

# Светлота в условиях дневного зрения: психофизическое моделирование посредством сигналов синечувствительных фоторецепторов сетчатки<sup>1</sup>

П. БОДРОГИ, С. ГО, Т.К. КХАН

Светотехническая лаборатория Технического университета Дармштадта, Германия  
E-mail: bodrogi@lichttechnik.tu-darmstadt.de

## Аннотация

Был проведён наглядный психофизический эксперимент и исследовано восприятие светлоты большого однородного поля зрения ( $41^\circ$ ). Испытуемые оценивали светлоту двадцати световых стимулов разной цветности при двух уровнях яркости:  $L_v = 267,6$  кд/м<sup>2</sup> и  $L_v = 24,8$  кд/м<sup>2</sup>. Полученные средние значения по субъективной шкале визуальной светлоты были смоделированы с помощью комбинации сигналов, генерируемых при возбуждении фоторецепторов: колбочек *S*-типа, палочек, светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки (*ipRGCs*) и разности сигналов колбочек *L*-типа и *M*-типа. Новая величина – «относительное содержание синего в спектре» – также рассматривалась к моделированию. Эта величина была определена как «спектральная плотность энергетической яркости светового стимула, отнесённая к малому спектральному интервалу (380–520) нм в данном направлении в заданной точке». Модель «относительного содержания синего в спектре» может с достаточной точностью описывать субъективное восприятие светлоты наблюдателями.

**Ключевые слова:** субъективная светлота, восприятие светлоты, фотопическая модель светлоты, фоторецепторы, спектральное содержание синего цвета.

## 1. Введение

### 1.1. Яркость: определение и актуальность

Светлота (то есть субъективная светлота визуального стимула, воспринимаемого человеческим глазом) определяется в Международном светотехническом словаре Международной комиссии по освещению (*CIE ILV*) как «свойство зрительного восприятия, в соответствии с которым объект воспринимается как излучающий или отражающий больше или меньше света» [1]. Хотя светлота имеет «по меньшей мере три аспекта» [2], в данной статье рассматривается только так называемый аспект «пространственной светлоты» – восприятие «общего количества света, попадающего в глаза наблюдателя» [2]. Концепция «пространственной светлоты» важна во многих областях светотехники, включая проектирование освещения внутреннего пространства, в котором яркость должна быть достаточно высокой, чтобы «было легко видеть» [3], то есть для обеспечения хорошего зрительного восприятия. Пространственное распределение светлоты в помещении должно обеспечивать визуальный комфорт и хорошее (трёхмерное) восприятие пространства [3, 4]. При

наружном освещении с повышением уровня пространственной светлоты объекта наблюдения (местности), увеличивается и чувство безопасности [6] (что важно для пешеходов). Понятие пространственной светлоты относится к светлоте всей наблюдаемой местности, обладающей пространственной протяжённостью, а не к светлоте, создаваемой малоразмерными источниками света; или небольших отдельных объектов [5, 7].

### 1.2. Разница между «светлотой» и «яркостью»

В 1933 году Л.А. Джоунса назначили председателем Комитета по колориметрии Американского оптического общества (1922) и попросили огласить актуальную информацию о ходе выполнения работ. Впоследствии был опубликован предварительный отчёт, в котором был введён термин «яркость» [8]. После этого Джоунс написал [9], что комитет рекомендовал заменить слово «яркость» на «видимость». Комитет также постановил резервировать термин «светлота» в качестве названия сенсорной характеристики, связанной с фотометрической величиной, которой был присвоен термин «яркость». Позже было заявлено, что «фотометрия основана на неполном описании возможностей зрительной системы человека» [10], потому что функция  $V(\lambda)$  (основная в фотометрии) и её производные величины (яркость, освещённость и т.д.) представляют собой линейную комбинацию только чувствительных к длинноволновому (*L*) и средневолновому (*M*) спектрам колбочковых фоторецепторов сетчатки глаза и не включают важные сигналы от чувствительных к коротковолновому спектру (*S*) колбочек, палочек и светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки (*ipRGCs*).

Последние, так называемые «чувствительные к коротковолновому спектру», сигналы фоторецепторов вносят вклад в восприятие светлоты (в зависимости от уровня яркости) [11–17] вместе с сигналами двух хроматических (противоположных) каналов – (*L–M*) и (*L+M–S*) [13] насыщенный цветовой стимул выглядит ярче, чем его ненасыщенный аналог той же яркости (это «отличие светлоты от яркости» или эффект Гельмгольца-Кольрауша) [18, 19]. Таким образом, суть светлоты не может быть описана только величиной «яркость». В приведённом выше описании под термином «сигнал» с математической точки зрения понимается взвешивание относительного спектра излучения источника света по спектральной чувствительности фоторецептора и интегрирование по длинам волн видимого диапазона.

<sup>1</sup> Перевод с англ. Т.В. Мешковой

### 1.3. Модели светлоты

В этом подразделе собраны и обобщены некоторые модели светлоты, имеющиеся в литературе, а также проведено сравнение с моделями, использованными в настоящей статье. Модели светлоты обычно объединяют значения вышеупомянутых сигналов сетчатки, включая два противоположных канала ( $L-M$  и  $L+M-S$ ) или их аппроксимации, основанные на значениях координат цвета стандартной колориметрической системы  $XYZ$  МКО. Модели светлоты также содержат аппроксимацию сигнала ( $L+M$ ) (чаще всего используется яркость в условиях дневного зрения,  $L_v$ ), представление палочкового сигнала (чаще всего используется яркость в условиях ночного зрения) и сигнала  $ipRGC$  (сигнал светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки), чтобы получить числовую величину предиктора для ощущения светлоты человеком. В некоторых моделях величина этого предиктора предназначена только для прогнозирования порядка ранжирования зрительных стимулов по восприятию их светлоты, не представляя численный аналог абсолютной величины воспринимаемой светлоты. Это так называемые модели эквивалентной яркости ( $L_{eq}$ ). Выражение (1) показывает пример модели светлоты по Фотиосу и Левормору [20]:

$$L_{eq} = L_v \cdot (S/V)^{0,24}, \quad (1)$$

где  $S$  – сигнал вычисляется по данным чувствительности колбочек Смита и Покорны [21], а величина  $V$  (так называемый  $V$ -сигнал) получается путём взвешивания относительного спектрального распределения потока излучения источника света по функции  $V(\lambda)$  в видимом диапазоне длин волн.

Другим примером модели светлоты является эквивалентная яркость  $L_{eq}$  по Вэйру и Коуну ( $WCCF$ ) [22]. Эта модель базируется на стандартной колориметрической системе МКО, которая представлена в виде уравнений (2) и (3):

$$L_{eq} = (B/L) \cdot L_v, \quad (2)$$

где  $B/L$  является отношением светлоты к яркости, вычисляемое по координатам цветности стимула  $x, y$  по уравнению (3):

$$\lg(B/L) = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4. \quad (3)$$

Модель по Ри и др. (2011) [15] работает с взвешенной суммой двух сигналов –  $V$ -сигнала и  $S$ -сигнала. В модели Фотиоса и Левормора (1998) [13] воспринимаемая светлота рассматривается как сумма сигналов по трём каналам: ( $L+M$ ), представленном с помощью  $V(\lambda)$ , и вышеупомянутых двух противоположных каналах. Модель Гута [23] основана на концепции векторной яркости, равной квадратному корню из суммы трёх квадратичных компонент:  $A$  (ахроматическая составляющая),  $T$  (первая хроматическая составляющая) и  $D$  (вторая хроматическая составляющая). Ягучи и Айкеда (1983) использовали модификацию модели Гута для объяснения нарушения спектральной аддитивности, которую они измерили в своих экспериментах по визуальному уравниванию светлот [24]. Модель

Кокошка – Бодман [25] вычисляет значение эквивалентной яркости для светлоты трёх координат цветности стандартной колориметрической системы МКО ( $X_{10}, Y_{10}, Z_{10}$ ) и яркости в условиях ночного зрения ( $L'$ ).

В модели Ямакава и др. [47], полученной в результате субъективного эксперимента по оценке уровня светлоты, сигнал  $ipRGC$  (меланопсинный сигнал) был объединён с освещённостью сетчатки, чтобы предсказать воспринимаемую светлоту метамерных белых стимулов (при фиксированных координатах цветности  $x = 0,328$  и  $y = 0,367$ ) при разных уровнях сигнала  $ipRGC$  и яркости (от 22 кд/м<sup>2</sup> до 112 кд/м<sup>2</sup>). Эта модель представлена в виде уравнения:

$$R = 0,00484G^{1,1} + 2,31E^{0,48}, \quad (4)$$

где  $R$  – воспринимаемая светлота метамерных белых стимулов,  $G$  – меланопсинный сигнал,  $E$  – освещённость на сетчатке.

Так называемая модель светлоты  $B_2$  Безенекера и Буллока [14] содержит взвешенную сумму трёх сигналов:  $V$ -сигнала,  $S$ -сигнала и сигнала  $ipRGC$ , отражающих тот факт, что «коротковолновое (<500 нм) излучение источника света усиливает восприятие пространственной светлоты в диапазоне от низкого до умеренного уровней яркости в условиях дневного зрения». Вдохновлённые этой идеей, авторы настоящей статьи намерены рассмотреть в качестве новой величины относительное спектральное содержание синего цвета в излучаемой энергии (далее – относительное спектральное содержание синего цвета). Эта величина обозначается  $\Phi_{rel, blue}$ , и определяется как спектральная плотность энергетической яркости  $L_e(\lambda)$  стимула, отнесённая к малому спектральному интервалу (380–520 нм) в данном направлении в заданной точке  $L_v$  и определяется по формуле (5):

$$\Phi_{rel, blue} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{520} L_e(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Формула приведена относительно одного из двух уровней яркости, которые использовались в методике эксперимента настоящей статьи, а именно 267,6 кд/м<sup>2</sup>.

