

Телевидение и обработка изображений

Статья посвящена 80-летию факультета радиотехники и телекоммуникаций

УДК 654.1

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-3-24-41>

## Метод оценки ошибки метамеризма наблюдателя для современных дисплеев

А. А. Мотыко<sup>1,2✉</sup>, Н. А. Обухова<sup>2</sup>, К. А. Смирнов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"  
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [motyko.alexandr@yandex.ru](mailto:motyko.alexandr@yandex.ru)

### Аннотация

**Введение.** Появление воспроизводящих устройств с широким цветовым охватом (светодиодные, лазерные или OLED) обострило проблему цветопередачи, связанную с индивидуальными отличиями функций цветового соответствия (ФЦС) различных пользователей и называемую ошибкой метамеризма наблюдателя. В настоящее время к широкому цветовому охвату стремятся разработчики и дисплеев смартфонов, и телевизоров, и других воспроизводящих устройств, при этом методика оценки выраженности ошибки метамеризма наблюдателя для конкретного устройства отсутствует.

**Цель работы.** Создание методики оценки выраженности ошибки метамеризма наблюдателя, в результате которой для конкретного воспроизводящего устройства будет возможно оценить необходимость специализированной цветокоррекции, позволяющей компенсировать соответствующую ошибку цветопередачи.

**Материалы и методы.** Используются "категориальные наблюдатели" – результат кластеризации ФЦС отдельных индивидуумов. Описана основанная на решении оптимизационной задачи процедура поиска пар цветов, которые при воспроизведении на дисплее с тремя опорными цветами были бы неразличимы одним категориальным наблюдателем, но выглядели бы различно для другого, т. е. вызывали бы эффект ошибки метамеризма наблюдателя. Исходя из выраженности ошибок на найденных парах цветов для набора категориальных наблюдателей делается вывод о необходимости специализированной коррекции для воспроизводящего устройства.

**Результаты.** Показано, что ошибка метамеризма наблюдателя проявляется уже на существующих дисплеях. С развитием дисплеев и увеличением цветового охвата за счет сужения спектральных характеристик основных цветов ошибка будет проявляться все более выражено, что обуславливает необходимость специальной цветокоррекции.

**Заключение.** Предложена методика оценки выраженности ошибки метамеризма наблюдателя для воспроизводящего устройства, которая позволяет обосновать необходимость специализированной цветокоррекции, обеспечивающей компенсацию соответствующей ошибки цветопередачи.

**Ключевые слова:** СВЧ, отражательные антенные решетки, полоса рабочих частот, коэффициент усиления, ячейка Флоке

**Для цитирования:** Мотыко А. А., Обухова Н. А., Смирнов К. А. Метод оценки ошибки метамеризма наблюдателя для современных дисплеев // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 3. С. 24–41.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-24-41

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование (разделы "Метод" и "Результат исследования") выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации научного проекта по соглашению № 075-15-2025-013.

Статья поступила в редакцию 13.12.2024; принята к публикации после рецензирования 19.05.2025; опубликована онлайн 30.06.2025

---

## Estimation of Observer Metameric Failure when Using Modern Displays

Alexander A. Motyko<sup>1,2✉</sup>, Natalia A. Obukhova<sup>2</sup>, Konstantin A. Smirnov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

✉ motyko.alexandr@yandex.ru

### Abstract

**Introduction.** The advent of wide-gamut color reproduction devices (LED, laser, or OLED) has exacerbated the problem of color rendering related to individual differences in color perception and referred to as observer metamerism failure. Currently, designers of smartphone and TV displays, as well as other playback devices, are aiming to reach a wider gamut; however, there is a lack of device-specific methodologies for assessing the degree of observer metamerism failure.

**Aim.** To develop a method for estimating the degree of observer metamerism failure. This method can be used to assess the need for a color correction of a particular device in order to compensate for the color rendering problem.

**Materials and methods.** Categorical observers, formed by clustering of color matching functions of individual users, were used. The procedure of searching for pairs of colors that would be indistinguishable for one categorical observer, but would look different for another, i.e., would cause an observer metamerism failure, was developed based on the solution of an optimization problem. The decision on the need to implement a color correction for the designed device is made based on the degree of errors on the found pairs of colors for a set of categorical observers.

**Results.** It was shown that modern displays are already associated with the effect of observer metamerism failure. Further development of display technologies and an extension of color coverage due to narrowing of spectral characteristics of basic colors will make the problem of observer metamerism failure more pronounced, thus requiring special measures of color correction.

**Conclusion.** A method for estimating the degree of observer metamerism failure for a particular color reproduction device is proposed. This method can be used to assess the need for implementing color correction measures to compensate for the problem of color rendering by individual users.

**Keywords:** observer metamerism error, colorimetry, color rendering, displays, color perception

**For citation:** Motyko A. A., Obukhova N. A., Smirnov K. A. Estimation of Observer Metameric Failure when Using Modern Displays. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 3, pp. 24–41.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-3-24-41

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** The study (presented in sections "Method" and "Research result") was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of a scientific project under agreement No. 075-15-2025-013.

Submitted 13.12.2024; accepted 19.05.2025; published online 30.06.2025

**Введение.** Зрительная система человека характеризуется спектральной чувствительностью трех типов рецепторов – колбочек, расположенных на сетчатке глаза. В зависимости от воспринимаемого диапазона длин волн (длинные, средние и короткие соответственно) различают рецепторы L, M и S (рис. 1).

Важным феноменом зрительной системы для формирования цветных изображений на воспроизводящих устройствах является так называемый метамеризм – явление, при кото-

ром цветовые стимулы с различным спектральным составом воспринимаются человеком одинаково как некоторый цвет. Благодаря метамеризму дисплеи способны достаточно точно воспроизводить заданные цвета, генерируя метамеры посредством всего лишь трех сигналов – опорных цветов R, G, B.

В теории цвета для моделирования человеческого цветовосприятия используют модели стандартного колориметрического наблюдателя для различных углов поля зрения – 2 и 10°, обозначае-

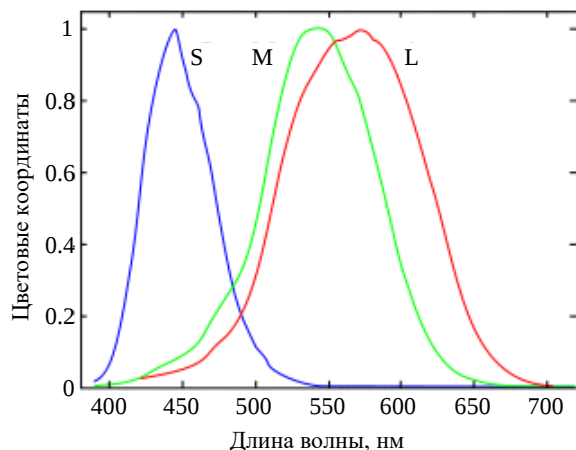


Рис. 1. Спектральная характеристика зрительной системы человека

Fig. 1. Spectral characterization of the human visual system

мые, соответственно, 2-CMF1931 и 10-CMF1964 [1]. В данном случае год соответствует дате принятия стандарта, а аббревиатура CMF означает "функции цветового соответствия" (ФЦС). ФЦС обычно заданы в цветовом пространстве XYZ и являются результатом пересчета измеренных в эксперименте характеристик LMS для группы людей (рис. 2). При этом индивидуальные различия в цветовосприятии не учитываются, оценки ФЦС представляют собой результаты усреднения по группе респондентов, причем небольшой – так в исследовании 31-го года [2] (основание для 2-CMF1931) был всего 21 респондент, а в исследовании 59-го года (основание для 10-CMF1964) – 51 [3].

Очевидно, что существуют индивидуальные различия в ФЦС. Вариативность для 51 человека, принимавшего участие в исследова-

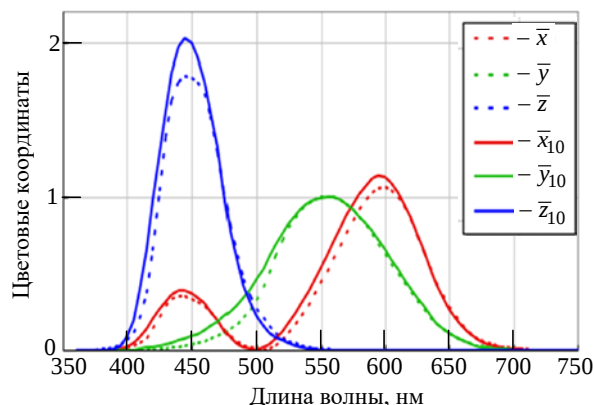


Рис. 2. Модели CIE стандартного колориметрического наблюдателя 1931 г. (пунктирные линии) и 1964 г. (сплошные линии)

Fig. 2. CIE models of the Standard Colorimetric Observer 1931 (dashed lines) and 1964 (solid lines)

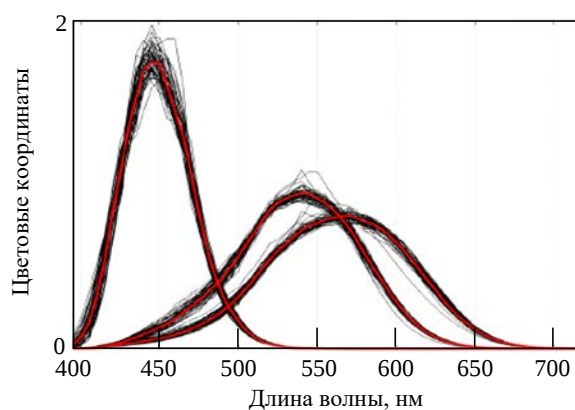


Рис. 3. LMS 51 респондента [3] (черные линии), современные функции цветового соответствия [5]

Fig. 3. LMS 51 respondents [3] (black lines), state of the art color matching functions [5]

нии [3], отражена на рис. 3 [4]. Тем не менее в колориметрии уточняются [5] и по-прежнему используются усредненные оценки.

