

РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДИКИ ВИЗУАЛЬНОЙ ФОТОМЕТРИИ

В.Б. Пясецкий
А.М. Хорохоров
А.Ф. Ширанков

piasetsky@bmstu.ru
alex1@bmstu.ru
ashirankov@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Проведен анализ современных методик расчета визуального восприятия яркости излучений. Рассмотрены стандартные методики Международной комиссии по освещению (МКО) для ахроматических излучений, основанные на определении функций световой эффективности для фотопического, скотопического и мезопического уровней яркости адаптации наблюдателя и хроматических излучений на основе определения эквивалентной яркости. Проведено сравнение функций световой эффективности стандартных наблюдателей МКО с 2- и 10-градусным полем с функциями световой эффективности, основанными на фундаментальных характеристиках чувствительности фоторецепторов сетчатки. Расчет значений коэффициента использования глазом излучения абсолютно черного тела показал, что различие значений этих коэффициентов для 2- и 10-градусного наблюдателей достигает 13 %. На примере показано, что для 10-градусного наблюдателя есть совпадение стандартной функции световой эффективности МКО и рассчитанной на основе фундаментальных характеристик чувствительности с погрешностью, допустимой для инженерных расчетов (3...5 %). Сформулированы рекомендации о применимости различных методик при решении практических задач визуальной и объективной фотометрии, в частности, основанных на характеристиках световой эффективности для 2- и 10-градусного наблюдателей как ахроматических, так и хроматических излучений

Ключевые слова

Визуальная фотометрия, функция световой эффективности, яркость излучения

Поступила 14.03.2024
Принята 07.06.2024
© Автор(ы), 2024

Введение. Расчет визуального восприятия яркости пространства предметов — актуальная тема в области светотехники. Примерами практических задач, которые решаются с учетом закономерностей визуальной фотомет-

рии, являются определение скорости реакций человека в условиях меняющейся освещенности, расчет оптимального уровня искусственного освещения общественных и производственных территорий, фасадов зданий, автотрасс, разработка конструкции осветительных систем транспортных средств, медицинские аспекты (влияние условий освещения жилых и производственных помещений и открытых пространств на здоровье и работоспособность людей), определение световой эффективности новых материалов, предназначенных для применения в светотехнических устройствах. Актуальность темы подтверждается значительным числом публикаций (см., например, [1–14]).

Расчитанное значение визуального восприятия яркости определяется функцией световой эффективности, которая характеризует спектральную чувствительность зрительного восприятия света человеком. Развитие представлений о функции световой эффективности — это эволюционный процесс в истории фотометрии, начало которого может быть отнесено к 1886 г. [15]. В 2024 г. исполняется 100 лет с момента принятия Международной комиссией по освещению (МКО) первого официального определения функции световой эффективности излучения¹. За это время неоднократно менялись представления об этой функции и, как следствие, ее математическое описание (см., например, [16–18]). Характерно, что появление новых стандартных описаний в документах МКО не связано с отрицанием ранее введенных. Кроме того, некоторые публикации МКО в этом отношении не являются официально завершенными.

Цель работы — привести результаты анализа расчетных методик визуальной фотометрии, основанных на различных вариантах функции световой эффективности, которые представлены в рекомендациях и стандартах МКО, и определение условий их применимости в практических задачах.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Расчет уровня визуального восприятия излучения основан на стандартах и рекомендациях МКО. Визуальная яркость источника света зависит не только от количества испускаемого им излучения, но и от спектрального состава этого излучения и функции зрительного отклика смотрящего на него наблюдателя. Поскольку зрительная реакция человека варьируется в зависимости от уровня освещенности и от человека к человеку, точная фотометрия требует определения репрезентативных стандартных наблюдателей. Основы современной физической фотометрии представлены в стан-

¹ CIE (1926). Commission internationale de l'éclairage proceedings, Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1924.

дарте МКО 2007 г. ISO 23539:2005(F)/CIE S 010/F:2007², который в 2023 г. изложен в новой редакции³. В этом документе определены фотометрические параметры и характеристики, составляющие систему физической фотометрии МКО и официально принятые Международным комитетом мер и весов⁴. Физическая фотометрия МКО определяет процедуры количественной оценки оптического излучения с точки зрения функций спектральной световой эффективности двух стандартных наблюдателей. Особенностью обоих стандартных наблюдателей МКО, представленных в документе 2007 г., является ограниченное угловое поле (2°), для которого определены функции световой эффективности. Первый наблюдатель, характеризующийся функцией $V(\lambda)$, представляет собой фотопическое (дневное) зрение при яркости пространства предметов более 5 кд/м^2 . Вторым, характеризующийся функцией $V'(\lambda)$, — скотопическое (ночное) зрение при яркости менее $5 \cdot 10^{-3} \text{ кд/м}^2$. В сочетании с базовой фотометрической единицей СИ канделой эти функции составляют систему, позволяющую определять значения фотометрических величин для всех типов источников света независимо от спектрального состава излучения. Функции $V(\lambda)$ и $V'(\lambda)$ представлены в стандарте МКО 2007 г. в виде массивов значений с шагом 1 нм. Для инженерных расчетов более удобны аппроксимирующие аналитические выражения, которые позволяют рассчитать необходимые значения световой эффективности с отклонением не более 2 % от стандартных значений функций в области их максимумов [19]:

$$V(\lambda) = 0,23919 \exp\left[-\frac{(\lambda - 530,52)^2}{850,73}\right] + 0,91063 \exp\left[-\frac{(\lambda - 565,62)^2}{3323,3}\right] + 0,03101 \exp\left[-\frac{(\lambda - 463,87)^2}{658,13}\right];$$

$$V'(\lambda) = 0,99927 \exp\left[-\frac{(\lambda - 507,05)^2}{2522,3}\right] + 0,18215 \exp\left[-\frac{(\lambda - 449,42)^2}{646,47}\right].$$

Для фотопического и скотопического наблюдателей яркость описывается через соответствующие функции световой эффективности:

² ISO 23539:2005(F)/CIE S 010/F:2007. Photometry — the CIE system of physical photometry.

³ ISO/CIE 23539:2023(E). Photometry — the CIE system of physical photometry.

