

# Взвешивание значимости различных цветов на основе субъективных оценок цветовых предпочтений<sup>1</sup>

П. БОДРОГИ, Д. КАРЕЛЛА, Т.К. КХАН

Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия

E-mail: bodrogi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

## Аннотация

В настоящей работе наблюдатели осуществляли субъективную оценку цветовых предпочтений применительно к разным сочетаниям цветных объектов в разных сценах. При этом наблюдатели должны были оценить значимость (так называемый вес) каждой из семи цветовых групп или групп цветовых тонов (*hue*) (телесной, красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей и лиловой). Сцены освещались светом с высокими общими индексами цветопередачи и четырьмя различными коррелированными цветовыми температурами (КЦТ). Красному и оранжевому цветам были присвоены самые высокие веса (это означает, что красный и оранжевый цвета являются наиболее важными при оценке субъективных цветовых предпочтений); жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными, в то время как телесному цвету был присвоен небольшой вес. КЦТ оказывает лишь небольшое влияние на цветовые предпочтения, в то время как характер сцены (например, «офис» или «картина») влияет на них очень сильно. В рамках одной цветовой группы объекты с большей чистотой цвета (*chroma*) имеют больший вес во всех сценах. Последний результат позволил получить формулу для расчёта весов.

**Ключевые слова:** взвешивание значимости, формула весов, субъективная оценка, цветовое предпочтение, группы оттенков, коррелированная цветовая температура (КЦТ), показатель цветового различия (*CRI*).

## 1. Введение

Субъективная оценка цветовых предпочтений привлекла большое внимание исследователей. Цветовое предпочтение можно определить как

субъективную оценку того, насколько наблюдателю нравится цветовой облик находящихся в помещении цветных объектов [1], причём эта оценка зависит от наблюдаемой сцены и области применения освещения [2]. Известно, что на цветовое предпочтение влияют следующие физические параметры осветительной установки: чистота цвета (*chroma*) и цветовой тон (*hue*) объекта при освещении источником света с конкретным спектром излучения, индекс точности воспроизведения цвета (*colour fidelity index*) [3], размер области, охватываемой цветовой гаммой (*colour gamut size*) [4, 5], форма области, охватываемой цветовой гаммой [6], коррелированная цветовая температура (КЦТ) источника света [7, 8] и характерный уровень освещённости [9–11] на плоскостях, на которых расположены цветные объекты. При оценке цветовых предпочтений, наблюдатели внимательно изучают находящиеся в помещении цветные объекты, обращая больше или меньше внимания на присутствующие в освещённой сцене цветные объекты, относящиеся к той или иной цветовой категории или группе (например, красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей или лиловой). Другими словами, разным цветовым группам наблюдатели присваивают разные веса. Это «взвешивание» и является предметом настоящей статьи. Проблема взвешивания рассматрива-

ется в литературе следующим образом. В [12] при определении так называемого индекса восхваления (*flattery index*) (разновидность индекса цветовых предпочтений) использовались следующие веса (*W*):  $W = 5$  для цветных образцов *CIE TCS-1* и *TCS-3* – *TCS-8* и  $W = 15$  для *TCS-2* (тёмный серовато-жёлтый цвет) и *TCS-14* (умеренный оливково-зелёный цвет или цвет листьев). Самый высокий вес  $W = 35$  был присвоен образцу *TCS-13* (светлый желтовато-розовый цвет или телесный цвет). Однако эти веса были умозрительными, так как они не были получены в результате проведения визуальных экспериментов. Насыщенные цвета (красный, жёлтый, зелёный, синий, лиловый) в процесс определения индекса восхваления включены не были ([12, табл. II]).

Позже были получены процентные соотношения количества случаев, когда все цветовые тона оценивались по трём главным критериям их значимости при освещении тёпло-белым и холодно-белым светом; при этом наблюдатели оценивали естественность и «живость» (*vividness*) цветных объектов (свежие фрукты, овощи и карта цветов), освещённых разными источниками света [13]. Результирующие веса объектов, принадлежащих к разным цветовым группам, приведены в табл. 1. (Точнее, задача наблюдателей состояла в том, чтобы в каждой сцене выбрать три главных, по их мнению, цветовых тона [13]). Как видно из табл. 1, красно-оранжево-жёлтые объекты оказались наиболее значимыми, а КЦТ оказала на вес лишь незначительное влияние.

В другом эксперименте [14] второстепенная задача наблюдателей состояла в том, чтобы проранжировать восемь цветных объектов (реальных, а не искусственных), присутствующих в сцене, в соответствии с их значимостью, оценивая при этом сходство их внешнего вида при освещении дву-

Таблица 1

Процент случаев, когда цветовому тону наблюдатели ставили одну из трёх высших оценок при оценке цветопередачи под тёпло-белым и холодно-белым светом [13]

| Цвет               | Красный | Оранжевый | Жёлтый | Жёлто-зелёный | Зелёный | Бирюзовый | Синий | Лиловый |
|--------------------|---------|-----------|--------|---------------|---------|-----------|-------|---------|
| Тёпло-белый свет   | 91      | 69        | 71     | 12            | 27      | 8         | 2     | 20      |
| Холодно-белый свет | 90      | 64        | 74     | 15            | 27      | 7         | 2     | 21      |

<sup>1</sup> Перевод с англ. А.Г. Савицкой

Общие средние веса ( $W_i$ ) и их среднеквадратические отклонения (СКО) для всех наблюдателей и всех сцен ( $i = 1-7$ ), рассмотренных в настоящей статье. Последние столбцы: сравнение с весами (относительно красного), приведёнными в [7, 13–16] (ссылки на литературу приведены в верхней строке).  $W_i'$  – общий средний вес без учёта картины;  $C_i$  – характеристическое для цветовой группы значение чистоты цвета *SIECAM02*, полученное на основе результатов спектральных измерений;  $W_i^*$  – значение  $W_i$  относительно красного цвета (красному цвету соответствует  $W_i^* = 1,00$ );  $r_1$  – коэффициент корреляции Пирсона между весом из литературы и полученными в настоящей работе значениями  $W_i$  (коричневый телесный цвет был рассмотрен только в [14]);  $r_2$  – коэффициент корреляции Пирсона между весом из литературы и данными, полученными в настоящей работе (без учёта картины)

