



Метрики невізуального впливу світла

Л.А. Назаренко, Д.Ю. Фелоненко, О.М. Ляшенко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, вул. Черноглазівська, 17, 61002, Харків, Україна
leonnaz@ukr.net; felonenko7000@gmail.com; olenalyashenko@kname.edu.ua

Анотація

Результати вивчення незорової дії світла вже успішно застосовуються в циркадному освітленні, що базується на зміні корельованої колірної температури (ККТ) джерел випромінювання освітлювальної системи приміщення протягом доби відповідно до природної зміни цього параметра, і сприяють підтримці біологічних процесів бадьорості та підготовки до сну.

Однак дослідження параметрів джерел світла освітлювальних систем, що можуть впливати на самопочуття людини, не обмежені тільки їхньою ККТ, і після детальнішого вивчення впливу спектра випромінювання на концентрацію і динаміку меланопсину Міжнародний комітет з освітлення запропонував алгоритм визначення меланопічної опроміненості та меланопічної освітленості саме за спектральним розподілом джерел випромінювання.

Для кількісної оцінки відношення невізуального впливу параметрів світлового середовища на самопочуття людини може бути застосовано співвідношення меланопічного потоку M до фотопічного світлового потоку P тестового джерела світла. За визначенням це відношення нормовано до 1 для референсного випромінювача денного світла D65. Особливого значення це співвідношення може набути для створення нової освітлювальної метрики, яка може характеризувати світлодіодні джерела світла з точки зору потенціалу щодо невізуального впливу залежно від спектрального складу.

Ключові слова: меланопсін; білі світлодіоди; меланопічна освітленість.

Отримано: 05.11.2024

Відредаговано: 25.11.2024

Схвалено до друку: 28.11.2024

Вступ

Є добре доведеним фактом, що світло впливає не тільки на візуальну, а й на невізуальну систему людини. Відкриття нового фоторецептора привело вчених до переосмислення парадигми освітлення: яке освітлення необхідне для людей і як його оцінювати (вимірювати). Освітлення більше не є просто системою забезпечення бачення. Споживачі все більше потребують і очікують освітлювальних систем і застосувань, які можуть підтримувати їхнє здоров'я та самопочуття, позитивний настрій, і професіонали з освітлення мають бути готовими відповідати цим викликам. Важливим кроком повинно бути встановлення методів і засобів оцінки невізуального впливу. Якщо світло, яке впливає на здоров'я і самопочуття, не може бути достовірно виміряно, воно не може бути ефективно використано на практиці.

За останні більш ніж два десятиріччя бурхливий розвиток освітлювальних технологій зумовлений переважно впровадженням нових джерел світла – світлодіодів. Це достатньою мірою

справедливо, проте коли ми говорили про новий етап розвитку світлотехніки, то гігантську роль відіграло відкриття нового фоторецептора – так званого циркадного.

У 2002 році Dave Berson і співробітники [1] від Brown University (USA) відкрили третій тип фоторецептора – світлочутливу клітину, названу ipRGC (intrinsically-photosensitive retinal ganglion cell).

Візуальні світлові ефекти серйозно вивчалися протягом більш ніж 500 років. На відміну від них, дослідження невізуальних біологічних ефектів на здоров'я і самопочуття людини під впливом світла, що потрапляє на її очі, були розпочаті тільки 25 років тому. За цей період було встановлено, що характеристики світлового середовища всередині будівель мають значний вплив майже на всі біологічні системи людини, яка за умовами роботи може тривалий час перебувати в приміщеннях зі штучним освітленням.

У другому виданні Міжнародного словника з освітлення Міжнародної комісії з освітлення

МКО S 017/E:2020 [2] було введено офіційний термін “інтегральне освітлення” для опису параметрів освітлення, яке спеціально призначено для поєднання візуальних і невізуальних ефектів, що базується на результатах досліджень залежностей параметрів освітлювальних систем і їхніх фізіологічних ефектів. У такому ж контексті говорять про людиноцентричне освітлення.

