

Зависимость цветового предпочтения от коррелированной цветовой температуры, освещённости и насыщенности цвета объекта – новая метрика¹

К.Т. ВИНЬ¹, П. БОДРОГИ^{1,3}, Т.К. КХАН¹, Т.Т. АНЬ²

¹ Дармштадтский технический университет, Дармштадт, Германия.

² Университет социальных и гуманитарных наук, Вьетнамский национальный университет, Ханой, Вьетнам.

³ E-mail: bodrogi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

Аннотация

Предложена новая метрика ($R_{p,2019}$) для источников света, позволяющая прогнозировать субъективное восприятие интерьеров с цветными объектами, освещёнными этими источниками света. Эта метрика основана на индексе точности воспроизведения цвета МКО 2017 г. (*CIE2017 Colour Fidelity Index*) и векторной диаграмме цветов (*Colour Vector Graphic*) из *TM-30-15*. Помимо учёта насыщенности цвета объекта, эта метрика включает в себя учёт коррелированной цветовой температуры и освещённости на плоскости, на которой расположены цветные объекты. На шкале метрики отмечены качественные оценки цветового предпочтения, такие как «хорошо» или «очень хорошо». Цель введения этой метрики состоит в том, чтобы помочь проектировщикам освещения определить освещённость, коррелированную цветовую температуру и насыщенность цвета объекта, необходимые для достижения «хорошего» или «очень хорошего» уровня цветового предпочтения

Ключевые слова: качество цвета, цветовое предпочтение, метрика цветового предпочтения, точность воспроизведения цвета, цветовая гамма, насыщенность цвета, коррелированная цветовая температура, освещённость

1. Введение

Понятие «качество цветопередачи источника света» может быть определено как качественная оценка субъективного восприятия цветового облика цветных объектов в интерьерах, освещаемых этим источником света.

Хотя качество цветопередачи является лишь одним из аспектов качества освещения, оно играет важную роль во внутреннем освещении для обеспечения удовлетворённости пользователей освещением в целом. Другие аспекты качества освещения включают в себя яркость, чёткость зрительного восприятия (чёткую различимость структур поверхностей объектов), отсутствие блёскости и различимость теней объектов. Качество цвета имеет несколько подаспектов [1, 2], включая:

- естественность цвета [2–5]: сходство цвета объекта, освещаемого заданным источником света, с его цветом при естественном освещении;
- цветовое предпочтение [2–7] (определено ниже);
- «живость» цвета (*colour vividness*) [2–4, 8]: мера того, насколько насыщенным выглядит цвет цветного объекта;
- сходство цветов объектов с цветами в долговременной памяти человека [9]: цвета объектов, часто встречавшихся в прошлом, сохраняются в памяти, например, цвета бананов, травы или кожи;
- способность к различению цветов [10–12]: способность зрительной системы человека различать цвета сходного оттенка, например, двух образцов зелёного цвета с чуть более или с чуть менее синеватым оттенком;
- цветовая гармония: ощущение цветовой гармонии связано с эстетическим восприятием цветовых сочетаний; например, красный и оранжевый или зелёный, синий и жёлтый рядом друг с другом. Цветовой гармонии посвящено много публикаций.

Если исходить из простого и вполне понятного определения цветового предпочтения, то из перечисленных подаспектов наиболее важным для светотехники является именно оно.

Этот термин может быть определён как «субъективная оценка того, насколько наблюдателю *нравится* цветовой облик находящихся в помещении объектов, освещаемых данным источником света, причём во внимание принимаются все цветные объекты» [1, 2, 13]. Важным моментом является то, что цветовые предпочтения наблюдателей применительно к различным источникам света зависят от воспринимаемой картины или области применения освещения, например, освещение ресторана, офиса, дома или супермаркета [14].

На цветовые предпочтения наблюдателей при восприятии ими интерьеров с искусственным освещением влияют следующие параметры осветительной установки:

1. Сдвиги воспринимаемой чистоты и тонов (*chroma shifts and hue shifts*) цветов объектов (или цветных образцов) между исследуемым источником света и используемым для сравнения образцовым источником света – см. векторную диаграмму цветов, представленную в *TM-30-15* [2–5, 7, 13, 15]. На этой векторной диаграмме можно увидеть, как изменяется цветовой облик различных выбранных цветов (цветных образцов), если вместо фактического (исследуемого) источника света используется образцовый иллюминант (спектр естественного излучения или спектр излучения абсолютно чёрного тела).

2. Индекс точности воспроизведения цвета [2–5, 13, 16], который выражает численно, насколько цветовой облик цветных образцов, освещаемых исследуемым источником света, близок к их цветовому облику при освещении их образцовым иллюминантом с такой же коррелированной цветовой температурой (КЦТ).

3. Размер области, охватываемой цветовой гаммой (*colour gamut size*) [17, 18], который эквивалентен насыщенности цвета освещённых цветных объектов и зависит от спектра излучения источника света. Цветовая гамма излучения источника света показывается, сколько различных оттенков цветов, включая насыщенные, можно наблюдать при освещении объекта источником света с заданным спектром излучения. *Насыщенность цвета объекта* определяется спектром источника света: этот параметр показывает, насколько насыщенными в среднем объекты одного цвета вы-

¹ Перевод с англ. А.Г. Савицкой

Характеристики выбранных (новейших) метрик цветовых предпочтений. Понятие «насыщенность цвета» (насыщенность цвета объекта, освещаемого рассматриваемым источником света) эквивалентно размеру области, охватываемой цветовой гаммой

Метрика цветового предпочтения	Учитываемые параметры	Параметры, которые не учитываются	Колориметрическое описание	Цветные образцы
CQS Q_p [35]	Насыщенность цвета, КЦТ	Освещённость, форма цветовой гаммы	<i>CIELAB</i>	15 шт. [35]
CP [29]	Освещённость, насыщенность цвета, КЦТ	Форма цветовой гаммы	<i>CIELAB</i>	15 шт. [35]
<i>LIKE</i> [13]	Насыщенность цвета, форма цветовой гаммы	КЦТ, освещённость	<i>TM-30-15</i> [15, 36]	<i>TM-30-15</i> [15, 36]
<i>MCRI</i> [9]	Насыщенность цвета, форма цветовой гаммы (с использованием сохранённых в памяти цветов)	КЦТ, освещённость	Цветовое пространство <i>IPT</i> [37]	10 шт. [9]

глядят при освещении их источниками света с разными спектрами излучения.

4. Форма области, охватываемой цветовой гаммой (особенно размер области «насыщенного красного цвета» [13, 19–21]). Понятие формы области, охватываемой цветовой гаммой, можно пояснить следующим образом: если, например, в случае определённого спектра источника света, красноватые цвета кажутся более насыщенными, чем в случае другого спектра, то соответствующая область, охватываемая цветовой гаммой, расширяется в область красноватых цветовых тонов.

5. КЦТ источника белого света [2, 5, 21, 22], которая характеризует оттенок этого белого цвета: 2700 К соответствует имеющему желтоватый оттенок тёпло-белому свету, в то время как 7000 К соответствует имеющему слегка голубоватый оттенок холодн-белому свету.

6. Расстояние от точки, соответствующей излучению источника белого света, до линии чёрного тела или линии дневного света на диаграмме цветности, которое характеризуется параметрами Duv или $\Delta u'v'$ [21, 23–26]. Если это расстояние большое, то цвет источника света не будет белым – он будет визуально восприниматься как, например, имеющий мешающий зеленоватый оттенок.

7. Характерный уровень освещённости [27–29] на рабочей плоскости, на которой расположены цветные объекты.

Теперь следует более подробно остановиться на некоторых экспериментальных данных о влиянии на цветовые предпочтения трёх параме-

тров: КЦТ, насыщенности цвета объекта и освещённости (этот вопрос будет всесторонне рассмотрен в разделе 2). В [2] было установлено, что на цветное предпочтение влияет КЦТ освещающего цветные объекты белого света, который в соответствии с КЦТ характеризуется как тепло-белый, нейтрально-белый или холодно-белый: по субъективным оценкам, при *относительно высокой* КЦТ (4000 К) уровень цветового предпочтения был *выше*, чем при более низкой КЦТ (2500 К) при одном и том же уровне насыщенности цвета объекта, обеспечиваемом источником света. В другом исследовании [5] цветовые предпочтения были максимальными при КЦТ, примерно равной 5000 К (холодно-белый свет), а не при 3100 К (тёпло-белый свет). В [10, 30, 31] утверждалось, что другой, связанный с этим аспект качества освещения, а именно, предпочтительность сцены (*scene preference*) (общая субъективная оценка качества внутреннего освещения) *увеличивается* по мере увеличения освещённости (в этих исследованиях индексы точности воспроизведения цвета и насыщенности цветов объектов оставались неизменными, а цветовые предпочтения конкретно не рассматривались). В другом исследовании субъективные цветовые предпочтения оказались монотонно возрастающей функцией освещённости [32].