| $i$ : цвет             | $W_i$ | СКО  | $W_i'$ | $C_i$ | $W_i^*$ | [13] | [14] | [15] | [16] | [7]  |
|------------------------|-------|------|--------|-------|---------|------|------|------|------|------|
| 1: коричневый/телесный | 1,69  | 1,11 | 1,72   | 24,1  | 0,50    | –    | 0,75 | –    | –    | –    |
| 2: красный             | 3,40  | 1,10 | 3,36   | 68,5  | 1,00    | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| 3: оранжевый           | 3,48  | 1,30 | 3,65   | 64,6  | 1,03    | 0,73 | 1,25 | 0,50 | 0,89 | 0,72 |
| 4: жёлтый              | 2,68  | 1,30 | 2,75   | 53,1  | 0,79    | 0,80 | 0,50 | 0,33 | 0,19 | 0,15 |
| 5: зелёный             | 2,81  | 1,16 | 2,76   | 46,6  | 0,83    | 0,30 | 0,50 | 0,61 | 0,86 | 0,47 |
| 6: синий               | 2,89  | 1,19 | 2,80   | 45,6  | 0,85    | 0,02 | 0,50 | 0,28 | 0,35 | 0,37 |
| 7: лиловый             | 2,22  | 1,21 | 2,24   | 34,5  | 0,65    | 0,23 | 0,25 | 0,22 | 0,46 | 0,43 |
| $r_1$                  | –     | –    | –      | –     | –       | 0,58 | 0,58 | 0,69 | 0,68 | 0,72 |
| $r_2$                  | –     | –    | –      | –     | –       | 0,63 | 0,63 | 0,62 | 0,64 | 0,68 |

ма источниками света (ранжирование осуществлялось в рамках экспериментального исследования точности воспроизведения света (*colour fidelity*)). Наблюдатели должны были присвоить баллы 1 (самый высокий), 2, 3, 4 или 5 (самый низкий) только пяти объектам (тем, которые были сочтены наиболее важными) из всего набора из восьми объектов. Были получены следующие средние баллы: оранжевый цвет – 1, цвет красная роза – 2, собственная рука – 3; лимон, банан, салат, синесиреневая роза – 4, лиловый лук – 5. Эти результаты, в свою очередь, подчёркивают важную роль красно-оранжевых объектов (табл. 2). Обсуждение табл. 2 будет дополнительно проведено в разделах 2 и 3.

В дальнейшем восемнадцать наблюдателей провели оценку цветовых предпочтений в случае цветных объектов (цветные ткани, карта цветов, банки с напитками, фрукты), помещённых в смотровую кабину [15]. Наиболее сильно на сделанные наблюдателями оценки повлияли красный, зелёный и оранжевый цвета (табл. 2). В другом эксперименте испытуемые оценивали помещение, заполненное различными цветными объектами, по трём шкалам: «насыщенный – тусклый», «нормальный – смещённый» и «нравится – не нравится» [16]. Доля наблюдателей, которые при проведении этих оценок включили определённую цветовую группу в тройку самых важных,

составила примерно 66 % для оранжевого цвета, 14 % для жёлтого цвета, 64 % для зелёного цвета, 26 % для синего цвета, 34 % для лилового цвета и 14 % для белого цвета (приблизительные процентные значения можно увидеть на приведённой в [16] диаграмме). Эти результаты подчёркивают, в свою очередь, важность красного и оранжевого цветов, как правило, играющих более важную роль, чем другие цвета. Зелёный цвет также получил высокую оценку, возможно, потому, что в наблюдаемой сцене присутствовали насыщенные зелёные объекты (табл. 2).

В другом исследовании наблюдатели оценивали внешний вид помещения при различных условиях освещения, исходя при этом из того, чувствовали ли они, что освещение делает цвет объектов нормальным или смещённым, насыщенным или тусклым, и из своего мнения о том, нравится или не нравится им то, как освещение выделяло объекты [7]. Объекты различных цветов включали в себя печатные изображения, одежду, различные цветные потребительские товары с упаковками, маркированными чернилами или красителями, и природные объекты, такие как цветы. Доля наблюдателей, которые при проведении этих оценок включили определённую цветовую группу в тройку самых важных, составила примерно 94 % для

красного цвета, 68 % для оранжевого цвета, 14 % для жёлтого цвета, 44 % для зелёного цвета, 35 % для синего цвета, 40 % для лилового цвета и 12 % для белого цвета (табл. 2) (приблизительные процентные значения можно увидеть на приведённой в [7] диаграмме). Приведённые выше результаты подтверждают, что веса  $W_i$  различных цветовых групп (красной, оранжевой, жёлтой, зелёной, синей и т.д.) оказывают существенное влияние на суждения о цветовых предпочтениях, и это следует учитывать при определении индекса цветового предпочтения (*colour preference index*)  $CP$ . Это можно записать, например, в виде:

$$CP = (W_1 \cdot CP_1 + W_2 \cdot CP_2 + \dots + W_N \cdot CP_N). \quad (1)$$

где  $W_i$  – вес цветовой группы  $i$  ( $i = 1, \dots, N$ ), а  $CP_i$  – индекс цветового предпочтения, определённый для  $i$ -ой цветовой группы. Несмотря на их важность, эти веса не учитываются в широко используемых сегодня метриках цветопередачи. Зависимость весов от состава содержащей объекты сцены (например, от наличия в сцене насыщенных зелёных объектов или объектов с сильным эмоциональным воздействием, таких как картины) в сочетании с влиянием КЦТ источника света систематически не исследовалась. Соответственно, цель настоя-

Таблица 3

Пол (П), возраст (В, лет) и культурные корни (К) наблюдателей (Н)  
(Г- Германия, К – Китай, В – Вьетнам)

|   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Н | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| П | Ж  | М  | М  | Ж  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | Ж  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | М  | Ж  | М  |
| В | 34 | 29 | 24 | 25 | 24 | 23 | 25 | 21 | 47 | 33 | 31 | 28 | 27 | 30 | 31 | 33 | 27 | 22 | 36 | 24 | 26 | 24 | 53 |
| К | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | К  | Г  | Г  | Г  | Г  | В  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  | Г  |