Для світлотехнічної спільноти актуальним є розвиток і використання метрик, які характеризують невізуальний вплив світлового стимулу. Стандарти з освітлення, регулятори і практики часто формуються на візуальних ефектах і енергетичній ефективності освітлювальних систем та не враховують невізуальні відклики. Зважаючи на невізуальні світлові ефекти, опис оптичного випромінення єдиною фотопічною дією спектра не є суттєвим. Більше того, немає єдиної дії спектра для невізуальних відкликів. Актуальні незорові ефекти зумовлені комбінованою дією всіх відкликів фоторецепторів, що потребує опису параметрів відкликів кожного із 5 відомих типів фоторецепторів, їхніх функцій спектральної чутливості та метрик для опису їхньої дії.

Основна частина

Модель “Циркадний стимул” для опису циркадної ефективності світла було запропоновано професором Rea [3] і колегами із Lighting Research Center, яка полягає в тому, що відклик людини на світло визначається в термінах пригнічення мелатоніну. Циркадний стимул (CS) є обчисленою ефективністю спектрально зваженої освітленості на зіниці від порога (CS = 0,0) до насичення (CS = 0,7).

Друга запропонована метрика – циркадне світло (CLA) – освітленість на зіниці, зважена спектральною чутливістю людської циркадної системи, яка вимірюється пригніченням мелатоніну після однієї години експозиції.

Циркадне світло (CLA) і циркадний стимул (CS) – це дві метрики, які характеризують спектральну й абсолютну чутливості людської циркадної системи. Ці метрики базуються на знанні ретинальної фізіології, а також на виміряних діючих характеристиках циркадного фотоперетворення – процесу, за якого ретина перетворює світло в нейронні сигнали для циркадної системи – від порогового сигналу до насичення.

Автори цієї моделі вважають, що хоча відклики на циркадно-ефективне світло, звичайно, змінюються від людини до людини, освітлювальна система, яка створює циркадний стимул більше ніж 0,3 протягом дня, частково протягом ранку і менше ніж 0,1 увечері, є значним початковим результатом.

На наш погляд, головним застереженням до такої концепції є те, що введені метрики ніяким

чином не прив’язані до стандартів Міжнародної комісії з освітлення (МКО), які визначають спектральну чутливість функцій, величин і метрик для опису можливостей оптичного випромінення стимулювати кожен із п’яти типів фоторецепторів. Рекомендації МКО засновані на дослідженнях, проведених низкою інститутів у всьому світі, а одиниці, які пов’язані з цими величинами, узгоджені з Міжнародною системою одиниць, що є суттєвим для можливості простежуваності вимірювань і міжнародних керівництв.

Серед метрик, що пропонуються МКО, є “меланопічний люкс” – термін, який описує густину потоку, зваженого функцією світлової ефективності, максимальна чутливість якої знаходиться на довжині хвилі 480 нм і заснована на дії спектра меланопсіну [4]. Меланопсін (світлочутлива нервова клітина або ipRGCs) є фотопігментом у ретині наших очей, який формує головний нейронний провід від ретини до мозку (brains master clock).

“Еквівалентний меланопічний люкс” (EML – Equivalent Melanopic Lux) заснований на спектральній чутливості меланопсіну відносно стандартного джерела світла E (джерело світла рівної енергії) [5].

МКО в [4] запропонував назву для п’яти зважених освітленостей, а саме “ α -опік” освітленість. Кожна з п’яти індивідуальних α -опік освітленостей називається за їхньою фотопігментною назвою: меланопічна (для ipRGC), родопічна (для паличок), цианопічна (для S-колбочок), хлоропічна (для M-колбочок), еритропічна (для L-колбочок) освітленості.

