

УДК 628.9

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЛАГОПРИЯТНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ СРЕДЫ

Е. Н. САВКОВА, доцент кафедры «Электротехника и электроника» Белорусского национального технического университета (БНТУ), ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники (филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт»), кандидат технических наук

Ю. ЧЖАН, аспирант кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» БНТУ

М. А. КЛЯВДО, магистрант кафедры «Электроснабжение» БНТУ

В статье предложен комплексный подход к моделированию визуальной среды с учетом хроматического, психофизиологического, пространственно-временного компонентов и ряда существующих нормативных показателей в условиях комбинированного воздействия факторов ближнего и дальнего окружения.

SUMMARY

E. N. SAVKOVA, YU. ZHANG, M. A. KLYAVDO

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF MODELING A FAVORABLE VISUAL ENVIRONMENT

A comprehensive approach to modeling the visual environment is proposed taking into account chromatic, psychophysiological, spatio-temporal components and a number of existing normative indicators in conditions of combined influence of factors of the near and far environment.

Ключевые слова: визуальная среда, освещение, циркадный ритм, фотобиологические риски, светотехнические сценарии.

Визуальная среда, в которой человек проводит время бодрствования не только в производственной, но и домашней обстановке, в целом изменилась за последнее десятилетие и комбинируется естественным и искусственным освещением с динамическими фотометрическими и спектральными характеристиками. Научные открытия фотоники и физиологии усиливают роль человеческого фактора в фотометрии, взаимосвязи оптиче-

ских и фотобиологических величин. Поэтому светотехнические сценарии должны учитывать как значение чисто физической характеристики мощности излучения, стимулирующей зрительную систему, так и спектральную чувствительность последней. В этой связи ISO 16817:2017 [1] устанавливает требования к параметрам благоприятной визуальной среды, а Международный союз электросвязи (ITU) и Международный консорциум по цвету (ICC) ввели термины «эталонной» и «реальной» среды просмотра с учетом восприятий цифровых изображений. Однако до сих пор

не в полной мере уделяется внимание многозадачной деятельности людей, сочетающей работу с документами на бумажных и электронных носителях (включая смартфоны), взаимодействию с различными видами видеоконтента, фонового влияния телевизоров, ночной иллюминации и подсветки. Еще одно направление – совершенствование визуальной среды для водителей, осуществляющих деятельность как в дневное, так и в ночное и сумеречное время суток, задействуя фoveальное и периферическое зрение. В рамках задания государственной программы научных исследований 6 «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Фотоника и ее применения») в научно-исследовательской лаборатории полупроводниковой техники БНТУ проводятся научные исследования методов и средств повышения качества визуальной среды человека. Одна из задач – разработка карты интервалов фотобиологической безопасности оптического излучения,

представляющей собой базу данных, в которой для диапазонов и поддиапазонов оптического излучения определены интервалы допусков значений пространственных, временных, фотометрических и хроматических параметров, оказывающих влияние на зрительные и психофизиологические функции организма человека. Данная карта позволит обеспечивать информационную поддержку при создании благоприятной визуальной среды в условиях комбинированного воздействия факторов ближнего и дальнего окружения, способствуя концентрации внимания и релаксации пользователей, улучшая самочувствие людей в зависимости от их предпочтений, психофизиологического состояния, времени суток и вида деятельности.

Цель статьи – разработка рекомендаций по моделированию благоприятной визуальной среды, основанной на добавлении хроматического, психофизиологического и пространственно-временного компонентов.

НОРМАТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ БЛАГОПРИЯТНОЙ ВИЗУАЛЬНОЙ СРЕДЫ

Существует ряд нормативных документов, содержащих требования и рекомендации к созданию благоприятной визуальной среды в помещениях и селитебных зонах, являющихся основой для карты интервалов фотобиологической безопасности (в данной работе будут рассмотрены лишь некоторые, относящиеся к помещениям). Так, например, СН 2.04.03-2020 [2] устанавливают интервалы допустимых значений показателей: коэффициент естественной освещенности (КЕО); контраст объекта различения с фоном K , коэффициент запаса, коэффициент пульсации освещенности, коэффициент светового климата m , пороговое приращение яркостей T_r , отраженная блескость, показатель ослепленности P , показатель дискомфорта M – критерий оценки дискомфорта блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения, определяемый согласно по формуле [2]:

$$M = \frac{L_c \Omega^{0,5}}{\Phi_0 L_{ад}^{0,5}}, \quad (1)$$

где L_c – яркость блеского источника, кд/м²;

Ω – угловой размер блеского источника, стер;

Φ_0 – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения;

$L_{ад}$ – яркость адаптации, кд/м².

ГОСТ 33392-2015 [3] определяет объединенный показатель дискомфорта UGR – международный критерий оценки дискомфортной блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения:

$$UGR = 8lg \left[\frac{0,25}{L_a} \sum_{i=1}^N \frac{L_i^2 \omega_i}{P_i^2} \right], \quad (2)$$

где N – число светильников в осветительной установке;

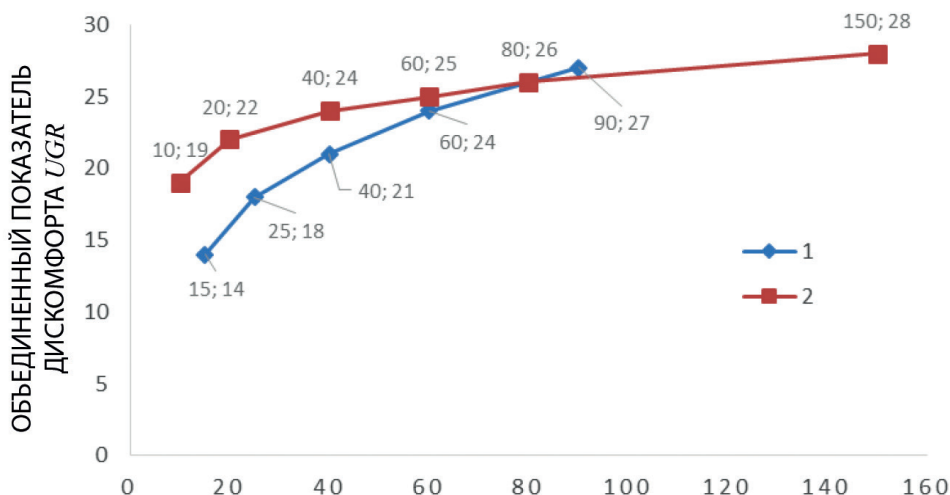
L_i – габаритная яркость светящейся части i -го светильника в направлении глаз наблюдателя, кд/м²;

ω_i – телесный угол светящихся частей i -го светильника из точки наблюдения, ср;

L_a – яркость фона, кд/м²;

p_i – индекс позиции для i -го светильника, учитывающий его размещение относительно линии зрения наблюдателя.