Проблема современных метрик цветовых предпочтений заключается в одном из следующих обстоятельств:

1. Они не учитывают зависимость цветового предпочтения от КЦТ и/или освещённости, и/или формы цвето-

вой гаммы (например, зависимость от уровня насыщенности красного цвета).

2. В них не используются новые важные колориметрические характеристики, которые появились в результате последних исследований в области колориметрии, включая новый индекс точности воспроизведения цвета, новое определение цветовой адаптации и новое цветовое пространство [15]. Соответственно, в табл. 1 приведено описание отобранных нами новейших метрик цветовых предпочтений. Другие метрики цветопередачи, включая цветовые предпочтения, были подробно описаны и проанализированы ранее [33, 34].

Как следует из табл. 1, в некоторых случаях зависимость цветового предпочтения от освещённости, КЦТ или формы цветовой гаммы не учитывается. Зависимость от формы цветовой гаммы включает в себя метрика *LIKE* [13], которая основана на результатах экспериментов с фиксированной КЦТ (3500 К) и с фиксированной освещённостью (646 лк). Индекс цветопередачи для хранящихся в памяти цветных объектов (*memory colour rendition index – MCRI*) [9] основан на экспериментах при 5600 К и 1150 лк, т.е. при фиксированных значениях КЦТ и освещённости. На основе анализа вышеупомянутых экспериментальных данных, свидетельствующих о значительном влиянии КЦТ и освещённости (помимо насыщенности цвета объекта) на цветовые предпочтения, было установлено, что полученную зависимость можно описать при помощи одной из предложенных ранее метрик (*CP*) [29]:

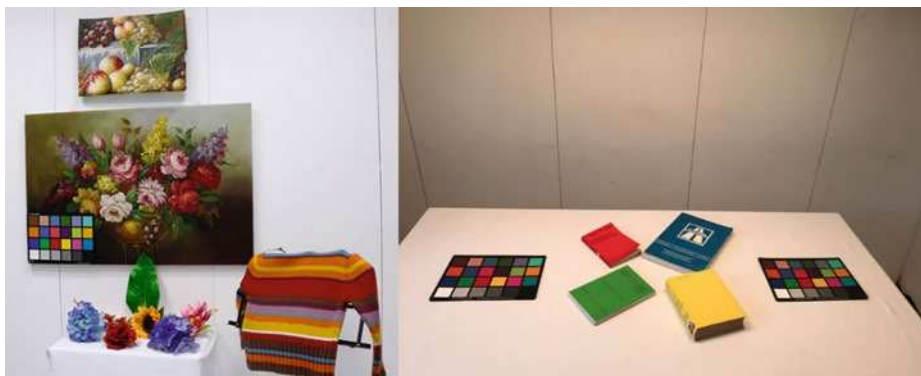


Рис. 1. Помещение с наборами разноцветных объектов, использовавшихся при проведении двух предыдущих исследований [3] слева и [32] справа), которые легли в основу разработки предлагаемой новой метрики цветового предпочтения ($R_{p,2019}$). (Воспроизводится с разрешения журнала *Lighting Research and Technology*. На обеих фотографиях присутствуют копии карты цветов *MacBeth ColourChecker*®)

$$CP = (14,089 \cdot \ln(E_{v,eq}) - 25,397) \cdot [-0,003 \cdot \Delta C^* + 0,0252 \cdot \Delta C^* + 1,0192] + [-518,554 \cdot ((S/V)^{0,24})^2 + 864,872 \cdot (S/V)^{0,24} - 356,578], \quad (1)$$

где CP – цветовое предпочтение, $E_{v,eq} = E_v \cdot (S/V)^{0,24}$ – так называемая эквивалентная вертикальная освещённость [38], ΔC^* – насыщенность цвета объекта, S/V – относительный сигнал колбочек S -типа (фоторецепторов человеческого глаза, чувствительных к коротковолновому излучению), который можно использовать вместо КЦТ [29]. Входящая в уравнение (1) величина $(S/V)^{0,24}$ была рассчитана в [29] с достоверностью $r^2 = 0,99$ для нескольких спектров многокристалльных светодиодов (СД) на основе значения КЦТ. Расчёты производились с помощью уравнения (2), которым можно воспользоваться на практике, если значение $(S/V)^{0,24}$ неизвестно:

$$(S/V)^{0,24} = -0,0138 \cdot (CST/1000)^2 + 0,1769 \cdot (CST/1000) + 0,2859. \quad (2)$$

Это означает, что, например, при использовании источника нейтрально-белого света (при высокой КЦТ и сильном сигнале колбочек S -типа) наблюдается более высокий уровень цветового предпочтения, чем в случае источника тепло-белого света, создающего такую же освещённость. Уравнение (1) содержит квадратичную зависимость от насыщенности цвета объекта, причём максимальное цветовое предпочтение достигается при умеренной насыщенности ($\Delta C^* = 4,2$). Насыщенность цвета объекта здесь выражается величиной ΔC^* , то есть

сдвигом воспринимаемой чистоты цвета в пространстве *CIELAB*, усреднённым по 15-ти цветным образцам шкалы качества цвета (*Color Quality Scale – CQS*) [35].

Квадратичный член в уравнении (1), содержащий $(S/V)^{0,24}$, необходим для учёта следующего эффекта: тепло-белому свету (3000 К) при высоких уровнях насыщенности соответствует более низкое цветовое предпочтение. Как следует из 4-го столбца табл. 1, метрика CP [29] включает в себя зависимость от КЦТ и освещённости, но не может быть использована применительно к более современным методам оценки цветопередачи, таким как принятый в *TM-30-15* подход [15, 36] или новый индекс точности воспроизведения цвета [16].

В соответствии с вышеизложенными соображениями, цель настоящей статьи состоит в том, чтобы описать новую метрику цветовых предпочтений (так называемую метрику $R_{p,2019}$) на основе повторного анализа и моделирования двух полученных ранее наборов субъективных (полученных психофизическими методами) результатов оценки цветовых предпочтений [3, 32]. Новый индекс цветового предпочтения $R_{p,2019}$ должен обладать следующими характеристиками:

1. $R_{p,2019}$ должен включать в себя зависимость от освещённости, КЦТ и насыщенности цвета объекта. В соответствии с ограниченностью базы экспериментальных данных, авторы не учитывают в описываемом варианте новой метрики зависимость цветовых предпочтений от формы цветовой гаммы и от Duv (Duv – расстояние от точки, соответствующей излучению источника белого света, до ли-

нии чёрного тела или линии дневного света на диаграмме цветности).

2. $R_{p,2019}$ должен основываться на следующих широко известных, новых или легко определяемых величинах: полученном при помощи векторной диаграммы цветов из *TM-30-15* показателе, характеризующем насыщенность цвета объекта (зависит от конкретного спектра источника света) R_f [16], КЦТ и E_v .

3. $R_{p,2019}$ должен иметь интуитивно понятную шкалу, адаптированную к субъективной шкале цветовых предпочтений наблюдателей, использовавшейся при получении экспериментальных данных о цветовых предпочтениях [3, 32]. На приведённой в [39] шкале были обозначены такие качественные оценки (категории), как «очень хорошо», «хорошо» и «посредственно». Следовательно, значение нового индекса $R_{p,2019}$ может быть легко определено для «хорошего» цветового предпочтения (в качестве минимального критерия приемлемости освещения), если известны спектр источника света и освещённость.

2. Данные о цветовых предпочтениях, использовавшиеся при разработке новой метрики цветовых предпочтений ($R_{p,2019}$)

Метрика цветовых предпочтений $R_{p,2019}$ основана на новом математическом анализе двух опубликованных ранее результатов субъективных оценок цветовых предпочтений, полученных в результате двух предыдущих исследований [3, 32]. В этом разделе описаны методики и обобщены результаты этих исследований [3, 32]. Оба исследования были лабораторными, проведёнными в специальном помещении с белыми стенами и белыми тканями на столах и с различными разноцветными наборами цветных объектов, включая искусственные цветы, картины, книги, цветные ткани и цветные карты *Macbeth ColourChecker*® (рис. 1). Эти наборы отражают характерные для помещений условия наблюдения при наличии цветных объектов, позволяющие оценить цветовые предпочтения независимо от конкретной области применения освещения [14].

В первом исследовании [3] многокристалльным СД генератором света (*light engine*) с красными, зелёны-

ми, синими и тепло-белыми СД освещались два набора цветных объектов (на рис. 1 в качестве примера изображён только первый набор). При этом были использованы 36 спектров белого света с четырьмя значениями КЦТ (3100, 4100, 5000 и 5600 К). Освещённость оставалась неизменной и была равна 750 лк. Каждой из КЦТ соответствовали девять различных спектров, формируемых использованным многокристальным источником света. При помощи каждого из этих девяти спектров обеспечивали девять разных уровней насыщенности цвета объекта. Это означает, что использовавшиеся разноспектральные излучения делали цвета окрашенных объектов более или менее насыщенными. Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения по впечатлению от всех цветных объектов одновременно. «Цветовое предпочтение» было определено для наблюдателей как «субъективная оценка того, насколько наблюдателю нравится цветовой облик всех цветных объектов в целом при освещении их используемым источником света».

Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения по интервальной шкале, на которой были обозначены разные качественные оценки (рис. 2). Неравномерность расстояния между этими качественными оценками следует из полученных ранее результатов [39]. В [3, 32] наблюдатели смогли успешно использовать эту интервальную шкалу. Качественные оценки были положены в основу принятия решений и помогли наблюдателям отметить на шкале свой выбор [39]. Наблюдателям было дано указание поставить свою оценку в любом месте интервальной шкалы, а не только отнести свою оценку к какой-то качественной категории (и они делали это осознанно). Качественная оценка «хорошо» со значением 79,6 играет важную роль в проектировании освещения как общий критерий приемлемости осветительной установки [29] с точки зрения цветовых предпочтений.

Недонасыщенность или перенасыщенность цветов цветных объектов, вызванная используемым источником света, характеризовалась значением насыщенности цвета (обозначается как ΔC^*), усреднённым по 15-ти цветным образцам *QOS* [35] *VS1-VS15*, формирующим набор из пятнадцати различных однотипных цветных

Рис. 2. Шкала оценки цветового предпочтения [39], на которой значению 97,9 соответствует качественная оценка «отлично», значению 91,6 – качественная оценка «очень хорошо», значению 79,6 – качественная оценка «хорошо», значению 52,9 – качественная оценка «посредственно», значению 41,2 – качественная оценка «неудовлетворительно», значению 26,5 – качественная оценка «плохо», а значению 12,8 – качественная оценка «очень плохо» [3]. (Воспроизводится с разрешения журнала *Lighting Research and Technology*)



Рис. 3. Полученные в первом исследовании [3] зависимости усреднённой оценки цветовых предпочтений наблюдателей от уровня насыщенности цвета (ΔC^*) и КЦТ при фиксированном значении освещённости 750 лк

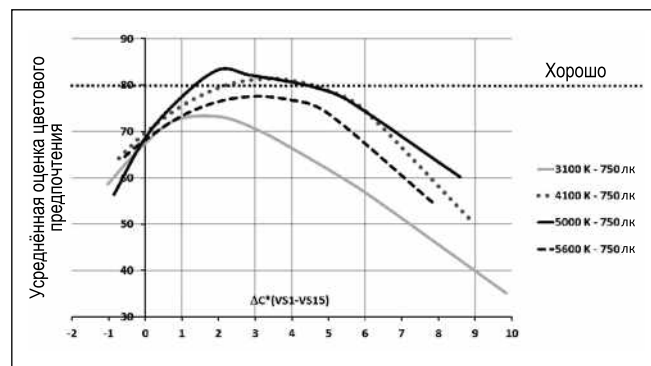
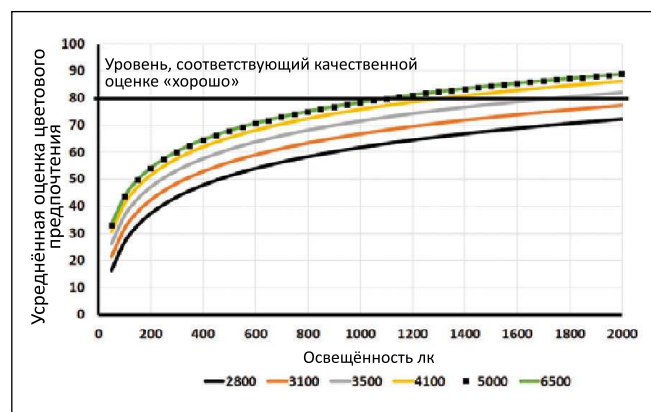


Рис. 4. Полученные во втором исследовании [32] зависимости усреднённой оценки цветовых предпочтений наблюдателей от освещённости и КЦТ при фиксированном уровне насыщенности цвета $\Delta C^* = 4,2$ (уровень максимального цветового предпочтения). (Воспроизводится с разрешения журнала *Lighting Research and Technology*)



образцов, когда воспринимаемая чистота цвета этих образцов при освещении их используемым источником света сравнивалась с воспринимаемой чистотой их цвета при освещении образцовым источником света. Рассмотрение графика зависимости усреднённых оценок цветовых предпочтений от ΔC^* позволило выявить следующие тенденции: нейтрально-белый (4100 К) и холодно-белый (5000 и 5600 К) свет привели к более высоким субъективным оценкам цветового предпочтения, чем тепло-белый (3100 К) свет (рис. 3) [3].

На рис. 3 также видно, что значение цветового предпочтения достигает максимума при умеренной насы-

щенности цвета объекта. Расположение этого максимального цветового предпочтения (в терминах ΔC^*) зависит от КЦТ, поскольку более высокие КЦТ требуют большей насыщенности цвета объекта. При 3100 К средние значения цветовых предпочтений наблюдателей всегда ниже «хороших» (см. рис. 3), поскольку при этой КЦТ уровень освещённости 750 лк слишком низок для наблюдателей, так что их оценки цветовых предпочтений всегда были ниже уровня «хорошо».

Во втором исследовании [32] наблюдатели оценивали цветовые предпочтения в случае цветных объектов, лежащих на на столе (рис. 1, справа) и освещаемых 36 различными источ-

Таблица 2

Оптимальные значения входящих в уравнение (5) параметров a_i , b_i , c_i и e_i ($i = 1, 2, 3$), полученные подстановкой в уравнение (3) усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения, произведённых применительно к 58-ми источникам света в [3, 32]

i	a_i	b_i	c_i	d_i	e_i
1	$-1,074 \cdot 10^{-6}$	0,008406	-0,01883	0,000	-31,68
2	$-4,603 \cdot 10^{-6}$	0,04249	-0,4564	$1,02 \cdot 10^4$	-63,92
3	$-3,726 \cdot 10^{-6}$	0,03519	11,37	-51,6	-143,5

никами света, при всех 36 возможных комбинациях трёх уровней насыщенности цвета объекта (низкого, с ΔC^* от -0,1 до 1,0; среднего, с ΔC^* от 1,7 до 4,4; и высокого, с ΔC^* от 10,7 до 12,2), трёх КЦТ (3000, 4100 и 5600 К) и четырёх уровней освещённости (200, 500, 1000 и 1800 лк). Наблюдатели оценивали свои цветовые предпочтения, используя приведённую выше шкалу оценок (рис. 2). Усреднённые оценки цветовых предпочтений в этом втором исследовании монотонно увеличивались по мере увеличения освещённости. Для описания зависимости цветовых предпочтений от освещённости была предложена логарифмическая функция [29] (см. первый член уравнения (1) и рис. 4).

Как видно на рис. 4, усреднённые субъективные оценки цветовых предпочтений увеличиваются с возрастанием КЦТ. Следует отметить, что при всех КЦТ и всех уровнях освещённости максимумы цветовых предпочтений обычно имеют место при $\Delta C^* = 4,2$ (средний уровень насыщенности).

3. Новая метрика цветовых предпочтений ($R_{p, 2019}$): описание, область применимости, сравнение с метрикой CP и подтверждение достоверности

В этом разделе приведены уравнения, описывающие новую метрику цветовых предпочтений ($R_{p, 2019}$). Основное из этих уравнений имеет вид:

$$R_{p, 2019} = 0,70 \cdot R_f + p_1 \times \Delta C_i^2 + p_2 \cdot \Delta C_i + p_3, \quad (3)$$

где R_f – индекс точности воспроизведения цвета МКО 2017 г. ($CIE2017$ Colour Fidelity Index) [16], ΔC_i – так называемая полная насыщенность

цвета, описываемая уравнением (4), а p_1 , p_2 и p_3 – параметры модели, которые зависят от КЦТ и освещённости (см. уравнение (5)):

$$\Delta C_i = \sum_{i=1}^{16} \frac{R_{cs, hi}}{100}, \quad (4)$$

где выраженные в % значения $R_{cs, hi}$, $i = 1-16$, соответствуют «чисто радикальной разнице между векторами, соответствующими рассматриваемому и образцовому состояниям каждого из 16-ти бинов цветовых тонов (*hue bin*)» на векторной диаграмме цветов из $TM-30-15$ [20]. Понятие «бин цветового тона» может быть определено как набор цветных образцов (с однородными поверхностями), имеющих схожие цветовые тона. По кругу цветовых тонов равномерно распределены 16 тонов ($i = 1-16$): красный ($i = 1$), красновато-оранжевый ($i = 2$), оранжевый ($i = 3$), жёлтый ($i = 4$), зеленовато-жёлтый ($i = 5$), желтовато-зелёный ($i = 6$), зелёный ($i = 7$), синевато-зелёный ($i = 8$), цианово-зелёный ($i = 9$), циановый (*cyan*) ($i = 10$), синевато-циановый ($i = 11$), синий ($i = 12$), синевато-фиолетовый ($i = 13$), фиолетовый ($i = 14$), пурпурно-фиолетовый ($i = 15$), пурпурный ($i = 16$). Например, бин красного цветового тона ($i = 1$) содержит цветные образцы разных красных тонов. Применительно к векторной диаграмме цветов, графические расчёты можно выполнять при помощи $TM-30$ Calculation Tools. Сумма значений $R_{cs, hi}$ в уравнении (4) характеризует общее насыщающее или ненасыщающее воздействие источника света на освещаемые цветные объекты в целом.