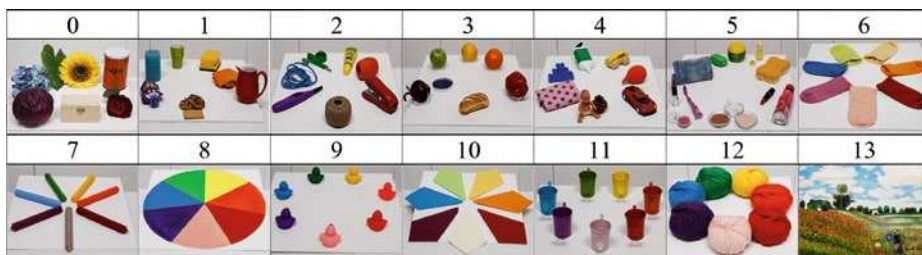


Рис. 1. Сцены (совокупность цветных объектов или картина). Верхний ряд, слева направо: 0 – тренировочная сцена, 1 – кухня; 2 – офис; 3 – пищевые продукты; 4 – детская комната; 5 – ванная; 6 – ткани. Нижний ряд, слева направо: 7 – свечи; 8 – цветной круг; 9 – утки; 10 – салфетки; 11 – лейки; 12 – мотки шерсти; 13 – картина (ручная репродукция «Макового поля» Моне)

щей статьи – ответить на следующие вопросы:

1. Каковы веса различных групп цветных объектов (например, красных, оранжевых, жёлтых, зелёных и т.д.) при определении цветового предпочтения? Метрика цветовых предпочтений должна учитывать эти веса, (см. уравнение (1)).

2. Является ли влияние КЦТ существенным? Данные, приведённые в табл. 1, не говорят о существенном влиянии КЦТ.

3. Влияет ли состав сцены с цветными объектами на веса разных цветов? Сцена может, например, содержать картину, вызывающую более сильную эмоциональную реакцию по сравнению с нейтральными офисными объектами. Сцена также может быть заполнена более или менее на-

сыщенными объектами, цвета которых относятся к определённой группе цветовых тонов, и эти хроматические различия также могут влиять на веса различных цветов. Например, если бы в сцене в качестве представителя группы зелёных тонов использовался насыщенный зелёный цвет, то это могло бы привести к увеличению веса этого цвета.

Чтобы ответить на поставленные выше вопросы, был проведён описанный ниже зрительный психофизический эксперимент.

## 2. Методика проведения эксперимента

Наблюдатели должны были решить, нравится ли им, и если да, то в какой степени, цветовой облик той или

Рис. 2. Опросный лист для оценки степени внимания (в настоящей статье это называется весом), уделяемого разным цветным группам (цветам) при определении предпочтений в части цветового облика совокупности цветных объектов или картины (так называемой сцены, см. рис. 1). Цвета: коричневый/телесный, красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, синий и лиловый. Оценки уделяемого внимания: 0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много»

| Категории рейтинга: | Совсем нет<br>0 | Очень мало<br>1 | Мало<br>2 | Немного<br>3 | Много<br>4 | Очень много<br>5 |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------|--------------|------------|------------------|
| Коричневый/телесный |                 |                 |           |              |            |                  |
| Красный             |                 |                 |           |              |            |                  |
| Оранжевый           |                 |                 |           |              |            |                  |
| Жёлтый              |                 |                 |           |              |            |                  |
| Зелёный             |                 |                 |           |              |            |                  |
| Синий               |                 |                 |           |              |            |                  |
| Лиловый             |                 |                 |           |              |            |                  |

иной из двенадцати различных совокупностей цветных объектов, а также картины (так называемые «сцены», см. рис. 1) при равных 3200, 4200, 5000 и 5500 К КЦТ источника света, освещающего сцену. При ответе на этот вопрос наблюдателям приходилось оценивать по шкале вопросника, насколько большое внимание они уделяли каждой из следующих цветовых групп (короче, цветов): коричневым и телесным цветам (они считались относящимися к одной категории), а также красным, оранжевым, жёлтым, зелёным, синим и лиловым цветам (рис. 2). Для каждого цвета наблюдатель должен был выбрать только одну оценку: 0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много». Как отмечалось во введении, эти оценки называют «весами» соответствующих цветов. Каждая сцена была скомпонована из искусственных объектов разного цвета (кроме картины, которая была приобретена целиком), так что все сцены содержали все семь цветов.

Наблюдатели должны были заполнить отдельную анкету для каждой из 13 сцен и для каждой из 4 КЦТ. Цветные объекты и картина были по-разному расположены на белом фоне на горизонтальной плоскости стола, на которой горизонтальная освещённость была равна  $2300 \text{ лк} \pm 4\%$  (максимальное отклонение) при всех четырёх КЦТ. Причиной выбора такого высокого уровня освещённости было намерение исследовать веса при наилучшем уровне цветовых предпочтений, которое согласно результатам предыдущих исследований обеспечивается при освещённостях, превышающих 2000 лк [11]. Четыре КЦТ, которые измерялись с использованием расположенной на столе белой образцовой пластины, были равны  $3228 \pm 55$ ,  $4184 \pm 110$ ,  $5000 \pm 24$  и  $5541 \pm 114$  К. Знак  $\pm$  указывает на максимальные различия КЦТ в разных местах стола (рис. 1).

В эксперименте приняли участие 23 наблюдателя (4 женщины и 19 мужчин), в состав которых вошли 21 немец, 1 вьетнамец и 1 китаец, причём на момент проведения эксперимента все они проживали в Германии не менее трёх лет (табл. 3). Все наблюдатели были сотрудниками лаборатории, в которой работают авторы, и все они проявляли интерес к све-



тотехнике и имели (более или менее большой) опыт работы в этой области. Они были в возрасте от 21 до 53 лет (среднее значение: 29,4). Все наблюдатели имели хорошую или исправленную остроту зрения и нормальное цветовое зрение.

Войдя в экспериментальную комнату (с окрашенными в белый цвет стенами), наблюдатель должен был в течение 2 мин адаптироваться к случайно выбранной начальной КЦТ. В этот период были разъяснены задание и вопросник. Затем наблюдатель должен был в течение 30 с посмотреть на сцену № 0 (тренировочную сцену, см. рис. 1) при этой КЦТ и заполнить анкету (рис. 2). После этого наблюдатель просматривал 13 сцен (по 30 с на каждую) и оценивал (без ограничения по времени) их одну за другой. Затем устанавливалась следующая случайно выбранная КЦТ, и наблюдатель должен был адаптироваться к ней в течение 2 мин, после чего выполнить вышеописанную процедуру оценки веса. Каждый наблюдатель оценивал каждую сцену при каждой КЦТ только один раз (повторов не было).

