	0,619	0,349	9,046	0,333	0,581	25,766	0,142	0,062	2,476
уровень 196(T=3)	x_{II}^3	y_{II}^3	z_{II}^3	x_{IV}^3	y_{IV}^3	z_{IV}^3	x_{VI}^3	y_{VI}^3	z_{VI}^3
A_3	0,622	0,350	19,2	0,335	0,582	53,767	0,144	0,067	5,663
уровень 255 (T=4)	x_{II}^4	y_{II}^4	z_{II}^4	x_{IV}^4	y_{IV}^4	z_{IV}^4	x_{VI}^4	y_{VI}^4	z_{VI}^4
A_4	0,621	0,352	31,4	0,334	0,581	88,033	0,145	0,071	9,733
$\bar{x}; \bar{y}; \bar{z}$	0,617	0,351	0,032	0,331	0,582	0,087	0,144	0,065	0,806
$x_{ref}; y_{ref}$	0,625	0,357	0,018	0,326	0,575	0,099	0,138	0,060	0,802
$\hat{\Delta}x, \hat{\Delta}y, \hat{\Delta}z$	-0,008	-0,006	-0,014	-0,005	0,002	-0,01	0,002	-0,005	0,004
ΔE	0,017			0,011			0,007		
s_x, s_y	0,032	0,0018	0,004	0,032	0,0013	0,0049	0,0014	0,0064	0,002-
s	0,032			0,029			0,0065		
$s_{\hat{\Delta}}$	0,014			0,016			0,0069		
s_r				0,044					

Таблица 3. Доверительные интервалы для лабораторных смещений
Table 3. Confidence intervals for laboratory biases

№	Формула для расчета интервала	Границы интервала	Примечание
1	$[\hat{\Delta}^{II}x - A_i s_r; \hat{\Delta}^{II}x + A_i s_r]$	[-0,125; 0,037]	не значимо
2	$[\hat{\Delta}^{II}y - A_i s_r; \hat{\Delta}^{II}y + A_i s_r]$	[-0,051; 0,039]	не значимо
3	$[\hat{\Delta}^{II}z - A_i s_r; \hat{\Delta}^{II}z + A_i s_r]$	[-0,059; 0,031]	не значимо
4	$[\hat{\Delta}^{IV}x - A_i s_r; \hat{\Delta}^{IV}x + A_i s_r]$	[-0,05; 0,04]	не значимо
5	$[\hat{\Delta}^{IV}y - A_i s_r; \hat{\Delta}^{IV}y + A_i s_r]$	[-0,043; 0,047]	не значимо
6	$[\hat{\Delta}^{IV}z - A_i s_r; \hat{\Delta}^{IV}z + A_i s_r]$	[-0,055; 0,035]	не значимо
7	$[\hat{\Delta}^{VI}x - A_i s_r; \hat{\Delta}^{VI}x + A_i s_r]$	[-0,043; 0,047]	не значимо
8	$[\hat{\Delta}^{VI}y - A_i s_r; \hat{\Delta}^{VI}y + A_i s_r]$	[-0,005; 0,04]	не значимо
9	$[\hat{\Delta}^{VI}z - A_i s_r; \hat{\Delta}^{VI}z + A_i s_r]$	[-0,041; 0,049]	не значимо

где $\chi^2_{(1-\alpha)}(v)$ – это квантиль распределения χ^2 с $v = p(n-1)$ степенями свободы.

Учитывая, что $v = 4(9-1) = 32$, имеем

$$C = \frac{0,001936}{0,0004} = 4,84$$

$$C_{crit} = \frac{0,711}{32} = 0,022$$

Поскольку $C > C_{crit}$, то по данному критерию s_r^2 значимо больше, чем σ_r^2 .

Расчеты показали, что критерий C_{crit} является более «жестким». Существует множество программных продуктов определения цвета, включая онлайн-калькуляторы. С метрологической точки зрения результаты такого определения будут иметь различную точность, неопределенность, вероятность охвата, достоверность, надежность и риски. Кроме того, «любой» участок изображения может быть ограничен одним пикселем, группой пикселей или матрицей большой размерности, а в качестве точечной оценки интенсивности цвета может сообщаться математическое ожидание, мода, медиана или единичное значение при различной степени обработки графической информации. Поэтому программное обеспечение (элемент информационно-измерительного канала «алгоритм обработки графических данных») является методической составляющей неопределенности.