Причина в том, что до последнего времени индивидуальные отличия характеристик зрительной системы человека на практике не играли никакой роли.

На рис. 4 приведены графики для дисплея SONY CRT BVM32.

Видно, что у относительно старого дисплея спектральные характеристики достаточно широкополосные. В результате, за счет того что цвет, воспроизводимый дисплеем и воспринимаемый человеком (например, в координатах цветового пространства XYZ), определяется интегрированием:

$$X = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda;$$

$$Y = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda;$$

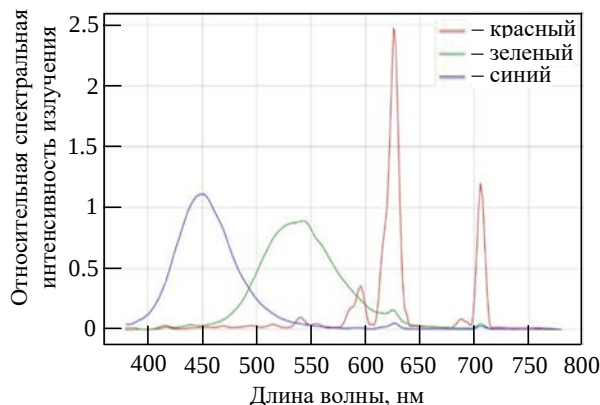


Рис. 4. Спектральные характеристики CRT BVM32

Fig. 4. Spectral characteristics of CRT BVM32

$$Z = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda;$$

$$E(\lambda) =$$

$$= R SPD_r(\lambda) + G SPD_g(\lambda) + B SPD_b(\lambda),$$

где  $E(\lambda)$  – спектр излучения дисплея, представляющий собой сумму спектральных характеристик основных цветов  $SPD_{r,g,b}(\lambda)$ , умноженных на коэффициенты (координаты в дисплейной системе) воспроизводимого цвета  $R, G, B$ ;  $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$  – ФЦС стандартного наблюдателя, небольшие отличия в ФЦС конкретного пользователя нивелируются. Именно поэтому вплоть до недавнего времени довольно грубые оценки ФЦС стандартного наблюдателя обеспечивали необходимую точность цветопередачи – индивидуальные отличия компенсировались при интегрировании со спектральными характеристиками дисплеев.

Появление на современном этапе технологий воспроизводящих устройств с широким цветовым охватом (светодиодные, лазерные или OLED) выявило проблему цветопередачи, связанную с индивидуальными отличиями ФЦС различных пользователей. Причина заключается в том, что для обеспечения большего цветового охвата необходимо делать спектральные характеристики основных цветов более узкополосными. На рис. 5 изображены характеристики лазерных дисплеев IMAX.

Еще одной иллюстрацией процесса сужения спектральных характеристик основных цветов по мере развития технологий дисплеев служит рис. 6.

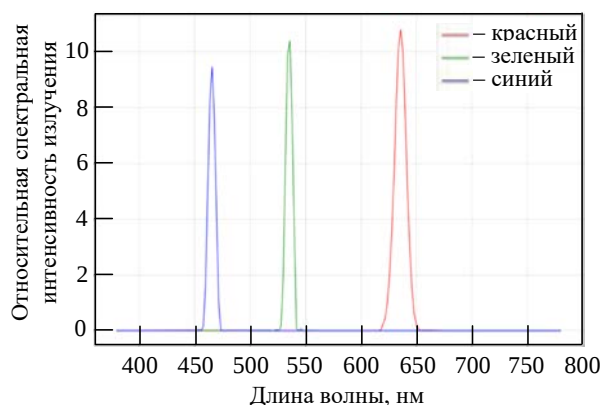


Рис. 5. Спектральные характеристики лазерного дисплея IMAX  
Fig. 5. Spectral characteristics of the laser IMAX display

На рисунке видно, что по мере приближения к широкому цветовому охвату BT.2020 спектральные характеристики основных цветов дисплеев становятся все более узкополосными. Чем более узкополосные спектральные характеристики у устройства воспроизведения, тем более будут влиять на точность цветопередачи индивидуальные особенности ФЦС, тем более вероятна ситуация, в которой два стимула с разными спектрами воспринимаются одинаково для одного наблюдателя (как метамеры) и как разные цвета для другого наблюдателя. Данный эффект называется ошибкой метамеризма наблюдателя (ОМН) [6]. Число публикаций, посвященных данной проблеме, начинает увеличиваться с 2014–2016 гг. [4], что неслучайно, так как примерно совпадает с выходом на рынок дисплеев с широким цветовым охватом, в частности с появлением кинотеатров с IMAX laser, т. е. с моментом, когда ОМН уже принципиально могла начать проявляться на практике. В настоящее время к широкому цветовому охвату стремятся разработчики и дисплеев смартфонов, и домашних телевизоров, а следовательно проблема ОМН будет проявляться все острее. Вопросу оценки выраженности ОМН на современных воспроизводящих устройствах посвящена данная статья.

**Обзор предметной области.** Существуют исследования, посвященные изучению феномена метамеризма наблюдателя и его влияния на технологии, а также оценке выраженности метамеризма наблюдателя в существующих устройствах и различным решениям для преодоления этой проблемы. В [7, 8] предложены подходы для уменьшения ошибки цветопередачи, связанной с метамеризмом наблюдателя для некоторых идеализированных дисплеев с тремя опорными цветами или для дисплеев, обладающих большим цветовым охватом с числом опорных цветов, превышающим три [9]. Также были предложены персонализированные системы репродукции цвета для минимизации ОМН на основе матричных цветокорректоров [10], новых "категориальных" ФЦС [11] или новых уточненных характеристик LMS [12]. Эти решения, вероятно, потенциально успешны для определенных моделей или типов дисплеев, таких как, например, проекционные

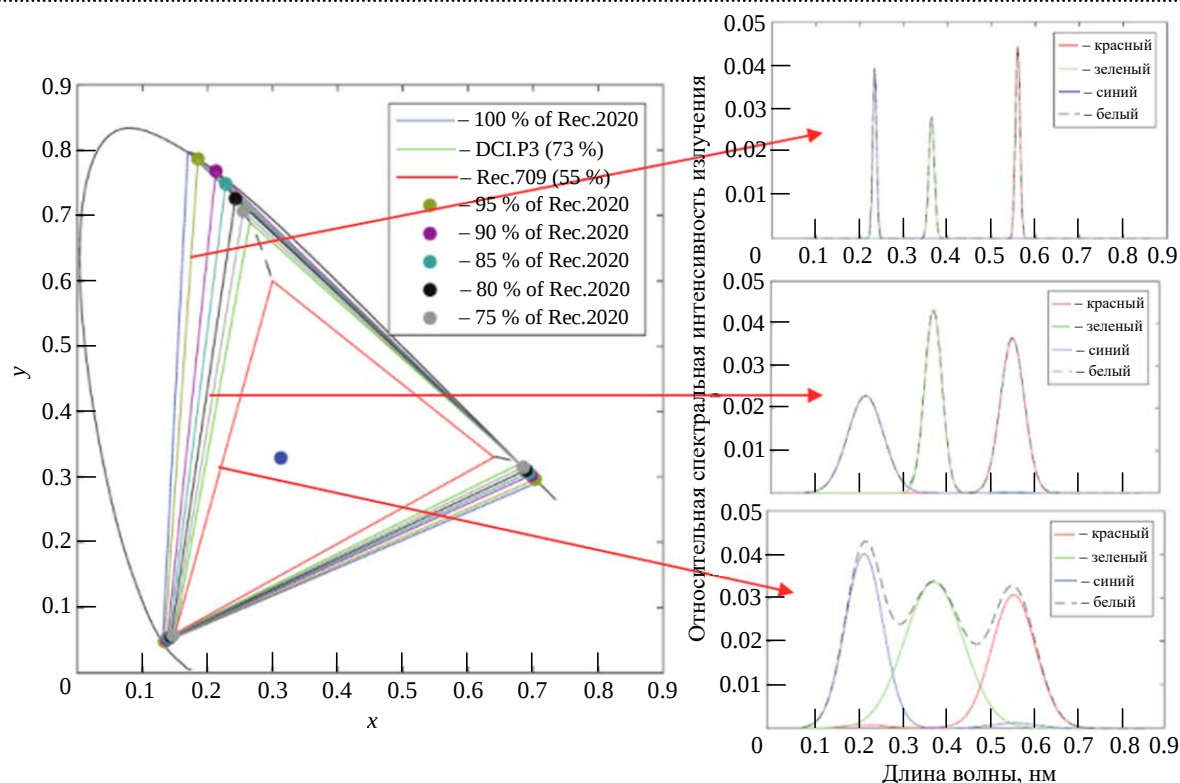


Рис. 6. Примерный вид (результат моделирования) спектральных характеристик дисплеев, обеспечивающих заданный цветовой охват

Fig. 6. Approximate view (the result of the modelling) of spectral characteristics of displays providing a given color gamut

очки или при возможности проведения специальной калибровки. Однако они не подходят, например, для кинотеатров или просто бытовых условий использования дисплеев смартфонов. В данном контексте стоит отметить публикацию, описывающую возможность цветокоррекции для учета индивидуальных особенностей для типовых дисплеев (с тремя основными цветами RGB) в бытовых условиях [13].