Соотношение между показателем дискомфорта UGR и показателями M и P графически показано на рисунке 1.



1 – Соотношение между UGR и показателем дискомфорта M
 2 – Соотношение между UGR и показателем ослепленности P

Рисунок 1 – Взаимосвязь показателей UGR , M и P согласно ГОСТ 33392-2015

ГОСТ 34819-2021 [4] определяет значения световой отдачи светильников со светодиодами, люминесцентными, металлогалогенными лампами, натриевыми лампами высокого давления для производственных, общественных помещений, наружного освещения, прожекторов с учетом цветовой коррелированной температуры и индекса цветопередачи (для светодиодов), а также зоны ограничения яркости, слепимости и защитного угла. Rec. ITU-R BT.2035 [5] дают рекомендации по созданию эталонной среды просмотра для оценки программного материала HDTV или завершенных программ, в то время как ITU-R BT.2022 [6] определяют общие условия просмотра для субъективных оценок в лабораторных условиях. При проектировании световой среды спектр данных показателей может быть расширен с учетом визуального, психофизиологических и временного аспектов.

ПРОБЛЕМА ЯРКОСТНОЙ И ХРОМАТИЧЕСКОЙ АДАПТАЦИИ

Одно из определений яркости адаптации приведено в [7]. Это яркость, наблюдаемая изнутри испытуемого транспортного средства, для заданного сочетания уровня верхнего освещения и типа дорожного покрытия. Для мезопического зрения эксперименты [8] показали варьирование яркости адаптации от 0,1 до 0,5 кд/м² для расстояний обнаружения от 110 до 130 м, с общим уровнем между двумя типами дорожных покрытий около 0,35 кд/м² [9] и минимальным влиянием спектров систем верхнего освещения на внеосевую видимость, что ограничивает потенциал мезопического эффекта для водителя [8, 9]. Феномены яркостной адаптации – эффекты Стивенса, «объемного звучания», контраста яркости – свойственны большинству людей, в отличие от аномалий, которые здесь не рассматриваются. Эффект Стивенса проявляется в повышении контраста с увеличением яркости, как показано на рисунке 2а). Эффект «объемного звучания» (рисунок 2б)) означает, что «воспринимаемый контраст изображений увеличивается, когда объемное изображение меняется с темного на тусклое и яркое» [10]. Эффект контраста яркости заключается в том, что «серое пятно, помещенное на темный фон, выглядит светлее, чем такое же серое пятно на светлом фоне» [10].

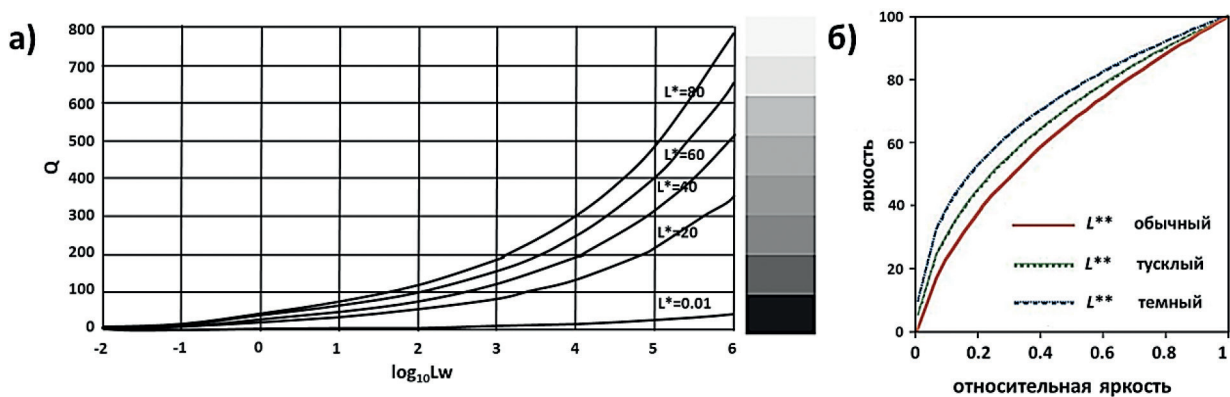


Рисунок 2 – Графическая интерпретация эффектов яркостной адаптации:
а) Стивенса; б) «объемного звучания»

Хроматическая адаптация проявляется в способности зрительной системы приспосабливаться к широко варьирующейся интенсивности цветов освещения при идентификации стимулов одинаковой яркости [11]. Так, например, белизна является важным атрибутом в промышленности (при достижении коэффициента яркости более 100 % образец может иметь вид флуоресценции). Формулы оценки показателей белизны W или W_{10} и оттенка TW или TW_{10} , рекомендованные CIE, ограничены условиями повторяемости и использованием иллюминанта CIE D65 [10]:

$$W = Y + 800(x_p - x) + 1700(y_p - y), \tag{3}$$

$$W_{10} = Y_{10} + 800(x_{p,10} - x_{10}) + 1700(y_{p,10} - y_{10}), \tag{4}$$

$$T = 1000(x_p - x) - 650(y_p - y), \tag{5}$$

$$T_{W,10} = 900(x_{p,10} - x_{10}) - 650(y_{p,10} - y_{10}), \tag{6}$$

где $x_p, x_{p,10}, y_p, y_{p,10}$ – координаты цветности опорных образцов; x, y, x_{10}, y_{10} – координаты цветности исследуемых образцов.

Хроматический компонент проявляется также в эффектах Джадда и Ханта, проиллюстрированных рисунком 3. В эффекте Джадда по мере снижения уровня освещенности наблюдается постепенное снижение яркости и красочности (насыщенности цветов), ниже примерно 0,1 люкс происходит полная потеря цветового зрения [11]. По мере уменьшения размера поля наблюдается постепенное снижение адаптации (например, при проецировании изображений в темных аудиториях или при печати изображений на цветной бумаге) [11]. Эффект Ханта можно резюмировать тем, что «красочность данного стимула увеличивается с уровнем яркости». Как упоминалось в [10], цвета одинаковой яркости, даже если они видны в одинаковых условиях фотопического обзора, не обязательно будут выглядеть одинаково яркими, поскольку существует тенденция к увеличению яркости с насыщенностью цвета.