⁴ Bureau International des Poids et Mesures. Principles governing photometry. Rapport BIPM-2019/05. Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France, 2019.

$$L_P = L_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} K(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

— фотопическая яркость;

$$L_S = L_{\lambda_{\max}} \int_0^{\infty} K'(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

— скотопическая яркость. Здесь $L_{\lambda_{\max}}$ — максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости, $\varphi(\lambda)$ — нормированная функция спектральной плотности потока излучения. Световая эффективность излучения для фотопического наблюдателя: $K(\lambda) = K_m V(\lambda) = 683,002V(\lambda) \approx 683V(\lambda)$, лм/Вт, для скотопического — $K'(\lambda) = K'_m V'(\lambda) = 1700,05V'(\lambda) \approx 1700V'(\lambda)$, лм/Вт. Следует отметить, что значение $K_m = 683,002$ лм/Вт, а не 683,000 лм/Вт, обусловлено тем, что максимальная чувствительность глаза соответствует длине волны 555,17 нм, а определение единицы силы света (канделы) связано с длиной волны 555 нм. Этим объясняются и некоторые различия значений параметра K'_m .

Диапазон значений яркости $5 \cdot 10^{-3} \dots 5$ кд/м² определен МКО как мезопический⁵ (сумеречный). В этом диапазоне световая эффективность излучения представляет собой линейную комбинацию функций $K(\lambda)$ и $K'(\lambda)$: $K_{mes}(\lambda) = mK(\lambda) + (1-m)K'(\lambda)$. Параметр m описывает соотношение уровней фотопического и скотопического восприятия и зависит от уровня яркости пространства предметов:

$$m_n = a + b \lg(L_{mes, n}), \quad (3)$$

где $a = 0,7670$, $b = 0,3334$ — постоянные. Мезопический уровень яркости находится в результате итерационного расчета по формуле

$$L_{mes, n} = \frac{m_{(n-1)}L_P + (1-m_{(n-1)})L_S V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1-m_{(n-1)})V'(\lambda_0)}, \quad (4)$$

где $n = 1, 2, \dots$ — номер итерационного шага; $0 \leq m_n \leq 1$, исходное значение $m_0 = 0,5$, $V'(\lambda_0) = 683/1700$, начальное значение мезопической яркости в итерационном расчете выбирается из условия $L_S < L_{mes, n=1} < L_P$, значения L_S, L_P определяются соотношениями (1), (2). Критерий окончания

⁵ CIE 191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, CIE, 2010.

итерации — получение значений L_{mes} по (3), (4), которые различаются на заданное значение ΔL_{mes} , определяемое как допустимая погрешность расчета в каждой конкретной задаче.

Графическое представление функции световой эффективности $K_{mes}(\lambda)$ при нескольких значениях параметра m приведено на рис. 1 [20].

Методика МКО позволяет достаточно просто найти решение обратной задачи: по заданному значению мезопической яркости L_{mes} определить максимальное значение спектральной плотности энергетической яркости пространства предметов, Вт/(м² · нм):

$$L_{\lambda, \max} = \frac{L_{mes} [1 + 1,489m]}{1700 [mI_1 + (1 - m)I_2]} = \frac{L_{mes} [4,315 + \lg L_{mes}]}{1141,78 [(2,30 + \lg L_{mes})I_1 + (0,69897 - \lg L_{mes})I_2]}$$

где m — параметр, определяемый по заданному значению L_{mes} ; I_1, I_2 — значения интегралов в (1), (2).

Максимальные значения световой эффективности излучений в мезопическом диапазоне при различных значениях параметра m приведены ниже:

m	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$K_{m, mes; m}$, лм/Вт	1700,05	1402,22	1181,84	1020,44	902,64	816,88
m	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	
$K_{m, mes; m}$, лм/Вт	757,24	718,49	695,95	685,46	683,00	

Визуальное восприятие света традиционно объясняется работой двух типов светочувствительных рецепторов, находящихся в сетчатке глаза (колбочек и палочек). Приведенные выше методики расчета основаны на предположении, что колбочки отвечают за фотопическое зрение и цветовые ощущения, палочки, не являясь светочувствительными, — за скотопическое, а в мезопическом диапазоне на излучение реагируют оба типа рецепторов. Несоответствие расчетной и экспериментально определяемой характеристик световой эффективности отмечалось неоднократно.

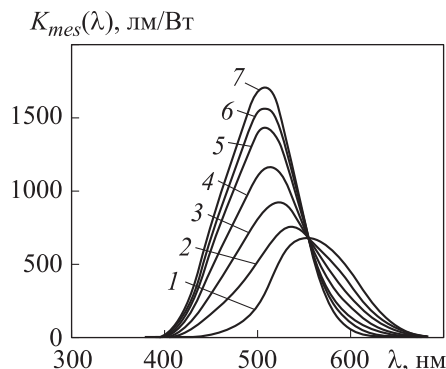


Рис. 1. Функция световой эффективности в мезопической области при $m = 1$ (1), 0,8 (2), 0,6 (3), 0,4 (4), 0,3 (5), 0,1 (6) и 0 (7)

Например, в [21] утверждается о необходимости преодоления этого несоответствия в коротковолновой области спектра. О несовпадении значений яркости пространства предметов, получаемых расчетно и экспериментально, указано в [22]. Это обстоятельство было одной из причин того, что в 1964 г. МКО утвердила новую модель стандартного колориметрического наблюдателя — для углового поля 10° . В 2015 г. эта модель утверждена и в качестве базовой фотопической наряду с 2-градусной⁶.

Получены результаты визуального восприятия яркости «белого» излучения. Показано, что при постоянстве расчетного значения фотопического светового потока визуальное ощущение не является постоянным и зависит от спектрального состава излучения [23]. В частности, более высокому значению цветовой температуры соответствует более высокая визуальная чувствительность. Согласно [23], визуальное ощущение может быть согласовано с расчетным значением при учете скотопической составляющей в виде эмпирического соотношения значений соответствующих интегралов в (1) и (2):

$$L_{VISP} \approx L_P \left(\frac{I_S}{I_P} \right)^{0,78}. \quad (5)$$

Формула (5) отражает более высокую чувствительность зрения фотопического наблюдателя к коротковолновой части видимого излучения, чем это предусматривает 2-градусная характеристика $V(\lambda)$. По мнению автора работы [23], это связано с тем, что «ночные» рецепторы сетчатки также участвуют в формировании фотопических зрительных ощущений.

Как указано в [24], рекомендации МКО требуют введения особых ограничений, там же приведена оценка уровня яркости пространства предметов, при которой можно ожидать полного «отключения» палочек в формировании зрительных ощущений: примерно $30\,000$ кд/м². Это чрезвычайно высокое значение, выходящее за пределы естественных условий наблюдения и превышающее безопасный для глаз уровень.

Предположения, приведенные в [23, 24], повышали значение функции палочек в формировании зрительных ощущений при дневных уровнях яркости пространства предметов. Дальнейшие исследования позволили уточнить особенности фоторецепции сетчатки в «синей» области. Об открытии новых светочувствительных элементов в глазах млекопитающих, получивших обозначения ipRGC (*intrinsically photosensitive retinal ganglion cells* —

⁶ CIE 165:2005. 10 degree photopic photometric observer. Vienna, Central Bureau of the Commission Internationale de l'Eclairage, 2015.