Публикации, посвященные количественной оценке выраженности ОМН, известны. Индекс метамеризма наблюдателя был введен Международной комиссией по освещению (CIE) еще в конце 1980-х гг. [14]. Это была попытка идентификации параметров четырех полиномов, характеризующих вариации индивидуальных ФЦС наблюдателей. Позже было отмечено, что реальная вариабельность в экспериментальных данных гораздо больше, чем предсказывает модель CIE [15].

Большинство последних исследований оценивают выраженность ОМН для конкретных дисплеев, используя наборы индивидуальных ФЦС, полученных с помощью математических моделей на основе известных экспериментальных данных [16, 17].

На основе подобных массивов ФЦС и заданного набора цветов были разработаны метрики, характеризующие "потенциал" возникновения ОМН дисплеев [18] и распределений ошибок. Целью данного исследования является создание методики оценки выраженности ОМН, в результате которой для конкретного воспроизводящего устройства можно будет оценить необходимость специализированной цветокоррекции, позволяющей компенсировать ОМН, связанных с ОМН по цветовому охвату [19].

**Метод.** В исследовании ставилась задача оценки возможности возникновения и выраженности эффекта ОМН на основании анализа результатов для реально существующего дисплея с широким цветовым охватом (IMAX laser) и для двух синтезированных модельных дисплеев с узкими спектральными характеристиками опорных цветов. Для этого была реализована процедура поиска пар цветов, которые при воспроизведении на дисплее с тремя опорными цветами были бы неразличимы одним наблюдателем, но выглядели бы различно для другого, т. е. вызывали бы эффект ОМН. Анализ выраженности ОМН строился исходя из

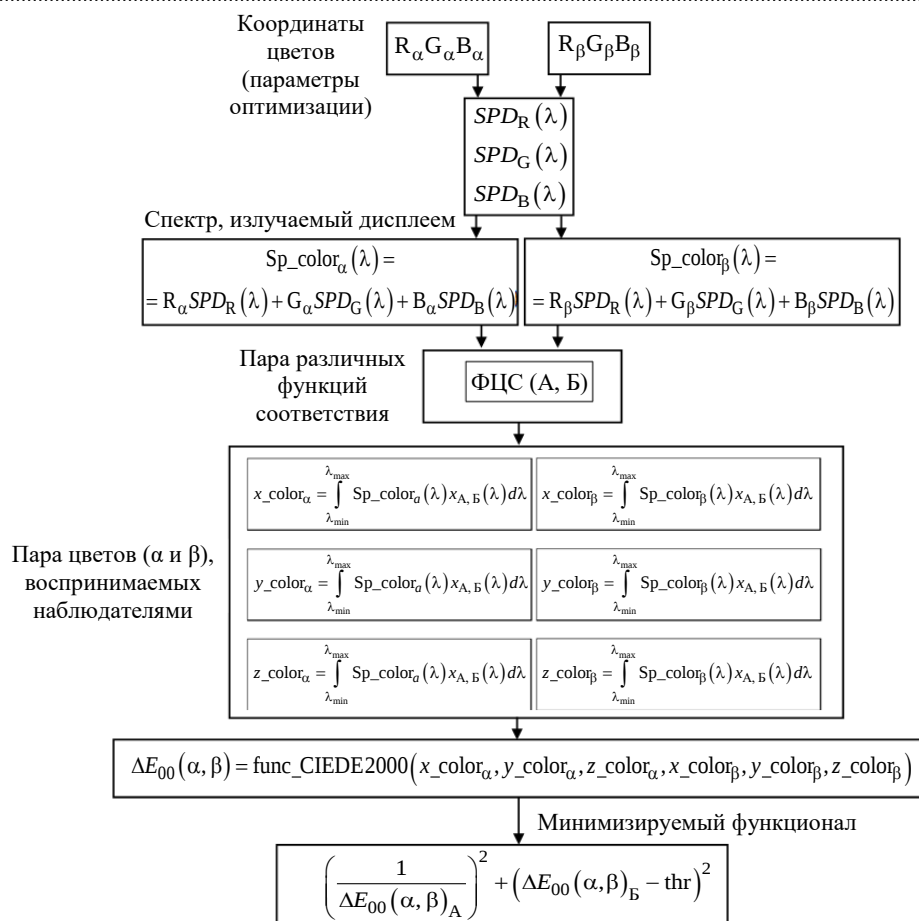


Рис. 7. Процедура определения пар цветов, вызывающих ОМН

Fig. 7. Procedure for determining color pairs that cause the observer metamerism failure

результатов нахождения указанных пар. Структурная схема процедуры приведена на рис. 7, где  $SPD_{R,G,B}(\lambda)$  – спектральная характеристика дисплея; ФЦС (A, B) – ФЦС наблюдателей A и B;  $(x\_color_\alpha, \beta, y\_color_\alpha, \beta, z\_color_\alpha, \beta)$  – координаты пары цветов в пространстве XYZ, воспринимаемые наблюдателями.

Процедура базируется на численном решении оптимизационной задачи. Минимизируемый функционал  $L$  представляет собой выражение

$$L = \left( \frac{1}{\Delta E_{00}(\alpha, \beta)_A} \right)^2 + (\Delta E_{00}(\alpha, \beta)_B - thr)^2,$$

где  $\Delta E_{00}$  – мера цветового различия CIEDE2000 [20];  $\alpha, \beta$  – пара цветов с координатами  $(R_\alpha, G_\alpha, B_\alpha)$  и  $(R_\beta, G_\beta, B_\beta)$  соответственно;  $thr$  – порог, выражаемый в единицах CIEDE2000, определяющий допустимое цветовое различие для наблюдателя B.

Суть процедуры выражается в следующем. Подбирается такая пара цветов  $(R_\alpha, G_\alpha, B_\alpha)$  и  $(R_\beta, G_\beta, B_\beta)$ , которая, будучи воспроизведенной на некотором дисплее с характеристиками  $SPD_{R,G,B}(\lambda)$ , была бы различима одним наблюдателем с характеристиками ФЦС A и практически неразличима для наблюдателя с характеристиками ФЦС B. Практическая неразличимость определяется получаемым значением  $\Delta E_{00}$  для заданной пары цветов для второго наблюдателя. Принято считать (подтверждено в [21] и применяется на практике), что если для пары цветов  $\Delta E_{00}$  не превышает значения 1...1.3, то данные цвета неразличимы для среднестатистического пользователя. Если же  $\Delta E_{00}$  находится в диапазоне от 1.3...2 единиц, то принято говорить о "приемлемом" отличии, т. е. человек видит разницу, но считает ее несущественной. Поэтому значения 1 и 2 выступали в качестве порогов  $thr$  в данном исследовании.

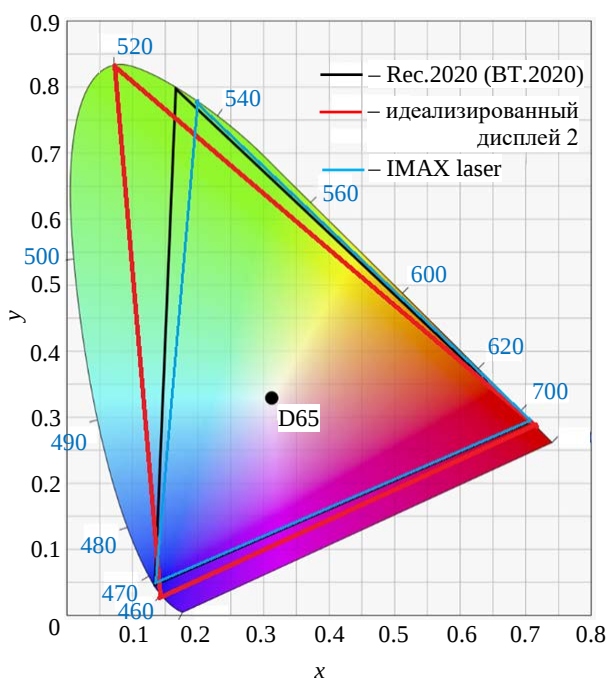


Рис. 8. Проекция цветовых охватов на диаграмме цветности

Fig. 8. Projections of color gamut on a chromaticity diagram

Первый модельный дисплей выбран таким, чтобы его цветовой охват полностью соответствовал Rec.2020 – самому широкому из стандартизированных на сегодняшний день. Для второго дисплея были выбраны опорные цвета, которые бы позволяли получить более широкий цветовой охват даже по сравнению с Rec.2020. Проекция цветовых охватов трех дисплеев приведены на цветовой диаграмме на рис. 8.