Четыре спектра (3200, 4200, 5000 и 5500 К) были получены с помощью стабильного мощного высокоэффективного четырехканального СД генератора света, включающего в себя красный, зелёный, синий и тепло-белый каналы. На рис. 3 показана их относительная спектральная яркость, а в табл. 4 приведены колориметрические характеристики этих спектров. Как следует из табл. 4, все спектры имеют высокие индексы точности воспроизведения цвета ( $R_f = 91-92$ ) с белой точкой в окрестности линии чёрного тела или линии дневного света ( $|Duv| < 0,002$ ).

Спектральные коэффициенты отражения цветных объектов в сценах (рис. 1) измеряли с помощью спектрорадиометра *Konica-Minolta CS2000* с полем измерения  $1^\circ$  при освещении сцен галогенной лампой накаливания. Сначала измеряли спектральную энергетическую яркость горизонтально расположенной на столе белой образцовой пластины, а затем заменяли эту пластину объектом и измеряли спектральную энергетическую яркость объекта в том же направлении, после чего рассчитывали спектральные коэффициенты энергетической яркости. Эта процедура была повторена для всех объектов и для всех сцен. В случае

Рис. 3. Относительная спектральная энергетическая яркость для четырёх излучений (3200, 4200, 5000 и 5500 К), использовавшихся при проведении эксперимента

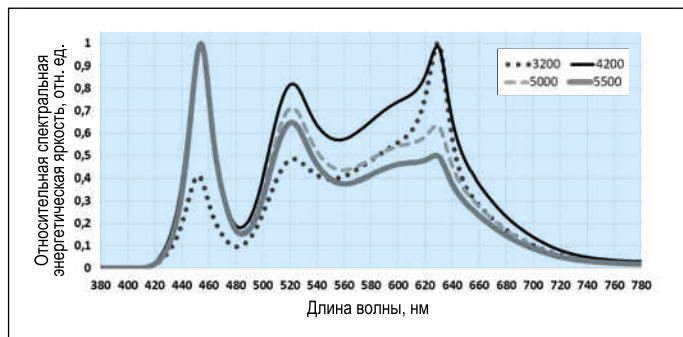
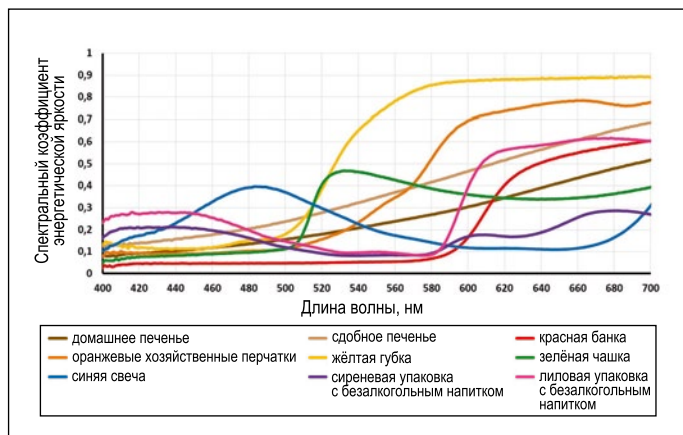


Рис. 4. Спектральные коэффициенты энергетической яркости объектов сцены «кухня» (пример), см. рис. 1



картины были измерены тридцать два характерных элемента поверхности (которые представляли семь цветовых групп, см. рис. 2). На рис. 4 в качестве примера показаны спектральные коэффициенты энергетической яркости объектов сцены «кухня».

С использованием полученных спектральных коэффициентов отражения, для всех измеренных цветных поверхностей со следующими параметрами *CIECAM02*:  $D = 1$  (принудительное (*forced*)),  $F = 1,0$ ,  $c = 0,69$  и  $N_c = 1,0$  (среднее окружение (*average surround*)), были рассчитаны значения *CIECAM02*  $H$ ,  $S$  и  $J$ . На рис. 5 для КЦТ 3200 К на графике  $H-S$  *CIECAM02* отображены измеренные цвета объектов, использовавшихся в 13 сценах.

### 3. Результаты и обсуждение

#### 3.1. Общие средние веса цветов и межличностные различия

Табл. 2 содержит общие средние веса семи цветов, значения их среднеквадратических отклонений (*СКО*) и характеристические значения чистоты цвета различных цветов, полученные на основе результатов спектральных измерений (раздел 2), а также используемые для сравнения литературные данные, описанные в разде-

ле 1. Как следует из табл. 2, красный и оранжевый цвета получили наивысшие средние оценки (3,4–3,5, то есть между «немного» и «много»), жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными (2,7–2,9, то есть «немного»), лиловый цвет имел меньший вес (2,2 т.е. «мало»), в то время как коричневый/телесный цвет получил оценку между «очень мало» и «мало» (1,7). Из табл. 2 также следует, что обусловленное различиями между наблюдателями общее среднее квадратическое отклонение (*СКО*) весов, определённых наблюдателями для всех четырёх КЦТ, тринадцати сцен и семи цветов, равнялось 1,3.

Если рассмотреть сцены по отдельности, то самое высокое значение общего *СКО* имело место в случае сцены № 13, то есть для картины (1,5), что, возможно, обусловлено большими межличностными различиями в восприятии при оценке этого объекта («Маковое поле» Моне), оказывающего эмоциональное воздействие и более сложное по сравнению с характеризирующей самым низким *СКО* (1,2) более декоративной и простой сценой № 4 (детская комната). Мы также рассчитали усреднённые значения общих оценок без учёта картины ( $Wi'$  в четвёртом столбце табл. 2), и получили результаты, немного отличающиеся от полученных с учётом картины ( $Wi$  во

**Колориметрические характеристики четырёх спектров (3200, 4200, 5000 и 5500 К), использовавшихся при проведении эксперимента**

| Номинальное значение КЦТ, К | 3200    | 4200    | 5000   | 5500   |
|-----------------------------|---------|---------|--------|--------|
| $R_a$                       | 95      | 96      | 95     | 95     |
| $R_f$                       | 92      | 91      | 91     | 91     |
| $R_g$                       | 105     | 103     | 103    | 104    |
| Duv                         | -0,0006 | -0,0003 | 0,0017 | 0,0019 |
| КЦТ, К                      | 3228    | 4184    | 5000   | 5541   |

Таблица 4

работы могут иметь следующие причины:

1. Разные задачи, например, оценка сходства цветового облика при освещении двумя источниками света [14] в сравнении с оценкой цветовых предпочтений в случае одного источника света.