Результаты и обсуждение

Цвет – фотобиологическая векторная величина, а в программно-аппаратных средах – многомерная дискретно-квантованная величина, фактически не имеющая значения истинного, т. е. точного, несомненного [28]. Метрологическая прослеживаемость цвета цифровых изображений в средах обеспечивается путем ссылки на усредненное по области пикселей опорное значение в выбранном цветовом пространстве, полученное посредством цифровой регистрации аттестованной материальной меры в определенных условиях, или иным путем, например, численными методами.

Однородность и достоверность опорного значения помимо стандартных подходов дополняется критериями допускаемого внутриэкземплярного и межэкземплярного стандартного отклонения интенсивности цвета пикселей и регулируется технологиями обработки цифровых изображений. Описанный метод измерения цвета основан на построении на линейных аппроксимациях передаточных функций и градуировочных

зависимостей в рабочем цветовом пространстве, их сопряжении и масштабировании.

Заключение

Эксперимент позволил сделать следующие выводы. Передаточные функции интенсивности цвета в цветовых каналах различаются и имеют нелинейные участки, как правило, не совпадающие в рабочих областях диапазона. Данную проблему можно решить сегментированием зависимостей с последующей линейной аппроксимацией. В ситуациях, когда «рабочие» участки передаточных функций не перекрываются, предлагается применить процедуру линейного масштабирования. В синем канале стандартное отклонение на передаточной функции выше, чем в красном и зеленом каналах, что связано с низким уровнем яркости синего изображения, отображаемого на мониторе, использованном в этом эксперименте. Достоверность результатов измерений зависит от количества измерительной информации (числа пикселей в области усреднения, числа областей усреднения и однотипных объектов исследования).

Тензорное исчисление дает возможность разделять цветовые пространства на сектора скалярных и векторных полей, снижая методическую составляющую неопределенности. Уменьшение рассеяния достигается калибровкой регистрирующего устройства и оптимизацией области усреднения пикселей с помощью специального программного обеспечения. Полученные показатели линейности, правильности и прецизионности позволяют делать вывод о возможностях применения эффективного метода для рутинных измерительных задач согласно установленным нормам точности.

Таким образом, тензорное исчисление позволяет избавиться от излишней индексации параметров, «прошивая» цветовое пространство, снижая неопределенности и риски, возникающие в измерениях.

Благодарности: Автор выражает благодарность Министерству образования Республики Беларусь, Национальной академии наук Республики Беларусь, Белорусскому национальному техническому университету за финансовую поддержку в рамках задания 1.3 Государственной программы научных исследований 6 «Фотоника и электроника для инноваций» (Республика Беларусь), а также Мариушу Сутковскому за предоставление технической базы для проведения экспериментов.

Acknowledgments: The author expresses gratitude to the Ministry of Education of the Republic of Belarus, the National Academy of Sciences of Belarus, the Belarusian National Technical University for financial support within

the framework of the assignment 1.3 of the State Scientific Research Program 6 “Photonics and Electronics for Innovation” (Republic of Belarus), as well as to Mariusz Sutkowski for providing the technical base for conducting experiments.

Вклад автора: Автор подтверждает единоличную ответственность за следующее: концепцию и дизайн исследования, сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Author contributions: The author confirms sole responsibility for the following: study concept and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

Конфликт интересов: Автор подтверждает, что у него нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Conflict of interests: The author states that she has no potential conflict of interest in relation to the study in this paper.

Финансирование: Работа выполнена в рамках задания 1.3 Государственной программы научных исследований 6 «Фотоника и электроника для инноваций» (Республика Беларусь).