Спектральные характеристики IMAX laser приведены на рис. 5. Характеристики модельных дисплеев были реконструированы следующим образом. Для первого дисплея были выбраны опорные цвета, соответствующие стандартным для Rec.2020: 630 нм для красного, 532 нм для зеленого и 467 нм для синего. Для второго дисплея были выбраны опорные цвета: 660 нм для красного, 520 нм для зеленого и 460 нм для синего. При этом спектральные характеристики цветов моделировались гауссианами (с учетом дискретизации) таким образом, чтобы полуширина каждой характеристики примерно соответствовала 10...12 нм для условной непротиворечивости реально достижимым характеристикам. Затем полученные характеристики корректировались таким образом, чтобы выполнялся баланс белого цвета, т. е. для координат RGB-цветов, расположенных на

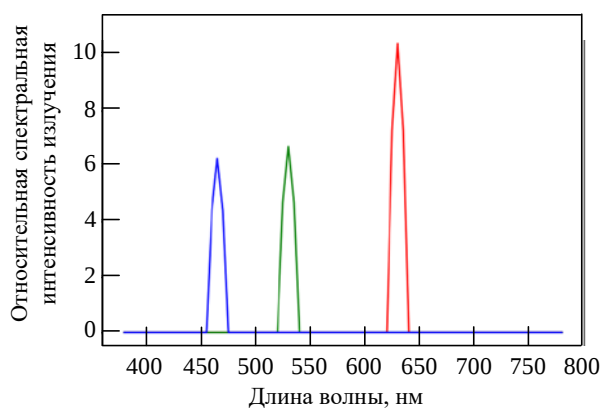


Рис. 9. Спектральные характеристики первого модельного дисплея

Fig. 9. Spectral characteristics of the first model display

ахроматической прямой, результирующие координаты XYZ соответствовали бы этим цветам. Полученный вид спектральных характеристик для первого модельного дисплея представлен на рис. 9, аналогично с учетом соответствующих длин волн опорных цветов выглядят характеристики второго модельного дисплея. При этом спектральные характеристики основных цветов второго модельного дисплея уже на 15 % характеристик первого модельного дисплея.

Из рис. 8 видно, что первый модельный дисплей по своим характеристикам в контексте цветового охвата должен быть достаточно близок к IMAX laser, отличия площадей треугольников менее 5 %. Площадь проекции на хроматическую диаграмму цветового охвата второго модельного дисплея значительно превышает охваты IMAX laser и первого модельного дисплея.

В качестве исходных данных для индивидуальных характеристик зрительной системы были использованы скорректированные данные исследования [3], представляющие собой ФЦС 51 респондента для угла  $10^\circ$ , полученные при использовании в качестве основных цветов монохроматического излучения на длинах волн 645.16, 526.32 и 444.44 нм. В статье использована версия с коррекцией данных, полученных на длинных волнах, предложенной и обоснованной в [18]. Решение использовать в исследовании именно ФЦС для угла  $10^\circ$  было принято по следующим причинам:

- функции, полученные в [3], легли в основу соответствующей модели стандартного колориметрического наблюдателя;

– в отличие от данных 1931 г., послуживших основой для 2-CMF1931, функции в [3] были измерены непосредственно без различных фотометрических допущений;

– в указанном исследовании больше респондентов, чем в данных для 2-CMF1931;

– угол наблюдения  $10^\circ$  выглядит более релевантным для практических задач.

В исследовании были приняты допущения:

– не ставился строго вопрос о физической реализуемости модельного дисплея, его основных цветов, в частности ширина спектров опорных цветов одинаковая;

– не учитывались встроенные в современные дисплеи "психофизиологические" корректоры цвета, призванные так или иначе формировать визуально привлекательное изображение (смещение цветового тона, повышение контраста);

– не учитывалось внешнее освещение, а следовательно, и вопросы хроматической адаптации и психофизиологических моделей восприятия, моделировалась ситуация, когда кроме дисплея нет других источников освещения.

Указанные допущения имели целью облегчить решаемую минимизационную задачу, избавив ее от второстепенных факторов. При этом они, безусловно, влияя на численные оценки, не нивелировали основную идею исследования.

Для оценки ОМН на базе данных об измеренных индивидуальных характеристиках зрительной системы необходимо было провести их кластеризацию. Замена индивидуальных ФЦС на кластерные является оправданной по ряду причин:

– вариативность данных индивидуумов относительно средних значений функций стандартного наблюдателя достаточно существенна, что и приводит к ОМН. Тем не менее ФЦС достаточно близки и для практических задач достаточным является замена функций стандартного наблюдателя на так называемые категориальные ФЦС, являющиеся результатами кластеризации индивидуальных данных и представляющих собой более точное описание характеристик отдельных групп людей;

– кластеризация, как и любое усреднение, позволяет уменьшить погрешности отдельных измерений.

Важным вопросом в данном случае явля-

ется определение необходимого числа кластеров, которое задает количество категориальных наблюдателей, а следовательно, и степень уточнения ФЦС. Чем больше кластеров, тем меньше внутрикластерное усреднение ФЦС и больший учет индивидуальных особенностей, но при этом возрастает сложность классификации ФЦС пользователя – отнесение его к одному из типов категориальных наблюдателей. В этом смысле число категориальных наблюдателей – важнейший параметр цвето-коррекции для компенсации ОМН.

Из литературы известны различные варианты кластеризации ФЦС, из которых наиболее примечательными являются результаты [22] и [17], проведенные для варианта функций при угле обзора  $2^\circ$ . Указанные варианты имеют ряд особенностей, в частности целью [22] было

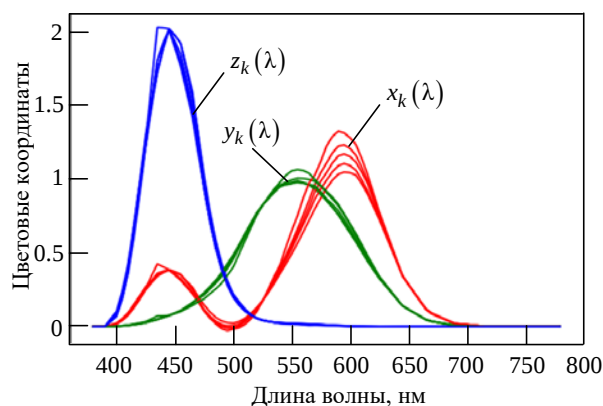


Рис. 10. Категориальные функции цветового соответствия (результат кластеризации на пять кластеров)

Fig. 10. Categorical color matching functions (result of clustering into five clusters)

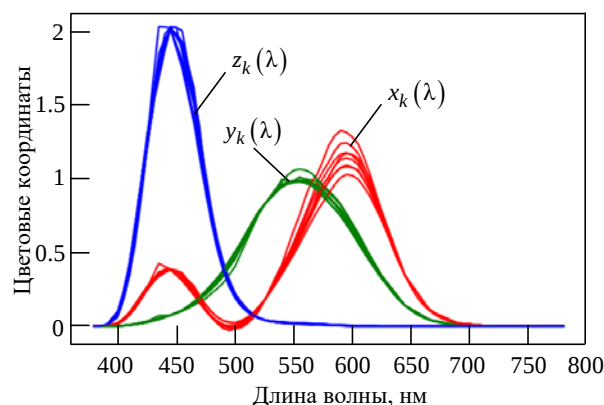


Рис. 11. Категориальные функции цветового соответствия (результат кластеризации на семь кластеров)

Fig. 11. Categorical color matching functions (result of clustering into seven clusters)

получение функций категориальных наблюдателей, максимально отличающихся друг от друга, в [17] исходные данные были синтезированы с помощью специально разработанной модели. Число кластеров в данных работах соответствовало 9 и 10.

В данном исследовании для кластеризации исходных данных был использован метод  $K$ -средних, а для определения числа кластеров были проанализированы результаты применения "метода локтя" [23] и сделан вывод, что число кластеров  $k$  должно находиться в диапазоне от 5 до 7. Соответственно, была проведена кластеризация на 5 и 7 кластеров и получены наборы "категориальных" ФЦС, описывающие пять и семь групп наблюдателей с близкими характеристиками зрительной системы. Их вид приведен на рис. 10 и 11.

Кроме того, для общности с приведенными в обзоре работами и расширения охвата исследования были получены категориальные функции соответствия при кластеризации на 9 кластеров.

**Результат исследования.** Решение оптимизационной задачи было выполнено для различных комбинаций спектральных характеристик основных цветов дисплеев, наборов ФЦС категориальных наблюдателей, двух порогов  $\text{thr}$  – 1 и 2, соответствующих порогам "восприятия" и "приемлемости". Результаты сведены в табл. 1–7.

В таблицах красным цветом отмечены случаи, когда превышение оценки различия цветов

по мере  $\Delta E_{00}$  для одного наблюдателя превышало оценку для второго (приблизительно равную установленному параметру  $\text{thr}$ ) на величину более 1  $\Delta E_{00}$ . Это сделано по следующей причине. Изменение  $\Delta E_{00}$  на единицу в области малых различий (на которую и нацелена данная мера [24]) характеризует качественное изменение восприятия цветов. Так, если порог для второго наблюдателя был равен 1, что эквивалентно неразличимости цветов, то при  $\Delta E_{00} = 2$  первый наблюдатель будет уверенно различать цвета. Если же порог был установлен равным 2, т. е. "приемлемой" разнице, то при  $\Delta E_{00}$ , равной или превышающей 3, различия уже будут значительными для первого наблюдателя.