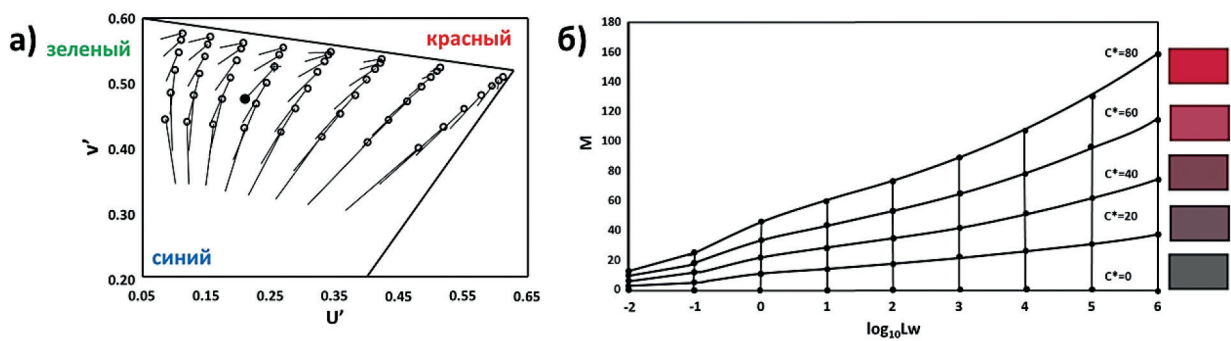


Рисунок 3 – Графическая интерпретация эффектов хроматической адаптации: а) Джадда; б) Ханта

Данный эффект достаточно велик для дисплеев с насыщенными самосветящимися цветами. Контуры постоянного коэффициента F представляют разницу в логарифмической яркости цветов, которые кажутся одинаково яркими при одних и тех же условиях просмотра. Эмпирическая формула идентификации стимулов как одинаково ярких содержит коэффициент F [10]:

$$F = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4, \quad (7)$$

где x, y – координаты цветности стимулов.

Тогда, если два стимула имеют яркости L_1, L_2 и коэффициенты F_1, F_2 , два стимула одинаково яркие, если [10]:

$$\log(L_1) + F_1 = \log(L_2) + F_2. \quad (8)$$

Если эти два выражения не равны, то большее указывает на стимул, имеющий большую яркость. На рисунке 4 показаны локусы с равными значениями F .

Ясно, что, хотя F имеет тенденцию увеличиваться с насыщением, это происходит с минимума, который не возникает в точке, представляющей равноэнергетический

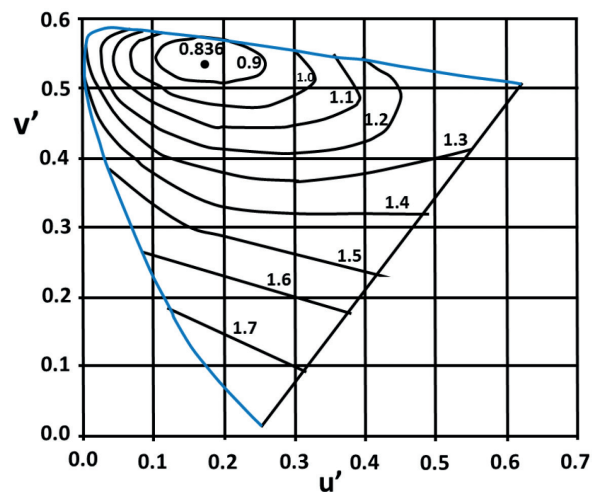


Рисунок 4 – Отображение стимулов одинаковой яркости в цветовом пространстве CIE Lu^*v^*

стимул (для которого $u = 0,2105$ и $v = 0,4737$), но в точке, которая смещена от него в сторону более желтоватых цветов [10].

Вывод: эффекты адаптации всегда связаны с временным компонентом, предполагающим не резкое, а постепенное изменение фотометрических параметров, что может быть учтено при проектировании биодинамических источников света и адаптивного освещения.

ВРЕМЕННОЙ КОМПОНЕНТ

Фактор времени учитывает влияние изменения света с различной периодичностью: начиная с эффектов нестабильности освещения (стробоскопического и фликера) и заканчивая суточными ритмами и сезонным солнцестоянием. Количественной мерой фликера согласно Регламенту (EU) 2019/2020 и ГОСТ IEC 61547-2013 [12] является параметр $P_{st}LM$ (значение $P_{st}LM = 1$ означает, что средний наблюдатель обнаружит фликер с вероятностью 50 %), а стробоскопического эффекта – согласно IEC TR 63158:2018 [13] – стробоскопическая мера видимости SVM (регламентирован как $P_{st}LM \leq 1,0$ при полной нагрузке, за исключением источников света, предназначенных для эксплуатации вне помещений, промышленного применения или в других областях). [2] регламентированы значения коэффициента пульсаций света при частоте 0–300 Гц: для люминесцентных ламп – 23–39 %, для галогенных – 11–29 %, для светодиодных – 0–8 %; для зрительных работ различной степени точности, в игровых комнатах детских садов, учебных классах, кабинетах, аудиториях учреждений образования – 10 %; в читальных залах, мастерских по обработке древесины и металла – 15 %. В помещениях, оборудованных компьютерной техникой, коэффициент пульсации света не должен превышать 5 %. Это связано с тем, что помимо ламп пульсируют также мониторы компьютеров, что создает дополнительную нагрузку на органы зрения и организм в целом. ГОСТ IEC 61000-3-3-2015 [14] нормирует характеристики изменения напряжения при измерении на клеммах тестируемого оборудования: временная функция относительного среднеквадратичного изменения напряжения полупериода для каждого полупериода между пересечениями нуля источником напряжения. ГОСТ IEC 61000-4-15-2014 [15] устанавливает параметр интенсивности кратковременного мерцания ($P_{st} = 10$ минут) и выражение для расчета долговременной чувствительности к мерцанию.

В настоящее время в проектах по освещению считается, что циркадный ритм человека описывается примерно как 24-часовой цикл, контролируемый световой средой, и один из ключей к регулированию сна, настроения, частоты сердечных сокращений и температуры тела [16]. Свет необходим для синхронизации циркадной системы, системы, отвечающей за настройку наших биологических часов каждый день в соответствии с циклами дня и ночи (свет–темнота) [17].