Є добре доведеним науковим фактом, що всі п’ять відомих фоторецепторів: три типи колбочок, палички і меланопсін – вміщувальні клітини, відомі як ipRGCs, можуть робити внески в світлоіндуковані відклики. Лукасом зі співавторами [5] запропоновані п’ять дій спектрів усіх п’яти фоторецепторів. Зважаючи на це, меланопічна дія спектра є найбільш широко використовуваною дослідниками і проектувальниками освітлювальних систем. На рис. 1 наведено п’ять дій спектрів.

На відміну від паличок і колбочок, меланопсінова фоторецепція не має добре встановлених психофізичних підтверджуючих методів, за якими визначається дія спектра. Проте існуючі результати досліджень щодо циркадної та нейрофізичної фоторецепції підтверджують, що запропонована дія меланопічного спектра є прийнятною. На підставі цього узгодженість полягає в тому, що дію спектра людського меланопсіну може бути описано з максимуму на довжині хвилі біля 480 нм, і меланопсінову фоточутливість може бути тоді виведено, беручи до уваги узгодження передрецепторного фільтрування [5]. Саме таке передрецепторне фільтрування для стандартного

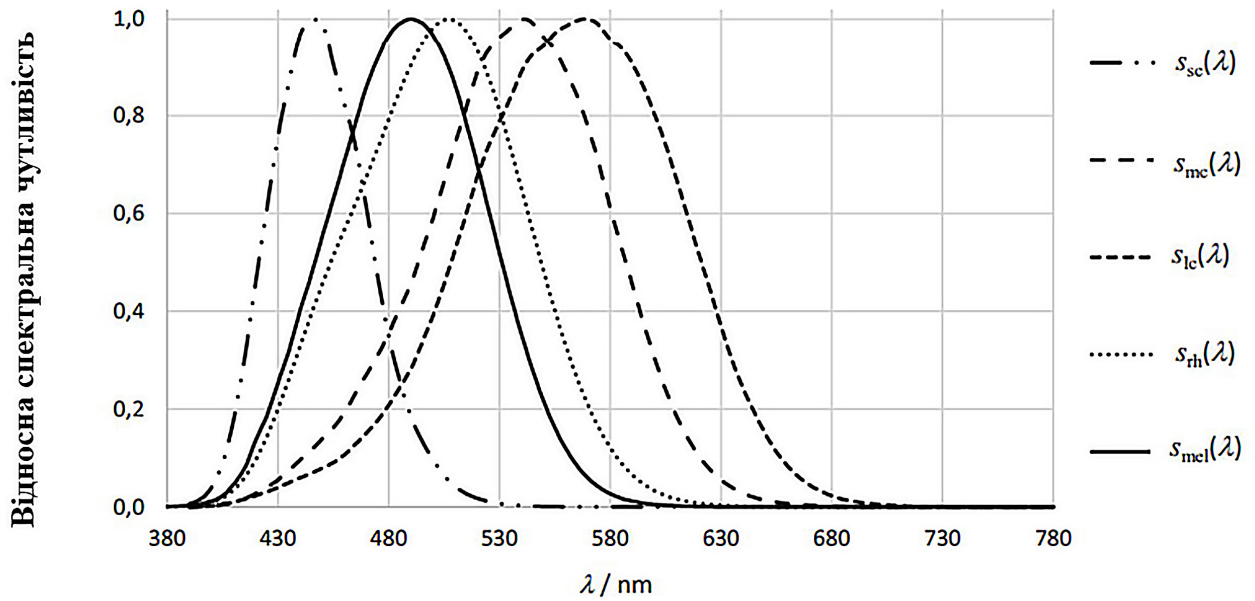


Рис. 1. Функції відносної спектральної чутливості для п'яти фоторецепторів: S_{sc} – для S-колбочок, S_{mc} – для M-колбочок, S_{lc} – для L-колбочок, S_{th} – для паличок, S_{mel} – для ipRGC відповідно

людського спостерігача призводить до зсуву максимуму дії меланопічного спектра, який становить 490 нм.