Уравнение (5) описывает зависимость входящих в уравнение (3) параметров модели p_i ($i = 1-3$) от коррелированной цветовой температуры CCT и освещённости E_v :

$$p_i = a_i \cdot CCT^2 + b_i \cdot CCT + c_i \cdot \ln(E_v + d_i) + e_i \quad (5)$$

Оптимальные значения входящих в уравнение (5) параметров a_i , b_i , c_i и e_i ($i = 1, 2, 3$), которые приведены в табл. 2, были получены следующим образом:

1. Из 72-х (36 + 36) источников света, использовавшихся в [3, 32], которые были описаны в разделе 2, были рассмотрены только те источники света, которым соответствовали ΔC_i от -0,4 до 1,2. Причина заключается в том, что оценки цветового предпочтения при использовании входящих в этот набор источников света с $\Delta C^* > 6,1$ оказались не лучше, чем «посредственно». Такие источники света не должны использоваться во внутреннем освещении. Поэтому авторы решили не учитывать эти источники света при аппроксимации. Так что из результатов первого [3] и второго [32] исследований были исключены, соответственно, два и двенадцать источников света.

2. Значения R_f и $R_{cs, hi}/100$ были рассчитаны для оставшихся 58-ми источников света (создаваемые ими освещённости и их КЦТ были известны).

3. Формулы (4) и (5) были подставлены в уравнение (3).

4. Сумма квадратов разностей между 58-ю усреднёнными субъективными оценками цветовых предпочтений [3, 32] и $R_{p, 2019}$ была минимизирована.

В соответствии с приведённым выше 4-м условием, числовая шкала новой метрики цветовых предпочтений $R_{p, 2019}$ эквивалентна визуальной шкале с отмеченными на ней качественными оценками (рис. 2). $R_{p, 2019} \geq 79,6$ должно быть достигнуто при проектировании освещения хотя бы для обеспечения «хорошего» цветового предпочтения в освещённой сцене (см. подпись к рис. 2, в которой указаны числовые значения, соответствующие различным качественным оценкам цветовых предпочтений).

Что касается точности определения приведённых в табл. 2 значений параметров, то среднее абсолютное значение разности между $R_{p, 2019}$ и усреднённым индексом цветового предпочтения наблюдателей в случае 58-ми источников света оказалось равным 2,0 (среднеквадратичное отклонение = 1,9; минимальное значение = 0,1; максимальное значение = 1,9).

ние = 7,2). Эта средняя точность аппроксимации (2,0 балла по оценочной шкале на рис. 2) невелика по сравнению с расстоянием между соседними качественными оценками (26,7 между «посредственно» и «хорошо» и 12,0 между «хорошо» и «очень хорошо»). Коэффициент корреляции Пирсона между 58-ю усреднёнными оценками цветовых предпочтений и соответствующими значениями $R_{p,2019}$ составил $r = 0,97$. При разработке новой метрики авторами также рассматривались математически менее сложные варианты, но оказалось, что для достижения такой же точности аппроксимации потребуется более высокий уровень сложности. Для сравнения, коэффициент корреляции Пирсона между 58-ю средними оценками цветовых предпочтений и соответствующими значениями CP (уравнение (1)) равнялся $r = 0,75$. Различие между этими двумя коэффициентами корреляции (0,97 и 0,75) было статистически значимой ($p < 0,001$).

Что касается области применимости приведённых в табл. 2 параметров, то в соответствии с базовым экспериментальным набором данных, эти параметры действительны для КЦТ от 3000 до 5600 лк и ΔC_t от $-0,4$ до 1,2. Координаты цветности, соответствующие белым точкам (*white points*²) базового набора экспериментальных данных, были расположены в пределах области $\Delta u' v' < 0,003$. В соответствии с этим ограничением, а также потому, что белые точки, которые находятся дальше от линии чёрного тела или линии дневного света, могут содержать визуально мешающие оттенки (например, зеленоватый оттенок) [24, 40], $R_{p,2019}$ не следует применять к источникам света с $\Delta u' v' \geq 0,003$.

Количественные значения $R_{p,2019}$ сравнивались с результатами расчётов CP (см. уравнение 1). На рис. 5 подобное сравнение проведено для набора из 180-ти выбранных спектров источников света. Этот набор является выборкой из 459-ти спектров, включающих в себя 58 спектров, использовавшихся для получения приведённых в табл. 2 оптимальных значений параметров [3, 32], и 401 спектр из библиотеки спектров для расчёта R_p , которая находится в открытом доступе

² См. <http://eilv.cie.co.at/term/1430>. – Прим. ред.

Рис. 5. Сравнение $R_{p,2019}$ с предыдущей метрикой (CP , уравнение 1) применительно к 180-ти спектрам источников света при четырёх значениях освещённости: 200, 500, 1000 и 1800 лк. Лучшая аппроксимация ($r^2 = 0,71$): $CP = 0,7476 \cdot R_{p,2019} + 13,965$. «Хороший» уровень цветового предпочтения $R_{p,2019} = 79,6$ указан в соответствии со шкалой, приведённой на рис. 2

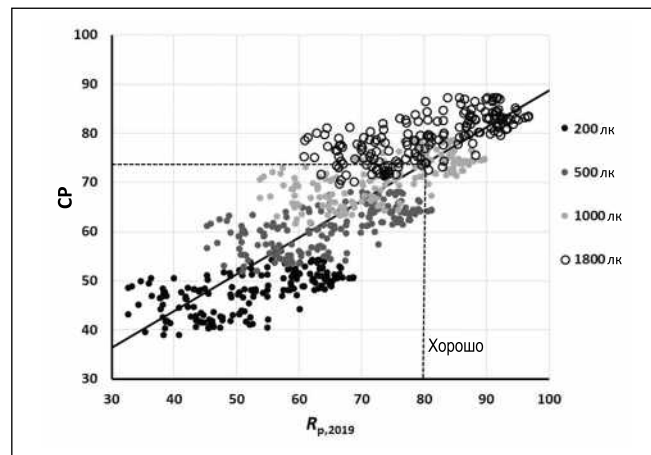


Рис. 6. Сравнение двух величин, используемых для описания насыщенности цвета объекта при освещении его конкретным источником света: ΔC_t (входит в уравнение (3) для расчёта $R_{p,2019}$) и ΔC^* (входит в уравнение (1) для расчёта CP). Аппроксимация: $\Delta C^* = 4,8645 \cdot \Delta C_t + 0,0434$ ($r^2 = 0,893$)

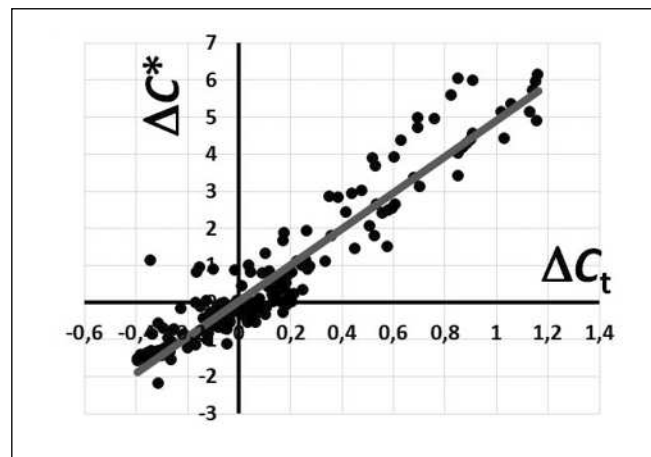
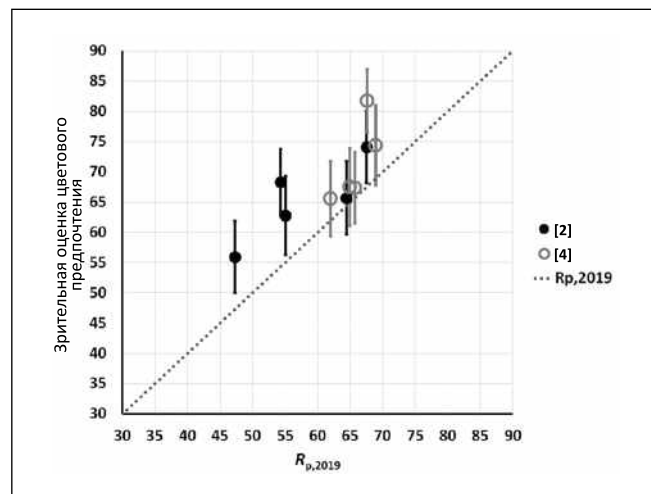


Рис. 7. Сравнение значений $R_{p,2019}$ с усреднёнными субъективными оценками цветового предпочтения (с 95 % доверительными интервалами, отражающими разброс сделанных наблюдателями оценок), полученными в [2] и [4]. Два источника света были исключены из [4] из-за $\Delta u' v' \geq 0,003$



в публикации МКО [16]. Выборка этих 180-ти спектров из 459-ти была произведена следующим образом:

1. Спектры с $R_p < 70$ были исключены (они не используются во внутреннем освещении).