внутренние фоточувствительные ганглиозные клетки сетчатки), pRGC (*photosensitive retinal ganglion cells* — фоточувствительные ганглиозные клетки сетчатки) или mRGC (*melanopsin-containing retinal ganglion cells* — меланопсиносодержащие ганглиозные клетки сетчатки), изложено в [25]. О наличии ipRGC в сетчатке человеческого глаза сообщено в [26]. Фотопигмент этих клеток — меланопсин — реагирует главным образом на «синюю» часть видимого света с максимумом чувствительности около 480 нм. Первоначально определенными функциями ipRGC были управление циркадными ритмами (интенсивностью биологических процессов днем и ночью), зрачковым рефлексом (изменением диаметра зрачка при изменении уровня освещенности) и управление зрительными адаптационными процессами при изменении яркости пространства предметов. В 2007 г. установлено, что ipRGC также прямо связаны с формированием визуальных образов в зрительном центре мозга человека [27].

Развитие представлений о механизмах зрительного восприятия является причиной изменений и дополнений, которые МКО вносит в рекомендуемые методики расчета визуальной фотометрии. В частности, для расчета реакции фотопических наблюдателей на излучение с заметной «синей» составляющей в 1990 г. рекомендована модифицированная функция световой эффективности $V_m(\lambda)$ ⁷, которая отличается от функции $V(\lambda)$ в диапазоне длин волн 380...460 нм (рис. 2).

В 2011 г. МКО опубликовала документ CIE 200:2011⁸, в котором представлена методика расчета уровня визуального восприятия яркости не только «белых», но и хроматических излучений. Эта методика основана на расчете эквивалентной яркости излучения. Определение эквивалентной яркости приведено, например, в ГОСТ 8.654–2016⁹. В таком случае МКО представляет фотометрическую модель для расчета эквивалентной яркости с учетом фотометрических и колориметрических величин: фотопической яркости L_P , скотопической яркости L_S , координат цветности x и y излучения с некоторыми весовыми коэффициентами в их сочетаниях, которые зависят от уровня адаптации наблюдателя. Связь визуального ощущения яркости с хроматичностью излучения обусловлена необходимостью учета эффекта Гельмгольца — Кольрауша [28].

⁷ CIE 086–1990. CIE 1988. 2° spectral luminous efficiency for photopic vision. Vienna, 1990.

⁸ CIE 200:2011. CIE supplementary system of photometry. Vienna, CIE, 2011.

⁹ ГОСТ 8.654–2016. Фотометрия. Термины и определения. М., Стандартинформ, 2016.

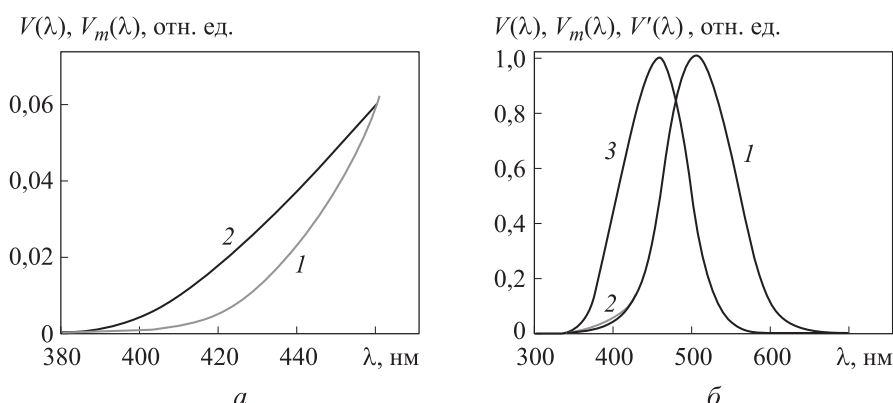


Рис. 2. Функции световой эффективности:

а — в диапазоне 380...460 нм, нормировка на K_m (1 — $V(\lambda)$, 2 — $V_m(\lambda)$);
 б — МКО (1 — $V(\lambda)$, 2 — $V_m(\lambda)$, нормировка на K_m , 3 — $V'(\lambda)$, нормировка на K'_m)

Эквивалентная яркость:

$$L_{eq} = L_P^\alpha (L_S)^{1-\alpha} 10^c, \quad (6)$$

где L_P , $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$ — фотопическая яркость, рассчитанная для 2-градусного стандартного наблюдателя МКО по (1); L_S , $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$ — скотопическая яркость для стандартного наблюдателя МКО в соответствии с (2); $\alpha = L_P / (L_P + 0,05)$ — коэффициент ахроматической адаптации; $c = a_c [f(x, y) - f(x, y)_{555}]$ — поправка на хроматичность, $a_c = 1,3 L_P^{0,5} / (L_P^{0,5} + 2,24)$ — коэффициент хроматической адаптации, который учитывает вклад хроматизма при изменении уровня яркости; $f(x, y)$ — функция, учитывающая вклад хроматизма при среднем уровне яркости и определяемая только значениями коэффициентов цветности x и y ,

$$f(x, y) = 0,5 \lg \left[-0,0054 - 0,21x + 0,77y + 1,44x^2 - 2,97xy + 1,59y^2 - 2,11(1-x-y)y^2 \right] - \lg y.$$

Значение функции $f(x, y)_{555} = 0,078$ определено для координат цветности излучения с длиной волны 555 нм ($x = 0,3373$; $y = 0,6589$).

Особенность методики МКО CIE 200:2011 заключается в том, что она имеет не обязательный, а рекомендательный характер. Это связано с особенностями расчета: он не определяет новую функцию световой эффективности, а рассчитанное значение эквивалентной яркости не является аддитивной величиной, т. е. эквивалентная яркость смеси излучений не равна сумме их отдельных эквивалентных яркостей.