Дискутуються різні способи вимірювання α -опік опроміненості:

α -опік опроміненість на вертикальній площині (аналог вертикальної освітленості);

α -опік опроміненість на вертикальному напівциліндрі (аналог напівциліндричної опроміненості);

α -опік опроміненість, виміряна за таких обмежень поля зору: 180° у горизонтальній площині; від $+20^\circ$ до -70° у вертикальній площині приміщень, від $+50^\circ$ до -70° у вертикальній площині зовнішніх просторів.

У табл. 1 наведені приклади α -опік величин, визначених МКО в CIE S 026/E:2018 [4].

Таким чином, відповідно до CIE S 026/E:2018 1лк стандартного денного світла (D65) має меланопічну опроміненість $1,33 \text{ мВт/м}^2$.

Таблиця 1

Визначення характеристик невізуальної дії світла за CIE S 026/E:2018

Величина	Позначення в [4]	Формула	Значення	Одиниця
α -опік опроміненість	–	$E_\alpha = \int E_{e,\lambda}(\lambda) \cdot S_\alpha(\lambda) \cdot d\lambda$	Зважена спектральна опроміненість $E_{e,\lambda}$ інтегрована за всіма довжинами хвиль. $S_\alpha(\lambda)$ – α -опік відносна спектральна чутливість	Вт/м ²
α -опік ефективність світлового випромінювання	α -опік ELR	$K_{\alpha,v} = \frac{E_\alpha}{E_v}$	Співвідношення α -опік опроміненості E_α і освітленості E_v	Вт/лм
α -опік еквівалентна освітленість денного світла D65	α -опік EDI	$E_{v,\alpha}^{D65} = \frac{E_\alpha}{K_{\alpha,v}^{D65}}$	Рівень освітленості денного світла, що продукує рівну опроміненість α -опік E_α тестовому джерелу світла	лк
α -опік відношення ефективності денного світла D65	α -опік DER	$\gamma_{\alpha,v}^{D65} = \frac{K_{\alpha,v}}{K_{\alpha,v}^{D65}}$	Відношення α -опік ELR тестового джерела $K_{\alpha,v}$ до α -опік ELR денного світла (D65), $K_{\alpha,v}^{D65}$	–

Тоді меланопічна ефективність світлового випромінювання для денного світла D65 є рівною

$$K_{mel}^{D65} = 1,33 \text{ мВт / лм},$$

а меланопічна опроміненість і еквівалентна меланопічна освітленість відповідно становлять 1,33 мВт/м² і 1 лк.

Коли описуються спектральні характеристики тестового джерела світла, відношення α -опік EDI тестового світла до їх освітленості визначає α -опік DER тестового світла (див. табл. 1). Іншими словами, меланопічне відношення ефективності денного світла D65 (меланопік DER) є відношенням

меланопічного потоку М до фотопічного світлового потоку Р тестового джерела світла, і ця безрозмірна величина може бути корисною як нове відношення М/Р. За визначенням це відношення нормовано до 1 для референсного випромінювача денного світла D65.

М/Р є, таким чином, новою освітлювальною метрикою, яка може характеризувати джерело світла з точки зору потенціалу його невізуального впливу залежно від спектрального складу.

Відзначимо, що маємо деяку аналогію з відомою характеристикою S/P, що було відкрито Берманом у 1992 р. Відношення S/P визначається діленням скотопічного вихідного сигналу джерела