Оптимизационная задача решалась с помощью локально-стохастического метода basin hopping (наиболее близкий по смыслу перевод – "прыжки в бассейне"), основная идея которого состоит в том, что локальные минимумы минимизируемой целевой функции (разумеется, вместе с глобальным) группируются в относительно небольших локальных областях – "бассейнах". Варьируя параметры в рамках такого "бассейна", можно отыскать удовлетворительное решение, близкое к глобальному минимуму [25]. Для проведенных экспериментов при  $\text{thr} = 1$  полученные значения цветового различия для второго категориального наблюдателя во всех случаях находились в диапазоне [1.00, 1.25], при  $\text{thr} = 2$  –

Табл. 1. Результаты для IMAX laser,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 1$

Tab. 1. Results for IMAX laser,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 1$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 1.92 | 1.57 | 1.66 | 2.05 |
| 2          | 1.76 |      | 1.86 | 2.12 | 1.84 |
| 3          | 1.55 | 1.81 |      | 1.67 | 2    |
| 4          | 1.69 | 2.17 | 1.77 |      | 2.28 |
| 5          | 1.92 | 1.82 | 1.9  | 2.11 |      |

Табл. 2. Результаты для IMAX laser,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 2. Results for IMAX laser,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.13 | 2.26 | 2.49 | 3.47 |
| 2          | 2.85 |      | 3.06 | 3.16 | 3.02 |
| 3          | 2.2  | 2.89 |      | 2.53 | 3.34 |
| 4          | 2.51 | 3.77 | 2.77 |      | 4.03 |
| 5          | 3.15 | 2.91 | 3.11 | 3.63 |      |

Табл. 3. Результаты для IMAX laser,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 1$

Tab. 3. Results for IMAX laser,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 1$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 1.85 | 1.69 | 1.93 | 1.82 | 1.58 | 2.12 |
| 2          | 1.74 |      | 1.65 | 1.64 | 1.97 | 1.83 | 1.84 |
| 3          | 1.64 | 1.63 |      | 1.77 | 1.79 | 1.68 | 1.99 |
| 4          | 2.02 | 1.74 | 1.91 |      | 2.2  | 2.15 | 1.7  |
| 5          | 1.8  | 1.89 | 1.75 | 2.02 |      | 1.86 | 2.29 |
| 6          | 1.56 | 1.84 | 1.7  | 1.93 | 1.87 |      | 2.12 |
| 7          | 2.32 | 2.03 | 2.23 | 1.76 | 2.43 | 2.43 |      |

Табл. 4. Результаты для IMAX laser,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 4. Results for IMAX laser,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.01 | 2.78 | 3.07 | 2.82 | 2.3  | 3.62 |
| 2          | 2.7  |      | 2.47 | 2.45 | 3.28 | 3.12 | 3.04 |
| 3          | 2.45 | 2.42 |      | 3.12 | 3.14 | 2.55 | 3.33 |
| 4          | 3.41 | 2.69 | 3.14 |      | 3.83 | 3.03 | 2.61 |
| 5          | 2.84 | 3.09 | 2.73 | 3.4  |      | 2.91 | 4.04 |
| 6          | 2.23 | 3.05 | 2.38 | 3.09 | 3.02 |      | 3.63 |
| 7          | 3.11 | 3.43 | 3.9  | 2.74 | 4.38 | 3.38 |      |

Табл. 5. Результаты для модельного дисплея № 1,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 5. Results for model display № 1,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.23 | 2.26 | 2.47 | 3.45 |
| 2          | 2.8  |      | 3.05 | 3.18 | 3.01 |
| 3          | 2.19 | 3.08 |      | 2.51 | 3.31 |
| 4          | 2.53 | 3.81 | 2.73 |      | 3.97 |
| 5          | 3.14 | 2.88 | 3.11 | 3.6  |      |

Табл. 6. Результаты для модельного дисплея № 2,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 6. Results for model display № 2,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.49 | 2.36 | 2.52 | 3.44 |
| 2          | 3.17 |      | 3.1  | 3.35 | 3.08 |
| 3          | 2.31 | 3.34 |      | 2.52 | 3.04 |
| 4          | 2.71 | 3.9  | 2.74 |      | 3.85 |
| 5          | 3.12 | 3.01 | 3.02 | 3.58 |      |

Табл. 7. Результаты для модельного дисплея № 1,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 7. Results for model display № 1,  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.01 | 3.03 | 3.02 | 2.65 | 2.36 | 3.25 |
| 2          | 2.86 |      | 2.98 | 2.29 | 3.32 | 2.78 | 3.14 |
| 3          | 3.24 | 2.87 |      | 4.14 | 2.56 | 3.22 | 4.17 |
| 4          | 3.08 | 2.33 | 3.78 |      | 3.37 | 2.78 | 2.76 |
| 5          | 3.16 | 4.05 | 2.94 | 4.01 |      | 2.86 | 4.04 |
| 6          | 2.55 | 3.26 | 3.56 | 3.21 | 3.05 |      | 3.27 |
| 7          | 3.1  | 3.04 | 4.07 | 2.82 | 3.87 | 3.21 |      |

в диапазоне [2.00, 2.04], что обеспечивает корректность оценок.

Выполнение цели исследования подразумевало решение ряда задач:

- определение числа кластеров (а следовательно, и степени усреднения ФЦС), которое имеет смысл использовать при расчетах для различных  $\text{thr}$ ;

- оценку выраженности ОМН относительно разных категориальных наблюдателей при увеличении цветового охвата устройств воспроизведения, для различного числа кластеров ФЦС;

- оценку выраженности ОМН относительно стандартного колориметрического наблюдателя при увеличении цветового охвата устройств воспроизведения, для различного числа кластеров ФЦС и порогов  $\text{thr}$ .

В рамках решения первой задачи в табл. 1–4 приведены результаты для реально существующего дисплея IMAX laser, категориальных ФЦС при числе категорий  $k = 5$  и  $7$  (упорядоченность категориальных ФЦС, сформированная в начале эксперимента, далее не менялась) и порогов  $\text{thr} = 1$  и  $2$ , соответствующих неразличимости и приемлемому отличию цветов.

Анализ табл. 1–4 показывает, что для существующего дисплея IMAX laser при кластеризации ФЦС на 5 кластеров ОМН явно манифестируются. При  $\text{thr} = 1$  в 6 случаях из 20 (30 %) полученное значение превышает  $\Delta E_{00} = 2$ , т. е. порог приемлемости цветового различия. При  $\text{thr} = 2$  результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 11 из 20 случаев (55 %).

В случае кластеризации ФЦС на 7 кластеров пары цветов, являющиеся результатом ОМН, закономерно встречаются чаще. При  $\text{thr} = 1$  в 14 случаях из 42 (33 %) полученное значение превышает  $\Delta E_{00} = 2$ . При  $\text{thr} = 2$  результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 25 из 42 случаев (60 %).

Таким образом, видно, что для реально существующего дисплея для оценки выраженности ОМН принципиально можно использовать 5 и более категориальных ФЦС, а также  $\text{thr} = 1$  и  $2$ . Тем не менее следует отметить, что IMAX laser обладает очень широким цветовым охватом, которого на сегодня достигают далеко не все современные дисплеи. Поэтому для оценки выра-

женности ОМН для большинства современных устройств можно рекомендовать использование от 7 категориальных наблюдателей и  $\text{thr} = 2$ .

В рамках второй задачи результаты, приведенные в табл. 1–4, дополнены данными, отраженными в табл. 5–7.

Согласно табл. 2, для IMAX laser при  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$  результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 11 из 20 случаев (55 %). Для первого модельного дисплея (см. табл. 5) при  $\text{thr} = 2$  результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 12 из 20 случаев (60 %), для второго модельного дисплея (см. табл. 6) 14 из 20 случаев (70 %). Полученные данные закономерны и отражают тот факт, что при увеличении цветового охвата воспроизводящих устройств за счет сужения спектральных характеристик основных цветов ОМН проявляется сильнее. Это подтверждают и данные табл. 7. Для IMAX laser при  $k = 7$ ,  $\text{thr} = 2$  (см. табл. 4) результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 25 из 42 случаев (60 %), в то время как для первого модельного дисплея результат превышает значение  $\Delta E_{00} = 3$  для 27 из 42 случаев (65 %).

Для анализа необходимости специальной цветокоррекции для конкретного дисплея требуется оценить выраженность ОМН относительно стандартного наблюдателя. Для этого для трех рассматриваемых дисплеев, трех наборов категориальных CMF ( $k = 5, 7, 9$ ) и двух порогов  $\text{thr} = 1$  и  $2$  были получены соответствующие данные, которые сведены в табл. 8 и 9.

На базе табл. 8 и 9 построен график, представленный на рис. 12, который отражает процент зафиксированных случаев нахождения пары цветов, вызывающей ОМН, от общего числа испытаний.