Впервые функции ipRGC представлены в документах МКО¹⁰, которые содержат описание усредненных значений спектральной чувствительности глаза человека и количественные показатели для описания способности оптического излучения стимулировать пять типов фоторецепторов (*L*-, *M*-, *S*-колбочек, область чувствительности которых соответствует длинно-, средне- и коротковолновому диапазонам спектра видимого излучения, палочек и ipRGC). Через ipRGC колбочки вносят вклад в опосредованные сетчаткой зрительные эффекты света. Стандарты содержат информацию о влиянии возраста (20...80 лет) и поля зрения (2...10°) на количественную оценку стимуляции фоторецепторов сетчатки для реакций на свет под влиянием ipRGC. В то же время эти документы не дают полной информации для конкретных применений освещения или для количественного прогнозирования визуальных реакций на свет, не предназначены для колориметрического контекста, а также не касаются вопросов здоровья и относятся только к фоторецепции сетчатки. Стандарт МКО CIE S 026 2018 г. представлен как проект, допускающий изменения и дополнения, и до настоящего времени в окончательном виде не опубликован. Есть результаты экспериментального исследования и расчета функций световой эффективности на основе фундаментальных характеристик фоторецепторов сетчатки (см., например, [29, 30]). Уровни возбуждения каждого типа колбочек являются параметрами, которые определяют цветовое пространство LMS. В расчетах используются нормированные функции удельных координат цвета в этом цветовом пространстве ($\bar{l}_e(\lambda)$, $\bar{m}_e(\lambda)$), определяемые суммой реакций *S*-, *M*- и *L*-колбочек. Ранее в определении функции световой эффективности на основе фундаментальных характеристик учитывались только реакции длинно- и средневолновых рецепторов (*L*, *M*) [31]. Обосновывалось это тем, что коротковолновых (*S*) колбочек гораздо меньше и они, как и палочки, отсутствуют в центральной (фовеальной) области сетчатки с угловым размером примерно 0,34°. Этим объясняется более высокая чувствительность периферического («бокового») зрения к синему излучению по сравнению с более длинноволновым.

¹⁰ CIE 170-1:2006. Cone-fundamental-based colorimetry and photometry. CIE: Fundamental chromaticity diagram with physiological axes. P. 1. Technical Report 170-171. Vienna, Central Bureau of the Commission Internationale de l'Éclairage, 2006. CIE: Fundamental chromaticity diagram with physiological axes. P. 2. Spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams. Vienna, Central Bureau of the Commission Internationale de l'Éclairage; 2015. CIE S 026, Revision E, 2018. CIE system for metrology of optical radiation for ipRGC-influenced responses to light. Vienna, 2018.

В сетчатке число S-колбочек составляет не более 10 % общего числа рецепторов [31]. Вклад в визуальное ощущение яркости S-рецепторов в ограниченном угловом поле (до 10°) существенно меньше по сравнению с L- и M-рецепторами. Нормированные функции чувствительности этих рецепторов [31] показаны на рис. 3, а, их сравнительные характеристики, определенные с учетом вклада в функцию восприятия яркости $V(\lambda)$ аналогично тому, как эта функция связана с функциями удельных координат $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ в системе RGB МКО 1931 ($V(\lambda) = \bar{r}(\lambda) + 4,59 \bar{g}(\lambda) + 0,06 \bar{b}(\lambda)$), — на рис. 3, б.

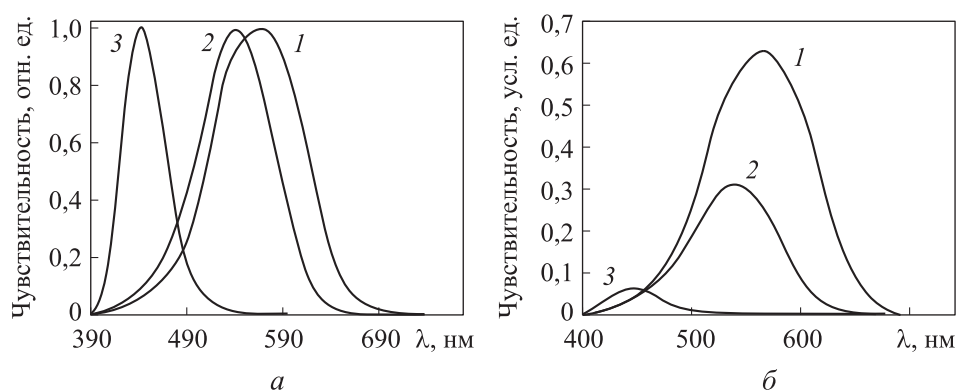


Рис. 3. Нормированные на максимальное значение функции чувствительности колбочек (а) и сравнительные характеристики чувствительности (б) для L- (1), M- (2), S-рецепторов (3) сетчатки

Функции световой эффективности, рассчитанные на основе фундаментальных характеристик чувствительности фоторецепторов [30] для 2-градусного наблюдателя

$$V_{Fe}(\lambda) = 0,68990272 \bar{l}_e(\lambda) + 0,34832189 \bar{m}_e(\lambda);$$

для 10-градусного наблюдателя

$$V_{F,10e}(\lambda) = 0,69283932 \bar{l}_{10e}(\lambda) + 0,34967567 \bar{m}_{10e}(\lambda).$$

Связь фундаментальных функций удельных координат цвета для 2-градусного наблюдателя в пространстве LMS со стандартными функциями системы RGB описывается уравнением

$$\begin{bmatrix} \bar{l}_e(\lambda) \\ \bar{m}_e(\lambda) \\ \bar{s}_e(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,192325269 & 0,749548882 & 0,0675726702 \\ 0,0192290085 & 0,949098496 & 0,113830196 \\ 0 & 0,0105107859 & 0,991427669 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}.$$

Функции удельных координат цвета для дополнительного (с 10-градусным полем зрения) наблюдателя МКО 1964 г. $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ представлены в CIE 165:2005. Функция $\bar{y}_{10}(\lambda)$ описывает соответствующую функцию световой эффективности для фотопического наблюдателя так же, как и функции $V(\lambda)$ и $V_m(\lambda)$. До настоящего времени функции $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ в основном используются для спецификации цвета и не применяются для характеристики источников света. Для 10-градусного стандартного наблюдателя связь фундаментальных функций удельных координат цвета в пространстве LMS со стандартными функциями системы RGB описывается уравнением [30]:

$$\begin{pmatrix} \bar{l}_{10}(\lambda) \\ \bar{m}_{10}(\lambda) \\ \bar{s}_{10}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,846201 & 11,09240 & 1 \\ 0,168926 & 8,265895 & 1 \\ 0 & 0,010600 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}_{10}(\lambda) \\ \bar{g}_{10}(\lambda) \\ \bar{b}_{10}(\lambda) \end{pmatrix}.$$

Сравнение функций $V_{F,10e}(\lambda)$ и $\bar{y}_{10}(\lambda)$ показывает значительную корреляцию этих характеристик [31]. На 29-й сессии МКО функцию $V_{F,10e}(\lambda)$ рекомендовали к применению в расчетах визуального восприятия яркости пространства предметов [32].