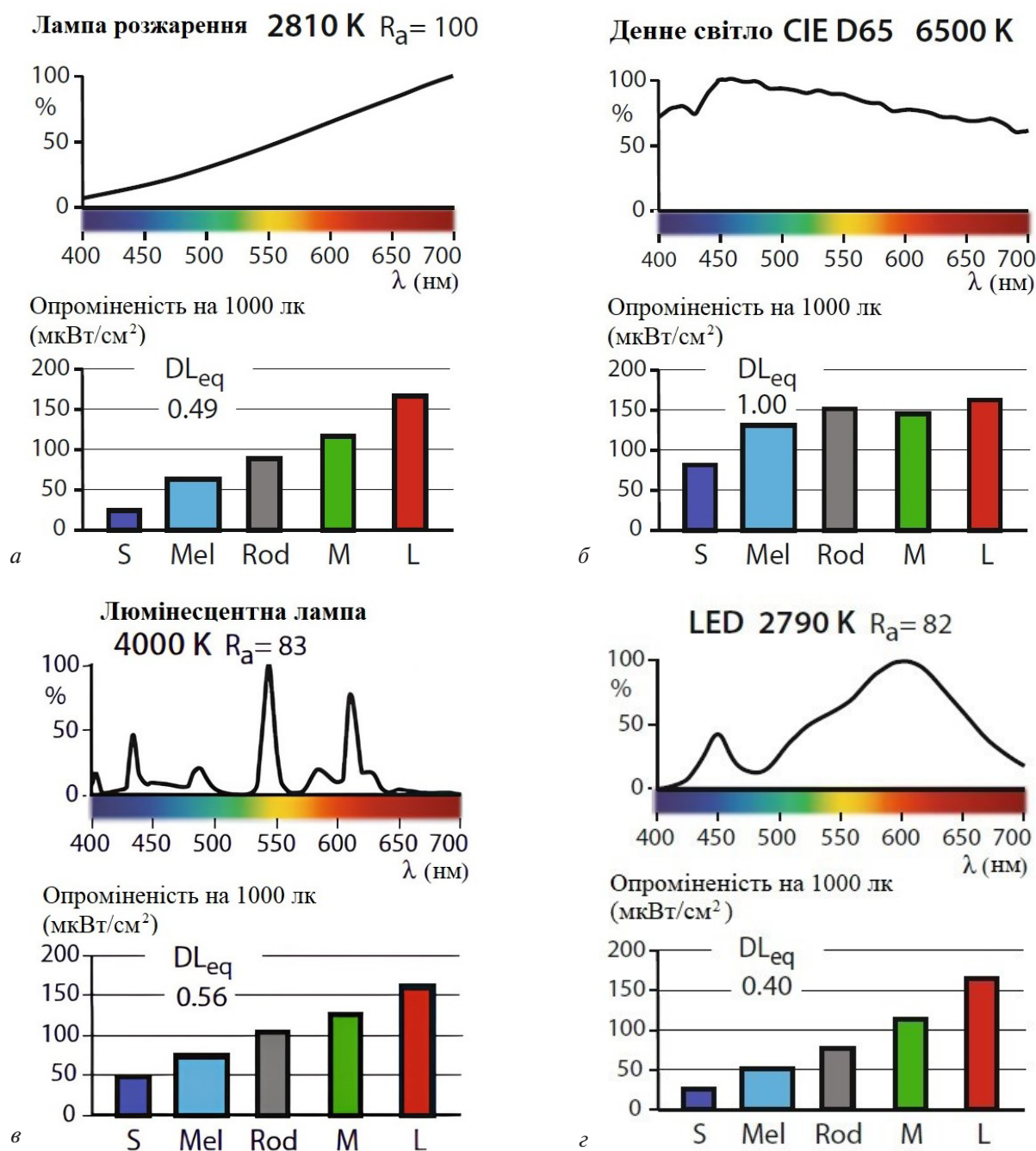


Рис. 2. Результати визначення ефективної опроміненості для кожного із п'яти фоторецепторів (S – S-колбочок, Mel – меланопісину, Rod – паличок, M – M-колбочок, L – L-колбочок) для стандартних джерел світла: а – для ламп розжарення, б – для денного світла, в – для люмінесцентних ламп, з – для світлодіодів із ККТ 2790 К

світла (наприклад, світлового потоку або яскравості) на відповідно фотопічно зважений вихід. S/P – це характеристика джерел світла, що показує вплив спектра джерела світла на роботу нічного зору і має важливе значення для мезопічної фотометрії.