2. Использовались только спектры в области применимости $R_{p,2019}$. Это означает, что авторы рассматривали только спектры с КЦТ от 3000 до 5600 К и ΔC_t от $-0,4$ до 1,2. Значения $R_{p,2019}$ и CP были рассчитаны для

четырёх значений освещённости: 200, 500, 1000 и 1800 лк.

Как видно на рис. 5, связь между предлагаемой метрикой $R_{p,2019}$ (см. уравнение (3)) и предыдущей метрикой CP [32] (см. уравнение (1)) может быть аппроксимирована линейной функцией ($r^2 = 0,71$, см. подпись к рис. 5). Поскольку базовые для обеих метрик наборы субъективных цветовых предпочтений были получены с использованием одной и той же

субъективной шкалы оценок (рис. 2), то можно сравнить абсолютные значения результатов, полученных применительно к этим двум метрикам. Как правило, результаты, полученные для одного и того же спектра источника света при одном и том же значении освещённости с использованием метрики CP , оказываются на примерно шесть единиц ниже оценок цветового предпочтения (см. рис. 2). То есть тогда, когда, например, при отмеченных на рис. 5 условиях освещённости согласно $R_{p,2019}$ уровень цветовых предпочтений оказывается «хорошим» (79,6, см. подпись к рис. 2), значение CP составляет только 73,5, что можно считать «хорошим-посредственным» уровнем цветовых предпочтений.

Причины этой разности оценок, а также разброса отображающих полученные данные точек, могут быть следующими:

1. Метрика CP основана только на втором наборе данных [32], в то время как в $R_{p,2019}$ учтены и результаты первого исследования [3] (см. раздел 2).

2. Метрики основаны на разных цветовых пространствах и цветных образцах ($CIELAB$ и 15 цветных образцов CQS для метрики CP и $SAM02-UCS$ с 16-ю бинами цветовых тонов стандарта $TM-30-15$ для $R_{p,2019}$). Сравнение этих метрик для большого набора спектров источников света проведено на рис. 5. Для дальнейшего анализа интересно сравнить ΔC_t (входящего в уравнение (3) для расчёта $R_{p,2019}$) и ΔC^* (входящего в уравнение (1) для расчёта CP) применительно к описанию насыщенности цвета объекта при освещении его конкретным источником света (рис. 6).

Как видно на рис. 6, при заданном значении ΔC^* максимальный разброс соответствующих ему значений ΔC_t может оказаться равным 0,7 (с одинаковыми колебаниями в направлениях «ненасыщающий» и «насыщающий»). Это может вызвать большие расхождения в оценке цветового предпочтения, если рассматриваемые метрики применяются к случайному источнику света. Этот вывод подтверждает важность использования метода $TM-30-15$ и индекса точности воспроизведения цвета $MCO R_f$ [16] при проектировании освещения.

Для проверки результаты расчётов $R_{p,2019}$ сравнивались со средними оценками цветовых предпочтений, полученными применительно к удов-

летворяющей следующим критериям выборки из результатов предыдущих исследований:

1. Использование той же шкалы оценок, что и в настоящей статье (см. рис. 2).

2. Использование сочетаний многоцветных объектов (аналогично рис. 1), а не только объектов определённых тонов (например, красных);

3. Использование источников света из области применимости $R_{p,2019}$.

Согласно этим критериям, авторами были выбраны два исследования [2, 4]. В [2] были использованы пять источников света (СД с люминофором, компактные люминесцентные лампы и галогенные лампы накаливания) при фиксированной освещённости 470 лк и КЦТ от 2300 до 4100 К, тогда как в [4] были использованы семь многокристалльных СД источников света при фиксированных значениях КЦТ (3220 К) и освещённости (550 лк). Два источника света из [4], которые оказались вне области применимости $R_{p,2019}$ (так как у них $\Delta u'v' \geq 0,003$), не рассматривались. Результат проведённого сравнения показан на рис. 7.

Как видно на рис. 7, $R_{p,2019}$ позволяет прогнозировать изменение усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения. Коэффициент корреляции Пирсона между $R_{p,2019}$ и десятью приведёнными на рис. 7 усреднёнными субъективными оценками цветовых предпочтений составил $r = 0,78$. Среднее расхождение между усреднённой субъективной оценкой цветового предпочтения и значением $R_{p,2019}$ равнялось 7 (среднеквадратичное отклонение равно 4) по шкале оценок, приведённой на рис. 2. Это расхождение было значительным в случае пяти источников света (см. те доверительные интервалы усреднённых субъективных оценок, которые на рис. 7 не пересекаются с серой пунктирной линией значений $R_{p,2019}$). Эти расхождения не приводили к переходу от одной из двух смежных качественных оценок к другой, например, от «хорошо» к «посредственно» (см. табл. 3).

Следует отметить, что принятый в настоящей статье подход к прогнозированию субъективных оценок цветовых предпочтений с привязкой их к приведённым на рис. 2 качественным оценкам отличается от подходов, принятых в других исследованиях (например, [13, 33, 34]) и осно-

ванных на анализе корреляции между метрикой и субъективной оценкой по произвольной шкале. В настоящей статье авторы рассматривают не только корреляцию, но и абсолютные различия между оценками, сделанными с использованием соответствующих шкал (см. табл. 3). Возможные причины абсолютных различий включают в себя несовпадение полей наблюдения, погодных условий, времени дня или времени года. Причиной различий могут быть и разные условия наблюдения (кабина в [4] вместо помещения в [2]), а также ограниченный диапазон значений освещённости (470–550 лк), рассматривавшихся в [2, 4] без сравнения их с более высокими значениями освещённости. Следовательно, необходимо провести в реальном помещении дополнительные контрольные исследования с систематическим варьированием всех трёх независимых переменных (освещённость, КЦТ и насыщенность цвета объекта) и использованием большего количества данных.

4. Применение $R_{p,2019}$ при проектировании освещения

Если спектр исследуемого источника света, который будет применяться в осветительной установке, известен, то можно рассчитать значения КЦТ, R_f и ΔC_t (см. уравнение (4)). Можно задать несколько значений освещённости на рабочей плоскости (например, на горизонтальной поверхности стола в помещении), на которой можно расположить цветные объекты. Эти цветные объекты могут освещаться светильником с рассматриваемым источником света. На рис. 8 показана зависимость $R_{p,2019}$ (см. уравнения (3) – (5)) от освещённости E_v для четырёх источников света разного типа, спектры которых приведены на рис. 9, а соответствующие значения КЦТ, R_f и ΔC_t приведены в табл. 4. На рис. 8 и в табл. 4 отмечены значения освещённости, при которых $R_{p,2019}$ достигает «очень хорошего» и «хорошего» уровней цветового предпочтения применительно к этим четырём источникам света разного типа. Хотя оценка «посредственно» при проектировании освещения не рассматривается, она всё же включена в рис. 8 для лучшего понимания.

Как следует из рис. 8 и табл. 4, в случае 2-го спектра (СД типа RGB)

Проверка достоверности численных оценок $R_{p,2019}$ на основе усреднённых субъективных оценок цветового предпочтения, полученных в [2] и [4] (см. также рис. 7)

Исследование	Интервальная шкала (см. рис. 2)			Качественная оценка (см. рис. 2)	
	Субъективная оценка	$R_{p,2019}$	Различие	Субъективная оценка	$R_{p,2019}$
[2]	68	54	14	хорошо-посредственно	посредственно
[2]	63	55	8	посредственно-хорошо	посредственно
[2]	66	64	1	посредственно-хорошо	посредственно-хорошо
[2]	74	68	7	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[2]	56	47	9	посредственно	посредственно -посредственно
[4]	66	62	4	хорошо-посредственно	посредственно-хорошо
[4]	67	66	2	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[4]	67	65	3	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно
[4]	82	68	14	хорошо	хорошо-посредственно
[4]	74	69	5	хорошо-посредственно	хорошо-посредственно

в области применимости $R_{p,2019}$ (200–1800 лк) невозможно достичь ни «хорошего», ни «очень хорошего» уровня цветового предпочтения. Причина в том, что этот спектр приводит к уменьшению насыщенности цвета объекта ($\Delta C_t < 0$) и имеет низкое значение R_f (77). Для 1-го спектра (СД типа $RGBW$ с $R_f = 90$ и умеренным перенасыщением цвета объекта $\Delta C_t = 0,61$) справедливо обратное утверждение: если этот источник света используется для освещения цветных объектов, то «хороший» уровень цветового предпочтения может быть получен при освещённости 440 лк, в то время как «очень хороший» уровень достигается при 1170 лк. Используя 3-й или 4-й спектр, можно в соответствии с их колориметрическими свойствами достичь только «хорошего» уровня цветового предпочтения при, соответственно, 1650 и 890 лк.