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что ОМН проявляется уже на существующих сегодня дисплеях. Следует отметить, что результаты для IMAX laser и модельного дисплея № 1 близки, так как близки и их характеристики. При этом манифестация ОМН для дисплея № 2 с самым широким среди рассмотренных цветовым охватом существенно более выраженная.

На основании анализа полученных результатов в качестве методики оценки выраженности ОМН для конкретного воспроизводящего

Табл. 8. Результаты оценки выраженности ОМН относительно стандартного колориметрического наблюдателя для  $\text{thr} = 1$

Tab. 8. Results of evaluation of the expression of the observer metamer failure relative to the Standard Colorimetric Observer for  $\text{thr} = 1$

| № кат. ФЦС                             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | %  |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| <b>При <math>\text{thr} = 1</math></b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>При <math>k = 5</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 1.64 | 1.69 | 1.6  | 1.83 | 2.04 |      |      |      |      | 20 |
| стандартный к 1–5                      | 1.6  | 1.77 | 1.56 | 1.71 | 2.01 |      |      |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 1.6  | 1.7  | 1.6  | 1.8  | 2.01 |      |      |      |      | 20 |
| стандартный к 1–5                      | 1.58 | 1.8  | 1.63 | 1.71 | 2.04 |      |      |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 1.96 | 2.25 | 1.94 | 2.01 | 2.08 |      |      |      |      | 60 |
| стандартный к 1–5                      | 1.87 | 2.23 | 1.86 | 1.88 | 1.94 |      |      |      |      |    |
| <b>При <math>k = 7</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 1.69 | 1.59 | 1.67 | 1.77 | 2.01 | 1.7  | 2.06 |      |      | 21 |
| стандартный к 1–7                      | 1.73 | 1.62 | 1.67 | 1.7  | 1.94 | 1.81 | 2.04 |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 1.68 | 1.56 | 1.71 | 1.69 | 2.09 | 1.71 | 2.02 |      |      | 21 |
| стандартный к 1–7                      | 1.74 | 1.59 | 1.72 | 1.68 | 1.96 | 1.85 | 2.06 |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 2.23 | 1.93 | 2.07 | 1.96 | 2.08 | 2.26 | 1.94 |      |      | 64 |
| стандартный к 1–7                      | 2.2  | 1.83 | 2.08 | 1.85 | 2.04 | 2.13 | 2.09 |      |      |    |
| <b>При <math>k = 9</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 1.65 | 1.83 | 1.67 | 1.66 | 2.05 | 2.02 | 2.01 | 1.74 | 1.75 | 28 |
| стандартный к 1–9                      | 1.61 | 1.72 | 1.73 | 1.77 | 2.36 | 1.77 | 2.02 | 1.81 | 1.86 |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 1.61 | 1.81 | 1.71 | 1.65 | 2.04 | 2.01 | 2.04 | 1.74 | 1.77 | 28 |
| стандартный к 1–9                      | 1.6  | 1.72 | 1.78 | 1.74 | 1.91 | 2.09 | 2.01 | 1.81 | 1.82 |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 2.04 | 2.01 | 2.08 | 1.9  | 2.71 | 2.04 | 2.06 | 2.25 | 2.33 | 72 |
| стандартный к 1–9                      | 2.01 | 1.83 | 2.08 | 1.77 | 2.65 | 1.94 | 2.04 | 2.23 | 2.33 |    |

устройства и необходимости для него специализированной цветокоррекции можно предложить следующее:

– сформировать или выбрать из известных наборов категориальных ФЦС;

– для полученного набора ФЦС провести поиск пар цветов, вызывающих ОМН относительно модели стандартного колориметрического наблюдателя. При этом в общем случае рекомендуется использовать  $\text{thr} = 2$ ;

– использование при поиске пар цветов  $\text{thr} = 1$  оправданно в случае, если цветовой охват устройства близок или превышает Rec.2020 и обусловлен областью применения (например, дисплеи в системах видеозендоскопии, где точность передачи цвета важна для диагностики);

– полученное в итоге значение доли исходных испытаний, в которых результат превышает  $\Delta E_{00} = 3$  для  $\text{thr} = 2$  (или  $\Delta E_{00} = 2$  для  $\text{thr} = 1$ )

Табл. 9. Результаты оценки выраженности ОМН относительно стандартного колориметрического наблюдателя для  $\text{thr} = 2$   
Tab. 9. Results of evaluation of the expression of the observer metamer failure relative to the Standard Colorimetric Observer for  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС                             | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | %  |
|----------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| <b>При <math>\text{thr} = 2</math></b> |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>При <math>k = 5</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 2.44 | 2.67 | 2.34 | 3.02 | 3.19 |      |      |      |      | 30 |
| стандартный к 1–5                      | 2.34 | 2.89 | 2.45 | 2.71 | 3.31 |      |      |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 2.44 | 2.69 | 2.41 | 3.02 | 3.23 |      |      |      |      | 40 |
| стандартный к 1–5                      | 2.39 | 3.01 | 2.3  | 2.7  | 3.28 |      |      |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–5 к стандартному                     | 3.37 | 4.07 | 3.35 | 3.49 | 3.66 |      |      |      |      | 90 |
| стандартный к 1–5                      | 3.14 | 4.03 | 2.96 | 3.17 | 3.57 |      |      |      |      |    |
| <b>При <math>k = 7</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 2.67 | 2.41 | 2.6  | 3.03 | 3.29 | 2.71 | 3.59 |      |      | 36 |
| стандартный к 1–7                      | 2.77 | 2.49 | 2.63 | 2.68 | 3.41 | 2.96 | 3.11 |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 2.66 | 2.33 | 2.73 | 3    | 3.22 | 2.74 | 3.57 |      |      | 43 |
| стандартный к 1–7                      | 2.88 | 2.27 | 2.75 | 2.64 | 3.28 | 3.07 | 3.1  |      |      |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–7 к стандартному                     | 4.05 | 3.3  | 3.65 | 3.37 | 3.66 | 3.98 | 3.33 |      |      | 93 |
| стандартный к 1–7                      | 3.95 | 3.05 | 3.65 | 2.87 | 3.57 | 4.06 | 3.03 |      |      |    |
| <b>При <math>k = 9</math></b>          |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| <b>IMAX laser</b>                      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 2.57 | 2.88 | 2.62 | 2.58 | 3.56 | 3.42 | 3.29 | 2.78 | 2.83 | 39 |
| стандартный к 1–9                      | 2.45 | 2.76 | 2.78 | 2.88 | 4.32 | 3.04 | 3.41 | 2.09 | 3.21 |    |
| <b>Модельный дисплей № 1</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 2.55 | 2.78 | 2.7  | 2.62 | 3.55 | 3.37 | 3.22 | 2.8  | 2.92 | 39 |
| стандартный к 1–9                      | 2.42 | 2.73 | 2.91 | 2.81 | 4.38 | 3.14 | 3.31 | 2.85 | 3.06 |    |
| <b>Модельный дисплей № 2</b>           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| 1–9 к стандартному                     | 3.15 | 3.41 | 3.66 | 3.21 | 4.98 | 3.62 | 3.66 | 3.97 | 4.24 | 94 |
| стандартный к 1–9                      | 3.15 | 3.05 | 3.67 | 2.94 | 5    | 3.31 | 3.57 | 3.92 | 4.25 |    |

позволяет сделать вывод о выраженности ОМН для данного дисплея, а его сравнение с референсным – оценить необходимость коррекции;

– в качестве референса может быть взято соответствующее значение для какого-либо стандартного, широко распространенного в отрасли или используемого в данный момент устройства. При его отсутствии референс может быть установлен, исходя из специфики и априорных данных решаемой задачи (в общем случае разумным видится уровень 30–50 % для  $\text{thr} = 2$ ).

**Обсуждение и выводы.** Нужно отметить, что полученные значения представляют собой локальные минимумы, рассчитанные при решении соответствующей минимизационной задачи. Практически наверняка можно утверждать, что в каждом случае возможно получить и более высокий результат, все ограничивалось лишь затрачиваемым на итерационный поиск временем. Однако в данном случае интересен принципиальный, качественный результат, а не точная оценка найденных минимумов.