2. Наблюдение куба [14] в сравнении со свободным наблюдением (как в настоящей работе).

3. Различие в выборе оцениваемых цветных объектов (например, в [16] были включены несколько насыщенных зелёных объектов).

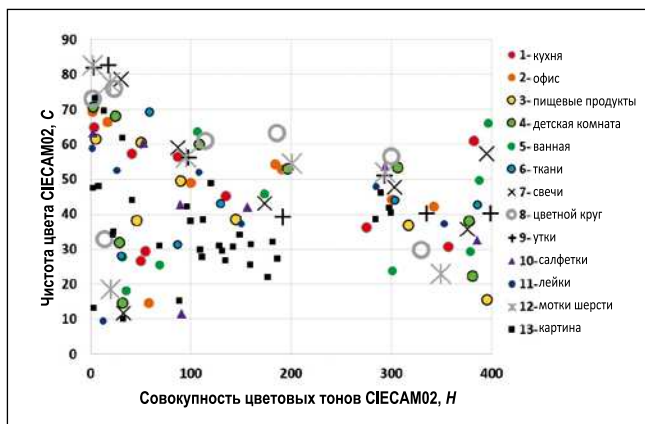
Мы также вычислили коэффициенты корреляции Пирсона между полученными нами результатами (без учёта картины) и литературными данными, см. последнюю строку табл. 2. Мы обозначили это как  $r_2$  (в отличие от коэффициентов  $r_1$ , которые были получены с учётом картины). Разница между  $r_1$  и  $r_2$  не была существенной ни для одних из пяти литературных данных ( $p > 0,88$ , двусторонний  $r$ -z критерий Фишера).

**Результаты трёхстороннего дисперсионного анализа (ANOVA), и их оценка при помощи пакета программ SPSS® (частная эта в квадрате,  $\eta^2$ )**

| Переменные         | df  | F       | $\sigma$ | $\eta^2$ |
|--------------------|-----|---------|----------|----------|
| КЦТ                | 3   | 8,747   | 0,000    | 0,003    |
| Сцена              | 12  | 19,109  | 0,000    | 0,030    |
| Цвет               | 6   | 384,351 | 0,000    | 0,234    |
| КЦТ * Сцена        | 36  | 0,568   | 0,982    | 0,003    |
| КЦТ * Цвет         | 18  | 2,927   | 0,000    | 0,007    |
| Сцена * Цвет       | 72  | 24,191  | 0,000    | 0,188    |
| КЦТ * Сцена * Цвет | 216 | 0,602   | 1,000    | 0,017    |

Таблица 5

Рис. 5. Цвета использованных в сценах объектов на графике H-C CIECAM02 при КЦТ 3200 К (пример; см. рис. 3).  $H = 0$  и  $H = 400$  – характерный красный,  $H = 100$  – характерный жёлтый,  $H = 200$  – характерный зелёный,  $H = 300$  – характерный синий



### 3.2 Совместное влияние трёх независимых переменных – цвета, сцены и КЦТ

В табл. 5 приведены результаты трёхстороннего дисперсионного анализа (ANOVA) и их оценка при помощи пакета программ SPSS®.

Как следует из табл. 5, хотя влияние КЦТ на сделанные наблюдателями оценки и было существенным, величина его оказалась небольшой (0,003). Наибольший эффект (0,234) имел место в случае независимой переменной «цвет», причём значительное влияние оказывает также и переменная «сцена» (0,030). Взаимосвязи между цветом и КЦТ (слабая зависимость,  $\eta^2 = 0,007$ ) и между цветом и сценой (сильная зависимость,  $\eta^2 = 0,188$ ) оказались существенными.

### 3.3 Влияние КЦТ

Слабое, но существенное влияние КЦТ ( $\eta^2 = 0,003$ ) на веса продемонстрировано на рис. 6, на котором можно заметить две пары непересекающихся доверительных интервалов: коричневый/телесный цвет (№ 1) при 4200 К имеет меньший вес, чем при других КЦТ (т.е. он привлёк меньше внимания, когда наблюдатели оценивали свои цветовые предпоч-

втором столбце табл. 2). Если сравнивать четыре КЦТ, то общие СКО весов варьировались от 1,27 до 1,36. При индивидуальном рассмотрении цветов было установлено, что для жёлтого и оранжевого цветов общее СКО оказалось равным 1,3, для коричневого/телесного и красного цветов – примерно 1,1, а для зелёного, синего и лилового цветов – примерно 1,2.

В последних столбцах табл. 2 средние веса  $W_i$  сравниваются с литературными данными, полученными из источников, описанных во введении. Эти данные были преобразованы в значения весов, приведённых к весу красной группы (вес которой считался равным 1,00). Для случая, описанного в [13], мы усреднили дан-

ные, приведённые в [13, табл. 1] для тёпло-белого и холодно-белого цветов, и получили умеренную положительную корреляцию со значениями  $W_i$ , полученными в настоящей работе ( $r_1 = 0,58$ ; см. табл. 2). Для случая, описанного в [14], мы вычли медианные приоритетные данные (median priority data) из 6, а затем соотнесли их с красным цветом (табл. 2). Между этими данными и значениями  $W_i$ , полученными в настоящей работе, была обнаружена умеренная положительная корреляция ( $r_1 = 0,58$ ). Для данных, приведённых в [7, 15, 16], была получена умеренно хорошая корреляция (со значениями  $r_1$  между 0,68 и 0,72).

Различия между литературными данными и результатами настоящей

тения при 4200 К), тогда как синий цвет (№ 6) имеет меньший вес при 3200 К (то есть синий цвет привлекает меньше внимания при освещении тёпло-белым светом).

### 3.4 Влияние сцены

На рис. 7 продемонстрировано совместное влияние параметров «сцена» и «цвет» ( $\eta^2 = 0,188$ ) на переменную *относительный вес* (по отношению к весу коричневого/телесного цвета (№ 1) для соответствующей сцены), рассчитываемый по формуле  $R_{ik} = W_{ik} / W_{1k}$ , где  $W_{1k}$  – вес коричневого/телесного цвета, а  $W_{ik}$  – средний вес, присвоенный всеми наблюдателями цвету  $i$  ( $i = 1-7$ ; см. номера цветов в табл. 2) при наблюдении сцены  $k$  ( $k = 1-13$ , см. рис. 1).