Рис. 8 иллюстрирует процесс достижения высокого уровня цветового предпочтения при проектировании освещения. Светильники, содержащие конкретный источник света, должны быть включены в проект освещения помещения (а затем и установлены) для обеспечения такого уровня освещённости на рабочей плоскости с расположенными на ней цветными объектами ($P_{el, crit}$), который, по меньшей мере, соответствовал бы качественной оценке «хорошо». После завершения проектирования осветительной установки будет известна электрическая

мощность, необходимая для обеспечения этого уровня освещённости, и можно будет рассчитать значение эффективности для этого цветового предпочтения:

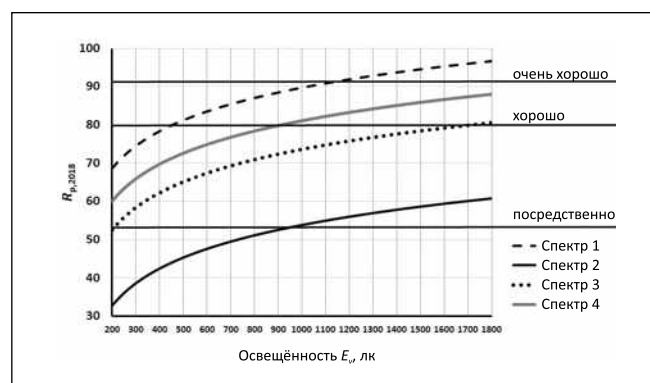
$$\eta_{p,2019} = \frac{R_{p,2019,crit.}}{P_{el,crit.}} = \frac{79.6}{P_{el,crit.}} \text{ (Вт}^{-1}\text{)}.$$

Эти значения можно рассчитать для всех вариантов осветительной установки применительно к разным источникам света. Таким образом, можно сравнить различные смоделированные осветительные установки и выбрать из них наиболее эффективную. Недавно была предложена новая метрика эффективности использования электрической энергии [41], но эта метрика предназначена для источников света, а не для осветительных установок и не для оценки цветового предпочтения.

В табл. 5 проведено сравнение определённых в соответствии с индексом $R_{p,2019}$ уровней цветового предпочтения, которые были получены для освещённости 500 и 1200 применительно к четырём источникам света, спектры которых приведены на рис. 9. Как следует из табл. 5, если освещённость увеличивается от 500 до 1200 лк, то цветовое предпочтение, определяемое в соответствии с $R_{p,2019}$, смещается по шкале цветового предпочтения (рис. 2) на 10–11 пунктов вверх. В случае 1-го источника света это приращение соответствует переходу из категории «хорошо» в категорию «очень хорошо», а в случае 2-го источника света – из категории «плохо» в категорию «посредственно». Для 3-го и 4-го источников света такого существенного сдвига оценок не наблюдается.

Также интересно построить зависимость $R_{p,2019}$ от КЦТ. На рис. 10 при-

Рис. 8. Применение $R_{p,2019}$ при проектировании внутреннего освещения: зависимость $R_{p,2019}$ от освещённости E_v для четырёх источников света (см. рис. 9 и табл. 4)



Применение $R_{p,2019}$ при проектировании внутреннего освещения: значения освещённости, при которых $R_{p,2019}$ достигает уровней цветового предпочтения «очень хорошо» и «хорошо» для четырёх разных спектров, показанных на рис. 8

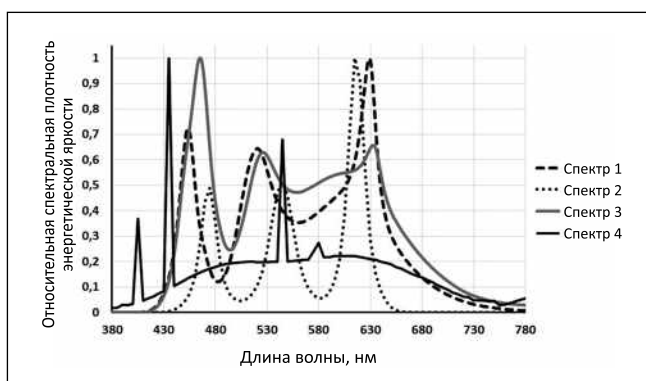
Спектр					Освещённость, лк, соответствующая качественной оценке:	
№	Источник света	R_f	КЦТ, К	ΔC_t	«хорошо», $R_{p,2019} = 79,6$	«очень хорошо», $R_{p,2019} = 91,6$
1	СД типа <i>RGBW</i>	90	3993	0,61	440	1170
2	СД типа <i>RGB</i>	77	3243	-0,34	*	*
3	СД типа <i>RGBW</i>	88	4840	-0,17	1650	*
4	Люминесцентная лампа	89	5091	0,05	890	*

* Уровня «хорошо» в пределах области применения $R_{p,2019}$ (200–1800 лк) достичь невозможно.

Уровни цветового предпочтения $R_{p,2019}$, полученные при 500 и 1200 лк для четырёх источников света, спектры излучения которых приведены на рис. 8

Спектр				$E_v=500$ лк		$E_v=1200$ лк		500 лк →1200 лк
№	R_f	КЦТ, К	ΔC_t	$R_{p,2019}$	Качественная оценка для $R_{p,2019}$	$R_{p,2019}$	Качественная оценка для $R_{p,2019}$	$R_{p,2019}$
1	90	3993	0.61	81	хорошо	92	очень хорошо	11
2	77	3243	-0.34	45	посредственно	56	умеренно	11
3	88	4840	-0.17	65	посредственно-хорошо	76	хорошо	11
4	89	5091	0.05	73	хорошо-посредственно	83	хорошо	10

Рис. 9. Относительная спектральная плотность энергетической яркости четырёх источников света из рис. 8 (характеристики этих источников света приведены в табл. 4): 1 – СД типа *RGBW*; 2 – СД типа *RGB*; 3 – СД типа *RGBW*; 4 – люминесцентная лампа



ведён расчётный пример, полученный с использованием уравнений (3) и (5) в пределах области применения $R_{p,2019}$ (3000–5600 К) независимо от какого-либо конкретного спектра источника света для $R_f = 84$, $E_v = 500$ лк и различных значений ΔC_t в качестве параметров. Были использованы следующие значения ΔC_t : 1,2; 0,9435 (что при $R_f = 84$ и $E_v = 500$ лк соответствует максимальному значению $R_{p,2019}$); 0,8; 0,4; 0,0 и -0,4 (это значение ΔC_t соответствует уменьшению насыщенности цвета).

Как видно на рис. 10, согласно результатам расчётов $R_{p,2019}$, наилуч-

ший уровень цветового предпочтения достигается в интервале от 4500 до 4800 К (нейтрально-белый и холодно-белый свет соответственно), что согласуется с базовым набором экспериментальных данных о цветовом предпочтении. Величины абсолютных максимумов зависимостей $R_{p,2019}$ от КЦТ зависят от уровня насыщенности цвета ΔC_t . Поскольку $R_{p,2019}$ был сформирован на основе результатов исследований установок искусственного освещения, проведённых с использованием цветных объектов с белыми стенами и белыми тканя-

ми (см. раздел 2), то можно ожидать, что ход приведённых на рис. 10 зависимостей $R_{p,2019}$ от КЦТ можно будет использовать для прогнозирования цветового предпочтения для различных ситуаций и условий работы, включая офисы, школы, выставки, конференц-залы, аудитории, помещения для завтраков в отелях и салоны в общественном транспорте. Для областей применения, которые требуют создания расслабленной атмосферы (например, романтические вечерние мероприятия, обеды, умственная творческая деятельность), более подходящими могут быть осветительные установки с более низкими КЦТ и более низкими уровнями освещённости. В последнем случае обеспечение высокого уровня цветового предпочтения не является (основной) целью при проектировании освещения.

5. Обсуждение

Новая метрика цветовых предпочтений ($R_{p,2019}$) обобщает экспериментальные данные о зависимости цветовых предпочтений от КЦТ, насыщенности цвета объекта и освещённости.

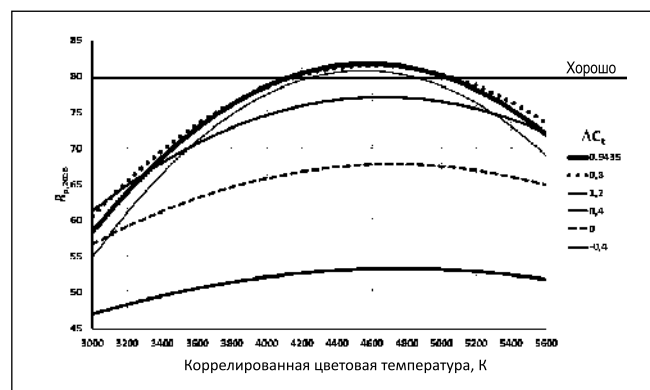
В метрику встроена семантическая интерпретация её числовой шкалы, связанная с качественной оценкой цветовых предпочтений («очень хорошо», «хорошо», «посредственно», см. рис. 2). Метрика позволяет определить значения освещённости, необходимые для достижения «хорошего» или «очень хорошего» уровня цветового предпочтения в случае конкретной осветительной установки (см. рис. 8), за исключением спектров с плохим качеством цветопередачи (например, спектр № 2 на рис. 9), в случае которых нельзя достичь «хорошего» уровня цветового предпочтения.