Результаты. Определение уровня визуального восприятия яркости может проводиться с использованием одной из пяти функций световой эффективности для фотопического наблюдателя ($V_2(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $V_m(\lambda)$, $V_{Fe}(\lambda)$ и $V_{F,10e}(\lambda)$) и одной — для скотопического ($V'(\lambda)$). Следует отметить, что функции световой эффективности, наряду с описанными выше, могут быть представлены в квантовой форме (см., например, [30]). Кроме того, для фотопического наблюдателя хроматических излучений существует дополнительная методика расчета — определение эквивалентной яркости L_{eq} по (6). Стандартный расчет для мезопического наблюдателя основан на использовании функции световой эффективности в форме комбинации фотопической ($V_2(\lambda)$) и скотопической ($V'(\lambda)$). Перечисленные характеристики, кроме $V_{Fe}(\lambda)$ и $V_{F,10e}(\lambda)$, имеют официальный статус рекомендованных стандартами и техническими рекомендациями МКО.

Обсуждение полученных результатов. Функция $V(\lambda)$ широко применяется в определении световых параметров в объективной фотометрии и, в частности, для описания параметров и характеристик приемников излучения, работающих в видимом диапазоне. Поскольку реакция приемника

излучения определяется спектральными характеристиками его чувствительности и принимаемого излучения, для получения корректного результата в расчете реакции фотоприемного устройства необходим переход от интегральных параметров к соответствующим спектральным. В этих случаях функция $V(\lambda)$ позволяет реализовать как общепринятое стандартное описание необходимых интегральных параметров, так и расчет соответствующих спектральных характеристик. Таким образом, если регистрация излучения осуществляется объективными методами, то нет оснований отказываться от функции $V(\lambda)$. Тем не менее следует обратить внимание на различие значений коэффициентов использования глазом ($k_{г\lambda}$) видимого излучения в расчетных задачах при применении функций $V(\lambda)$ и $\bar{y}_{10}(\lambda)$:

$$k_{г\lambda 2} = \frac{\int_0^{760} V(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda)d\lambda}, \quad k_{г\lambda 10} = \frac{\int_0^{760} \bar{y}_{10}(\lambda)\varphi(\lambda)d\lambda}{\int_0^{\infty} \varphi(\lambda)d\lambda}.$$

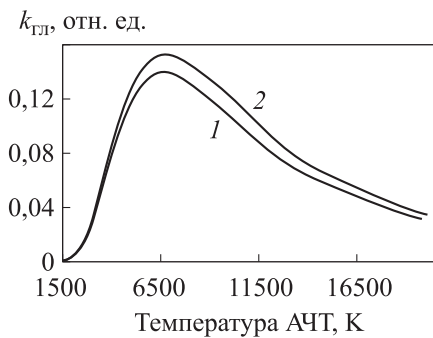


Рис. 4. Зависимость коэффициента использования глазом излучения АЧТ от температуры для $V(\lambda)$ (1) и $\bar{y}_{10}(\lambda)$ (2)

Для примера на рис. 4 показаны соответствующие зависимости $k_{г\lambda}$ для излучения абсолютно черного тела (АЧТ) при различных значениях температуры. Максимальное различие значений коэффициентов (~ 13 %) наблюдается при температуре около 6 500 К.

В ряде случаев при наличии заметной «синей» составляющей в наблюдаемом излучении расчеты могут быть выполнены по (1) с модифицированной функцией световой эффективности $V_m(\lambda)$ вместо $V(\lambda)$. Эффективность такой замены необходимо исследовать с учетом спектра наблюдаемого излучения, так как конкретные рекомендации МКО для этого случая не сформулированы. Очевидная особенность любого варианта такого расчета: $V(\lambda)$ и $V_m(\lambda)$ являются функциями стандартного наблюдателя МКО с малым угловым полем (2°).

Для расчетов фотопических визуальных реакций на хроматические излучения и мезопических на хроматические и ахроматические не существует альтернатив. В этих случаях МКО рекомендует применять соответствующие методики: расчеты эквивалентной и мезопической яркости,

основанные на характеристиках световой эффективности для 2-градусного стандартного наблюдателя. В общем случае в стандартных расчетах визуальных реакций фотопического наблюдателя, учитывая результаты исследований последних 5–7 лет, следует отдавать предпочтение функции $\bar{y}_{10}(\lambda)$, которую можно обозначить как $V_{10}(\lambda)$. Это обусловлено более широким угловым полем стандартного наблюдателя по сравнению с 2-градусным вариантом, что в большей мере соответствует реальным условиям визуальных наблюдений в практических задачах. Фундаментальная функция $V_{F,10e}(\lambda)$ до настоящего времени не включена в стандартные расчетные методики, рекомендованные МКО. Тем не менее возможность ее применения в практических задачах подтверждается сравнением с функцией $V_{10}(\lambda)$. Характеристики световой эффективности фундаментальной $V_{F2}(\lambda)$ (для углового поля 2°) и модифицированной $V_m(\lambda)$ функций показаны на рис. 5, на рис. 5, а — фундаментальной для поля зрения 10° и $\bar{y}_{10}(\lambda)$ [32].

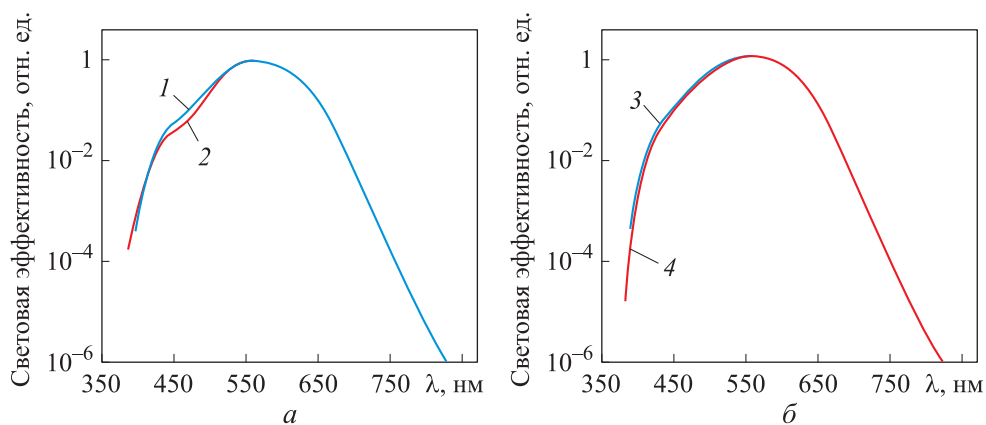


Рис. 5. Функции световой эффективности для $V_{F2}(\lambda)$ (1), $V_m(\lambda)$ (2), $V_{F10}(\lambda)$ (3) и $\bar{y}_{10}(\lambda)$ (4)