На рис. 7 видны явные различия между распределениями относительного веса всех семи цветов. Используя в качестве входных данных  $13 \times 7$  средних относительных весов  $R_{ik}$ , приведённых на рис. 7, 13 сцен были автоматически сгруппированы в программе SPSS® методом кластерного анализа  $k$ -средних с равным четырёх фиксированным количеством кластеров. Все 13 сцен были сгруппированы в соответствии со сходством или различием соответствующих им распределений относительных весов семи цветов (рис. 7). В табл. 6 приведены итоговые относительные веса семи цветов в четырёх центрах кластеров сцен, найденных методом кластерного анализа  $k$ -средних, которые сравниваются с общими относительными весами, рассчитанными по данным табл. 2 (последний столбец табл. 6).

Как следует из табл. 6, четыре центра кластеров демонстрируют характерные распределения относительных весов среди семи цветов. Эти распределения отличаются от распределения общего относительного веса, отражённого в последнем столбце. Например, «красный» центр кластера «Картина» имеет относительный вес 2,86, и это больше, чем общий средний относительный вес красного цвета (2,00). Чтобы обозначить принадлежность сцен к тому или иному кластеру, мы назвали четыре кластера следующим образом: «Офис», «Картина», «Кухня» и «Салфетки». Сцены «офис» и «лейки» относятся к 1-му кластеру («Офис»), «картина» относится ко 2-му кластеру («Картина»), «кухня»,

Рис. 6. Слабое ( $\eta^2 = 0,003$ ), но существенное (ANOVA:  $df = 3$ ,  $F = 8,747$ ;  $p < 0,0001$ ) влияние КЦТ на веса различных цветов. 1 – коричневый/телесный; 2 – красный; 3 – оранжевый; 4 – жёлтый; 5 – зелёный; 6 – синий; 7 – лиловый. Показаны 95 % доверительные интервалы (межличностное непостоянство) средних весов

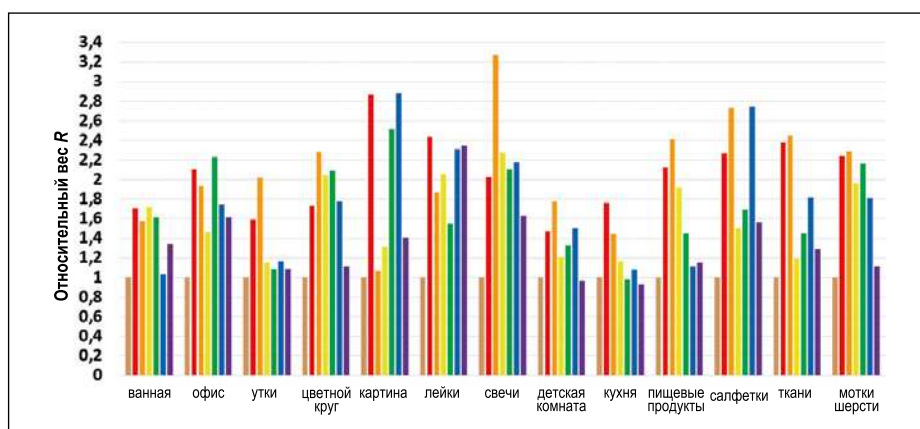
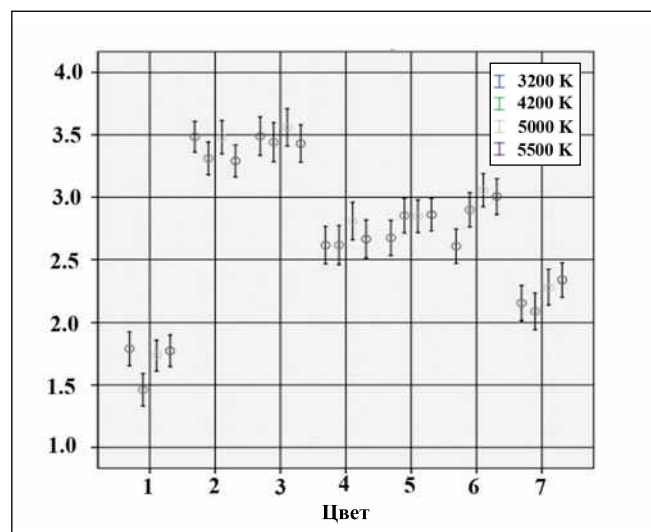


Рис. 7. Совместное влияние сцены и цвета ( $\eta^2 = 0,188$ ). Средние *относительные веса* (по отношению к весу коричневого/телесного цвета для соответствующей сцены), присвоенные наблюдателями. Цветные столбцы: первый – коричневый/телесный цвет; второй – красный цвет; третий – оранжевый цвет; четвёртый – жёлтый цвет; пятый – зелёный цвет; шестой – синий цвет; седьмой – лиловый цвет

«продукты питания», «детская комната», «ванная», «ткани» и «утки» относятся к 3-му кластеру («Кухня»), а «свечи», «цветной круг», «салфетки» и «мотки шерсти» относятся к 4-му кластеру («Салфетки»). Картина была отнесена к индивидуальному кластеру из-за более сложного изобразительного содержания, вызывающего сильный эмоциональный отклик у наблюдателей при оценке цветовых предпочтений для различных цветов на поверхности картины.

### 3.5 Объяснение различий между сценами в распределениях весов и прогнозирование весов

Чтобы объяснить различия между сценами в распределениях весов (рис. 7) и существование кластеров сцен (табл. 6), мы предположили, что причина сильного взаимодействия сцены и цвета, отражённого на рис. 7,

заключается в том, что при оценке цветовых предпочтений больше внимания привлекают объекты конкретной сцены, принадлежащие к одной и той же цветовой группе, но имеющие большую чистоту цвета. В разных сценах объекты одного и того же цвета имели разные значения чистоты цвета, что следует из разброса значений чистоты цвета на рис. 5.