ДЕСКРИПТОРНЫЕ ГРУППЫ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Фотометрические величины, используемые для визуальной характеристики света и стратегий освещения, группируются в зависимости от условий визуального наблюдения с применением соответствующих дескрипторов и связаны с радиометрическими (энергетическими) величинами спектральных функций светоотдачи $V_x(\lambda)$. Для фотопического зрения при яркости адаптации выше 5 кд/м^2 используются функции: $V(\lambda)$ – для всех задач визуального наблюдения по оси, когда объекты, видимые глазом, находятся в узком поле зрения при центральном зрении с узким полем зрения (около 4° или менее) для фовеального обзора [18]; $V_{10}(\lambda)$ – для поля зрения, когда визуальная

цель имеет угловое отклонение больше 4° или видна вне оси на длине волны $\lambda_{10m} = 557$ нм (точно) [19]; V_F модифицированного наблюдателя CIE 1988 2° для исследовательских целей фотопического зрения [19]. Для скотопического зрения со средней яркостью адаптации глаза $L < 0,005$ кд/м² используется функция светоотдачи $V'(\lambda)$, принятая ISO/CIE, 2005 [20]; для мезопического зрения с яркостью адаптации от 0,005 кд/м² до 5 кд/м² – семейство спектральных функций световой эффективности $V_{mes;m}(\lambda)$ для выполнения периферийных задач (неприменимо к фовеальному зрению) [21, 22]:

$$V_{mes;m}(\lambda) = \frac{1}{M(m)} \{mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda)\} \quad \text{для } 0 \leq m \leq 1, \quad (9)$$

где m – коэффициент адаптации, значение которого зависит от условий визуальной адаптации; для мезопического зрения – в зависимости от уровня визуальной адаптации $m = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$; $M(m)$ – нормализующая функция, такая, что $V_{mes;m}(\lambda) = 1$.

Функция модифицированного наблюдателя V_M [7] применяется дополнительно в мезопической фотометрии при оценке пространственной яркости, обнаружении периферийных объектов (приподнятая тротуарная плитка для пешеходов [8, 9], движущаяся цель на обочине дороги) для водителей при движении на низкой скорости [8]. Значения максимальной длины волны λ_m в стандартном воздухе (сухой воздух при 15 °С и 101 325 Па, содержащий 0,045 % двуокиси углерода по объему) составляют для фотопического зрения: $\lambda_{cd} = 555,017$ нм и $\lambda_{10} = 557$ нм, для скотопического зрения – $\lambda'_m = 507$ нм [21]. Анализ [18–22] позволил авторам вывести формулы фотометрических величин для трех видов зрения, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные формулы фотометрических величин

Скотопическое зрение	Мезопическое зрение	Фотопическое зрение
Спектральная функция светоотдачи (стандартный наблюдатель CIE)		
$V'(\lambda)$ ISO/CIE, 2005	$V_{mes;m}(\lambda)$	$V(\lambda), V_{10}(\lambda), V_F$
Максимальная световая эффективность, лм·Вт ⁻¹		
$K'_m = K_{cd} \frac{V'(\lambda_m)}{V'(\lambda_{cd})} = 1\,700,13$	$K_{m,mes;m} = \frac{K_{cd}}{V_{mes;m}(\lambda_{cd})}$ $K_{cd} = 683$ $K_{m,mes;m} \in [683; 1\,700]$	$K_m = 683,002 \approx 683$ $K_m = K_{cd} \frac{V(\lambda_m)}{V(\lambda_{cd})}$ $K_{m,10} = K_{cd} \frac{V_{10}(\lambda_{m,10})}{V_{10}(\lambda_{cd})}$
Световая энергия, лм·с		
$Q' = K'_m \int_0^\infty Q_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$	$Q_{mes;m} = \frac{K_{cd}}{V_{mes;m}(\lambda_{cd})} \int_0^\infty Q_{e,\lambda}(\lambda) V_{mes;m}(\lambda) d\lambda$	$Q_V = K_m \int_0^\infty Q_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
$Q_{e,\lambda}$ – спектральная энергия излучения, Дж		
Световой поток, лм		
$\Phi' = \frac{dQ'}{dt}$	$\Phi_{mes;m} = \frac{dQ_{mes;m}}{dt}$	$\Phi_V = \frac{dQ_V}{dt}$