Как упомянуто выше,  $\Phi_{rel, blue}$  аналогична подходу Безенекера и Буллока [14] коротковолнового излучения (менее 500 нм), но мы используем 520 нм в качестве верхнего предела интеграла для того, чтобы немного больше перекрыть спектральную чувствительность палочкового фоторецептора (чтобы иметь возможность лучше учитывать возможный вклад палочек). В табл. 1 приведена классификация вышеупомянутых моделей светлоты по их типу.

### 1.4. Цели настоящей статьи

В настоящей статье будет описан визуальный эксперимент по моделированию светлоты. Эксперимент проводился при двух фиксированных уровнях яркости ( $L_v = 267,6$  и  $24,8$  кд/м<sup>2</sup>) с 20 различными цветностями (различным содержанием сигнала фоторецептора) зрительного стимула на каждом уровне.

Результат будет моделироваться для следующих случаев:

1. комбинацией вышеупомянутых сигналов фоторецепторов сетчатки;

Аналитический обзор моделей светлоты, включая предложенную авторами настоящей статьи

Авторы	Тип модели	Сигналы или величины
Фотнус и Левермор [20]	Эквивалентная яркость	$S, V, L_v$
Вэйр и Коуэн ( <i>WCCF</i> ) [22]	Эквивалентная яркость	$x, y, L_v$
Ри и др. [15]	Взвешенная сумма сигналов	$S, V$
Фотнус и Левермор [13]	Взвешенная сумма каналов	$L+M,$ $L-M,$ $L+M-S$
Гут [23]	Взвешенная сумма каналов	$A, T, D$
Ягучи и Айкеда [24]	Взвешенная сумма каналов	$A, T, D$ (изменённые)
Кокошка – Бодман [25]	Эквивалентная яркость	$X_{10}, Y_{10}, Z_{10}, L'$ (палочки)
Безенкер и Буллок [14]	Взвешенная сумма сигналов	$S, V, ipRGC$
Ямакава и др. [47]	Взвешенная сумма каналов	$E, ipRGC$
Бодроги, Го, Кхань	Относительное спектральное содержание синего цвета	$L_v, \Phi_{rel, blue}$

2. относительным спектральным содержанием синего цвета, как представление сигналов трёх типов фоторецепторов, чувствительных в коротковолновой части видимого излучения:  $S$ -колбочек,  $ipRGCs$  и палочек.

Предметы исследования настоящей статьи:

1. Различимы ли вклады трёх фоторецепторов в коротковолновом диапазоне ( $S$ -колбочек,  $ipRGCs$  и палочек) для начального восприятия отличия светлот друг от друга (а также выделения значения относительного спектрального содержания синего) на основе результатов визуального эксперимента по исследованию светлоты?

2. Велик ли вклад палочек в восприятие светлоты при двух уровнях яркости в эксперименте ( $L_v = 267,6$  и  $24,8$  кд/м<sup>2</sup>)?

3. Влияет ли противоположный сигнал ( $L-M$ ) (разность сигналов  $L$ - и  $M$ -колбочек)?

4. Можно ли применять предложенную величину относительного спектрального содержания синего цвета (5) для

моделирования воспринимаемой светлоты в новой и существующей моделях?

Мы будем использовать комбинацию сигналов фоторецепторов и относительное спектральное содержание синего цвета для моделирования светлоты, т.е. для трактовки субъективных (определяемых наблюдателями) шкал визуальной светлоты ( $VBS$ , *visual brightness scales*), полученных в результате эксперимента настоящей статьи. Эти две гипотезы формулируются в уравнении комбинации сигналов (6) и в уравнении относительного спектрального содержания синего цвета (7), соответственно. Оптимальные параметры модели (весовые коэффициенты сигнала  $A_S, A_{ipRGC}, A_R, A_{L-M}$  и показатель степени  $\gamma$ ) будут рассчитываться на основе средних значений шкал ощущений светлоты наблюдателями. Величина  $lg(L_v)$  включается для учёта влияния изменения общего уровня яркости зрительного стимула.

$$VBS \sim lg(L_v) \cdot [A_S (S_{rel})^\gamma + A_{ipRGC} (ipRGC_{rel})^\gamma + A_R (R_{rel})^\gamma + A_{L-M} (|L_{rel} - M_{rel}|)^\gamma] \quad (6)$$

$$VBS \sim lg(L_v) \cdot [(\Phi_{rel, blue})^\gamma] \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7), символ « $\sim$ » означает, что количество слева должно быть объяснено количеством справа. Величина  $|L_{rel} - M_{rel}|$  – это так называемый противоположный сигнал: разность относительного сигнала  $L$ -колбочек и относительного сигнала  $M$ -колбочек. Так называемые относительные значения сигнала  $L_{rel}, M_{rel}, S_{rel}, R_{rel}$  и  $ipRGC_{rel}$  в уравнении (6) были вычислены следующим образом:

1. спектральное распределение энергии (СПЭ) стимула было нормировано так, что его яркость составила  $267,6$  кд/м<sup>2</sup>;

2. нормированное значение СПЭ было взвешено при относительной спектральной чувствительности определённого фоторецептора;

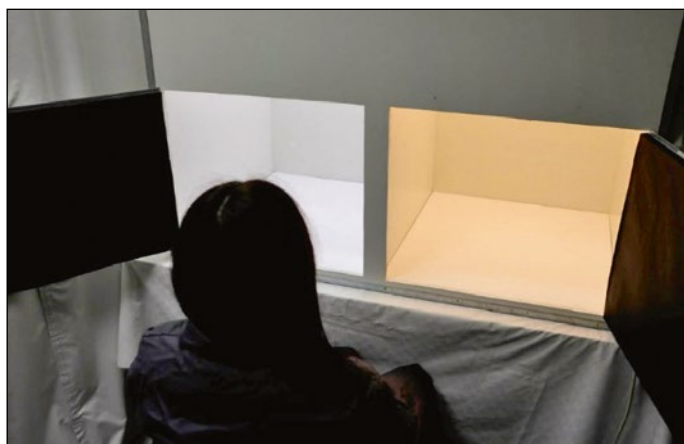


Рис. 1. Экспериментальная установка. Испытуемый сравнивал яркость в двух камерах экспериментального бокса, когда яркость двух камер была одинаковой, и при двух различных уровнях яркости  $267,6$  и  $24,8$  кд/м<sup>2</sup>. Слева – эталонный стимул (второй серии)

3. далее был взят интеграл взвешенного значения СРЭ в диапазоне (380–780) нм.

Это вычисление показано в уравнениях (8) – (12). Для расчёта использовались спектральные чувствительности  $L$ -,  $M$ - и  $S$ -колбочек по Стокману и Шарпу (2000),  $L(\lambda)$ ,  $M(\lambda)$  и  $S(\lambda)$ , соответственно [27, 28]. Спектральная чувствительность светочувствительных ганглиозных клеток сетчатки ( $ipRGC$ ),  $ipRGC(\lambda)$  была вычислена в соответствии с [29, 30], в то время как относительная спектральная световая эффективность  $V'(\lambda)$  для ночного зрения была применена для представления вклада палочковых фоторецепторов в восприятие светлоты.

$$L_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)L(\lambda)d\lambda \quad (8)$$

$$M_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)M(\lambda)d\lambda \quad (9)$$

$$S_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)S(\lambda)d\lambda \quad (10)$$

$$R_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)V'(\lambda)d\lambda \quad (11)$$

$$ipRGC_{rel} = [267,6 / L_v] \cdot \int_{380}^{780} L_e(\lambda)ipRGC(\lambda)d\lambda \quad (12)$$

Ещё одной целью настоящей работы является сравнение оптимальных значений показателя степени  $\gamma$  в уравнениях (6) и (7) при двух уровнях яркости 267,6 и 24,8 кд/м<sup>2</sup>, и сравнить эти полученные значения с моделью Фотиуса и Левормора [20] ( $\gamma = 0,24$ ). Другой вопрос, существенно ли различаются два показателя степени при двух уровнях яркости в настоящем эксперименте по светлоте. Таким образом, целью настоящей статьи является моделирование набора данных нового визуального эксперимента исследования светлоты с помощью предложенных уравнений (6) и (7).

## 2. Экспериментальный метод

Была использована так называемая процедура различения светлоты [31], в ходе которой испытуемым предлагалось сообщить, какая часть двухкамерного экспериментального бокса выглядит ярче (рис. 1). Испытуемые также должны были сказать, насколько он был ярче. Для этого они использовали следующую шкалу ощущений: 0 – почти одинаково яркая, почти нет видимой разницы в яркости; 1 – несколько ярче с очень маленькой разницей; 2 – несколько ярче; 3 – явно ярче; и 4 – явно ярче с большой разницей. Далее испытуемых инструктировали следующим образом: «Если вы говорите, например: «правая 2», это означает, что правая камера несколько ярче левой камеры. Если вы говорите «левая 4», это означает, что левая камера явно ярче, чем правая камера, и видна большая разница». Экспериментатор немедленно записывал каждый произнесённый ответ в электронную таблицу.