В первом (см. рис. 5, а) и во втором (рис. 5, б) случае заметны различия в коротковолновой области (до ~ 500 нм). Однако степень различия функций $V_{F10}(\lambda)$ и $\bar{y}_{10}(\lambda)$ можно оценивать как незначительную ($\sim 3...5$ % на длине волны 440 нм), допускающую применение в инженерных фотометрических расчетах функции $V_{10}(\lambda) \equiv \bar{y}_{10}(\lambda)$. Максимум чувствительности для 10-градусного наблюдателя приходится на длину волны 557 нм, максимальное значение световой эффективности для такого наблюдателя составляет $683,601 \approx 684$ лм/Вт (см. ISO 23539:2005(F)/CIE S 010/F:2007):

$$K_{m10} = 683 \left[\frac{V_{10}(\lambda_{\max 10} = 557 \text{ нм})}{V_{10}(\lambda = 555 \text{ нм})} \right] = 683,601 \approx 684 \text{ лм/Вт.}$$

Работы в этом направлении продолжают до настоящего времени (см., например, [30]). Как уже было отмечено, в 2023 г. МКО приняла новую редакцию стандарта ISO 23539:2005(F)/CIE S 010/F:2007, в котором наряду с ранее утвержденными представлены функции световой эффективности, основанные на фундаментальных характеристиках чувствительности фоторецепторов сетчатки, — пока только в виде приложения (приложение E). В перспективе следует ожидать уточнения и утверждения новых стандартных методик расчета уровня визуальных реакций фотопического наблюдателя, основанных на фундаментальных характеристиках световой эффективности, основные положения которых уже сформулированы в документах МКО.

Заключение. Результаты сравнительного анализа современных методик количественного расчета визуального восприятия яркости пространства предметов при различных уровнях освещенности и спектральных составах видимого света позволяют сделать следующие выводы.

Двухградусная функция световой эффективности $V(\lambda)$ (функция видности стандартного фотопического наблюдателя МКО 1931 г.) применима в стандартных расчетах световых параметров при аттестации приемников излучения и в задачах расчета реакции фотоприемных устройств оптико-электронных приборов, в том числе приборов ночного видения. Однако описание характеристик этих приборов может быть выполнено и в сравнении с визуальной чувствительностью $K'(\lambda)$ стандартного скотопического наблюдателя МКО или, в более общем случае, — мезопического наблюдателя $K_{mes}(\lambda)$.

Двухградусная функция световой эффективности $V'(\lambda)$ (функция видности стандартного скотопического наблюдателя МКО) должна применяться в задачах расчета визуальных реакций в условиях низкого уровня освещенности ($< 10^{-3}$ лк) при яркости пространства предметов не более $5 \cdot 10^{-5}$ кд/м², а в сочетании с функцией $V(\lambda)$ — для определения функции видности стандартного наблюдателя в условиях мезопических значений яркости пространства предметов. Границы мезопического диапазона определяются на основе функций $V(\lambda)$ (5 кд/м²) и $V'(\lambda)$ ($5 \cdot 10^{-3}$ кд/м²).

Модифицированная функция световой эффективности $V_m(\lambda)$ для фотопического уровня яркости имеет ограниченное применение в расчетах для излучений с заметной «синей» составляющей, причем эффективность

ее применения необходимо исследовать в конкретных условиях освещения, так как не сформулированы критерии применимости этой функции в стандартах МКО.

В задачах стандартного расчета уровня визуального восприятия яркости пространства предметов фотопического уровня без учета влияния на расчет цвета предметов до утверждения МКО фундаментальных характеристик световой эффективности следует отдавать предпочтение функции световой эффективности для 10-градусного наблюдателя $V_{10}(\lambda)$, которая совпадает с функцией удельной координаты цвета $\bar{y}_{10}(\lambda)$. Для сравнения с результатами расчета, полученными по стандартной утвержденной МКО методике, в качестве альтернативного варианта можно рассматривать методику, основанную на фундаментальных характеристиках световой эффективности.

В задачах расчета уровня визуального восприятия яркости пространства предметов фотопического уровня с учетом влияния хроматизма наблюдаемого излучения следует использовать стандартную методику МКО определения эквивалентной яркости.

В настоящее время фундаментальные характеристики световой эффективности еще не получили статус рекомендуемых МКО для стандартных расчетов уровня визуального восприятия фотопической яркости. Однако результаты исследования этих функций показывают, что они в значительной степени соответствуют стандартным, в частности функциям $V_m(\lambda)$ и $\bar{y}_{10}(\lambda)$, и есть основания предполагать, что в перспективе МКО может рекомендовать их для применения наряду или взамен ранее утвержденных стандартных функций световой эффективности.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ylinen A.-M., Tähkämö L., Puolakka M., et al. Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design. LED street lighting case study. URL: <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526044101/article5.pdf> (дата обращения: 21.02.2024).
- [2] Bullough J.D., Radetsky L.C. Analysis of new highway lighting technologies. URL: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07\(305\)_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(305)_FR.pdf) (дата обращения: 21.02.2024).
- [3] Diakite-Kortlever A.K., Knoop M. Non-image forming potential in urban settings — an approach considering orientation-dependent spectral properties of daylight. *Energy Build.*, 2022, vol. 265, art. 112080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112080>
- [4] Wong K.-L., Bünzli J.-C.G., Tanner P.A. Quantum yield and brightness. *J. Lumin.*, 2020, vol. 224, art. 117256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117256>