Помимо вышеуказанных достоинств, новая метрика имеет и следующие ограничения. Область применимости её входных параметров ограничена: метрика не может использоваться применительно к источникам тепло-белого света с КЦТ < 3000 К и к источникам холодно-белого света с КЦТ > 5600 К. Уровень освещённости также ограничен диапазоном от 200 до 1800 лк, который, однако, охватывает типичные освещённости, характерные для современного общего внутреннего освещения.

Что касается уровней насыщенности цвета, то источники света с $\Delta C_t > 1,2$ обычно приводят к перенасыщенности цветов цветных объектов, и при их использовании цветовые предпочтения обычно оцениваются как «посредственно» или ниже. Такие источники света не должны применяться в освещении. При таких высоких уровнях насыщенности цвета ($\Delta C_t > 1,2$) значение цветового предпочтения, получаемое в рамках этой метрики, с увеличением ΔC_t быстро уменьшается. Соответственно, такие источники света не должны применяться для общего внутреннего освещения, хотя они могут иметь специальное применение, например, при освещении театральных сцен для обеспечения сильного эмоционального эффекта. Ещё одним ограничением является зависимость субъективных оценок цветового предпочтения от области применения освещения [14], о чём уже упоминалось в конце раздела 4.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что на оценку наблюдателями цветовых предпочтений существенно влияет форма цветовой гаммы (особенно насыщенность

Рис. 10. Зависимость $R_{p,2019}$ от КЦТ при фиксированных значениях $R_f = 84$ и $E_v = 500$ лк. Расчётный пример с использованием уравнений (3) и (5) с различными значениями ΔC_t в качестве параметров. Абсолютный максимум $R_{p,2019}$ наблюдается при $\Delta C_t = 0,9435$



красного цвета) [13, 19, 20]. Насыщенность красного цвета не учитывается в рассматриваемой метрике $R_{p,2019}$ из-за ограниченности базовых наборов данных о цветовых предпочтениях [3, 32]: в этих экспериментах исследовалось влияние только КЦТ и освещённости без учёта влияния изменений насыщенности красного цвета, которое должно быть изучено в последующих исследованиях. Влияние насыщенности красного цвета особенно важно учитывать, если используются спектры излучения, специально предназначенные для обеспечения насыщенности цветов красных объектов (см. векторную диаграмму цветов на приведённом в [13] рис. 2). Для описания этого эффекта была разработана метрика *LIKE* (см. табл. 1), в которой используются следующие параметры [15]: R_f , $R_{cs, h16}$ (в качестве показателя насыщенности красного цвета; эта величина также используется в уравнении (4) настоящей статьи как одно из слагаемых при суммировании всех 16-ти значений $R_{cs, hi}$) и ψ (который представляет собой угол поворота наилучшим образом подобранного эллипса; этот эллипс аппроксимирует форму векторной диаграммы цветов *IES TM-30-15*).

При освещении совокупности цветных объектов, белый тон источника света обычно заметен на белых или нейтрально-серых поверхностях (стенах, скатертях, подоконниках, шторах, мебели), и восприятие этого белого тона влияет на определение уровня цветового предпочтения применительно к цветным объектам. Зависимость восприятия тона белого света (тепло-белый, нейтрально-белый, холодно-белый) от КЦТ и связь этого восприятия с цветовыми предпочтениями включены в метрики *CQS* [35], *CP* (уравнение (1)) и $R_{p,2019}$ (уравнения (3) – (5)). Однако было показано [25, 42,

43], что расстояние от соответствующих белому тону координат цветности до линии чёрного тела (выраженное как *Duv* или $\Delta u'v'$) также влияет на цветовое предпочтение. Цветности, которые находятся ниже линии чёрного тела, получали в целом более высокую оценку. Причина такого предпочтения была выявлена с помощью моделирования [26]: «источники света с цветностями ниже линии чёрного тела (то есть с отрицательными *Duv*) скорее получают высокую оценку в части цветовой гаммы, чем источники света, цветности которых лежат на линии чёрного тела или выше неё, сохраняя при этом высокие индексы точности воспроизведения цвета» [26]. Этот эффект не включён в новую метрику цветовых предпочтений $R_{p,2019}$, которой посвящена настоящая статья.

6. Выводы и перспективы

Подобные приведённым на рис. 8 зависимости цветового предпочтения от освещённости для разных источников света (или для разных вариантов многокристалльных СД источников света) можно использовать при проектировании, и выбрать в результате наиболее энергоэффективный источник света с «хорошим» уровнем цветового предпочтения. Если имеется только один источник света, то можно рассчитать соответствующий качественной оценке «хорошо» уровень освещённости, варьируя при этом количество светильников (с этим источником света), устанавливаемых в помещении, и высоту установки светильников над столом, на котором размещены освещаемые цветные объекты.

В соответствии с условиями наблюдения, использовавшимися при получении экспериментальных наборов данных, лежащих в основе но-

вой метрики цветовых предпочтений (нейтральная среда с белыми стенами, белыми скатертями и разнообразными цветными объектами), эта метрика должна быть применимой для служебных помещений или производственных условий. Для других областей применения, включая освещение жилых комнат или столовых в вечернее время, а также для специальных наборов цветных предметов (например, красной косметики, синих джинсов или важных хранящихся в памяти цветов, таких как цвет банана или оттенок кожи), следует применять другую метрику цветовых предпочтений.

Согласно табл. 5, равного 500 лк типичного уровня освещённости (наиболее распространённый уровень горизонтальной освещённости, требуемый стандартом для общего освещения рабочих мест [44]), часто недостаточно для обеспечения «хорошего» цветового предпочтения. В случае предъявляющих повышенные требования к световому предпочтению областей применения этот уровень освещённости должен быть увеличен (если это возможно) либо за счёт естественного освещения помещения, либо за счёт увеличения количества потребляемой светильниками электрической мощности (связанные с этим экономические соображения выходят за рамки настоящей статьи).

Контрольное исследование с использованием этой же семантически маркированной шкалы цветовых предпочтений (см. рис. 2) в настоящее время проводится в просторном экспериментальном помещении с осветительной установкой с большим количеством СД, позволяющей в более широком диапазоне, чем в предыдущих исследованиях, варьировать такие существенные параметры освещения, как освещённость, КЦТ (от 2800 до 6500 К), расстояние от координат цветности источника света до линии чёрного тела, насыщенность цвета объекта и насыщенность красного цвета. Цель этого исследования состоит в том, чтобы проверить и расширить область применимости уравнений (3) – (5) и ещё раз оптимизировать приведённые в табл. 2 параметры модели. Будет уточнено и используемое в настоящее время равное 0,70 значение весового коэффициента индекса точности воспроизведения цвета R_f .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. P. Bodrogi, S. Brückner, T.Q. Khanh, H. Winkler, Visual Assessment of Light Source Colour Quality // Colour Research and Application. – 2013. – Vol .38. – P. 4–13.
2. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, D. Stojanovic, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics – Part 1: Experiments in a real room // Lighting Research and Technology. – 2016. – Vol .49. – P. 697–713.
3. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, X. Guo, T.T. Anh, «Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 4: Experiments with still life arrangements at different correlated colour temperatures // Lighting Research and Technology. – 2017. – Vol .50. – P. 862–879.
4. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, Q.T. Vinh, D. Stojanovic, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 2: Experiments in a viewing booth and analysis of the combined dataset // Lighting Research and Technology. – 2017. – Vol .49. – P. 714–726.
5. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, Q.T. Vinh, S. Fischer, Colour preference, naturalness, vividness and colour quality metrics, Part 5: A colour preference experiment at 2000 lx in a real room // Lighting Research and Technology; first published online 20 October; DOI 10.1177/1477153517737133. – 2017.
6. S. Jost-Boissard, P. Avouac, P. Fontoynt, Assessing the colour quality of LED sources: Naturalness, attractiveness, colourfulness and colour difference // Lighting Res. Technol. – 2015. – Vol .47. – P. 769–794.
7. D. Durmus, W. Davis, Object colour naturalness and attractiveness with spectrally optimized illumination // Optics Express. – 2017. – Vol .25. – P. 12839–12850.
8. Y. Lin, J. He, A. Tsukitani, H. Noguchi, Colour quality evaluation of natural objects based on the Feeling of Contrast Index // Lighting Research and Technology. – 2016. – Vol .48. – P. 323–339.
9. K. A.G. Smet, P. Hanselaer, Memory and preferred colours and the colour rendition of white light sources // Lighting Research and Technology. – 2016. – Vol .48. – P. 393–411.
10. P.R. Boyce, C. Cuttle, Effect of correlated colour temperature on the perception of interiors and colour discrimination performance // Lighting Research and Technology. – 1990. – Vol .22. – P. 19–36.
11. L. Xu, M.R. Luo, M. Pointer, The development of a colour discrimination index // Lighting Research and Technology. – 2018. – Vol .50. – P. 681–700.
12. T. Esposito, K. Houser, A new measure of colour discrimination for LEDs and other light sources // Lighting Research and Technology. – 2019. – Vol .51. – P. 5–23.
13. T. Esposito, K. Houser, Models of colour quality over a wide range of spectral power distributions // Lighting Research and Technology; first published online on April 13; DOI 10.1177/1477153518765953. – 2018.