Испытуемые сидели в фиксированном положении перед экспериментальным боксом, экспериментатор контролировал положения наблюдателя. Испытуемые располагались по центру относительно экспериментального бокса, так чтобы глаза находились на расстоянии 20 см, при этом расстояние между глазами и серединой дна каждой

камеры равнялось 80 см. Ширина каждой камеры составляла 60 см (соответствует угловому размеру 41°), высота – 53 см, глубина – 67 см. Ширина разделительной стенки между двумя камерами равнялась 6 см (что соответствует угловому размеру 4°). Два источника света располагались в верхней части экспериментального бокса на высоте 72 см над верхними крышками двух камер. Такое расположение источников света позволило достичь однородного освещения нижней части камер. Однородность была увеличена за счёт дополнительной установки двух диффузных пластин (одна под источниками света, а другая на верхних крышках камер), таким образом неравномерность яркости в нижней части камер составила менее 3 %.

В эксперименте эталонный стимул был получен от светодиодного источника света с изменённым люминофором для фиксированного относительного спектрального распределения потока излучения при цветовой температуре 3991 К. Эталонный стимул появлялся либо справа (первая серия), либо слева (вторая серия), чтобы уравновесить возможное «смещение положения» [31]. Каждая из двух серий эксперимента проводилась дважды в двух отдельных случаях (называемых сессиями): первый со всеми стимулами при 267,6 кд/м<sup>2</sup> и второй со всеми стимулами при 24,8 кд/м<sup>2</sup>, так что всего было проведено четыре сессии. В один день разрешалось провести и закончить только одну сессию, чтобы не было повторений. Испытуемым заранее сообщали, где находится эталон (слева или справа). Также дополнительно обозначали, что эталонный стимул не будет меняться в течение всего сеанса с двадцатью тестовыми стимулами.

Перед каждым сеансом проводилась тренировочная сессия, в ходе которой каждый из двадцати тестовых стимулов показывался в случайном порядке (по 10 с каждый) по сравнению с постоянным эталонным стимулом. Испытуемые не должны были отвечать на этапе обучения; они просто должны были рассмотреть возможный ответ. На тренировочной сессии в дополнение к двадцати тестовым стимулам в сочетании с эталонным стимулом трижды были показаны два якорных стимула. Один из них был явно ярче (330 и 33 кд/м<sup>2</sup> при двух уровнях яркости соответственно; при относительном спектральном распределении излучения стимула № 20 в таблице 2), а другой был явно темнее (49 и 5 кд/м<sup>2</sup>; при относительном спектральном распределении излучения стимула № 6 в таблице 2), чем эталонный стимул (с чётко определяемой визуальной разницей светлоты), и испытуемый был проинформирован об этом. Эти два якоря были показаны в начале сессии, затем после 10-го тестового стимула и в конце.

В основной части каждого сеанса, после 15 минут первоначальной адаптации к эталонному стимулу, испытуемый просматривал две камеры (эталонную и тестовую) в течение 40 с. Затем автоматический компьютерный звук произносил: «пожалуйста, оцените». После сигнала испытуемый должен был ответить в течение 20 с. До появления следующего тестового стимула нейтральный белый тёмный якорный стимул всегда отображался в течение 40 с, и автоматический звук сообщал об этом испытуемому. В течение каждого 40-секундного интервала испытуемому предлагалось сравнить светлоту двух стимулов следующим образом:

1. рассматривать только два дна камер экспериментального бокса, исключая вертикальные стенки;

Значения стимулов  $L_{rel}$ ,  $M_{rel}$ ,  $S_{rel}$ ,  $|L_{rel}-M_{rel}|$ ,  $S_{rel}$ ,  $R_{rel}$  (палочек),  $ipRGC$  и относительное спектральное содержание синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ )

№	$L_v$ (кд/м <sup>2</sup> )	$ L_{rel}-M_{rel} $	$L_{rel}$	$M_{rel}$	$S_{rel}$	$R_{rel}$	$ipRGC_{rel}$	$\Phi_{rel, blue}$	Комментарии
1	268,2	0,001	0,386	0,387	0,024	0,345	0,211	0,188	Высокое содержание палочек
2	267,4	0,168	0,453	0,285	0,015	0,155	0,080	0,058	Высокое содержание $ L-M $
3	268,3	0,108	0,431	0,322	0,034	0,269	0,171	0,158	Высокое содержание палочек
4	267,7	0,088	0,440	0,352	0,331	0,525	0,586	0,740	Высокое содержание палочек и $ipRGC$
5	268,1	0,083	0,431	0,348	0,436	0,327	0,426	0,703	Высокое содержание S
6	266,8	0,168	0,454	0,286	0,048	0,167	0,109	0,100	Тёплый белый
7	266,8	0,033	0,413	0,380	0,343	0,476	0,512	0,652	Холодный белый
8	268,9	0,099	0,431	0,332	0,166	0,322	0,289	0,409	Нейтральный белый
9	268,4	0,101	0,433	0,332	0,144	0,292	0,268	0,307	Сбалансированные сигналы с высоким содержанием $ipRGC$
10	268,0	0,167	0,452	0,285	0,018	0,157	0,083	0,062	Высокое содержание $ L-M $
11	266,7	0,037	0,415	0,377	0,380	0,477	0,530	0,793	Холодный белый с более высокими локальными максимумами
12	267,6	0,101	0,429	0,328	0,122	0,294	0,226	0,233	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием палочек
13	267,1	0,042	0,426	0,384	0,831	0,538	0,767	1,164	Очень высокое содержание S
14	268,0	0,095	0,427	0,332	0,150	0,274	0,223	0,238	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием S
15	267,4	0,097	0,430	0,333	0,134	0,293	0,253	0,274	Нейтральный белый
16	268,0	0,101	0,431	0,330	0,131	0,281	0,237	0,250	Стимул нулевого положения
17	267,9	0,030	0,412	0,382	0,351	0,483	0,514	0,626	Высокое содержание $ipRGC$
18	267,1	0,168	0,455	0,287	0,051	0,206	0,143	0,142	Тёплый белый с более высокими локальными максимумами
19	267,3	0,159	0,459	0,300	0,327	0,300	0,338	0,414	Сбалансированные сигналы с более высоким содержанием S
20	266,8	0,069	0,422	0,352	0,194	0,362	0,338	0,381	Холодный белый
Ref.	270,3	0,100	0,431	0,331	0,133	0,282	0,239	0,252	Нейтральный белый (без оптимизации)

2. медленно перемещать голову между двумя камерами, глядя на два дна, не менее 2 с каждое.

Стимулы с сильным хроматическим содержанием (например, желтоватый в правой камере на рис. 1) вызывали остаточные изображения, но этот эффект был смягчён нейтральным белым тёмным якорным стимулом, отображаемым в течение 40 с между любыми последующими тестовыми стимулами. Роль этого повторяющегося тёмного якорного стимула состояла не только в том, чтобы очистить остаточные изображения, но и в том, чтобы перезагрузить процедуру распознавания светлоты испытуемым из явно более тёмного якоря.

Двадцать тестовых стимулов всегда показывались в случайном порядке, чтобы избежать так называемого «эффекта порядка» [31]. Они были сгенерированы 11-каналь-

ным светодиодной установкой при двух уровнях яркости:  $(267,6 \pm 0,8)$  кд/м<sup>2</sup> или  $(24,8 \pm 0,07)$  кд/м<sup>2</sup>. Двадцать тестовых стимулов имели одинаковые относительные спектральные распределения потока излучения при обоих уровнях яркости. Это было обеспечено ахроматически передаваемым рисунком отверстий, расположенным под светодиодным источником света. Один из тестовых стимулов (№ 16; стимул нулевого условия) был оптимизирован таким образом, чтобы иметь аналогичные относительные спектральные распределения излучения сигналов  $|L-M|$ , S, палочек и  $ipRGC$  по отношению к эталонному стимулу (табл. 2). Другие тестовые стимулы были разработаны (путём оптимизации управляющих значений 11 каналов) таким образом, чтобы иметь различные комбинации значений сигналов  $|L-M|$ , S, палочек и  $ipRGC$ , сохраняя по-

Средние значения и средние абсолютные значения отклонения оценок разности светлоты для всех наблюдателей

	Серия	Средняя оценка разности светлот				Среднее абсолютное отклонение по всем наблюдателям			
		1 <sup>я</sup>	2 <sup>я</sup>	1 <sup>я</sup>	2 <sup>я</sup>	1 <sup>я</sup>	2 <sup>я</sup>	1 <sup>я</sup>	2 <sup>я</sup>
No.	$\Phi_{rel, blue}$	267,6 кд/м <sup>2</sup>	267,6 кд/м <sup>2</sup>	24,8 кд/м <sup>2</sup>	24,8 кд/м <sup>2</sup>	267,6 кд/м <sup>2</sup>	267,6 кд/м <sup>2</sup>	24,8 кд/м <sup>2</sup>	24,8 кд/м <sup>2</sup>
13	1,164	3,0	3,5	3,0	2,5	1,0	0,5	1,0	1,5
11	0,793	2,0	2,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,5
4	0,74	3,0	3,0	3,0	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
5	0,703	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0
7	0,652	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,5	1,0	1,0
17	0,626	2,0	2,0	2,0	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0
19	0,414	3,0	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,5
8	0,409	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,5	1,0	0,0
20	0,381	2,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,5	1,0	1,0
9	0,307	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15	0,274	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,5
16	0,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	0,238	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,0
12	0,233	-1,0	-1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	0,188	2,0	0,0	2,0	-2,0	1,0	3,0	1,0	2,0
3	0,158	-1,0	-2,0	-1,0	-1,5	2,0	1,0	1,0	1,0
18	0,142	-1,0	-2,0	-1,0	-3,0	3,0	2,0	2,0	1,0
6	0,1	-2,0	-2,5	-1,0	-2,5	2,0	1,5	1,0	1,0
10	0,062	-1,0	-3,0	-1,0	-3,0	3,0	1,0	3,0	1,0
2	0,058	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0	2,0	2,0	2,0	1,0
					Средне	1,0	1,0	1,0	1,0

стоянный уровень яркости. На рис. 2 показано относительное спектральное распределение потока излучения стимулов. В табл. 2 приведены значения стимулов  $L_{rel}$ ,  $M_{rel}$ ,  $S_{rel}$ ,  $|L_{rel}-M_{rel}|$ ,  $S_{rel}$ ,  $R_{rel}$  (палочек) и  $ipRGC$ , полученные с помощью уравнений (8) – (12) и комментарии по оптимизации. Их относительное спектральное содержание синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ ) также приведено в таблице 2.