Маючи точно виміряні спектральні розподіли джерел світла і користуючись таблицею спектральних розподілів дії спектрів фоторецепторів, можна обчислити ефективну опроміненість для кожного із п'яти фоторецепторів. Розглянемо найбільш широко використані джерела світла [6] з урахуванням типів стандартних джерел світла МКО:

1. Лампа розжарення. Стандартним джерелом світла МКО типу А є лампа розжарення з вольфрамовою ниткою і корельованою колірною температурою $T = 2856$ К (рис. 2, а).

2. Стандартне джерело світла МКО D65 для денного світла відповідає корельованій колірній температурі (ККТ) 6500 К (рис. 2, б).

3. Люмінесцентна лампа відповідає стандартному джерелу світла МКО F11 (ККТ = 4000 К) (рис. 2, в).

4. Стандартне джерело типу Е – рівноенергетичний випромінювач із постійною спектральною опроміненістю вздовж діапазону 380–780 нм, що забезпечує корисний теоретичний референс і використовується відносно еквівалентного α -опік значення люкса до фотопічного люкса. Для рівноенергетичного джерела 1 фотопічний люкс припускає 1 еквівалентний α -опік люкс (одночасно для кожного фоторецептора, позначеного “ α ”).

5. Білі світлодіодні джерела світла (рис. 2, г; рис. 3).

Швидкий прогрес освітлювальних технологій, у першу чергу, пов'язаний із впровадженням світлодіодів, завдяки яким стало можливим значне підвищення енергоефективності. Водночас є й інші аспекти світлодіодного прогресу – можливість створювати різноманітні спектральні розподіли потужності залежно від поставлених завдань. Наприклад, для невізуальних відкликів – вибір світлодіодів із більшою пропорцією меланопічного світла в порівнянні з денним світлом [6].

Таким чином, у наш час існують два різних запропонованих типи моделей циркадного освітлення: модель меланопічної освітленості, заснована на активації фоторецептора ipRGC, яка включає меланопічну освітленість, еквівалентну денному світлу D65, і модель циркадного стимулу (CS).

З точки зору досконалості побудови цих моделей і їхнього зв'язку та пристосованості до міжнародних стандартів слід зазначити внутрішню недосконалість системи циркадного стимулу (CS). Разом з тим це не завадило дослідникам провести дослідження за цими двома моделями і порівняти одержані результати [7].

Було виявлено повторюване обмеження попередніх досліджень: спектри освітлення були адаптовані так, щоб ефективно відобразити фундаментальні відмінності між двома типами моделей, визначення точності яких є складним завданням. Для вирішення цієї проблеми було застосовано метод проектування пар контраст-