14. Y. Lin, M. Wei, K. A. G Smet, A. Tsukitani, P. Bodrogi, T.Q. Khanh, Colour preference varies with lighting application,» Lighting Research and Technology. – 2015. – Vol .49. – P. 316–332.

15. IES (Illuminating Engineering Society), IES method for evaluating light source colour rendition // IES TM-30-15. – 2015.

16. CIE (Commission Internationale de l'Éclairage), CIE2017 Colour Fidelity Index for accurate scientific use // CIE Publication 224:2017. – 2017.

17. M.S. Islam, R. Dangol, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, User preferences for LED lighting in terms of light spectrum // Lighting Research and Technology. – 2013. – Vol .45. – P. 641–665.

18. R. Dangol, M.S. Islam, M. Hyvärinen, P. Bhusal, M. Puolakka, L. Halonen, User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness // Lighting Research and Technology. – 2015. – Vol .47. – P. 36–53.

19. M. Wei, K.W. Houser, A. David, M.R. Krames, Colour gamut size and shape influence colour preference // Lighting Research and Technology. – 2017. – Vol .49. – P. 992–1014.

20. M.P. Royer, A. Wilkerson, M. Wei, K. Houser, R. Davis, Human perceptions of colour rendition vary with average fidelity, average gamut, and gamut shape // Lighting Research and Technology. – 2017. – Vol .49. – P. 966–991.

21. M.P. Royer, A. Wilkerson, M. Wei, Human perceptions of colour rendition at different chromaticities // Lighting Research and Technology. – 2018. – Vol .50. – P. 965–994.

22. Z. Huang, Q. Liu, S. Westland, M.R. Pointer, M.R. Luo, K. Xiao, Light dominates colour preference when correlated colour temperature differs // Lighting Research and Technology. – 2018. – Vol .50. – P. 995–1012.

23. H. Li, M.R. Luo, X.Y. Liu, B.Y. Wang, H.Y. Liu, Evaluation of colour appearance in a real lit room // Lighting Research and Technology. – 2016. – Vol .48. – P. 412–432.

24. P. Bodrogi, X. Guo, D. Stojanovic, S. Fischer, T.Q. Khanh, Observer preference for perceived illumination chromaticity // Colour Research and Application, Early View. – 2018.

25. Y. Wang, M. Wei, Preference among light sources with different Duv but similar colour rendition: A pilot study // Lighting Research and Technology. – 2018. – Vol .50. – P. 1013–1023.

26. M. Wei, K.W. Houser, What Is the Cause of Apparent Preference for Sources with Chromaticity below the Blackbody Locus? // LEUKOS. – 2016. – Vol .12. – P. 95–99.

27. M. Wei, W. Bao, H.P. Huang, Consideration of Light Level in Specifying Light Source Colour Rendition // LEUKOS, published online on 11 May; DOI 10.1080/15502724.2018.1448992. – 2018.

28. M. Wei, Maintaining Colour Preference under Different Light Levels, // presented at the 15th China International Forum on Solid State Lighting, Shenzhen, China. – 23–25 Oct. 2018.

29. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, P.Q. Anh PhD, Towards a user preference model for interior lighting Part 2: Experimental results and modelling // Lighting Research and Technology; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816474.– 2018.

30. H.W. Bodmann, G. Sollner, E. Voit, Evaluation of lighting level with various kinds of light // in: Proceedings of the CIE19th Session (CIE, 1963).

31. H.W. Bodmann, Quality of interior lighting based on luminance // Transactions of the Illuminating Engineering Society.– 1967. – Vol. 32. – P. 22–40.

32. T.Q. Khanh, P. Bodrogi, X. Guo, P.Q. Anh PhD, Towards a user preference model for interior lighting Part 1: Concept of the user preference model and experimental method,» Lighting Research and Technology; published online on December 13; DOI 10.1177/1477153518816469 (2018).

33. K. Smet, W.R. Ryckaert, M.R. Pointer, G. Deconinck, P. Hanselaer, Correlation between colour quality metric predictions and visual appreciation of light sources // Optics Express.– 2011. – Vol. 19. – P. 8151–8166.

34. K.W. Houser, M. Wei, A. David, M.R. Krames, X.S. Shen, Review of measures for light-source colour rendition and considerations for a two-measure system for characterizing colour rendition // Optics Express.– 2013. – Vol. 21. – P. 10393–10411.

35. W. Davis, Y. Ohno, Colour quality scale // Optical Engineering.– 2010. – Vol. 49. – P. 033602.

36. A. David, P.T. Fini, K.W. Houser, L. Whitehead, Development of the IES method for evaluating the colour rendition of light sources // Optics Express.– 2015. – Vol. 23. – P. 15888–15906.

37. F. Ebner, M.D. Fairchild, Development and testing of a colour space (IPT) with improved hue uniformity // in: Proceedings of the IS&T 6th Colour Imaging Conference.– 1998.

38. S.A. Fotios, G.J. Levermore, Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model // Lighting Research and Technology.– 1998. – Vol. 30. – P. 103–106.

39. P. Bodrogi, S. Brückner, N. Krause, T.Q. Khanh, Semantic interpretation of colour differences and colour-rendering indices // Colour Research and Application.– 2014. – Vol. 39. – P. 252–262.

40. M.S. Rea, J.P. Freyssinier, White lighting // Colour Research and Application.– 2013. – Vol. 38. – P. 82–92.

41. Q.T. Vinh, P. Bodrogi, T.Q. Khanh, Preliminary measure for the characterization of the usefulness of light sources // Optics Express.– 2018. – Vol. 26. – P. 14538–14551.

42. E.E. Dikel, G.J. Burns, J.A. Veitch, S. Mancini, G.R. Newsham, Preferred chromaticity of colour-tunable LED lighting // LEUKOS.– 2014. – Vol. 10. – P. 101–115.

43. Y. Ohno, M. Fein, Vision experiment on acceptable and preferred white light chromaticity for lighting // in: Proceedings of CIE2014

Lighting Quality and Energy Efficiency, CIE.– 2014.

44. DIN (German Industry Standard), DIN EN12464–1, Lighting of work places – Part 1: Indoor work places, DIN.– 2011.



Куанг Тринь Винь (Quang Trinh Vinh), Ph.D. Научный сотрудник Дармштадтского технического университета. Область научных интересов: светотехнические

аспекты СД освещения и автоматизации



Тран Куок Кхан (Tran Quoc Khanh), Ph. D., Dr. Sc., профессор. Окончил технический университет Ильяменау. Декан факультета электротехники и информационных

технологий Дармштадтского технического университета. Председатель проводящийся 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



Тран Туу Ань (Tran Thuy Anh), Ph. D. доцент Вьетнамского национального университета в Ханое. Область научных интересов: вопросы культуры, включая технокультуру и поведение покупателей



Петер Бодроги (Peter Bodrogi), Ph. D., Dr. Sc. Окончил Университет им. Лорана Этвуша (Будапешт). Научный сотрудник Дармштадтского технического университета. Область научных интересов: светотехника,

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

«Самая узкая медицинская лампа» 2019 года по версии IES

Североамериканское светотехническое общество (IES) в своём ежегодном отчёте («PROGRESS REPORT ACCEPTED PRODUCTS») публикует информацию об осветительных приборах, которые могут быть названы уникальными инновационными достижениями для светотехнической промышленности. В отчёте за 2019 г. одним из таких осветительных приборов был назван светильник «Lenga» компании «Visa Lighting» – двухсекционный щелевой светильник для освещения комнаты пациента.



«Lenga» был разработан, чтобы обеспечить многофункциональное освещение комнаты пациента, занимая при этом как можно меньше места. Дополнительные осветительные приборы, применяемые в медицинских учреждениях, должны обеспечивать достаточную освещённость для работы персонала – ухода за больными, проведения осмотров и др. Тем не менее, пространство потолка и стен палаты весьма ограничено из-за необходимости размещения потолочного и настенного медицинского оборудования, систем вызова персонала, карнизов, а также проводки и вентиляционных систем. Для решения этой проблемы, компания «Visa Lighting» спроектировала светильник «Lenga» как можно более узким – его габариты не превышают 83 мм в ширину и 102 мм в глубину.

Прибор оснащён оптикой для двух режимов: «Ambient» и «Exam»: при первом используются обе стороны каждого светильника, а при втором светильник непосредственно освещает кровать пациента без затенения. В устройстве используются СД или настраиваемые ИС для циркадного освещения.

finance.yahoo.com
15.08.2019