- [5] Tang L., Chen T., Zhang X., et al. Experimental study on brightness perception changing effect of pulsed light in short wavelengths. *Optik*, 2020, vol. 217, art. 164817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164817>
- [6] Ren H., Yang F., Wu Y. The $\text{Li}_3\text{LaMg}_2\text{TiO}_7\text{:Mn}^{4+}$ fluorescent ceramics with significant spatial distribution of luminous efficiency. *Ceram. Int.*, 2024, vol. 50, iss. 10, pp. 17513–17519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.239>
- [7] Dey A., Zele A.J., Feigl B., et al. Threshold vision under full-field stimulation: Revisiting the minimum number of quanta necessary to evoke a visual sensation. *Vision Res.*, 2021, vol. 180, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.11.010>
- [8] Noor M.C., Saradj F.M., Yazdanfar S.-A. Analytical evolution of measurement methods for light's non-visual effects. *Results Eng.*, 2023, vol. 17, art. 100922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100922>
- [9] Mao Y., Lee C.H., Bachmann C.M., et al. High resolution imaging spectroscopy of the sky. *Sol. Energy*, 2023, vol. 262, art. 111821. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111821>
- [10] Jain S., Wienold J., Lagier M., et al. Perceived glare from the sun behind tinted glazing: comparing blue vs. color-neutral tints. *Build. Environ.*, 2023, vol. 234, art. 110146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110146>
- [11] Mahmoudzadeh P., Hu W., Davis W., et al. Spatial efficiency: an outset of lighting application efficacy for indoor lighting. *Build. Environ.*, 2024, vol. 255, art. 111409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111409>
- [12] Pu J.-H., Yu X., Zhao Y., et al. Dynamic aerogel window with switchable solar transmittance and low haze. *Energy*, 2023, vol. 285, art. 129437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129437>
- [13] Хань Б., Юй Ц., Би М. Комплексная модель оценки яркости наружного экрана в городском общественном пространстве. *Светотехника*, 2024, № 1, с. 73–80. EDN: CWWISK
- [14] Пясецкий В.Б. Расчетные методики современной визуальной фотометрии. *Необратимые процессы в природе и технике. Тр. Всерос. конф. Т. 2. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2023, с. 212–216. EDN: GDLUFE
- [15] Abney W., Festing E.R. Colour photometry. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1886, vol. 177, pp. 423–456.
- [16] Vos J.J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. *Color Res. Appl.*, 1978, vol. 3, iss. 3, pp. 125–128. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.5080030309>
- [17] Sharpe L.T., Stockman A., Jagla W., et al. A luminous efficiency function, $V_{D65}(\lambda)$, for daylight adaptation: a correction. *Color Res. Appl.*, 2011, vol. 36, iss. 1, pp. 42–46. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20602>
- [18] Tsujimura Si., Takahashi Y. Melanopsin contributions to human brightness perception. In: Shamey R. (eds). *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2020, pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_422-1

- [19] Poelman D., Smet P.F. Photometry in the dark: time dependent visibility of low intensity light sources. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, iss. 25, pp. 26293–26299. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.026293>
- [20] Пясецкий В.Б. Расчет визуального восприятия яркости в условиях низкой освещенности. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2020, № 1 (130), с. 33–49. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-33-49>
- [21] Judd D.B. Report of U.S. secretariat committee on colorimetry and artificial daylight. *Proc. 12th Session of the CIE*, 1951, vol. 1, p. 11.
- [22] Sanders C.L., Wyszecki G. Correlate for brightness in terms of CIE color matching data. *Proc. 15th Session CIE*, 1963, vol. B, pp. 221–230.
- [23] Berman S.M. Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity. *J. Illum. Eng. Soc.*, 1991, vol. 21, iss. 1, pp. 3–14. DOI: <https://doi.org/10.1080/00994480.1992.10747980>
- [24] Judd D.B., Wyszecki G.W. Color in business, science, and industry. Wiley, 1975.
- [25] Foster R.G., Provencio I., Hudson D., et al. Circadian photoreception in the retinally degenerate mouse (*rd/rd*). *J. Comp. Physiol. A*, 1991, vol. 169, no. 1, pp. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00198171>
- [26] He S., Dong W., Deng Q., et al. Seeing more clearly: recent advances in understanding retinal circuitry. *Science*, 2003, vol. 302, iss. 5644, pp. 408–411. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1085457>
- [27] Zaidi F.H., Hull J.T., Peirson S.N., et al. Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. *Curr. Biol.*, 2007, vol. 17, iss. 24, pp. 2122–2128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034>
- [28] Kohlrausch V.A. Zur photometrie farbiger lichtern. *Das Licht.*, 1935, no. 6, pp. 259–279.
- [29] Sharpe L.T., Stockman A., Jagla W., et al. A luminous efficiency function $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *J. Vis.*, 2005, no. 5, iss. 11, pp. 948–968. DOI: <https://doi.org/10.1167/5.11.3>
- [30] Stockman A., Rider A.T. Formulae for generating standard and individual human cone spectral sensitivities. *Color Res. Appl.*, 2023, vol. 48, iss. 6, pp. 818–840. DOI: <https://doi.org/10.1002/col.22879>
- [31] Stockman A., Sharpe L.T. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Res.*, 2000, vol. 40, iss. 13, pp. 1711–1737. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(00)00021-3)
- [32] Ohno Y., Kawashima Y., Oh S., et al. Visual evaluation of CIE 2015 cone fundamental-based 10° colour matching functions for lighting applications. *Proc. 29th CIE Session*, 2019, pp. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.25039/x46.2019.OP69>

Пясецкий Вячеслав Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Хорохоров Алексей Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Ширанков Александр Федорович — канд. техн. наук, начальник отдела НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Пясецкий В.Б., Хорохоров А.М., Ширанков А.Ф. Расчетные методики визуальной фотометрии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 6 (117), с. 15–35. EDN: FGEIWX

COMPUTATIONAL APPROACHES TO VISUAL PHOTOMETRY

V.B. Pyasetsky

A.M. Khorokhorov

A.F. Shirankov

piasetsky@bmstu.ru

alex1@bmstu.ru

ashirankov@bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In this paper, we delve into contemporary techniques employed in the computation of visual perceptions of luminous intensity. We explore the standard methodologies adopted by the International Commission on Illumination (ISO), which encompass both achromatic and chromatic radiances. The ISO methods involve the determination of light efficiency functions tailored to various levels of photopic, scotopic, and mesopic adaptation for the observer. The light efficiency functions of standardized ISO observers with a 2-degree field and a 10-degree field are compared to the light efficiency functions derived from the basic sensitivity characteristics of the photoreceptors in the retina. The calculation of the eye's utilization of blackbody radiation reveals that the difference in coefficients between the 2-degree and 10-degree observers can reach up to 13 %. This example demonstrates that, for a 10-degree observer, there is a close correspondence between the standard MCO light efficiency function and the one calculated based on the fundamental sensitivity parameters, with

Keywords

Visual photometry, luminous efficiency function, luminosity

an error falling within the acceptable range for engineering calculations (3–5 %). These findings provide guidance on the suitability of various techniques for addressing practical challenges in visual and objective photometry, particularly considering the light efficiency characteristics of 2- and 10-degree observers for both achromatic and chromatic radiation