Скотопическое зрение	Мезопическое зрение	Фотопическое зрение
t – время		
$\Phi' = K'_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$	$\Phi_{mes,m} = \frac{K_{cd}}{V_{mes,m}(\lambda_{cd})} \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V_{mes,m}(\lambda) d\lambda$	$\Phi_V = K_m \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ $\Phi_{10} = K_{m,10} \int_{\lambda} \Phi_{e,\lambda}(\lambda) V_{10}(\lambda) d\lambda$
$\Phi' = \iint_{\Omega} I'(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta$	$\Phi_{mes,m} = \iint_{\Omega} I_{mes,m}(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta$	$\Phi_V = \iint_{\Omega} I_V(\vartheta, \varphi) \sin \vartheta d\varphi d\vartheta$
$\Phi' = \iint L' \cos \alpha dA d\Omega$	$\Phi_{mes,m} = \iint L_{mes,m} \cos \alpha dA d\Omega$	$\Phi_V = \iint L_V \cos \alpha dA d\Omega$
Ω – телесный угол, содержащий это направление; A – площадь; α – угол между нормалью к поверхности в указанной точке и заданным направлением; ϑ, φ – указанное направление		
Сила света, кд		
$I' = K'_m \int_{\lambda} I_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$	$I_{mes,m} = K_{m,mes,m} \int_{\lambda} I_{e,\lambda}(\lambda) V_{mes,m}(\lambda) d\lambda$	$I_V = K_m \int_{\lambda} I_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
$I' = \frac{d\Phi'}{d\Omega}$	$I_{mes,m} = \frac{d\Phi_{mes,m}}{d\Omega}$	$I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}$
Яркость, кд/м ²		
$L' = K'_m \int_{\lambda} L_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$	$L_{mes,m} = \frac{m^{(n-1)I_{V,adapt} + (1-m_{(n-1)})\dot{L}'_{V,adapt} V'(\lambda_m)}}{m_{(n-1)} + (1-m_{(n-1)})V'(\lambda_m)}$	$L_V = K_m \int_{\lambda} L_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
$L' = \frac{dI'}{dA \cos \alpha}$	$L_{mes,m} = \frac{dI_{mes,m}}{dA \cos \alpha}$	$L_V = \frac{dI_V}{dA \cos \alpha}$
$\bar{L}' = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\bar{I}'}{A \cos \alpha}$	$\bar{L}_{mes,m} = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\bar{I}_{mes,m}}{A \cos \alpha}$	$\bar{L}_V = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\bar{I}_V}{A \cos \alpha}$
Базовая яркость, кд/м ²		
$L' = \frac{d\Phi'}{dG}$	$L_{mes,m} = \frac{d\Phi_{mes,m}}{dG}$	$L_V = \frac{d\Phi_V}{dG}$
G – геометрическая протяженность		
$L' = \frac{dE'}{d\Omega \cos \theta}$	$L_{mes,m} = \frac{dE_{mes,m}}{d\Omega \cos \theta}$	$L_V = \frac{dE_V}{d\Omega \cos \theta}$
θ – угол между нормалью к облучаемой поверхности и направлением облучения		
$L'(x, y, \vartheta, \varphi) = \frac{\partial^2 \Phi'(x, y, \vartheta, \varphi)}{\partial A(x, y) \cos \alpha \partial \Omega(\vartheta, \varphi)}$	$L_{mes,m}(x, y, \vartheta, \varphi) = \frac{\partial^2 \Phi_{mes,m}(x, y, \vartheta, \varphi)}{\partial A(x, y) \cos \alpha \partial \Omega(\vartheta, \varphi)}$	$L_V(x, y, \vartheta, \varphi) = \frac{\partial^2 \Phi_V(x, y, \vartheta, \varphi)}{\partial A(x, y) \cos \alpha \partial \Omega(\vartheta, \varphi)}$
	$L_{mes,n} = \frac{m^{(n-1)I_{V,adapt} + (1-m_{(n-1)})\dot{L}'_{V,adapt} V'(\lambda_m)}}{m_{(n-1)} + (1-m_{(n-1)})V'(\lambda_m)}$	
$m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n})$ для $0 \leq m_n \leq 1$; $a = 0,767 0$ и $b = 0,333 4$; (СИЕ, 2010) $I_{V,adapt}$, $\dot{L}'_{V,adapt}$ – значения яркости адаптации		
x, y – координаты указанной точки в пространстве		
Освещенность, лк		
$E' = K'_m \int_{\lambda} E_{e,\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda$	$E_{mes,m} = K_{m,mes,m} \int_{\lambda} E_{e,\lambda}(\lambda) V_{mes,m}(\lambda) d\lambda$	$E_V = K_m \int_{\lambda} E_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda$
$E' = \frac{d\Phi'}{dA}$	$E_{mes,m} = \frac{d\Phi_{mes,m}}{dA}$	$E_V = \frac{d\Phi_V}{dA}$

Спектральные весовые функции пропускания $s_{p,A}(\lambda)$ и $s_{e,A}(\lambda)$, описывающие один и тот же эффект, различны по форме и пиковой длине волны, когда выражаются в количествах фотонов или радиометрических величинах [11].

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПОНЕНТ

Для создания благоприятной визуальной среды СІЕ предложила пять характеристик, определяющих невизуальные эффекты (зрачковый рефлекс, частоту сердцебиения, регулирование режима сна – бодрствования): интенсивность света, спектральный состав, момент освещения, продолжительность и режим экспозиции [23]. Большинство взаимодействий зависит от энергии фотона и, следовательно, от его частоты и длины волны. В [24] определены функции спектральной чувствительности и метрики для описания психофизиологического компонента оптического излучения в видимом диапазоне, обусловленного стимулированием каждого из пяти типов фоторецепторов (реакции ИЛ) через меланопсинсодержащие ганглиозные клетки сетчатки (ipRGCs) с учетом влияния возраста и поля зрения (FOV). В работе [25] исследования работоспособности испытуемых при освещенности 165, 600 и 1 700 лк показали повышение частоты сердечных сокращений и проводимости кожи с увеличением освещенности, то есть возбуждение испытуемых усиливалось, улучшая производительность при выполнении задач по работе с памятью при очень ярком освещении. Невизуальные эффекты света также зависят от времени: световая стимуляция до минимума температуры ядра продвигает фазу циркадного ритма, в то время как световая стимуляция после минимума задерживает ее. Таким образом, получение достаточного количества света по утрам ускоряет фазу ритма и эффективно повышает бдительность и жизненную силу работников [26, 27]. Авторы [16] предложили модель объективной количественной оценки, основанную на ритмических факторах (значение C/P) [1] и циркадной стимуляции (значение CS), приведенную на рисунке 5 [27].

$$C / P = \frac{\Phi_c}{\Phi_v}, \tag{10}$$

$$\Phi_v = K_m \int_{380}^{780} P(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \tag{11}$$

$$\Phi_c = K_{mc} \int_{380}^{780} P(\lambda) C(\lambda) d\lambda, \tag{12}$$

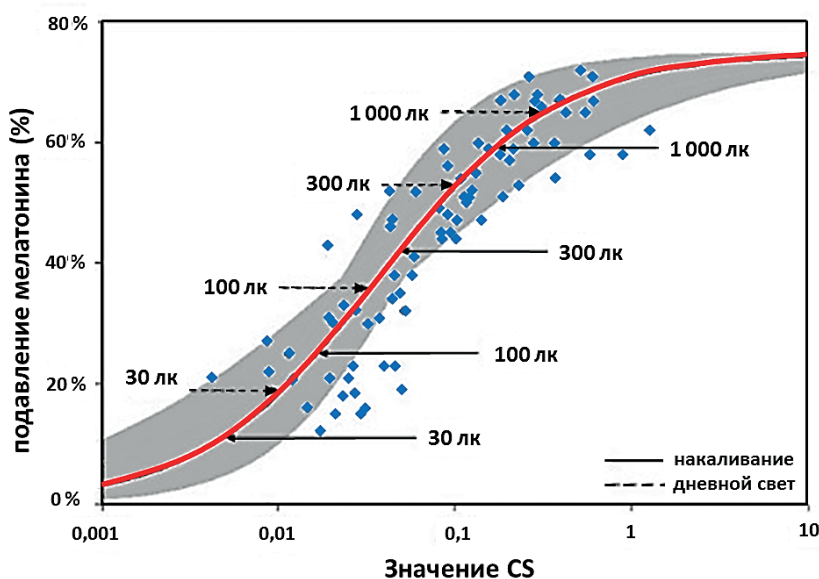


Рисунок 5 – Взаимосвязь между циркадным стимулирующим фактором (значение CS) и ингибированием мелатонина (Figueiro et al., 2006)

где: Φ_c – невидимый световой поток; $P(\lambda)$ – абсолютное спектральное распределение энергии; $V(\lambda)$ – функция светоотдачи фотопического зрения; $C(\lambda)$ – невидимая спектральная функция светоотдачи; K_{mc} – невидимая максимальная спектральная световая визуальная энергоэффективность.