Funding: The research was carried out within the framework of the assignment 1.3 of the State Scientific Research Program 6 “Photonics and Electronics for Innovation” (Republic of Belarus).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Digital colorimetry in chemical and pharmaceutical analysis / A. A. Chaplenko [et al.] // Moscow University Chemistry Bulletin. 2022. Vol. 77. P. 61–67. <https://doi.org/10.3103/S002713142202002X>
- Inner product of RGB unit vectors for simple and versatile detection of color transition / N. Kakiuchi [et al.] // Analytical Science. 2021. Vol. 37, № 1. P. 3–5. <https://doi.org/10.2116/analsci.20C015>
- Development of a double monitoring system for the determination of Cr(VI) in different water matrices by HPLC–UV and digital image-based colorimetric detection method with the help of a metal sieve-linked double syringe system in complexation / T. U. Gösterişli [et al.] // Environmental Monitoring and Assessment. 2022. Vol. 194. P. 691. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10392-2>
- Development of a double-monitoring method for the determination of total antioxidant capacity as ascorbic acid equivalent using CUPRAC assay with RP-HPLC and digital image-based colorimetric detection / T. Borahan [et al.] // European Food Research and Technology. 2022. Vol. 248. P. 707–713. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03923-7>
- Khalid H. S., Fakhre N. A. An android smartphone-based digital image colorimeter for detecting acid fuchsine dye in aqueous solutions // Journal of the Iranian Chemical Society. 2023. Vol. 20. P. 3043–3057. <https://doi.org/10.1007/s13738-023-02896-6>
- Polat F. An advantageous analytical method for the determination of fluoride in saliva exploiting smartphone-based digital-image colorimetry // Chemical Papers. 2022. Vol. 76. P. 6215–6221. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02313-x>
- Exploring smart phone based colorimetric technology for on-site quantitative determination of adulterant (neutralizer) in milk / V. Kumar [et al.] // Journal of Food Science and Technology. 2022. Vol. 59. P. 3693–3699. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05392-6>
- Saadati M. A simple spot test method with digital imaging for chromium speciation in water samples // Journal of Analytical Chemistry. 2022. Vol. 77. P. 704–710. <https://doi.org/10.1134/S1061934822060089>
- A method based on digital image colorimetry for determination of total phenolic content in fruits / R. C. Costa [et al.] // Food Analytical Methods. 2023. Vol. 16. P. 1261–1270. <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02492-7>
- Caleja-Ballesteros H. J. R., Ballesteros J. I. Digital image-based quantification of ethanol in distilled spirits using red cabbage (Brassica oleracea) extract // Chemical Papers. Vol. 77. P. 7977–7984. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03034-5>
- Palygorskite and solvatochromic dye in solid-state colorimetric devices for rapid assessment of the amount of water in ethanol fuel / C. G. de Souza [et al.] // Chemical Papers. 2023. Vol. 77. P. 6341–6350. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02943-9>
- Inagawa A., Kimura M., Uehara N. Total protein assay by PCA-based RGB-spectrum conversion methods with smartphone-acquired digital images // Analytical Sciences. 2022. Vol. 38. P. 869–880. <https://doi.org/10.1007/s44211-022-00107-5>
- Yin C., Zhang X. Role of high-precision real-time digital image based on data simulation in the construction of rural public space environment // Soft Computing. 2023. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08376-6>
- Non-contact optical dynamic measurements at different ranges: a review / Y. Fu [et al.] // Acta Mechanica Sinica. 2021. Vol. 37. P. 537–553. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01102-1>
- Barten P. G. J. Spatiotemporal model for the contrast sensitivity of the human eye and its temporal aspects // Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV : Proc. SPIE1913 / San Jose, CA, United States: 1993. <https://doi.org/10.1117/12.152690>
- Saukova Y. The validation model of information measuring channel in technical vision systems // International Journal of Advanced Engineering and Technology. 2018. Vol. 1, № 4. P. 28–33.
- Фершильд М. Д. Модели цветового восприятия. Второе издание : пер. с англ. 2006.
- Зуйков И. Е., Савкова Е. Н. Колориметрия с высоким пространственным разрешением // Приборы и методы измерений. 2013. № 1. С. 86–91.