Чтобы исследовать эту гипотетическую роль чистоты цвета объектов, для каждого цвета ( $i = 1-7$ ) и каждой сцены ( $i = 1-12$ , т.е. кроме картины) было рассчитано характеристическое значение чистоты цвета  $C_{ik}$ , полученное посредством усреднения чистоты цвета измеренных объектов (при наличии нескольких объектов одного цвета чистота цвета усреднялась с учётом всех объектов) по всем четырём КЦТ. Картина была исключена, потому что, как упоминалось выше, при оценке цветовых предпочтений она оказывает



Результаты кластерного анализа. Центры кластеров, то есть характерные распределения относительных весов ( $R$ ) (относительно веса коричневого/телесного цвета) семи цветов для четырёх кластеров сцен, которым присвоены наименования, позволяющие объединить сцены в кластере. Относительные общие веса рассчитаны на основании данных табл. 2. Сцены: 1 – кухня; 2 – офис; 3 – продукты питания; 4 – детская комната; 5 – ванная; 6 – ткани; 7 – свечи; 8 – цветной круг; 9 – утки; 10 – салфетки; 11 – лейки; 12 – мотки шерсти; 13 – картина

| № кластера                | 1      | 2         | 3         | 4            | Общий вес |
|---------------------------|--------|-----------|-----------|--------------|-----------|
| Сцены, входящие в кластер | 2, 11  | 13        | 1, 3–6, 9 | 7, 8, 10, 12 |           |
| Наименование кластера     | «Офис» | «Картина» | «Кухня»   | «Салфетки»   |           |
| Коричневый/телесный цвет  | 1,00   | 1,00      | 1,00      | 1,00         | 1,00      |
| Красный цвет              | 2,27   | 2,86      | 1,84      | 2,07         | 2,00      |
| Оранжевый цвет            | 1,90   | 1,07      | 1,95      | 2,64         | 2,06      |
| Жёлтый цвет               | 1,76   | 1,32      | 1,39      | 1,95         | 1,58      |
| Зелёный цвет              | 1,89   | 2,52      | 1,32      | 2,01         | 1,66      |
| Синий цвет                | 2,03   | 2,88      | 1,29      | 2,13         | 1,70      |
| Лиловый цвет              | 1,98   | 1,40      | 1,13      | 1,35         | 1,31      |

более высокое эмоциональное воздействие: присутствующим на картине красному (маки) и синему (небо, зонт) цветам были присвоены более высокие веса, поскольку эти цвета, как правило, осознанно оказываются в центре внимания зрителя из-за вызывающего эмоции содержания картины.

На втором этапе была рассчитана усреднённая по всем сценам, кроме картины ( $k = 1-12$ ), чистота каждого цвета ( $i = 1-7$ )  $C_i$  ( $C_i$  – это усреднённое по  $i$  значение  $C_{ik}$ ,  $k = 1-12$ ). После этого для всех цветов и всех сцен была рассчитана относительная чистота цвета  $C_{ik, rel} = C_{ik}/C_i$ . Если в случае данного цвета и данной сцены значение этой относительной чистоты цвета  $C_{ik, rel}$  оказалось высоким, то это означает, что в этой конкретной сцене этот цвет имеет относительно высокую чистоту. Умножая  $C_{ik, rel}$  на общие средние веса  $W_i$  из табл. 2, получаем предположительные веса  $W_{ik, pred}$ :

$$W_{ik, pred} = C_{ik, rel} \cdot W_i, \quad (2)$$

где  $C_{ik, rel} = C_{ik}/C_i$ ,  $i = 1-7$ ,  $k = 1-12$ .

Коэффициент корреляции Пирсона между  $W_{ik}$  и  $W_{ik, pred}$  оказался равным 0,84 (рис. 8).

Столь сильная положительная корреляция между  $W_{ik}$  и  $W_{ik, pred}$  ( $r = 0,84$ ), подразумевает, что если в какой-то конкретной сцене чистота цвета объекта из данной цветовой группы (например, оранжевой) относительно высока, то в этой сцене этому объекту будет приписан больший вес. Значения  $C_i$  (см. последний столбец табл. 2), полученные в результате исследований, проведённых в настоящей статье, можно рассматривать как чистоты цветов, характерные для соответствующих цветовых групп.

Таким образом, уравнение (2) может применяться для прогнозирования весов цветов в любой новой сцене

( $k = 14$ ), которая состоит из цветовых групп, исследованных в настоящей статье (коричневая/телесная, красная, оранжевая, жёлтая, зелёная, синяя и лиловая). Если характерные значения чистоты цвета  $CIECAM02$  ( $C_{i14}$ ) в этой новой сцене ( $k = 14$ ) известны, то прогнозируемая величина  $W_{ik, pred}$  может быть рассчитана с использованием значений  $W_i$  и  $C_i$ , приведённых в табл. 2. Для прогнозирования оценок весов в новой сцене (0 для «совсем нет», 1 для «очень мало», 2 для «мало», 3 для «немного», 4 для «много» и 5 для «очень много»), значение  $W_{ik, pred}$ , рассчитанное помощи уравнения (2), должно быть пересчитано в соответствии с линией наилучшего соответствия, приведённой на рис. 8 и описываемой уравнением (3). Результат пересчёта обозначается как  $W_{ik, pred}'$ :

$$W_{ik, pred}' = 0,7868 \times W_{ik, pred} + 0,6014. \quad (3)$$

Следует отметить, что для достоверности расчётов новые сцены, для которых предполагается спрогнозировать веса, не должны содержать вызывающих эмоциональное воздействие элементов, таких как мазки кистью на картине. В картине важны определённые цвета, потому что они отражают намерения художника, например, если главной темой картины является человек в лиловой одежде, то лиловые мазки выделяются *автоматически*.

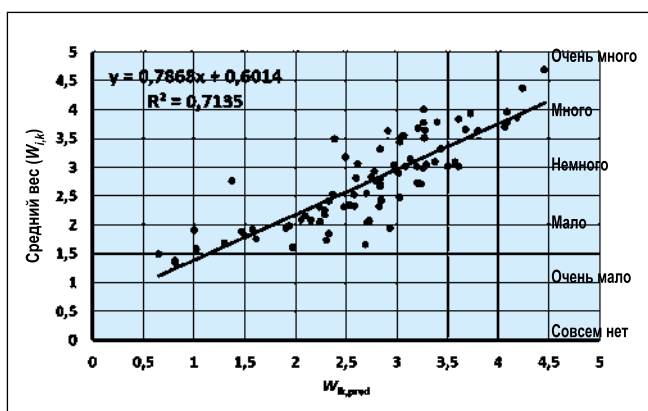


Рис. 8. Прогнозирование средних весов ( $W_{ik}$ ) для разных цветов ( $i = 1-7$ ) и сцен ( $k = 1-12$ ) при помощи значений  $W_{ik, pred}$ , полученных с использованием уравнения (2) (за исключением картины)