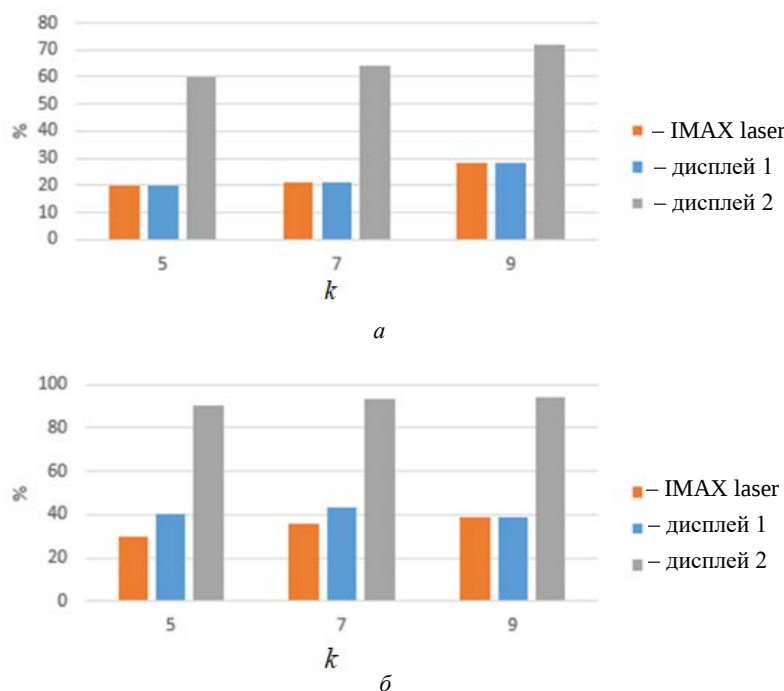


Рис. 12. Результаты оценки выраженности ОМН относительно стандартного колориметрического наблюдателя:  $a$  – для  $\text{thr} = 1$ ;  $b$  –  $\text{thr} = 2$

Fig. 12. Results of evaluation of the expression of the observer metamerism failure relative to the Standard Colorimetric Observer for:  $a$  –  $\text{thr} = 1$ ;  $b$  –  $\text{thr} = 2$

На результаты вычислений, описанных в статье, влияет специфика используемых категориальных ФЦС. В данном исследовании для получения набора ФЦС использовалась кластеризация ФЦС для  $10^\circ$ -го угла поля зрения. При использовании других методов получения категориальных ФЦС, нацеленных на максимизацию межкластерных отличий, или вариантов ФЦС для угла поля зрения  $2^\circ$  (что оправданно в ряде задач) получаемые значения выраженности ОМН будут значительно отличаться численно при сохранении общих тенденций. В качестве примера можно привести результаты, полученные для реально существующего устройства – дисплея современного смартфона при использовании пяти категориальных ФЦС для угла поля зрения  $2^\circ$  ( $k = 5$ ) и порога, равного двум единицам CIEDE2000 ( $\text{thr} = 2$ ). Спектральные характеристики дисплея приведены на рис. 13. Данные сведены в табл. 10.

Несмотря на то что цветовой охват дисплея современного смартфона, будучи достаточно широким, все же уступает IMAX и спектральные характеристики дисплея, разумеется, шире, чем у лазерного устройства отображения, для  $2^\circ$  ФЦС (актуальных при расчетах для смартфона) ОМН

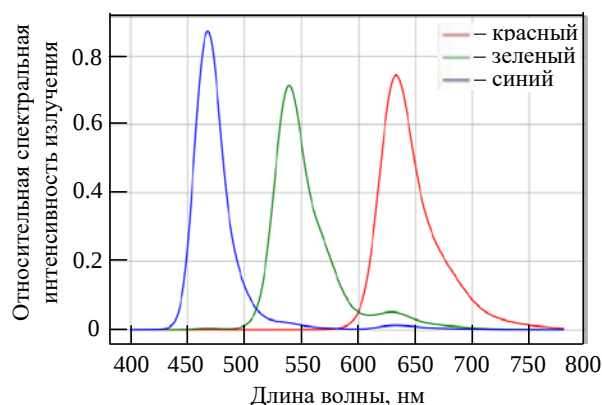


Рис. 13. Спектральные характеристики дисплея смартфона

Fig. 13. Spectral sensitivities of the smartphone display

проявляется достаточно существенно (40 % случаев). Это позволяет уверенно говорить о том, что ОМН манифестируется на существующих современных воспроизводящих устройствах.

В исследовании были получены следующие результаты и выводы:

1. ОМН манифестируется на существующих современных воспроизводящих устройствах с широким цветовым охватом.

2. С развитием дисплеев и увеличением цветового охвата за счет сужения спектральных характеристик основных цветов ОМН будет прояв-

Табл. 10. Результаты для дисплея современного смартфона, 2° ФЦС,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

Tab. 10. Results for modern smartphone display, 2° CMF,  $k = 5$ ,  $\text{thr} = 2$

| № кат. ФЦС | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|------------|------|------|------|------|------|
| 1          |      | 3.51 | 2.93 | 2.81 | 2.05 |
| 2          | 3.41 |      | 4.76 | 2.85 | 2.95 |
| 3          | 3.37 | 4.90 |      | 3.80 | 2.81 |
| 4          | 2.15 | 2.72 | 3.38 |      | 2.17 |
| 5          | 2.26 | 2.91 | 3.65 | 2.81 |      |

ляться все более выражено, что обуславливает необходимость специальной цветокоррекции.

3. В статье предложена методика оценки выраженности ОМН для конкретного воспро-

изводящего устройства, которая дает возможность обосновать необходимость специализированной цветокоррекции, позволяющей компенсировать ОМН.

### Список литературы

1. Stockman A. Cone fundamentals and CIE standards // Current Opinion in Behavioral Sciences. 2019. Vol. 30. P. 87–93.  
doi: 10.1016/j.cobeha.2019.06.005
2. Vos J. J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer // Color Research and Application. 1978. Vol. 3. P. 125–128.  
doi: 10.1002/col.5080030309
3. Stiles W. S., Burch J. M. NPL colour-matching investigation: Final report // Optica Acta. 1959. Vol. 6, iss. 1. P. 1–26.  
doi: 10.1080/713826267
4. Mapping Quantitative Observer Metamerism of Displays / G. Trumpy, C. F. Andersen, I. Farup, O. Elezabi // J. of Imaging. 2023. Vol. 9, № 10. Art. № 227.  
doi: 10.3390/jimaging9100227
5. Stockman A., Sharpe L. T. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype // Vision Research. 2000. Vol. 40, iss. 13. P. 1711–1737.  
doi: 10.1016/S0042-6989(00)00021-3
6. Measuring and modeling display observer metamerism / Ch. Shen, R. Wanat, J. Yoo, J. Jang, M. Fairchild // The Visual Computer. 2022. Vol. 38. P. 3301–3310.  
doi: 10.1007/s00371-022-02546-7
7. Ramanath R. Minimizing observer metamerism in display systems // Color Res. Appl. 2009. Vol. 34, iss. 5. P. 391–398.  
doi: 10.1002/col.20523
8. Hu Y., Wei M., Luo M. R. Observer metamerism to display white point using different primary sets // Optics Express. 2020. Vol. 28, iss. 14. P. 20305–20323.  
doi: 10.1364/OE.395568
9. Long D. L., Fairchild M. D. Observer metamerism models and multiprimary display systems // SMPTE Motion Imaging J. 2016. Vol. 125, iss. 3. P. 18–29.  
doi: 10.5594/JMI.2016.2527401

10. 78-1: Correcting Metameric Failure of Wide Color Gamut Displays / B. Bodner, N. Robinson, R. Atkins, S. Daly // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2018. Vol. 49, iss. 1. P. 1040–1043.  
doi: 10.1002/sdtp.12190
11. Bai C. Y. H., Ou L. C. Observer variability study and method to implement observer categories for novel light source projection system // Color Res. Appl. 2021. Vol. 46, iss. 5. P. 1019–1033.  
doi: 10.1002/col.22634
12. Reducing the CIE colorimetric matching failure on wide color gamut displays / M. Ko, Y. Kwak, G. Seo, J. Kim, Y. Moon // Opt. Express. 2023. Vol. 31, iss. 4. P. 5670–5686.  
doi: 10.1364/OE.480001
13. A device and method for color contrast enhancement based on human color vision features / N. A. Obukhova, A. A. Motyko, A. A. Pozdeev, E. V. Vorobyev, M. K. Tchobanou // Patent WO, № 2023172154A1, 2023.
14. Special Metamerism Index: Change in Observer. Technical Report 80. Vienna, Austria: CIE Central Bureau, 1989.
15. Sarkar A. CIE Special Metamerism Index: Change in Observer // Encyclopedia of Color Science and Technology / Ed. by R. Luo. Berlin/Heidelberg: Springer, 2015. P. 1–9.  
doi: 10.1007/978-3-642-27851-8\_322-1
16. Fairchild M. D., Heckaman R. L. Metameric Observers: A Monte Carlo Approach // Proc. of the 21<sup>st</sup> Color and Imaging Conf. 2013. Vol. 21. P. 185–190.  
doi: 10.2352/CIC.2013.21.1.art00033
17. Asano Y. Individual Colorimetric Observers for Personalized Color Imaging. Ph.D. Thesis, Rochester Institute of Technology. NY, USA, Rochester, 2015.
18. Long D. L., Fairchild M. D. Modeling Observer Variability and Metamerism Failure in Electronic Color Displays // J. of Imaging Science and Technology. 2014. Vol. 58. P. 030402-1–030402-14.  
doi: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2014.58.3.030402

19. Xie H., Farnand S. P., Murdoch M. J. Observer metamerism in commercial displays // J. of the Optical Society of America A. 2020. Vol. 37, iss. 4. P. 61–69. doi: 10.1364/JOSAA.382228

20. Sharma G., Wu W., Dalal E. N. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Formula Specification and Examples // Color Research and Application. 2005. Vol. 30, iss. 1. P. 21–30. doi: 10.1002/col.20070

21. Kim A., Kim H., Park S. Measuring of the Perceptibility and Acceptability in Various Color Quality Measures // J. of the Optical Society of Korea. 2011. Vol. 15, iss. 3. P. 310–317. doi: 10.3807/JOSK.2011.15.3.310

22. Sarkar A. Identification and Assignment of Colorimetric Observer Categories and Their Applications in Color and Vision Sciences. Ph.D. Thesis, Université de Nantes, 2011.