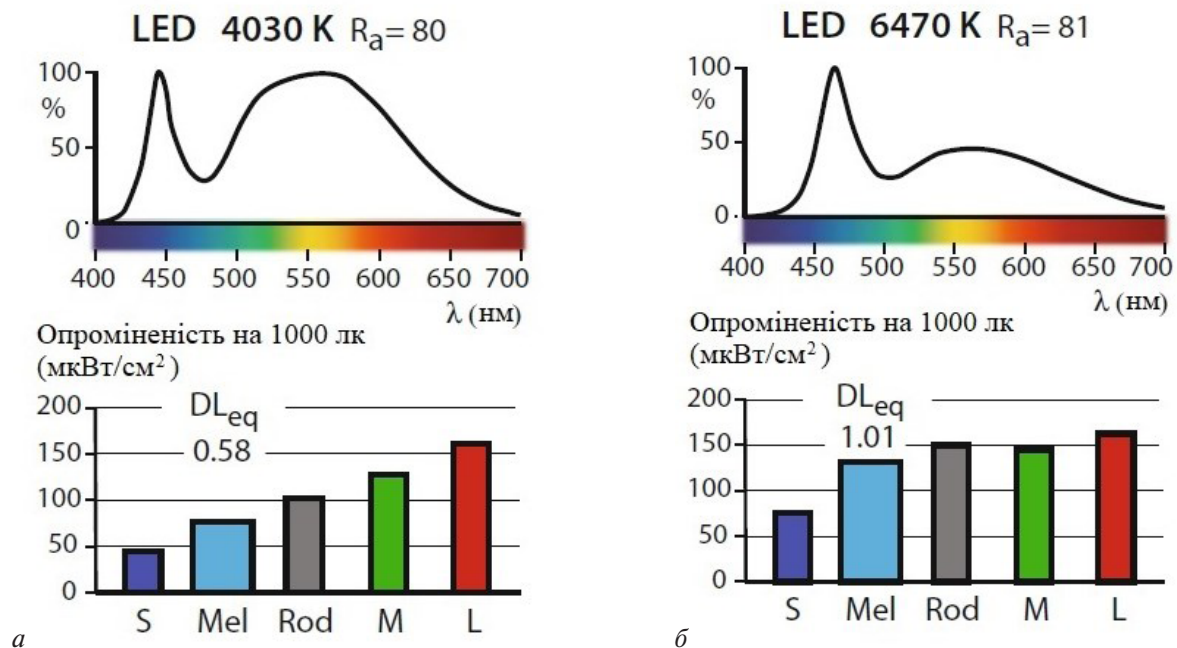


Рис. 3. Результати визначення ефективної опроміненості для кожного із п'яти фоторецепторів (S – S-колбочок, Mel – меланопсін, Rod – паличок, M – M-колбочок, L – L-колбочок) для світлодіодних джерел світла з корельованою колірною температурою: а – 4030 К, б – 6470 К

них спектрів [7]. Цей метод може забезпечити спектри освітлення для підкреслення відмінності в циркадній освітленості на основі однієї моделі, зберігаючи при цьому циркадну освітленість другої послідовності.

Незважаючи на складність моделі (CS), її точність не показала покращення з простішою моделлю меланопічного освітлення, що є викликом для необхідності впровадження допоміжної складності моделі. Навіть дані Rea і співавторів [3] не мають беззаперечних доказів, що модуль CS досягає вищої точності порівняно з меланопічною моделлю і значно простішими припущеннями. Таким чином, прийнятна метрика меланопічної освітленості є розумною стратегією для кількісної оцінки невізуального впливу світлових спектрів.

Висновки

1. Невізуальна система фоточутливості людини функціонально відрізняється від візуальної системи і повинна оцінюватися відповідно. Визначення відносних величин і внесків різних типів фото-

рецепторів у невізуальні відклики до світла виявилися складними.

2. Із введенням міжнародного стандарту CIE S026:2018 Міжнародна комісія з освітлення створила важливу основу для різних стейкхолдерів використання тих самих термінів і метрик. Тепер це є важливим викликом впровадження цих метрик у спільноту дослідників, виробників і, таким чином, може генерувати результати, які можуть бути застосовані для переваг людського буття. Це також забезпечує основу для метрології дії спектрів п'яти фоторецепторів, вказуючи ipRGC.

3. У результативному плані використання вказаних метрик відзначимо рекомендації експертів, заснованих на консенсусі відносно денного, вечірнього і нічного світла, що спиралися на меланопічну еквівалентну освітленість денного світла D65 (меланопік EDI) [8].

Ці дані забезпечують підтвердження ефективності застосування метрик меланопічної дії освітлювальних систем як основи для регулювання світлової експозиції для переваг людського здоров'я і формування майбутнього світлового дизайну.

Metrics of non-visual effects of light

L. Nazarenko, D. Felonenko, O. Liashenko

*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Chornoglazivska Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine
leonnaz@ukr.net; felonenko7000@gmail.com; olenalyashenko@kname.edu.ua*

Abstract

The discovery of a new photoreceptor ipRGC (melanopsin) and the associated non-visual impact of the lighting environment on human well-being and health has led to a significant amount of research in the field of the connection between the parameters of light sources and human biological activity. The results of studying the non-visual effect of light are successfully applied in circadian lighting, which is based on changing the correlated colour temperature (CCT) of light sources of indoor lighting system during the day in accordance with the natural change of this parameter, and contribute to maintaining the biological processes of vigilance and preparation for sleep.