#### 4. Выводы

При принятии решений о цветовых предпочтениях в различных сценах с цветными объектами, участники психофизического эксперимента, описанного в настоящей статье, оценивали веса различных цветовых групп (или групп цветовых тонов) в соответствии с тем, сколько внимания они уделяли каждой из семи групп (включающих объекты коричневого/телесного, красного, оранжевого, жёлтого, зелёного, синего или фиолетового цвета). Сцены освещались светом с высокими общими индексами цветопередачи и четырьмя различными коррелированными цветовыми температурами. КЦТ источника света оказывала небольшое, но существенное влияние на веса различных цветов. Красный и оранжевый цвета получили наивысшие средние оценки (3,4–3,5, то есть между «немного» и «много»), жёлтый, зелёный и синий цвета были промежуточными (2,7–2,9, то есть «немного»), фиолетовый цвет имел меньший вес (2,2 т.е. «мало»), в то время как у коричневого/телесного цвета получил оценку между «очень мало» и «мало» (1,7), что частично соответствует литературным данным.

Содержание сцены (например, «картина» или «типичные цветные объекты в офисе») оказало сильное влияние на веса всех семи цветов. Соответственно, были идентифицированы четыре кластера сцен (офис, живопись, кухня и салфетки) с характерными центрами (то есть распределениями весов семи цветов). Чтобы интерпретировать различия между сценами (за исключением картины) в распределении веса, мы предположили, что входящим в одну и ту же цветовую группу объектам с более высокой чистотой цвета присваивается больший вес. Эта гипотеза привела к выводу уравнения (3), основанного на уравнении (2). Уравнение (3) может использоваться для прогнозирования весов в любой новой сцене, которая состоит из объектов, относящихся к рассмотренным цветовым группам (коричневые/телесные, красные, оранжевые, жёлтые, зелёные, синие и фиолетовые цвета), за исключением сцен с высоким эмоциональным содержанием (например, картины). В будущем метрики цветовых предпочтений должны учитывать веса различных групп цветовых тонов,

возможно, с использованием уравнения (3). Картина представляла собой отдельный кластер из-за её сложного изобразительного содержания (форма, размер, композиция), оказывающего сильное эмоциональное воздействие. Картины с различным изобразительным содержанием следует рассмотреть отдельно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Esposito T, Houser K.* Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions// *Lighting Research and Technology* 2018; first published online on April 13; DOI 10.1177/1477153518765953.
2. *Lin Y, Wei M, Smet KAG, Tsukitani A, Bodrogi P, Khanh TQ.* Colour preference varies with lighting application// *Lighting Research and Technology*. – 2015. – no.49. – С. 316–332
3. Commission Internationale de l'Éclairage. CIE224–2017, CIE2017// *Colour Fidelity Index for accurate scientific use*, Vienna: CIE. – 2017.
4. *Islam M.S, Dangol R, Hyvärinen M, Bhusal P, Puolakka M, Halonen L.* User preferences for LED lighting in terms of light spectrum// *Lighting Research and Technology*. – 2013. – no.45. – С. 641–665
5. *Dangol R, Islam MS, Hyvärinen M, Bhusal P, Puolakka M, Halonen L.* User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness// *Lighting Research and Technology*. – 2015. – no.47. – С. 36–53
6. *Wei M, Houser K.W, David A, Krames M.R.* Colour gamut size and shape influence colour preference// *Lighting Research and Technology*. – 2017. – no.49. – С. 992–1014
7. *Royer M, Wilkerson A, Wei M.* Human Perceptions of Color Rendition at Different Chromaticities// *Lighting Research and Technology*. – 2018. – no.50. – С. 965–994
8. *Huang Z, Liu Q, Westland S, Pointer MR, Luo MR, Xiao K.* Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs// *Lighting Research and Technology*. – 2018. – no.50. – С. 995–1012.
9. *Wei M, Bao W, Huang H.P.*, Consideration of Light Level in Specifying Light Source Colour Rendition// *LEUKOS*2018; published online on 11 May; DOI 10.1080/15502724.2018.1448992.
10. *Wei M.* Maintaining Colour Preference under Different Light Levels. 15<sup>th</sup> China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen. – 2018.
11. *Khanh T.Q, Bodrogi P, Guo X, Anh P.Q.* Towards a user preference model for interior lighting Part 2: Experimental results and modelling// *Lighting Research and Technology* 2018; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816474.
12. *Judd D.B.* A flattery index for artificial illuminants// *Illum. Eng.* . – 1967. – no.62. – С. 593–598

13. *Rea MS, Freyssinier JP.* Color Rendering: Beyond Pride and Prejudice// *Color Research and Application*. – 2010. – no.35. – С.401–409.

14. *Bodrogi P, Guo X, Khanh TQ.* Semantic interpretation of the CIE2017 colour fidelity index. Proc. CIE2019 29<sup>th</sup> Quadrennial Session, Washington. – 2019.

15. *Wei M, Houser KW.* Systematic Changes in Gamut Size Affect Color Preference// *LEUKOS*. – 2017. – no.13. – С. 23–32.

16. *Royer M, Wilkerson A, Wei M, Houser K, Davis R.* Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape// *Lighting Research and Technology*. – 2017. – no.49. – С. 966–991.



**Петер Бодроги (Peter Bodrogi), Ph. D., Dr. Sc.** Окончил Университет им. Лорана Этвюша (Будапешт). Научный сотрудник Дармштадского технического университета. Область

научных интересов: светотехника, освещение в условиях сумеречного зрения, колориметрия, наука о цвете, зрительная оптимизация дисплеев и СД осветительных установок



**Диана Карелла (Diana Carella).** Окончила Дармштадский технический университет, Дармштадт (Германия). С 15 января 2013 года по 5 октября 2017 года являлась научным со-

трудником в Лаборатории светотехники Дармштадского технического университета. В настоящее время работает инженером по свету в Институте по сертификации и испытаниям VDE, Оффенбах, Германия



**Тран Куок Хан (Tran Quoc Khanh), Ph. D., Dr. Sc., профессор.** Окончил технический университет Ильменау. Декан факультета электротехники и информационных технологий

Дармштадского технического университета. Председатель проводящихся в Дармштадте международных симпозиумов по автомобильному освещению (ISAL), член нескольких технических комитетов МКО. Автор целого ряда книг, научных публикаций и патентов в области светотехники. Область научных интересов: СД освещение