Received 14.03.2024

Accepted 07.06.2024

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Ylinen A.-M., Tähkämö L., Puolakka M., et al. Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design. LED street lighting case study. Available at: <http://lib.tkk.fi/Diss/2011/isbn9789526044101/article5.pdf> (accessed: 21.02.2024).
- [2] Bullough J.D., Radetsky L.C. Analysis of new highway lighting technologies. Available at: [http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07\(305\)_FR.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP20-07(305)_FR.pdf) (accessed: 21.02.2024).
- [3] Diakite-Kortlever A.K., Knoop M. Non-image forming potential in urban settings — an approach considering orientation-dependent spectral properties of daylight. *Energy Build.*, 2022, vol. 265, art. 112080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112080>
- [4] Wong K.-L., Bünzli J.-C.G., Tanner P.A. Quantum yield and brightness. *J. Lumin.*, 2020, vol. 224, art. 117256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117256>
- [5] Tang L., Chen T., Zhang X., et al. Experimental study on brightness perception changing effect of pulsed light in short wavelengths. *Optik*, 2020, vol. 217, art. 164817. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164817>
- [6] Ren H., Yang F., Wu Y. The $\text{Li}_3\text{LaMg}_2\text{TiO}_7\text{:Mn}^{4+}$ fluorescent ceramics with significant spatial distribution of luminous efficiency. *Ceram. Int.*, 2024, vol. 50, iss. 10, pp. 17513–17519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.239>
- [7] Dey A., Zele A.J., Feigl B., et al. Threshold vision under full-field stimulation: Revisiting the minimum number of quanta necessary to evoke a visual sensation. *Vision Res.*, 2021, vol. 180, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2020.11.010>
- [8] Noor M.C., Saradj F.M., Yazdanfar S.-A. Analytical evolution of measurement methods for light's non-visual effects. *Results Eng.*, 2023, vol. 17, art. 100922. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.100922>
- [9] Mao Y., Lee C.H., Bachmann C.M., et al. High resolution imaging spectroscopy of the sky. *Sol. Energy*, 2023, vol. 262, art. 111821. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.111821>
- [10] Jain S., Wienold J., Lagier M., et al. Perceived glare from the sun behind tinted glazing: comparing blue vs. color-neutral tints. *Build. Environ.*, 2023, vol. 234, art. 110146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110146>
- [11] Mahmoudzadeh P., Hu W., Davis W., et al. Spatial efficiency: an outset of lighting application efficacy for indoor lighting. *Build. Environ.*, 2024, vol. 255, art. 111409. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111409>

- [12] Pu J.-H., Yu X., Zhao Y., et al. Dynamic aerogel window with switchable solar transmittance and low haze. *Energy*, 2023, vol. 285, art. 129437.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129437>
- [13] Khan B., Yuy Ts., Bi M. A comprehensive model for the assessment of outdoor screen brightness in urban public space. *Svetotekhnika*, 2024, no. 1, pp. 73–80 (in Russ.).
EDN: CWWISK
- [14] Pyasetskiy V.B. [Calculation techniques of modern visual photometry]. *Neobratimye protsessy v prirode i tekhnike. Tr. Vseros. konf. T. 2* [Irreversible Processes in Nature and Technology. Proc. Russ. Conf. Vol. 2]. Moscow, BMSTU Publ., 2023, pp. 212–216 (in Russ.). EDN: GDLUFE
- [15] Abney W., Festing E.R. Colour photometry. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1886, vol. 177, pp. 423–456.
- [16] Vos J.J. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. *Color Res. Appl.*, 1978, vol. 3, iss. 3, pp. 125–128.
DOI: <https://doi.org/10.1002/col.5080030309>
- [17] Sharpe L.T., Stockman A., Jagla W., et al. A luminous efficiency function, $V_{D65}(\lambda)$, for daylight adaptation: a correction. *Color Res. Appl.*, 2011, vol. 36, iss. 1, pp. 42–46.
DOI: <https://doi.org/10.1002/col.20602>
- [18] Tsujimura Si., Takahashi Y. Melanopsin contributions to human brightness perception. In: Shamey R. (eds). *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2020, pp. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27851-8_422-1
- [19] Poelman D., Smet P.F. Photometry in the dark: time dependent visibility of low intensity light sources. *Opt. Express*, 2010, vol. 18, iss. 25, pp. 26293–26299.
DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.18.026293>
- [20] Pyasetskiy V.B. Estimating perceived brightness in low luminance conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2020, no. 1 (130), pp. 33–49 (in Russ.).
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2020-1-33-49>
- [21] Judd D.B. Report of U.S. secretariat committee on colorimetry and artificial daylight. *Proc. 12th Session of the CIE*, 1951, vol. 1, p. 11.
- [22] Sanders C.L., Wyszecki G. Correlate for brightness in terms of CIE color matching data. *Proc. 15th Session CIE*, 1963, vol. B, pp. 221–230.
- [23] Berman S.M. Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity. *J. Illum. Eng. Soc.*, 1991, vol. 21, iss. 1, pp. 3–14. DOI: <https://doi.org/10.1080/00994480.1992.10747980>
- [24] Judd D.B., Wyszecki G.W. *Color in business, science, and industry*. Wiley, 1975.
- [25] Foster R.G., Provencio I., Hudson D., et al. Circadian photoreception in the retinally degenerate mouse (*rd/rd*). *J. Comp. Physiol. A*, 1991, vol. 169, no. 1, pp. 39–50.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00198171>
- [26] He S., Dong W., Deng Q., et al. Seeing more clearly: recent advances in understanding retinal circuitry. *Science*, 2003, vol. 302, iss. 5644, pp. 408–411.
DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1085457>

- [27] Zaidi F.H., Hull J.T., Peirson S.N., et al. Short-wavelength light sensitivity of circadian, pupillary, and visual awareness in humans lacking an outer retina. *Curr. Biol.*, 2007, vol. 17, iss. 24, pp. 2122–2128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.11.034>
- [28] Kohlrausch V.A. Zur photometrie farbiger lichtern. *Das Licht.*, 1935, no. 6, pp. 259–279.
- [29] Sharpe L.T., Stockman A., Jagla W., et al. A luminous efficiency function $V^*(\lambda)$, for daylight adaptation. *J. Vis.*, 2005, no. 5, iss. 11, pp. 948–968.
DOI: <https://doi.org/10.1167/5.11.3>
- [30] Stockman A., Rider A.T. Formulae for generating standard and individual human cone spectral sensitivities. *Color Res. Appl.*, 2023, vol. 48, iss. 6, pp. 818–840.
DOI: <https://doi.org/10.1002/col.22879>
- [31] Stockman A., Sharpe L.T. The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Res.*, 2000, vol. 40, iss. 13, pp. 1711–1737.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s0042-6989\(00\)00021-3](https://doi.org/10.1016/s0042-6989(00)00021-3)
- [32] Ohno Y., Kawashima Y., Oh S., et al. Visual evaluation of CIE 2015 cone fundamental-based 10° colour matching functions for lighting applications. *Proc. 29th CIE Session*, 2019, pp. 505–514. DOI: <https://doi.org/10.25039/x46.2019.OP69>

Pyasetsky V.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Khorokhorov A.M. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Shirankov A.F. — Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, Research Institute of Radioelectronics and Laser Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Pyasetsky V.B., Khorokhorov A.M., Shirankov A.F. Computational approaches to visual photometry. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 6 (117), pp. 15–35 (in Russ.). EDN: FGEIWX