Из рисунка видно, что значение CS представляет степень подавления мелатонина [28]:

$$CS = 0,7 - \frac{0,7}{1 + \left(\frac{CL_A}{355,7}\right)^{1,1026}}, \quad (13)$$

где $CL_A = 5831CL$ – нормализация дневной и ночной освещенности (CL), так что освещенность света, излучаемого стандартным источником света CIE A (излучатель черного тела с цветовой температурой 2 856К, аналогичный лампе накаливания) на сетчатке, составляет 1 000 лк, что эквивалентно значению $CL_A = 1 000$.

В работе [25] использован коэффициент биоритма M , учитывающий как возраст, так и структуру человеческого глаза [25]:

$$M = \frac{\int_{380}^{780} S_{ret}(\lambda)C(\lambda)d\lambda}{\int_{380}^{780} S_{ret}(\lambda)V(\lambda)d\lambda}, \quad (14)$$

где $S_{ret}(\lambda)$ – спектральное распределение, преобразованное в сетчатку;

$C(\lambda)$ – функция отклика циркадного ритма [25];

Распределение спектральной мощности $S_{ret}(\lambda)$ на сетчатке описывается выражением [28, 29]:

$$S_{ret}(\lambda) = \frac{S_{cor}(\lambda) \cdot \tau \cdot \pi D^2}{4A_{ret}}, \quad (15)$$

где $S_{cor}(\lambda)$ – спектральное распределение, облученное роговицей человека;

A_{ret} – облученная область на сетчатке;

D – диаметр зрачка человеческого глаза;

τ – коэффициент пропускания хрусталика человеческого глаза.

Коэффициент пропускания человеческого глаза уменьшается с возрастом, и формула расчета изменения коэффициента пропускания τ человеческого глаза с возрастом, приведенная в [28], выглядит следующим образом:

$$\tau(\lambda, A) = 10^{-D_i(\lambda, A)}, \quad (16)$$

$$D_i(\lambda, A) = F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + 0,06, \quad (17)$$

$$F1 = (0,15 + 0,000 031A^2)(400/\lambda)^4, \quad (18)$$

$$F2 = 14,19 \times 10,68 \exp(-\{[0,057(\lambda - 273)]^2\}), \quad (19)$$

$$F3 = (1,05 - 0,000 063A^2) \times 2,13 \exp(-\{[0,029(\lambda - 370)]^2\}), \quad (20)$$

$$F4 = (0,059 + 0,000 186A^2) \times 11,95 \exp(-\{[0,021(\lambda - 325)]^2\}), \quad (21)$$

$$F5 = (0,016 + 0,000 132A^2) \times 1,43 \exp(-\{[0,008(\lambda - 325)]^2\}). \quad (22)$$

Поправки меланоподобного излучения, зависящие от возраста, также приведены в [29] в виде показателя $k_{mel,\tau}(a)$: 1,045...1,055 (25 лет); $k_{mel,\tau}(a) = 1$ (35 лет); 0,83...0,86 (50 лет); 0,57...0,65 (75 лет); 0,44...0,55 (90 лет). Связанное с возрастом снижение процента излучения, измеренного на внешней поверхности глаза, которое достигает сетчатки (на основе источника равной энергии), для на-

блюдателей 32 и 70 лет также дано в [30]. Однако пространственное распределение фоторецепторов на сетчатке недостаточно известно, а движение глаз/головы «размажет» это распределение, в основном в горизонтальном направлении.

ПЕРЕХОД К ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИМ ВЕЛИЧИНАМ И РИСКАМ

Фотобиологические опасности могут быть минимизированы путем превентивного управления рисками, которые рассчитываются с учетом интервала допуска, измеренного значения величины, неопределенности и плотности распределения вероятностей. Фотобиологическая система, разработанная для исследований полезных и вредных воздействий света (технически неионизирующего излучения) на живые организмы, включает группы величин «доза» ($\text{Дж}\cdot\text{м}^{-2}$), «функция опасности» и «фактор опасности». Актиничная доза H_{act} – величина, полученная путем спектрального взвешивания спектрального излучения со спектром актинического действия [29–31]:

$$H_{act} = \iint E_{e,\lambda}(t) s_{act}(\lambda) d\lambda dt, \quad (23)$$

где $s_{act}(\lambda)$ – спектр актинического действия, нормированный на 1 в его максимуме.

Эритемная доза (облучение эритемным излучением) H_{er} – интеграл по времени эритемного излучения [32]:

$$H_{er} = \iint E_{\lambda}(\lambda, t) s_{er}(\lambda) d\lambda dt, \quad (24)$$

где $s_{er}(\lambda)$ – спектральная весовая функция эритемы, нормированная на 1 в максимуме.

Опасность синего света – эффективность светового излучения $K_{B,v}$ – отношение средневзвешенного лучевого потока с опасностью синего света Φ_B и светового потока Φ_v [32]:

$$K_{B,v} = \frac{\Phi_B}{\Phi_v} = \frac{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \cdot \int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (25)$$

где $B(\lambda)$ – спектральная весовая функция опасности синего света, представляющая относительную спектральную чувствительность человеческого глаза к опасностям синего света, основанная на относительной спектральной эффективности оптического излучения для индукции фотохимического повреждения сетчатки (например, фотической макулопатии).

Фактор опасности синего света светового излучения $\alpha_{B,v}$ [32]:

$$\alpha_{B,v} = \frac{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot B(\lambda) \cdot d\lambda}{\int \Phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}. \quad (26)$$

Опасность синего света оценивается показателями эффективности излучения (η_B), представляющими отношение взвешенного лучистого потока с опасностью синего света и лучистого потока.