19. *Sutkowski M., Saukova Y.* Extending of digital camera dynamic range on the Imaging Processing basis // Приборы и методы измерений. 2017. Т. 8, № 3. С. 271–278. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278>
20. *Савкова Е. Н., Миргород Ю. С.* Оптимизация параметров пиксельной графики по критерию минимума неопределенности // сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции Метрология – 2017 / под общ. ред. канд. техн. наук В. Л. Гуревича. Минск: БелГИМ, 2017. С. 90–94.
21. *Saukova Y., Matyush I.* The metrological assurance of the colorimetry in software and hardware environments // International Journal of Innovative Research in Electronics and Communications (IJIREC). 2016. Vol. 3, Iss. 5. P. 6–19. <http://dx.doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>
22. *Эпштейн Н. А.* Валидация аналитических методик: графические и расчетные критерии для оценки линейности методик на практике // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2019. Т. 8, № 2. С. 122–130. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2019-8-2-122-13023>
23. *Эрмер Й., Миллер Д. Х. МакБ.* Валидация методик в фармацевтическом анализе. Примеры наилучших практик: пер с англ. М. : Группа компаний ВИАЛЕК, 2013. 512 с.
24. Пригодность применения. Руководство для лабораторий по валидации методов и смежным вопросам ; под ред. Б. Магнуссона и У. Эрнемарка : перевод второго издания 2014 года. Киев : ООО Юрка Любченка, 2016. 96 с.
25. Handbook of chemometrics and qualimetrics / D. L. Massart [et al.]. Part A. Amsterdam: Elsevier, 1997. 886 p.
26. Chemometrics in chromatography / L. Komsta [et al.]. Boca Raton: CRC Press, 2018. 506 p. <https://doi.org/10.1201/9781315154404>
27. *Schanda J.* Colorimetry. Understanding the CIE system. John Wiley & SONS, INC., Publication, 2019. 500 p.
28. Толковый словарь русского языка / С. И. Ожегов; под ред. проф. Л. И. Скворцова. 27-е изд., испр. М. : Издательство АСТ : Издательство Мир и образование, 2023. 393 с.

REFERENCES

1. Chaplenko A. A., Monogorova O. V., Oskolok K. V., Garmay A. V. Digital colorimetry in chemical and pharmaceutical analysis. *Moscow University Chemistry Bulletin*. 2022;77:61–67. <https://doi.org/10.3103/S002713142202002X>
2. Kakiuchi N., Ochiai J., Takeuchi M., Tanaka H. Inner product of RGB unit vectors for simple and versatile detection of color transition. *Analytical Science*. 2021;37(1):3–5. <https://doi.org/10.2116/analsci.20C015>
3. Gösterişli T. U., Oflu S., Keyf S., Bakırdere S. Development of a double monitoring system for the determination of Cr(VI) in different water matrices by HPLC–UV and digital image-based colorimetric detection method with the help of a metal sieve-linked double syringe system in complexation. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022;194:691. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10392-2>
4. Borahan T., Girgin A., Atsever N., Zaman B. T., Chormey D. S., Bakırdere S. Development of a double-monitoring method for the determination of total antioxidant capacity as ascorbic acid equivalent using CUPRAC assay with RP-HPLC and digital image-based colorimetric detection. *European Food Research and Technology*. 2022;248:707–713. <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03923-7>
5. Khalid H. S., Fakhre N. A. An android smartphone-based digital image colorimeter for detecting acid fuchsine dye in aqueous solutions. *Journal of the Iranian Chemical Society*. 2023;20:3043–3057. <https://doi.org/10.1007/s13738-023-02896-6>
6. Polat F. An advantageous analytical method for the determination of fluoride in saliva exploiting smartphone-based digital-image colorimetry. *Chemical Papers*. 2022;76:6215–6221. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02313-x>
7. Kumar V., Aulakh R. S., Gill J. P. S., Sharma A. Exploring smart phone based colorimetric technology for on-site quantitative determination of adulterant (neutralizer) in milk. *Journal of Food Science and Technology*. 2022;59:3693–3699. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05392-6>
8. Saadati M. A Simple spot test method with digital imaging for chromium speciation in water samples. *Journal of Analytical Chemistry*. 2022;77:704–710. <https://doi.org/10.1134/S1061934822060089>
9. Costa R. C., Leite J. C., Brandão G. C., Costa F. S. L., dos Santos W. N. L. A method based on digital image colorimetry for determination of total phenolic content in fruits. *Food Analytical Methods*. 2023;16:1261–1270. <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02492-7>
10. Caleja-Ballesteros H. J. R., Ballesteros J. I. Digital image-based quantification of ethanol in distilled spirits using red cabbage (*Brassica oleracea*) extract. *Chemical Papers*. 2023;77:7977–7984. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-03034-5>
11. de Souza C. G., dos Santos R. C., Bertolino L. C., de Andrade D. F., d'Avila L. A., Spinelli L. Palygorskite and solvatochromic dye in solid-state colorimetric devices for rapid assessment of the amount of water in ethanol fuel. *Chemical Papers*. 2023;77:6341–6350. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02943-9>
12. Inagawa A., Kimura M., Uehara N. Total protein assay by PCA-based RGB-spectrum conversion methods with smartphone-acquired digital images. *Analytical Sciences*. 2022;38:869–880. <https://doi.org/10.1007/s44211-022-00107-5>
13. Yin C., Zhang X. Role of high-precision real-time digital image based on data simulation in the construction of rural public space environment. *Soft Computing*. 2023. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08376-6>
14. Fu Y., Shang Y., Hu W., Li B., Yu Q. Non-contact optical dynamic measurements at different ranges: a review. *Acta Mechanica Sinica*. 2021;37:537–553. <https://doi.org/10.1007/s10409-021-01102-1>
15. Barten P. G. J. Spatiotemporal model for the contrast sensitivity of the human eye and its temporal aspects. In: *Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV: Proc. SPIE1913*, San Jose, CA, United States. <https://doi.org/10.1117/12.152690>