Что касается воспроизводимости двадцати различных спектральных распределений излучения с помощью светодиодной установки, то изменение яркости в течение 40-дневного экспериментального периода составило менее 1 %, изменение яркости эталонного источника света составило менее 1,5 %, изменение сигналов  $L_{rel}$ ,  $M_{rel}$ ,  $R_{rel}$  (палочек) и  $ipRGC_{rel}$  составило менее 1,5 % (как для тестовых стимулов, так и для эталонных), изменение сигнала  $S_{rel}$  составило менее 2,3 % (как для тестовых стимулов, так и для эталонных).

В первой серии участвовало 25 участников (в возрасте от 21 до 47 лет, среднее значение: 26,9; 10 китайцев, 1 тайванец, 9 европейцев, 2 вьетнамца и 3ое с Ближнего

Востока) и во второй серии принял участие 21 испытуемый (в возрасте от 21 до 47 лет, среднее значение: 27,4; 10 китайцев, 1 тайванец, 7 европейцев, 1 вьетнамец и 2ое с Ближнего Востока), частично перекрывающих обе серии. Все испытуемые имели нормальное цветовое зрение, проверенное стандартными Псевдоизохроматическими пластинами на наличие приобретённых дефектов цветового зрения, Часть II [32] и ненасыщенной панелью d-15 [33].

### 3. Результаты, моделирование и обсуждение

В каждом сеансе для каждого из 20 тестовых стимулов регистрировались значения делений по шкале ощущений для каждого наблюдателя (то есть целое число от 0 до 4). Если эталон оказывался темнее (ярче) тестового стимула, то оценка этого тестового стимула присваивалась положительному (отрицательному) знаку. В табл. 3 приведены средние значения и средние абсолютные значения отклонения (разброс в оценках наблюдателей) в оценках светлоты для всех наблюдателей. 20 тестовых стимулов

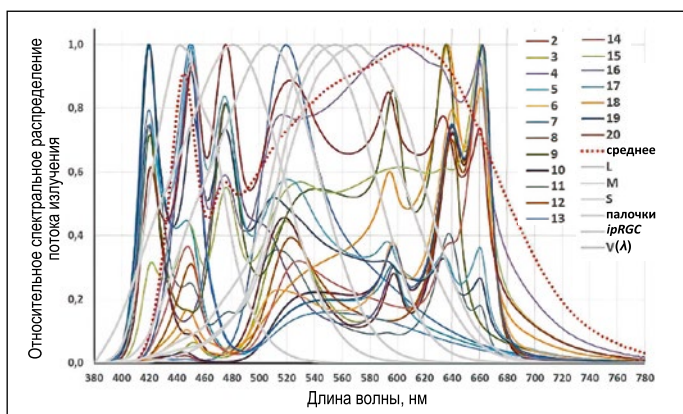


Рис. 2. Относительное спектральное распределение потока излучения 20 тестовых стимулов, эталонного стимула и относительные спектральные чувствительности колбочек типов *L*, *M*, *S*, палочек и *ipRGC*

(см. табл. 2 и рис. 2) повторно отсортированы в табл. 3 в соответствии с их относительным спектральным содержанием синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ ) в порядке убывания.

Как видно из последней строки табл. 3, среднее значение среднего абсолютного значения отклонения для всех участвующих наблюдателей всех тестовых стимулов равно 1 рейтинговой единице в каждой серии (1 и 2) и каждому уровню яркости (267,6 и 24,8 кд/м<sup>2</sup>). Единица оценки в этом случае – это характерное значение вариативности для межнациональной группы наблюдателей. На рис. 3 визуализируются средние значения шкалы светлоты, представленные в таблице 3.

Как видно из рис. 3, средние значения светлоты для всех наблюдателей, участвующих в данной серии, демонстрируют тенденцию к снижению с уменьшением относительного спектрального содержания синего цвета. Тестовый стимул № 13 с наибольшим относительным значением спектрального содержания синего цвета  $\Phi_{rel, blue} = 1,164$  оказался самым ярким. В целом, последние пять тестовых стимулов в табл. 3 (№ 3, 18, 6, 10 и 2), имеющие наименьшее относительное спектральное содержание синего цвета ( $\Phi_{rel, blue} < 0,16$ ), оказались самыми тёмными. Коэффициент корреляции Спирмена между средними значениями оценок разности светлоты при двух уровнях яркости составил 0,944 в первой и 0,916 во второй серии эксперимента. Оба значения коэффициента корреляции были значимыми (*T*-тест;  $p < 0,0001$ ). Это означает, что результаты при двух уровнях яркости демонстрируют сходные тенденции при оценке светлоты для всех 20 тестовых стимулов. Корреляция между значениями светлот в двух сериях эксперимента также высокая: коэффициент корреляции Спирмена составил 0,911 (при 267,6 кд/м<sup>2</sup>) и 0,838 (при 24,8 кд/м<sup>2</sup>), причём оба коэффициента были значимыми (*T*-тест;  $p < 0,0001$ ). Этот вывод позволяет объединить результаты двух серий эксперимента.

Чтобы построить модель светлоты, очень важно проанализировать тенденции оценки отдельных наблюдателей, чтобы исключить наблюдателей с противоречащими тенденциями оценок перед моделированием. Для этого был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена между значением сигнала тестового стимула (табл. 2) и значениями оценки светлоты каждого наблюдателя в отдельности. Минимальные, максимальные и сред-

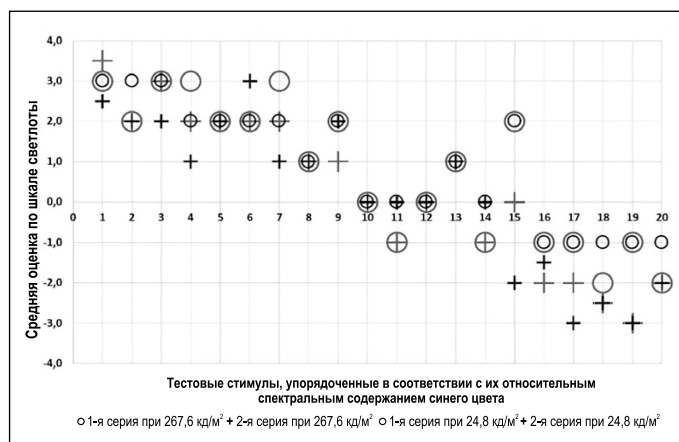


Рис. 3. Средняя оценка по шкале светлоты в зависимости от тестовых стимулов, которые упорядочены в соответствии с их относительным спектральным содержанием синего цвета в порядке убывания по абсциссе

ние значения этих коэффициентов ранговой корреляции для всех испытуемых приведены в табл. 4.

Как видно из табл. 4, существует положительная корреляция в среднем между оценками светлоты и сигналами всех трёх коротковолновых фоторецепторов (*ipRGC*, *S*, *R*), а также  $\Phi_{rel, blue}$ , но корреляция с сигналом  $[L-M]$  в среднем отрицательна. Рассматривая максимальные и минимальные значения коэффициентов корреляции, можно видеть, что некоторые наблюдатели противоречат основной тенденции восприятия большей светлоты с повышенным спектральным содержанием синего при равной яркости. В рамках настоящей статьи мы решили использовать для моделирования экспериментальные данные только тех наблюдателей (большинство), которые следуют основной тенденции. Аналогичные выводы об индивидуальных различиях восприятия светлоты были также найдены в литературе, что обозначалось выше. В настоящей статье мы используем следующий математический критерий для включения результата конкретного наблюдателя в моделирование светлоты: значение коэффициента ранговой корреляции с относительным спектральным содержанием синего  $\Phi_{rel, blue}$  этого наблюдателя должно было быть больше 0,2 в каждом из четырёх сеансов.