23. Ketchen D. J., Shook C. L. The application of cluster analysis in strategic management research: an analysis and critique // Strategic Management J. 1996. Vol. 17. P. 441–458.

doi: 10.1002/(SICI)1097-0266(199606)17:6<3C441::AID-SMJ819%3E3.0.CO;2-G

24. Mathematical Discontinuities in CIEDE2000 Color Difference Computations / G. Sharma, W. Wu, E. Dalal, U. M. Celik // The 12<sup>th</sup> Color Imaging Conf. Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications, Scottsdale, Arizona, USA, 9 Nov. 2004. P. 334–339.

25. Basin Hopping as a General and Versatile Optimization Framework for the Characterization of Biological Macromolecules / B. Olson, I. Hashmi, K. Molloy, A. Shehu // Advances in Artificial Intelligence. 2012. Vol. 2012, iss. 1. Art. № 674832. doi: 10.1155/2012/674832

### Информация об авторах

**Мотыко Александр Александрович** – кандидат технических наук (2012), доцент (2019), старший научный сотрудник лаборатории "Вероятностные методы в анализе" факультета математики и компьютерных наук Санкт-Петербургского государственного университета, доцент кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 80 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное зрение; колориметрия; глубокое обучение.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: motyko.alexandr@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4241-4298>

**Обухова Наталия Александровна** – доктор технических наук (2009), декан факультета радиотехники и телекоммуникаций, зав. кафедрой телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 130 научных работ. Сфера научных интересов – компьютерное зрение и видеоаналитика; машинное обучение и цифровая обработка изображений; видеосистемы и системы поддержки принятия решений; smart-технологии формирования изображений.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: natalia172419@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1953-2085>

**Смирнов Константин Андреевич** – магистр по направлению "Радиотехника" (2022, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры телевидения и видеотехники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-исследователь лаборатории "Вероятностные методы в анализе" факультета математики и компьютерных наук Санкт-Петербургского государственного университета. Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – компьютерное зрение; колориметрия.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Проф. Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: KonstantinAndSmi@yandex.ru

<https://orcid.org/0009-0006-2509-1254>

### References

1. Stockman A. Cone Fundamentals and CIE Standards. Current Opinion in Behavioral Sciences. 2019, vol. 30, pp. 87–93.

doi: 10.1016/j.cobeha.2019.06.005

2. Vos J. J. Colorimetric and Photometric Properties of a 2° Fundamental Observer. Color

Research and Application. 1978, vol. 3, pp. 125–128.

doi: 10.1002/col.5080030309

3. Stiles W. S., Burch J. M. NPL Colour-Matching Investigation: Final Report. Optica Acta. 1959, vol. 6, iss. 1, pp. 1–26.

doi: 10.1080/713826267

4. Trumpy G., Andersen C. F., Farup I., Elezabi O. Mapping Quantitative Observer Metamerism of Displays. *J. of Imaging*. 2023, vol. 9, no. 10, art. no. 227. doi: 10.3390/jimaging9100227
5. Stockman A., Sharpe L. T. The Spectral Sensitivities of the Middle- and Long-Wavelength-Sensitive Cones Derived from Measurements in Observers of Known Genotype. *Vision Research*. 2000, vol. 40, iss. 13, pp. 1711–1737. doi: 10.1016/S0042-6989(00)00021-3
6. Shen Ch., Wanat R., Yoo J., Jang J., Fairchild M. Measuring and Modeling Display Observer Metamerism. *The Visual Computer*. 2022, vol. 38, pp. 3301–3310. doi: 10.1007/s00371-022-02546-7
7. Ramanath R. Minimizing Observer Metamerism in Display Systems. *Color Res. Appl.* 2009, vol. 34, iss. 5, pp. 391–398. doi: 10.1002/col.20523
8. Hu Y., Wei M., Luo M. R. Observer Metamerism to Display White Point Using Different Primary Sets. *Optics Express*. 2020, vol. 28, iss. 14, pp. 20305–20323. doi: 10.1364/OE.395568
9. Long D. L., Fairchild M. D. Observer Metamerism Models and Multiprimary Display Systems. *SMPTE Motion Imaging J.* 2016, vol. 125, iss. 3, pp. 18–29. doi: 10.5594/JMI.2016.2527401
10. Bodner B., Robinson N., Atkins R., Daly S. 78-1: Correcting Metameric Failure of Wide Color Gamut Displays. *SID Symp. Digest of Technical Papers*. 2018, vol. 49, iss. 1, pp. 1040–1043. doi: 10.1002/sdtp.12190
11. Bai C. Y. H., Ou L. C. Observer Variability Study and Method to Implement Observer Categories for Novel Light Source Projection System. *Color Res. Appl.* 2021, vol. 46, iss. 5, pp. 1019–1033. doi: 10.1002/col.22634
12. Ko M., Kwak Y., Seo G., Kim J., Moon Y. Reducing the CIE Colorimetric Matching Failure on Wide Color Gamut Displays. *Opt. Express*. 2023, vol. 31, iss. 4, pp. 5670–5686. doi: 10.1364/OE.480001
13. Obukhova N. A., Motyko A. A., Pozdeev A. A., Vorobyev E. V., Tchobanov M. K. A Device and Method for Color Contrast Enhancement Based on Human Color Vision Features. *Patent WO*, № 2023172154A1, 2023.
14. Special Metamerism Index: Change in Observer. *Technical Report 80*. CIE Central Bureau, Vienna, Austria, 1989.
15. Sarkar A. CIE Special Metamerism Index: Change in Observer. *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Ed. by R. Luo. Berlin/Heidelberg, Springer, 2015, pp. 1–9. doi: 10.1007/978-3-642-27851-8\_322-1
16. Fairchild M. D., Heckaman R. L. Metameric Observers: A Monte Carlo Approach. *Proc. of the 21<sup>st</sup> Color and Imaging Conf.* 2013, vol. 21, pp. 185–190. doi: 10.2352/CIC.2013.21.1.art00033
17. Asano Y. Individual Colorimetric Observers for Personalized Color Imaging. Ph.D. Thesis, Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, 2015.
18. Long D. L., Fairchild M. D. Modeling Observer Variability and Metamerism Failure in Electronic Color Displays. *J. of Imaging Science and Technology*. 2014, vol. 58, pp. 030402-1–030402-14. doi: 10.2352/J.ImagingSci.Technol.2014.58.3.030402
19. Xie H., Farnand S. P., Murdoch M. J. Observer Metamerism in Commercial Displays. *J. of the Optical Society of America A*. 2020, vol. 37, iss. 4, pp. 61–69. doi: 10.1364/JOSAA.382228
20. Sharma G., Wu W., Dalal E. N. The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Formula Specification, and Examples. *Color Research and Application*. 2005, vol. 30, iss. 1, pp. 21–30. doi: 10.1002/col.20070
21. Kim A., Kim H., Park S. Measuring of the Perceptibility and Acceptability in Various Color Quality Measures. *J. of the Optical Society of Korea*. 2011, vol. 15, iss. 3, pp. 310–317. doi: 10.3807/JOSK.2011.15.3.310
22. Sarkar A. Identification and Assignment of Colorimetric Observer Categories and Their Applications in Color and Vision Sciences. Ph.D. Thesis, Université de Nantes, 2011.
23. Ketchen D. J., Shook C. L. The Application of Cluster Analysis in Strategic Management Research: an Analysis And Critique. *Strategic Management J.* 1996, vol. 17, pp. 441–458. doi: 10.1002/(SICI)1097-0266(199606)17:6%3C441::AID-SMJ819%3E3.0.CO;2-G
24. Sharma G., Wu W., Dalal E., Celik U. M. Mathematical Discontinuities in CIEDE2000 Color Difference Computations. *The 12<sup>th</sup> Color Imaging Conf. Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, Scottsdale, Arizona, USA, 9 Nov. 2004, pp. 334–339.
25. Olson B., Hashmi I., Molloy K., Shehu A. Basin Hopping as a General and Versatile Optimization Framework for the Characterization of Biological Macromolecules. *Advances in Artificial Intelligence*. 2012, vol. 2012, iss. 1, art. no. 674832. doi: 10.1155/2012/674832

### Information about the authors

**Alexander A. Motyko**, Cand. Sci. (Eng.) (2012), Associate Professor (2019), Senior Researcher of the Laboratory "Probabilistic Methods in Analysis" of Faculty of Mathematics and Computer Science of St Petersburg State University, Associate Professor of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: computer vision; colorimetry; deep learning. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: motyko.alexandr@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-4241-4298>

**Natalia A. Obukhova**, Dr Sci. in Engineering (2009), Dean of the Faculty of Radio Engineering and Telecommunications, Head of the Department of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 130 scientific publications. Area of expertise: computer vision and video analytics; machine learning and digital image processing; video systems and decision support systems; smart imaging technologies. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: natalia172419@yandex.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-1953-2085>

**Konstantin A. Smirnov** – Master's degree in Radio Engineering (2022, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate student of Television and Video Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University. Researcher of the Laboratory of Probabilistic Methods in Analysis of Faculty of Mathematics and Computer Science of St Petersburg State University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: computer vision; colourimetry. Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia  
E-mail: KonstantinAndSmi@yandex.ru  
<https://orcid.org/0009-0006-2509-1254>

---