16. Saukova Y. The validation model of information measuring channel in technical vision systems. *International Journal of Advanced Engineering and Technology*. 2018;1(4):28–33.
17. Fairchild M. D. Color appearance model. Second edition. 2006. (Russ. ed.: Fershil'd M. D. Modeli cvetovogo vospriyatiya. Vtoroe izdanie: per. s angl. (In Russ.)).
18. Zuikov I. E., Savkova E. N. The colorimetry with a high dimensional resolution. *Devices and Methods of Measurements*. 2013;(1):86–91. (In Russ.).
19. Sutkowski M., Saukova Y. Extending of digital camera dynamic range on the Imaging Processing basis. *Devices and Methods of Measurements*. 2017;8(3):271–278. (In Russ.). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2017-8-3-271-278>
20. Savkova E. N., Mirgorod Y. S. Optimization of pixel graphics parameters by the criterion of minimum uncertainty. In: Gurevich V. L. ed. *Metrologiya – 2017: collection of abstracts of the International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BelGIM; 2017. P. 90–94. (In Russ.).
21. Saukova Y., Matyush I. The metrological assurance of the colorimetry in software and hardware environments. *International Journal of Innovative Research in Electronics and Communications (IJIREC)*. 2016;3(5):6–19. <http://dx.doi.org/10.20431/2349-4050.0305002>
22. Epstein N. A. Validation of analytical techniques: graphical and computational criteria for evaluating the linearity of techniques in practice. *Drug Development & Registration*. 2019;8(2):122–130. (In Russ.). <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2019-8-2-122-13023>
23. Ermer J., Miller D. H. Mak B. Method validation in pharmaceutical analysis. A Guide to best practice.– weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2005. 403 p. (Russ. ed.: Ermer J., Miller D. H. Mak B. Validaciya metodik v farmacevicheskom analize. Primery nailuchshih praktik : per. s angl. Moskow: Gruppy kompanij VIALEK; 2013. 512 p. (In Russ.)).
24. Magnusson B., Örnemark U. (eds.) the fitness for purpose of analytical methods – A laboratory Guide to method validation and related topics. (Russ. ed.: Magnussona B., Ernemarka U. Prigodnost' primeneniya. Rukovodstvo dlya laboratorij po validacii metodov i smezhnym voprosam. Kiev: OOO «Yurka Lyubchenka»; 2016. 96 p. (In Russ.)).
25. Massart D. L., Vandeginste B. G. M., Buydens L. M. C., De Jong S., Lewi P. J., Smeyers-Verbeke J. Handbook of chemometrics and qualimetrics. Part A. Amsterdam: Elsevier; 1997.
26. Komsta L., Heyden Y. V., Sherma J. eds. Chemometrics in chromatography. Boca Raton: CRC Press; 2018. 506 p. <https://doi.org/10.1201/9781315154404>
27. Schanda J. Colorimetry. Understanding the CIE system. United States of America: John Wiley & SONS, INC. Publication; 2019. 500 p.
28. Ozhegov S. I., Skvorcova L. I. ed. Explanatory dictionary of the Russian language. Moskow: Izdatel'stvo AST, Izdatel'stvo Mir i Obrazovanie; 2023. 393 p. (In Russ.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

CIE15:2018 Colorimetry, 4th Edition // CIE [website]. URL: <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition> (Accessed: 06 October 2023).