Восемнадцать из 25 наблюдателей (72 %) были включены в моделирование согласно 1-й серии эксперимента и четырнадцать из 21 наблюдателя (67 %) были включены в моделирование согласно 2-й серии эксперимента. Оценки светлоты выбранных наблюдателей (18 наблюдателей + 14 наблюдателей = 32 случая) были унифицированы по следующим положениям. Нулевое положение стимула дало в случае последних наблюдателей для обеих серий и обеих уровней яркости нулевые средние оценки. В первой серии эксперимента при 267,6 кд/м<sup>2</sup> были получены исключительно нулевые оценки в случае нулевого стимула (т.е. наблюдатели отмечали эталонную светлоту), во второй серии была только одна оценка (-1), а все остальные равнялись 0. При этом для уровня яркости 24,8 кд/м<sup>2</sup> были получены только две оценки (-1); и одна (+1) в первой серии и три (-1) оценки и одна (+1) оценка. *U*-тест Манна-Уитни не выявил достоверного отличия тенденции любого из четырёх наборов нулевых условий от нуля ( $p < 0,01$ ). Мы сравнили наборы данных 1-й серии и 2-й серии также

Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена между значениями сигнала фоторецептора тестовых стимулов и значениями оценки светлоты для каждого наблюдателя и каждого экспериментального сеанса

Сессия							
Серия	Уровень яркости, кд/м <sup>2</sup>		$ipRGC_{rel}$	$S_{rel}$	$R_{rel}$	$ L_{rel}-M_{rel} $	$\Phi_{rel, blue}$
1	267,6	Мин.	-0,10	-0,06	-0,05	-0,78	-0,11
1	267,6	Макс.	0,94	0,90	0,91	0,22	0,95
1	267,6	Ср.	0,49	0,49	0,50	-0,43	0,50
1	24,8	Мин.	-0,16	-0,19	-0,04	-0,85	-0,19
1	24,8	Макс.	0,95	0,91	0,92	0,09	0,94
1	24,8	Ср.	0,56	0,53	0,59	-0,52	0,56
2	267,6	Мин.	-0,50	-0,36	-0,40	-0,85	-0,45
2	267,6	Макс.	0,87	0,89	0,88	0,24	0,88
2	267,6	Ср.	0,50	0,50	0,48	-0,42	0,50
2	24,8	Мин.	-0,20	-0,17	-0,22	-0,76	-0,21
2	24,8	Макс.	0,89	0,87	0,87	0,34	0,88
2	24,8	Ср.	0,59	0,57	0,57	-0,50	0,58

в случае других 19 стимулов (табл. 2; по одному отдельно) в дополнение к нулевому положению стимула при обоих уровнях яркости. *U*-тест Манна-Уитни не выявил достоверного различия между тенденциями 1-й серии и 2-й серии для любого стимула ( $p < 0,05$ ), что подтверждает отсутствие значимого смещения позиции (то есть различий только потому, что наблюдение за эталонным стимулом происходило либо с левой, либо с правой стороны).

Полученные два унифицированных набора данных (при двух уровнях яркости) состояли из  $18+14=32$  (случаев) $\times 20$  (тестовые стимулы) = 640 оценок светлоты (целые числа от -4 до 4). Из этих двух наборов данных были вычислены две непрерывные шкалы светлоты (так называемые шкалы Терстона [34]) для 20 спектров (см. табл. 2 и рис. 2) при двух уровнях яркости. Эти значения шкалы Терстона  $2\times 20$ , т.е. шкалы визуальной оценки светлоты (*VBS*), изображены на рис. 4 как функция величины  $\Phi_{rel, blue}$  вместе с точками данных моделирования в соответствии с формулой (7) с оптимальными значениями степени  $\gamma$  для обоих уровней яркости и промежуточной модели светлоты (на основе объединённого набора данных).

Как видно из рис. 4, оптимальные значения показателей степени  $\gamma$  в соответствии с формулой (7) равны 0,194 (при 24,8 кд/м<sup>2</sup>) и 0,668 (при 267,6 кд/м<sup>2</sup>). При этих двух оптимальных показателях степени значение коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) между значениями, полученными по уравнению (7) и шкалой визуальной оценки светлоты равнялось 0,925 ( $r^2 = 0,856$ ) и 0,924 ( $r^2 = 0,853$ ) соответственно. Оптимизируя показатель для объединённого набора данных при обоих уровнях яркости, промежуточное значение показателя  $\gamma = 0,399$  получилось со следующими значениями коэффициента корреляции:  $r = 0,921$  ( $r^2 = 0,848$ ) для 24,8 кд/м<sup>2</sup> и  $r = 0,918$  ( $r^2 = 0,843$ ) для 267,6 кд/м<sup>2</sup> соответственно. С показателем степени согласно модели Фотиуса и Левормора [20] ( $\gamma = 0,24$ ) мы получаем  $r = 0,925$

при 24,8 кд/м<sup>2</sup> и  $r = 0,909$  при 267,6 кд/м<sup>2</sup>. Эти коэффициенты корреляции существенно не отличаются [35] от ранее указанных значений ни при оптимальных значениях степени, ни при промежуточном значении  $\gamma = 0,399$  ( $p > 0,78$ ). Если мы используем ( $B/L$ ) из уравнений (2) и (3), мы получаем  $r = 0,711$  для 24,8 кд/м<sup>2</sup> ( $p = 0,04$ ; значительно меньше, чем при использовании уравнения (7) при  $\gamma = 0,399$ ) и  $r = 0,815$  для 267,6 кд/м<sup>2</sup> ( $p = 0,21$ ; не значительно меньше, чем согласно уравнению (7) с  $\gamma = 0,399$ ). На рис. 5 показана зависимость величины  $r^2$  от степени  $\gamma$ .

Как видно из рис. 5, зависимость  $r^2$  от  $\gamma$  достаточно ровная; разница между коэффициентами корреляции, соответствующими промежуточному значению показателя ( $\gamma = 0,399$ ) и конкретному значению показателя ( $\gamma = 0,194$

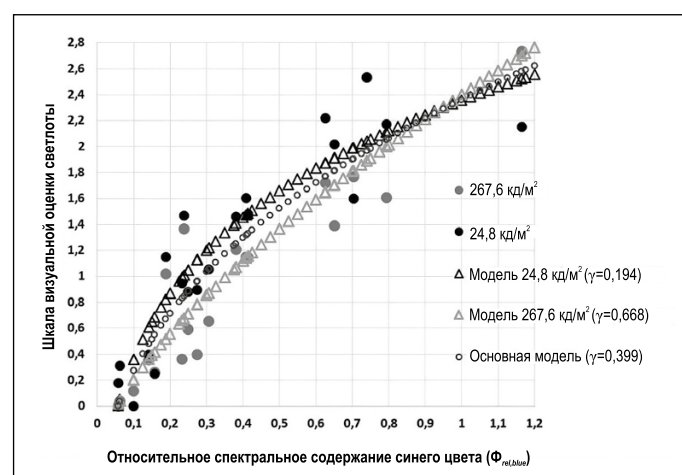


Рис. 4. Значения шкалы визуальной оценки светлоты (шкалы Терстона) для 20 источников света при двух исследуемых уровнях яркости (267,6 и 24,8 кд/м<sup>2</sup>) в зависимости от относительного спектрального содержания синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ ) источника света



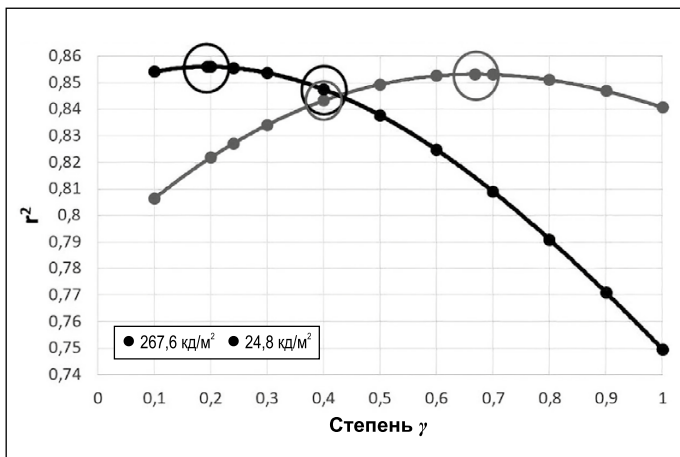


Рис. 5. Зависимость величины коэффициента корреляции Пирсона в квадрате ( $r^2$ ) для светлоты (при 24,8 и 267,6 кд/м<sup>2</sup>) и прогнозируемой величины степени по формуле (7), кружками выделены оптимальные парные значения  $r^2$  и  $\gamma$

при 24,8 кд/м<sup>2</sup> или  $\gamma = 0,668$  при 267,6 кд/м<sup>2</sup>), не была существенной ( $p > 0,9$ ) [35]. Поэтому казалось разумным использовать усреднённое значение степени ( $\gamma = 0,399$ ) при обоих уровнях яркости в уравнении (7).

Рассмотрим более подробно уравнение (6) для комбинации сигналов. Во-первых, коэффициент  $A_{L-M}$  был установлен равным нулю, поскольку коэффициент корреляции с сигналом  $|L-M|$  был отрицательным, по крайней мере, в пределах вышеупомянутой основной группы наблюдателей, которые рассматривались для моделирования в настоящей статье. Роль сигнала  $|L-M|$  далее анализируется в разделе 4. Коэффициент корреляции между значениями шкалы визуальной оценки светлоты и прогнозируемых значений по уравнению (6) был максимизирован путём оптимизации значений  $\gamma$ ,  $A_S$ ,  $A_{ipRGC}$  и  $A_R$  при двух уровнях яркости отдельно. Оптимизация также проводилась путём установки некоторых параметров нулевыми из набора  $\{A_S, A_{ipRGC}, A_R\}$  и оптимизации только остальных параметров. Результаты приведены в табл. 5.