Интервалы фотобиологической безопасности ламп и ламповых систем (кроме лазеров) в диапазоне длин волн от 200 до 3 000 нм для источников непрерывного излучения при длительности воздействия регламентируются ГОСТ ИЕС 62471-2013 [33]. Идентифицированы фотобиологические опасности, связанные с: актиничным УФ-излучением (эритема, старение, морщины, фотоиндуцированный кератит, катаракта); УФ-А-излучением (катаракта); синим светом (ожог

сетчатки); видимым и инфракрасным излучением; термическим воздействием (ожоги роговицы, катаракта). В стандарте установлена классификация источников света по группам риска, как представлено на рисунке 1 [4]: 1) RG0 (группа, не подлежащая контролю, отсутствие фотобиологической опасности при предсказуемых условиях): предел воздействия не превышен в течение 10 000 с; 2) RG1 (малый риск): источники безопасны для большинства применений, предел воздействия не превышен в течение 100 с; 3) RG2 (средний риск): предел воздействия не превышен в течение 0,25 с (время отвлечения); 4) RG3 (высокий риск): предел воздействия превышен менее чем за 0,25 с. Полупроводниковые источники белого света связаны только с опасностью синего света [34], тогда как иные лампы могут быть источником нескольких видов опасности.

Риски всегда связаны с неопределенностью. Они могут оцениваться экспертными методами по балльным шкалам или определяться количественно путем расчета. Согласно СТБ ISO/IEC Guide 98-4 [35] формула риска может быть выражена следующим образом [35]:

$$R = \Phi\left(\frac{T_U - y}{U}\right) - \Phi\left(\frac{T_L - y}{U}\right), \quad (27)$$

где T – интервал допуска значений измеряемой величины;

$$T = T_U - T_L, \quad (28)$$

y – измеренное значение величины;

U – неопределенность измерения величины y ;

Φ – интеграл функции распределения вероятностей величины.

Например, для защиты сетчатки от фотохимического повреждения, вызванного длительным воздействием синего света, интегральная спектральная энергетическая яркость, взвешенная с функцией опасности синего света $B(\lambda)$, т. е. взвешенная энергетическая яркость L_B , не должна превышать уровень, определенный как [9]:

$$L_B \cdot t = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda(\lambda, t) \cdot B(\lambda) \cdot \Delta t \Delta \lambda \leq 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \quad (t \leq 104 \text{ с}), \quad (29)$$

$$L_B = \sum_{300}^{700} \sum_t L_\lambda \cdot B(\lambda) \cdot \Delta \lambda \leq 100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \quad (t > 104 \text{ с}), \quad (30)$$

где $L_\lambda(\lambda, t)$ – спектральная энергетическая освещенность, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$;

$B(\lambda)$ – спектральная весовая функция опасности синего света;

$\Delta \lambda$ – ширина полосы, нм;

t – время воздействия, с.

Для взвешенной энергетической яркости L_B источника излучения, превышающей $100 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1}$, максимально допустимое время воздействия t_{\max} , с, рассчитывается по формуле:

$$t_{\max} = \frac{10^6}{L_B} \quad (t \leq 104 \text{ с}), \quad (31)$$

где t_{\max} – допустимое время воздействия, с;

L_B – взвешенная энергетическая яркость синего света.

Эффективная яркость L_B светодиодной лампы как показатель фотобиологической безопасности для защиты сетчатки глаза от синего света может быть определена путем измерений освещенности

в процессе испытаний. Источники неопределенности измерения в этом испытании согласно [38] в основном включают дисперсию повторяемости, вызванную измерениями испытуемой светодиодной лампы; неопределенность калибровки стандартного источника света; погрешность спектро-радиометра; неопределенность u_{B3} , вызванную напряжением источника питания лампы; неопределенность, вызванную положением установки испытуемой лампы; неопределенность, вызванную условиями окружающей среды. Среди них неопределенность эталонной лампы и неопределенность спектро-радиометра имеют большее влияние на неопределенность измерения. Следовательно, при измерениях следует как можно больше выбирать спектро-радиометр с высокой точностью, а эталонную лампу следует измерять регулярно, чтобы гарантировать ее стабильность [38].

Применяя комплексный подход, в идеальном случае необходимо измерить пространственное распределение излучения и использовать пространственное распределение фоторецепторов на сетчатке глаза, которое, однако, недостаточно известно. Альтернативными концепциями являются усреднение яркости по заданному полю зрения (PBS) и использование вертикальной освещенности с ограничением поля зрения. Движение глаз/головы «размажет» это распределение, в основном в горизонтальном направлении. При отсутствии научных доказательств принимается вертикальная освещенность с ограничением поля зрения: в помещении вертикальная протяженность составляет от 50° выше 0° до 70° ниже 0°; горизонтальная протяженность (слева направо) – 180° (обоими глазами) [36, 37].

РЕКОМЕНДОВАННЫЙ ПОДХОД

Визуальная среда в помещении представляет собой динамичную систему, изменяющуюся и переходящую в состояние равновесия в течение суток, характеризующуюся номенклатурой фотобиологических, технических, фотометрических, колориметрических параметров и показателями энергоэффективности. Система адаптивного освещения реализуется комбинаторикой технических и программных средств, сочетаемых по критериям результативности и эффективности применительно к конкретным условиям и пользователям. При выборе наиболее подходящего источника света в любой конкретной ситуации важно помнить, что мезопическая светоотдача не является единственным фактором. При выборе спектра источника света следует также учитывать другие аспекты, которые могут иметь решающее значение для конкретного применения, такие как распознавание цвета, цветопередача, дискомфортный яркий свет, особенно для пожилых людей, внимание и настороженность, приемлемость для пользователей, небесное свечение, воздействие на природную среду, включая воздействие на флору и фауну, здоровье и благополучие человека. Таким образом, в данной работе предложен комплексный подход к моделированию визуальной среды, представляющей собой динамическую систему взаимодействующих световых потоков от первичных и вторичных источников оптического излучения, характеризующуюся номенклатурой технических, фотометрических, колориметрических параметров и показателями энергоэффективности. Фотобиологическое воздействие данной модели оценивается через совокупное влияние этих факторов с учетом функций светоотдачи фотопического, мезопического и скотопического зрения, отклика циркадного ритма, спектрального распределения, преобразованного в сетчатку, и времени экспозиции. Это направлено на повышение качества жизни пользователей путем оптимизации выбора светотехнических сценариев в зависимости от времени суток, вида деятельности и психофизиологического состояния и предпочтений пользователей.



СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO 16817:2017 Проектирование систем регулирования микроклимата в зданиях. Внутренняя среда. Процесс проектирования визуальной среды.
2. СН 2.04.03-2020 Строительные нормы Республики Беларусь. Естественное и искусственное освещение.
3. ГОСТ 33392-2015 Здания и сооружения. Метод определения показателя дискомфорта при искусственном освещении помещений.
4. ГОСТ 34819-2021 Приборы осветительные. Светотехнические требования и методы испытаний.
5. Recommendation ITU-R BT.2035 (07/2013) A reference viewing environment for evaluation of HDTV program material or completed programmes.
6. ITU-R BT.2022 General viewing conditions for subjective assessment of quality of SDTV and HDTV television pictures on flat panel displays.
7. CIE, 2016b. CIE TN 004: 2016 The Use of Terms and Units in Photometry – Implementation of the CIE System for Mesopic Photometry. Vienna: CIE.
8. Gibbons, R. B., Terry, T., Bhagavathula, R., Meyer, J., Lewis, A. 2016. Applicability of mesopic factors to the driving task. *Lighting Res. & Tech.* 48, 70-82.
9. CIE, 2017. CIE TN 007:2017 Interim Recommendation for Practical Application of the CIE System for Mesopic Photometry in Outdoor Lighting. Vienna: CIE.
10. Measuring Colour. Fourth Edition. R.W.G. Hunt, M.R. Pointer. A John Wiley & Sons, Ltd., Publication. 2011. ISBN 978-1-119-97537-3 (hardback).
11. Ming Ronnier Luo, Keith Hoover, Tingwei Huang, Candong He, Xiaoping Zhang, et al. (2021), A Total Appearance Reproduction System for Supply Chain Colour Management. *J Textile Eng & Fash Tech*, 3(1): 46-40. DOI: 10.1002/9780470175637.ch11. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/227991182>. Дата доступа: 27.01.2023.
12. ГОСТ IEC 61547-2013 Электромагнитная совместимость. Помехоустойчивость светового оборудования общего назначения. Требования и методы испытаний.
13. IEC TR 63158:2018 Equipment for general lighting purposes – Objective test method for stroboscopic effects of lighting equipment.
14. ГОСТ IEC 61000-3-3-2015 Электромагнитная совместимость (ЭМС) Часть 3. Нормы. Ограничение изменений напряжения, колебаний напряжения и фликера в общественных низковольтных системах электроснабжения для оборудования с номинальным током не более 16 А (в одной фазе), подключаемого к сети электропитания без особых условий.
15. ГОСТ IEC 61000-4-15-2014 Совместимость технических средств электромагнитная. Часть 4. Методы испытаний и измерений. Раздел 15. Фликерметр. Функциональные и конструктивные требования.
16. Brown, T.; Brainard, G.; Cajochen, C.; Czeisler, C.; Hanifin, J.; Lockley, S.; Lucas, R.; Munch, M.; O'Hagan, J.; Peirson, S. Recommendations for healthy daytime, evening, and night-time indoor light exposure. Preprints 2020. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/347626355>. Дата доступа: 05.02.2023.
17. Lucas, R.J.; Peirson, S.N.; Berson, D.M.; Brown, T.M.; Cooper, H.M.; Czeisler, C.A.; Figueiro, M.G.; Gamlin, P.D.; Lockley, S.W.; O'Hagan, J.B.; et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci.* 2014, 37, 1–9. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/259002854>. Дата доступа: 05.02.2023.
18. CIE, 2005. CIE 165:2005 CIE 10 Degree Photopic Photometric Observer. Vienna: CIE.
19. CIE, 1990. CIE 86-1990 CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic vision. Vienna: CIE.
20. ISO/CIE, 2005. ISO 23539:2005/CIE S 010:2004 Photometry – The CIE System of Physical Photometry. Vienna: CIE.
21. Principles governing photometry. 2nd Edition. Rapport BIPM-2019/05. Pavillon de Breteuil, F-92312 SÈVRES Cedex, France. 44 p.
22. CIE, 2010. CIE 191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry based on Visual Performance. Vienna: CIE.
23. Освещение для работы: обзор визуальных и биологических эффектов. DOI:10.1191/1365782804li122oa.
24. CIE, 2018a. S 026/E:2018 System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. Vienna: CIE.
25. Rao F., Zhu X.F., Xu A.C. et al. Effect of retina illuminance, circadian rhythm and blue light hazard of LED backlight display on the human of different ages [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(4):0417003.

26. Mark S Rea, Mariana G Figueiro, John D Bullough, Andrew Bierman A model of phototransduction by the human circadian system. Brain Res Brain Res Rev. 2005 Dec 15;50(2):213-28. PMID: 16216333 DOI: 10.1016/j.brainresrev.2005.07.002.
27. On light as an alerting stimulus at night. Acta Neurobiol Exp 2007, 67: 171–178.
28. Diurnal Circadian Lighting Accumulation Model: A Predictor of the Human Circadian Phase Shift Phenotype.
29. Quantifying photobiological and photochemical effects/Director CIE Division 2. CIE President-elect/Head of Laboratory, METAS/ 2018-06-02.
30. CIE TN 003:2015 Technical note. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry, 2013.
31. CIE 03: 2012 A Computerized Approach to Transmission and Absorption Characteristics of The Human Eye (Including Erratum 1) [S]. Vienna: CIE, 2012.
32. CIE TN 002:2014. Relating Photochemical and Photobiological Quantities to Photometric Quantities.
33. ГОСТ IEC 62471-2013 Фотобиологическая безопасность ламп и ламповых систем.
34. Rhythm and Blue Light Hazard of LED Backlight Display on the Human of Different Ages[J]. ACTA PHOTONICA SINICA. 2015, 44(4).
35. СТБ ISO/IEC Guide 98-4-2019 Неопределенность измерений. Часть 4. Роль неопределенности измерений при оценке соответствия.
36. International WELL Building Institute (IWBI) WELL Building Standard. LIGHT. WELL v2. Q2 2021. Available online: <https://standard.wellcertified.com/well> (accessed on 12 May 2021).
37. IE Draft International Standard (DIS 026/E:2018): CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light.
38. Cai Y., Zhu T.F., Wang Z.H., Fan J.J., Zhang Y. Assessment of the uncertainty for the measurement of photobiological safety of LED lighting products [J]. Optical Instruments. Vol.39, No.4 Augst, 2017. (In Chinese).

Поступила в редакцию 23.02.2023

Внимание!

**Продолжается
подписка**

**на 2-е полугодие
2023 года**

УНП 101458672
Подробности на сайте
journal.bies.by
тел.: (+375 17) 350 56 91;
(+375 29) 307 32 82

Новинка!

Доступна также подписка
на **электронную версию**
журнала

4 Возобновляемые источники энергии | 16 Энергоэффективное оборудование | 20 Учимся энергосбережению

Энерго
эффективность

Мы публикуем
только
достоверные
материалы,
имеющие
научную
и практическую
ценность!