CIE standard illuminant D50, 1 nm wavelength steps, original source: ISO/CIE FDIS11664–2:2022 // CIE [website]. URL: <https://cie.co.at/datatable/cie-standard-illuminant-d50> (Accessed: 06 October 2023).

DICOM PS3.14 2023e – Grayscale Standard Display Function // DICOM [website]. URL: <https://www.dicomstandard.org/standards/view/grayscale-standard-display-function> (Accessed: 06 October 2023).

ISO 13655:2017 Graphic technology – Spectral measurement and colorimetric computation for graphic arts images // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/65430.html> (Accessed: 06 October 2023).

ISO 11664–2:2022 Colorimetric methods – Part 2: Standard CIE Illuminants // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/77215.html> (Accessed: 06 October 2023).

ISO 15469:2004 Spatial distribution of daylight – CIE standard general sky // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/38608.html> (Accessed: 06 October 2023)

ISO 7944:1998 Optics and optical instruments – Reference wavelengths // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/22574.html> (Accessed: 06 October 2023).

ISO 7724–2:1984 Paints and varnishes – Colorimetry – Part 2: Colour measurement // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/14558.html> (Accessed: 06 October 2023).

ISO 13528:2022 Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses // ISO [website]. URL: <https://www.iso.org/standard/79169.html> (Accessed: 06 October 2023).

Report ITU-R BT.2446–0 (04/2019) Methods for conversion of high dynamic range content to standard dynamic range content and vice-versa // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2446-2019> (Accessed: 06 October 2023).

Report ITU-R BT.2390–7 (07/2019) – High dynamic range television for production and international programme exchange // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2390-7-2019> (Accessed: 06 October 2023).

Recommendation ITU-R BT.2100–2 (07/2018) Image parameter values for high dynamic range television for use in production and international programme exchange // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-BT.2100> (Accessed: 06 October 2023).

Report ITU-R-BT.2390–9 (03/2021) High dynamic range television for production and international programme exchange // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2390> (Accessed: 06 October 2023).

Report ITU-R BT.2408–2 (04/2019) Guidance for operational practices in HDR television production // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2408-2-2019> (Accessed: 06 October 2023).

Report of ITU-R BT.2245–4 – HDTV and UHDTV including HDR-TV test materials for assessment of picture quality // ITU [website]. URL: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2245> (Accessed: 06 October 2023).

Specification ICC.1:2022 (Profile version 4.4.0.0) Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structure // ICC [website]. URL: <https://color.org/specification/ICC.1–2022–05.pdf> (Accessed: 06 October 2023).

ГОСТ Р ИСО 11843-2-2007 Статистические методы. Способность обнаружения. Часть 2. Методология в случае линейной калибровки = Capability of detection – Part 2: Methodology in the linear calibration case. М. : Стандартинформ, 2007. 20 с.

ГОСТ Р ИСО 11095–2007 Статистические методы. Линейная калибровка с использованием образцов сравнения = Linear calibration using reference materials. М. : Стандартинформ, 2008. 32 с.

ГОСТ Р 54500.1–2011 / Руководство ИСО/МЭК 98–1:2009 Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по неопределенности измерения = Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement (IDT). М. : Стандартинформ, 2012. 18 с.

ГЭТ 81–2023 Государственный первичный эталон единиц координат цвета, координат цветности и светового коэффициента пропускания // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [сайт]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1408353> (дата обращения: 06.10.2023).

Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерений координат цвета и координат цветности, белизны, блеска: приказ Министерства промышленности и торговли Российской Федерации от 27 ноября 2018 года № 2516 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/553849919?ysclid=lu8b0k3cq340004292> (дата обращения: 06.10.2023).

СТБ ISO 5725-4-2022 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений. Минск: БелГИСС, 2022. 32 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Савкова Евгения Николаевна – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники филиала БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65
E-mail: savkova@bntu.by
<https://orcid.org/0000-0002-7067-0224>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yauheniya N. Saukova – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher of the Research Laboratory of Semiconductor Engineering, BNTU Branch, Research Polytechnic Institute
65 pr. Nezavisimosti, Minsk, 220013, Republic of Belarus
E-mail: savkova@bntu.by
ORCID: ResearcherID: <https://orcid.org/0000-0002-7067-0224>