Как видно из таблицы 5, полученные значения коэффициента корреляции не сильно отличаются. Критерий значимости [35] не выявил достоверной разницы между коэффициентами корреляции ( $p > 0,14$  при 24,8 кд/м<sup>2</sup> и  $p > 0,38$  для 267,6 кд/м<sup>2</sup>). На следующем этапе для прогнозирования результатов с помощью простейшей возможной модели рассматривался автономный сигнал  $ipRGC$  с средним значением степени ( $\gamma = 0,399$ ) относительного спектрального содержания синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ ) модели уравнения (7). Коэффициенты корреляции с  $\gamma = 0,399$  были не достоверно меньше ( $p > 0,85$ ), чем при оптимальных значениях показателя в 5-м столбце таблицы 5 ( $r = 0,922$  вместо  $r = 0,931$  при 267,6 кд/м<sup>2</sup> и  $r = 0,938$  вместо  $r = 0,939$  при 24,8 кд/м<sup>2</sup>). Эти коэффициенты корреляции также не значительно больше, чем у модели  $\Phi_{rel, blue}$  с  $\gamma = 0,399$ . Значит, что, основываясь на нынешних результатах шкалы визуальной оценки светлоты, мы не можем различать три фоторецептора в коротковолновом диапазоне и не можем сказать, можно ли пренебречь вкладом палочек. Во всяком случае, оптимальные коэффициенты палочек были больше при 24,8 кд/м<sup>2</sup>, чем при 267,6 кд/м<sup>2</sup> по сравнению с величиной коэффициентов S-колбочек и  $ipRGC$ . Это указывает на прямое влияние палочек при

24,8 кд/м<sup>2</sup>. При этом считаем, что камеры в экспериментальном боксе были достаточно большими ( $2 \times 41^\circ$ ), чтобы покрыть большую область сетчатки, включая область с наибольшей плотностью палочек.

Согласно приведённому выше анализу, величина  $M$  предлагается в качестве результирующей модели светлоты настоящей статьи (13). Формула (13) содержит среднее значение степени  $\gamma = 0,399$ .

$$M = \lg(L_v) \cdot \Phi_{rel, blue}^{0,399} \quad (13)$$

#### 4. Общее обсуждение

Предложенная формулировка (13), содержащая относительное спектральное содержание синего цвета и логарифмическую яркость стимула, способна предсказать результат оценки визуальной светлоты с разумной точностью, т.е. с  $r = 0,921$  и  $r = 0,918$  при 24,8 и 267,6 кд/м<sup>2</sup> соответственно. В эксперименте стимулом был свет от источников света (табл. 2), отражённый от белого однородного дна смотровых камер (рис. 1), и моделирование проводилось на основе этого стимула. Этот белый стимул можно рассматривать как рабочую точку зрительной системы в момент оценки светлоты. Эта белая точка определяла эффективность каждого нейронного механизма, который вносит свой вклад в воспринимаемую светлоту.

Важным ограничением настоящего исследования является то, что описание зависимости яркости от светлоты  $\lg(L_v)$  (13) является гипотетическим, потому что уровни яркости были фиксированными. Несколько моделей светлоты (1) и (2) имеют линейную зависимость от яркости и утверждают (согласно концепции эквивалентной яркости), что предсказывают только то, является ли один стимул ярче другого, и не утверждают, что предсказывают абсолютную воспринимаемую величину светлоты. Выражение  $\lg(L_v)$  (вместо  $L_v$ ) представляет собой один из возможных способов описания сжатия сигнала яркости в зрительной системе человека с целью предсказания абсолютной величины восприятия светлоты, а не только порядка различных стимулов в зависимости от их светлоты.

Ещё одним ограничением настоящих результатов стало то, что была смоделирована лишь часть ответов. Хотя она и включает в себя большинство наблюдателей (около 70%), остальные наблюдатели не следовали тенденциям предложенной модели (13): либо они не имели корреляции ни с одним из сигналов, либо имели низкую корреляцию с сигналом  $|L-M|$ . Действительно, в исследовании восприятия светлоты наблюдатели могут быть сгруппированы в зависимости от того, меняется ли их восприятие светлоты в зависимости от относительного спектрального состава излучения при одинаковой яркости [16]. Другие авторы также обнаружили существенную межнациональную вариативность восприятия светлоты [36–39] и указали, что существует по меньшей мере два основных типа наблюдателей в соответствии с их восприятием светлоты: преимущественно хроматический тип (имеющий большую хроматическую чувствительность во всем видимом диапазоне длин волн) и преимущественно ахроматический тип (имеющий приблизительно чувствительность канала яркости, предсказываемого  $V(\lambda)$ ).

Рис. 5 в работе Айкеда и др. [36] показывает, что вариация наблюдателей между этими двумя основными типа-

Оптимальные значения параметров по уравнению (6) и коэффициенты корреляции Пирсона между значениями шкалы визуальной оценки светлоты и прогнозируемых значений по уравнению (6) после оптимизации

Уровень яркости (кд/м <sup>2</sup> )		$S, ipRGC,$ палочки, $\gamma$	$S, ipRGC, \gamma$	$ipRGC, \gamma$	$S, \gamma$	Палочки, $\gamma$	$S,$ палочки, $\gamma$	$ipRGC,$ палочки, $\gamma$
267,6	$\gamma$	0,869	0,845	0,848	0,644	1,337	0,875	0,856
267,6	$A_S$	0,342	0,003	0	1,000	0	0,652	0
267,6	$A_{ipRGC}$	1,876	0,376	1,000	0	0	0	1,790
267,6	$A_R$	0,728	0	0	0	1,000	1,333	0,066
267,6	$r$	0,932	0,931	0,931	0,880	0,893	0,930	0,931
267,6	$r^2$	0,868	0,867	0,867	0,775	0,797	0,865	0,867
24,8	$\gamma$	0,314	0,259	0,259	0,246	0,560	0,314	0,352
24,8	$A_S$	0,634	0	0	1,000	0	0,285	0
24,8	$A_{ipRGC}$	0,000*	2,000	1,000	0	0	0	0,920
24,8	$A_R$	3,430	0	0	0	1,000	1,543	1,084
24,8	$r$	0,947	0,939	0,939	0,863	0,934	0,947	0,945
24,8	$r^2$	0,897	0,882	0,882	0,745	0,873	0,897	0,894

ми непрерывна, то есть существуют «сильные», «средние» и «слабые» хроматические типы. Рис. 3 и 4 в работе Айкеда и др. [36] выявили ещё два варианта: хроматический вариант с меньшей чувствительностью к синему цвету, чем основной хроматический тип, и ахроматический вариант с ещё меньшей чувствительностью к синему и красному цвету, чем предсказывал канал яркости. Физиологическая причина может заключаться в том, что хроматический наблюдатель имеет больший вклад в воспринимаемую светлоту от хроматических каналов зрительной системы, чем ахроматический наблюдатель. Другой причиной большой межнациональной вариативности восприятия светлоты может быть различие психологических установок испытуемых в ходе эксперимента по различению светлоты: ахроматические наблюдатели склонны мысленно изолировать хроматическую составляющую светлоты и не реагируют на неё.

Ещё один вопрос заключается в том, применимы ли результаты настоящего эксперимента к реальной сцене, поскольку сравнивались только однородные поля. Предыдущие исследования показали, что присутствие окрашенных объектов или поверхностей в наблюдаемом поле существенно не влияет на результаты испытаний по уравнению [40]. Однако если в поле зрения находился пространственно протяжённый высоко хроматический массив Мондриана, то оценка светлоты отличалась от ахроматической среды [41]. Возможно, сильно хроматические изображения с очень насыщенными красными и оранжевыми поверхностями вызывают очень сильные красно-зеленые противоположные сигналы ( $L-M$ ), которые вносят вклад в их светлоту, и это не может быть описано такими пространственными моделями светлоты, которые не содержат зависимости от ( $L-M$ ) сигнала. В уравнении (6), при ненулевом значении коэффициента  $A_{L-M}$ , а также в моде-

ли Фотиуса и Левермора [13], оба хроматических канала ( $L-M$ ) и ( $L+M-S$ ) активны так, что при увеличении сигнала обоих каналов светлоты увеличивается. Если в сцене есть (несколько пространственно протяжённых) красных и/или оранжевых объектов, то мы получим более высокие значения сигналов  $L-M$  в поле зрения, и тогда, в свою очередь, вклад канала  $L-M$  в общее пространственное восприятие светлоты сцены может стать более явным.

При объединении сигналов фоторецепторов для прогнозирования пространственной светлоты мы использовали автономный сигнал  $S$  вместо  $(L+M)-S$  со следующим математическим обоснованием. Спектральная функция чувствительности сигнала  $(L+M)-S$  спектрально перекрывается со спектральной чувствительностью как  $L-M$ , так и яркостью ( $L+M$ ), и в целом это мешает успешной оптимизации параметров в уравнении (6). Заметим, что в настоящем эксперименте со светлотой значение ( $L+M$ ) было приблизительно постоянным, поскольку яркость была постоянной. Во время оптимизации 20 мульти-светодиодных спектров сигнал яркости ( $L+M$ ) был представлен источником света с угловым размером  $2^\circ$  фотопической яркости (в единицах кд/м<sup>2</sup>) для современных применений (поскольку это обычное определение яркости сегодня наиболее широко используется). Мы не рассматривали альтернативные представления [42] сигнала канала яркости.

Что касается времени адаптации в эксперименте со светлотой, то испытуемым давали 15 минут на адаптацию к эталону на текущем уровне яркости (267,6 или 24,8 кд/м<sup>2</sup>). После этого уровень яркости не изменялся в течение сеанса, и у испытуемого было 40 с, в течение которых устанавливалась смешанная адаптация между тестовой цветностью и эталонной цветностью путём медленного взгляда (т.е. по крайней мере в течение 2 с в каждой камере) назад и вперед между тестовой и эталонной

камерами.  $L$ -,  $M$ -,  $S$ -колбочковые фоторецепторы хроматической адаптации имеют период полураспада всего 40–70 мс. [43], так что пребывание 2 с в каждой камере обеспечивало достаточное время для стабилизации сигналов хроматического колбочкового фоторецептора и, следовательно, для визуальной оценки наблюдателями изменения светлоты между двумя камерами. Канал  $ipRGC$ , обладает более длительным временем адаптации (около 100–200 с, см. рис. 3 в [44]), так что нам, безусловно, нужен более длительный период наблюдения, чем в настоящем эксперименте, чтобы получить значительный вклад  $ipRGC$  в воспринимаемую светлоту. На практике испытуемые обычно проводят несколько часов в одной и той же визуальной среде, например в офисе или гостиной. Поэтому в качестве валидации необходимы исследования поля светлоты в реалистичных условиях просмотра.

Предложенные формулировки (6) и (7) настоящей статьи увеличивают гипотетическую зависимость светлоты от яркости [ $lg(L_v)$ ] благодаря учёту сигналов синечувствительных фоторецепторов ( $\Phi_{rel, blue}$  для  $\leq 520$  нм) или комбинации сигналов  $S_{rel}$ ,  $ipRGC_{rel}$  и  $R_{rel}$ . Зависимость точности моделирования от показателя степени была достаточно низкой  $\gamma$  (см. рис. 5), причём наиболее вероятные значения показателя находились в диапазоне от 0,15 до 0,50 (в соответствии с предыдущими моделями), а в модели (13) было принято среднее значение показателя 0,399. Альтернативная гипотеза моделирования может заключаться в том, что зависимость шкалы визуальной оценки светлоты от яркости не должна мультипликативно масштабироваться, вместо этого она аддитивно модифицируется сжатыми и комбинированными относительными сигналами  $S$ -,  $ipRGC$  и палочковых фоторецепторов (14):

$$VBS = lg(L_v) + A \cdot lg[A_S(S_{rel})^\gamma + A_{ipRGC}(ipRGC_{rel})^\gamma + A_R(R_{rel})^\gamma] \quad (14)$$

Модель (14) «сжимает» комбинацию сигналов с помощью второй функции  $lg$ . Ни аддитивная концепция, ни двойное сжатие не дали полезных результатов при моделировании. Поэтому мы предлагаем в дальнейших исследованиях использовать модель (13). Преимущество формулировки (13) заключается в том, что её легко использовать в современной светотехнической практике. Для репрезентативного набора из 302 спектральных составов широко используемых сегодня источников света (включая светодиодные лампы и светильники, компактные и трубчатые люминесцентные лампы и лампы накаливания) относительное спектральное содержание синего ( $\Phi_{rel, blue}$ ) может быть аппроксимировано с разумной точностью ( $r^2 = 0,91$ ) от 2° стандартной координаты цветности  $y$  в соответствии с формулой (15).

$$\Phi_{rel, blue} = -2,4174 \cdot y + 1,1405 \quad (15)$$

Практическая значимость настоящей модели светлоты заключается в том, что пространственное светлотное восприятие реальных сцен (например, улицы или построенного интерьера) очень важно для применения в области внутреннего и наружного освещения. В наружном освещении более высокое значение восприятия светлоты связано с повышением уровня безопасности [6] и увеличе-

нием скорости обнаружения препятствий. При внутреннем освещении повышение уровня светлоты в помещении способствует увеличению производительности труда [45]. Важно отметить, что для применения в архитектуре и при светотехническом моделировании, что мы не можем описать пространственное восприятие светлоты только стандартной фотометрией, то есть количеством яркости ( $L_v$ , в единицах кд/м<sup>2</sup>) [11–17]. Следовательно, мы должны предложить практически осуществимый способ описания светлоты, основанный на фундаментальных психофизических исследованиях. В наиболее типичной повседневной ситуации у специалиста по освещению есть инструмент, и этот инструмент может измерять яркость и координаты цветности МКО 1931 ( $x$ ,  $y$ ). Уравнения (13) и (15) обеспечивают достаточное для использования приближение светлоты, основанное на настоящем экспериментальном наборе данных.

Действительно, если специалист по освещению измерит некоторые характерные значения яркости ( $L_v$ ) и координаты цветности  $y$  в поле зрения (например, в середине стены в комнате), то на основании них можно рассчитать характерное значение светлоты, которое теперь зависит не только от яркости, но и от спектра в более коротковолновом диапазоне, согласно настоящим экспериментальным результатам. Таким образом, практическая значимость настоящего исследования заключается в том, что мы предоставляем светотехникам, инженерам и дизайнерам простую в использовании формулировку (13) путём замены на (15). Новая формулировка позволит оценить восприятие пространственной светлоты сцены в реальных условиях. Для этого нам не нужен сложный аппарат: достаточно ручного колориметрического устройства, которое позволяет измерять  $L_v$  и  $y$  в характерной точке, чтобы получить характерное значение пространственной светлоты в данной сцене. Мы также можем использовать освещённость ( $E_v$  в lx) вместо яркости (т.е. заменить  $L_v$  на  $E_v$ ) и вычислить значение на основе освещённости. Чтобы измерить  $E_v$  и  $y$ , нам просто нужен ручной колориметр типа освещённости с хорошо охарактеризованной сенсорной головкой.

Наконец, мы хотели бы дополнительно обсудить, в каком смысле используется термин «пространственная светлота», и обозначить его отличительные особенности. Наша цель состоит в том, чтобы получить значение пространственного восприятия светлоты сцены для лучшей видимости небольших структур, текстур и цветовых оттенков на поверхностях объектов и лучшего восприятия внешнего вида среды (например, комнаты) для внутреннего освещения. Этот параметр является основополагающим в дизайне для моделирования и проектирования освещения. Если мы увеличим средний уровень яркости сцены (например, от 0,3 до 3,0 кд/м<sup>2</sup> при уличном освещении или от 30 до 300 кд/м<sup>2</sup> при внутреннем освещении), то, независимо от пространственной структуры сцены общее восприятие светлоты пространственно-расширенной сцены (так называемой «пространственной светлоты») будет увеличиваться. Как уже упоминалось во введении, светлота в этом смысле зависит не только от яркости, но и от цветности, особенно от «коротковолнового содержания» спектра источника света. Освещение пространственно-протяженной сцены с более высокой коррелированной цветовой температурой (более высоким

содержанием коротких длин волн) приводит к более высокому значению воспринимаемой пространственной светлоты [5, 12, 13, 17, 20, 41].

Настоящая статья посвящена только этой, так называемой, «пространственной светлоте». Здесь мы не рассматриваем восприятие света некоторых пространственно-ограниченных объектов внутри сцены. Чтобы прояснить это утверждение, посмотрите на лист белой бумаги (с несколькими маленькими, сложными символами, написанными очень тонкими линиями и, например, маленьким изображением красной клубники, напечатанным на нём) в хорошо освещённой комнате под светильником. Бумага будет выглядеть белой. Если мы возьмём этот лист в той же комнате в тени, например, шкафа, бумага продолжит выглядеть белой, хотя её яркость становится намного ниже. Но разобраться в символах будет сложнее, и красная клубника станет менее яркой, потому что зрительная система получает меньше абсолютного количества света и больше не работает в идеальной рабочей точке. Если, в свою очередь, мы снизим световой поток всех светильников в комнате, то впечатление от всей комнаты станет тусклым и неприятным, потому что общая пространственная светлота в комнате станет низкой, независимо от светлоты неизолированного цвета отдельных объектов. Наблюдателям, входящим в эту комнату, не понравится её внешний вид, потому что пространственные (цветовые) структуры на поверхностях объектов имеют тенденцию исчезать: например, детальная структура лиц и волос наблюдателей, сидящих в комнате, обычно становится менее заметной. Пространственная светлота, воспринимаемая в комнате, уменьшается. Этот эффект не зависит от структуры сцены и не зависит от воспринимаемой светлоты отдельных объектов в комнате, а также от одновременных контрастов между этими объектами. В настоящей статье рассматривается только пространственная светлота в указанном выше смысле.

## 5. Выводы

В визуальном эксперименте исследовалось восприятие светлоты большого однородного поля ( $41^\circ$ ). Одна камера двухкамерного экспериментального бокса освещалась 20 световыми стимулами разной цветности при 2 различных уровнях яркости. В другой камере находился эталонный источник света. Испытуемые должны были сравнить восприятие светлоты от тестового и эталонного стимулов при равной яркости. Для моделирования средней субъективной шкалы визуального восприятия светлоты используются значения сигналов различных фоторецепторов ( $S$ -колбочки, палочки,  $ipRGCs$  и сигнал  $|L-M|$  (6)) и относительное спектральное содержание синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ , спектральное излучение стимула для длин волн  $\leq 520$  нм относительно его яркости (7)). Наша гипотеза состояла в том, что светлота зависит от логарифма яркости, который умножается на любой ( $\Phi_{rel, blue}$ ) в соответствии с (7) или комбинацию взвешенных и сжатых сигналов фоторецепторов в соответствии с (6).

Исходя из психофизических результатов, из модели был исключён противоположный сигнал ( $L-M$ ) ( $A_{L-M} = 0$ ). Точность моделирования автономных сигналов  $S$ -колбочек, палочек и  $ipRGCs$ , а также их комбинаций в зависимости от различных весов в (6) существенно не отличались друг

от друга, а также существенно не отличались от точности моделирования относительного спектрального содержания синего цвета модели (7). Как следствие, на основании полученных результатов нельзя было решить, можно ли пренебречь вкладом палочек в двух экспериментах. Следует отметить, что в эксперименте по исследованию светлоты оптимальные значения степени палочек были больше при  $24,8$  кд/м<sup>2</sup>, чем при  $267,6$  кд/м<sup>2</sup> по сравнению со значением  $S$ -колбочек и  $ipRGC$ . Это подразумевает возможное влияние палочек в случае наблюдения большого однородного поля при проведении эксперимента по исследованию светлоты при  $24,8$  кд/м<sup>2</sup>.

Величина  $M$  (13) может описать усреднённую тенденцию поведения шкалы визуального восприятия светлоты с разумной точностью. Формула (13) легко реализуется в практическом применении в современной светотехнике, потому что, кроме яркости, используется только количественное относительное спектральное содержание синего цвета ( $\Phi_{rel, blue}$ ), и это может быть легко аппроксимировано из координаты цветности  $u$  в соответствии с (15).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Commission Internationale de l'Éclairage. e-ILV. Available from <http://eilv.cie.co.at/>, 2014.
2. Rea MS. The what and the where of vision lighting research. // *Lighting Research and Technology* 2018; 50: 14–37.
3. Stiles WS. The Eye, Brightness and Illuminating Engineering. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 1952; 17: 241–264.
4. Robinson W. Brightness Engineering. A.M.I.E.E. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 1951; 16: 61–85.
5. Fotios SA, Cheal C. Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 1: Spatial brightness. // *Lighting Research and Technology* 2011; 43:143–157.
6. Rea MS, Bullough JD, Brons JA. Parking lot lighting based upon predictions of scene brightness and personal safety. // *Lighting Research and Technology* 2015; 49: 293–304.
7. Fotios S, Atli D. Comparing Judgments of Visual Clarity and Spatial, Brightness through an Analysis of Studies Using the Category Rating Procedure. // *LEUKOS*2012; 8: 261–281.
8. Jones LA. Colorimetry: Preliminary Draft of a Report on Nomenclature and Definitions. // *Journal of the Optical Society of America* 1937; 27: 207–211.
9. Optical Society of America, Committee on Colorimetry. *The Science of Color*. New York, USA: Crowell, 1953.
10. Boyce P. Editorial: The paradox of photometry. // *Lighting Research and Technology* 2015; 47: 767.
11. Berman SM, Jewett DL, Fein G, Saika G, Ashford F. Photopic luminance does not always predict perceived room brightness. // *Lighting Research and Technology* 1990; 22: 37–41.
12. Fotios SA. Lamp colour properties and apparent brightness: a review. // *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 2001; 33: 163–178.
13. Fotios SA, Levermore GJ. Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces III: Chromatic brightness model. // *International Journal of Lighting Research and Technology* 1998; 30: 107–110.
14. Besencker UC, Bullough JD. Investigating visual mechanisms underlying scene brightness. // *Lighting Research and Technology* 2016; 49: 16–32.
15. Rea MS, Radetsky LC. Toward a model of outdoor lighting scene brightness. // *Lighting Research and Technology* 2011; 43: 7–30.

16. *Vidovszky-Németh A, Schanda J.* White light brightness–luminance relationship. // *Lighting Research and Technology* 2012; 44: 55–68.

17. *Fotios S, Levermore GJ.* Perception of electric light sources of different colour properties. // *International Journal of Lighting Research and Technology* 1997; 29: 161–171.

18. *Nayatani Y.* A colorimetric explanation of the Helmholtz–Kohlrausch effect. // *Color Research and Application* 1998; 23: 374–378.

19. *Burns SA, Smith VC, Pokorny J, Elsner AE.* Brightness of equal-luminance lights. // *Journal of the Optical Society of America* 1982; 72: 1225–1231.

20. *Fotios SA, Levermore GJ.* Chromatic effect on apparent brightness in interior spaces, II: SWS lumens model. // *Lighting Research and Technology* 1998; 30: 103–106.

21. *Smith VC, J. Pokorny J.* Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. // *Vision Research* 1975; 15: 161–171.

22. Commission Internationale de l'Éclairage. Publ. CIE118–1995. // *CIE Collection in Colour and Vision* 118/2, 1995. Models of heterochromatic brightness matching.

23. *Guth SL, Massof RW, Benzschawel T.* Vector model for normal and dichromatic color vision. // *Journal of the Optical Society of America* 1980; 70: 197–212.

24. *Yaguchi H, Ikeda M.* Subadditivity and superadditivity in heterochromatic brightness matching. // *Vision Research* 1983; 23: 1711–1718.

25. *Kokoschka S, Bodmann HW.* Ein konsistentes System zur photometrischen Strahlungsbewertung im gesamten Adaptationsbereich. // In: *Proceedings of the CIE18<sup>th</sup> Session, London, 1975.*

27. *Stockman A, Sharpe LT.* Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. // *Vision Research* 2000; 40: 1711–1737.

28. *Stockman A, Sharpe LT, Fach CC.* The spectral sensitivity of the human short-wavelength cones. // *Vision Research* 1999; 39: 2901–2927.

29. *Rea MS, Figueiro MG, Bierman A, Bullough JD.* Circadian light. // *Journal of Circadian Rhythms* 2010; 8: 1–10.

30. *Dacey DM, Liao HW, Peterson BB, Robinson FR, Smith VC, Pokorny J, Yau KW, Gamlin PD.* Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal color and irradiance and project to the LGN. // *Nature* 2005; 433: 749–754.

31. Commission Internationale de l'Éclairage. Publ. // *CIE212–2014. Guidance towards Best Practice in Psychophysical Procedures Used when Measuring Relative Spatial Brightness, 2014.*

32. *Ichikawa H, Tanabe S, Hukami K.* Standard Pseudoisochromatic Plates for Acquired Color Vision Defects, Part II. // *Tokyo, Japan: Igaku-Shoin Medical Publishers, 1983.*

33. *Lanthyony P.* The desaturated panel d-15. // *Documenta Ophthalmologica* 1978; 46: 185–189.

34. *Costa M, Gaddi C.* Color Name Distances Scaled by Thurstone's Ranking Order Psychophysical Method. *Journal of Vision* 2016; 16: 824.

35. *Fisher RA.* On the Probable Error of a Coefficient of Correlation Deduced from a Small Sample. // *Metron* 1921; 1: 3–32.

36. *Ikeda M, Ikeda J, Ayama M.* Specification of individual variation in luminous efficiency for brightness. // *Color Research and Application* 1992; 17: 31–44.

37. *Kimura-Minoda T, Kojima Sh, Fujita Y, Ayama M.* Study on Glare of LED lamp and Individual Variations of Brightness Perception. // In: *Proceedings of the ISAL 7<sup>th</sup> International Symposium on Automotive Lighting, 2007.*

38. *Nayatani Y, Sobagaki H.* Causes of individual differences on brightness/luminance (B/L) ratios. // *Journal of Light and Visual Environment* 2003; 27: 30–34.

39. *Yaguchi H, Kawada A, Shioiri S, Miyake Y.* Individual differences of the contribution of chromatic channels to brightness. // *Journal of the Optical Society of America* 1993; 10: 1373–1379.

40. *Fotios SA, Cheal C.* Brightness matching with visual fields of different types. // *Lighting Research and Technology* 2010; 43: 73–85.

41. *Fotios S, Atli D, Cheal C, Hara N.* Lamp spectrum and spatial brightness at photopic levels: Investigating prediction using S/P ratio and gamut area. // *Lighting Research and Technology* 2014; 47: 595–612.

42. *Sharpe LT, Stockman A, Jagla W, Jägle H.* A luminous efficiency function,  $V^*(\lambda)$ , for daylight adaptation. // *Journal of Vision* 2005; 5: 948–968.

43. *Rinner O, Gegenfurtner KR.* Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. // *Vision Research* 2000; 40: 1813–1826.

44. *Wong KY, Dunn FA, Berson DM.* Photoreceptor Adaptation in Intrinsically Photosensitive Retinal Ganglion Cells. // *Neuron* 2005; 48:1001–1010.

45. *Rea MS.* The Trotter Paterson Lecture 2012: Whatever happened to visual performance?. // *Lighting Research and Technology* 2012; 44: 95–108.

46. *Land EH, McCann JJ.* Lightness and Retinex Theory. // *Journal of the Optical Society of America* 1971; 61: 1–11.

47. *Yamakawa M, Tsujimura S, Okajima K.* A quantitative analysis of the contribution of melanopsin to brightness perception. // *Scientific Reports* 2019; 9:7568, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44035-3>.



**Петер Бодрози (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



**Сюэ Го (Xue Guo)**, M. Sc. С 2016 года по 2018 год работала научным сотрудником в Светотехнической лаборатории Технического университета Дармштадта, Германия. В настоящее время работает в компании TÜV SÜD Product Service GmbH в качестве продакт-специалиста по светильникам и светотехническим измерениям



**Тран Куок Хан (Tran Quoc Khanh)**, Ph. D., Dr. Sc., профессор. Окончил технический университет Илменау. 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