However, the study of the light sources parameters for indoor lighting that can affect human well-being is not limited only to their CCT. After more detailed study of the radiation spectrum influence on the concentration and dynamics of melanopsin, the International Commission on Illumination (CIE) has proposed an algorithm for determining the melanopic irradiance and melanopic illuminance precisely by the spectral distribution of irradiation sources.

To quantify the ratio of the non-visual impact of the lighting environment parameters on human well-being, the ratio of the melanopic flux M to the photopic luminous flux P for a test light source, which is a dimensionless quantity, can be used as a new ratio M/P . By definition, this ratio is normalized to 1 for the reference daylight illuminant D65. This ratio can be applied for creating a new lighting metric that can characterize LED light sources in terms of its potential for non-visual impact depending on its spectral characteristics. Moreover, new metrics of non-visual light impact will be helpful for the implementation of integrative lighting principles declared by the CIE as balance between human well-being, health, and functioning lighting for achieving the energy savings and reducing the impact on environment by applying LED systems with the considered characteristics.

Keywords: melanopsin; white LEDs; melanopic illumination.

Список літератури

1. Berson D.M., Dunn F.A., Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, vol. 295, issue 5557, pp. 1070–1073. doi: 10.1126/science.1067262
2. CIE S 017/E:2020. CIE International Lighting Vocabulary. 2nd edition. doi: 10.25039/S017.2020
3. Rea M.S., Figueiro M. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research and Technology*, 2016, vol. 50, no. 4. doi: 10.1177/147715351668368
4. CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-influenced Responses to Light. doi: 10.25039/S026.2018
5. Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., Brown T.M. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci*, 2014, vol. 37(1), pp. 1–9. doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004
6. Назаренко Л.А., Діденко О.М. Меланопічна фотометрія. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 3. С. 37–44. doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291952>
7. Yingying Huang, Jiuhui Li, Qi Dai. Comparative analysis of circadian lighting models: melanopic illuminance vs circadian stimulus. *Optics Express*, 2024, vol. 32, issue 17, pp. 29454–29513. doi: 10.1364/OE.532207
8. Brown T.M., Brainard G.C., Cajochen C., Czeisler C.A. et al. Recommendations for daytime, evening and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep and wakefulness in healthy adults. *PLoS Biol*, 2022, vol. 20(3):e3001571. doi: 10.1371/journal.pbio.3001571

References

1. Berson D.M., Dunn F.A., Takao M. Phototransduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, vol. 295, issue 5557, pp. 1070–1073. doi: 10.1126/science.1067262
2. CIE S 017/E:2020. CIE International Lighting Vocabulary. 2nd edition. doi: 10.25039/S017.2020
3. Rea M.S., Figueiro M. Light as a circadian stimulus for architectural lighting. *Lighting Research and Technology*, 2016, vol. 50, no. 4. doi: 10.1177/147715351668368
4. CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-influenced Responses to Light. doi: 10.25039/S026.2018
5. Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., Brown T.M. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci*, 2014, vol. 37(1), pp. 1–9. doi: 10.1016/j.tins.2013.10.004
6. Nazarenko L.A., Didenko O.M. Melanopichna fotometriya [Melanopic photometry]. *Ukrainian Metrological Journal*, 2023, no. 3, pp. 37–44 (in Ukrainian). doi: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3.2023.291952>
7. Yingying Huang, Jiuhui Li, Qi Dai. Comparative analysis of circadian lighting models: melanopic illuminance vs circadian stimulus. *Optics Express*, 2024, vol. 32, issue 17, pp. 29454–29513. doi: 10.1364/OE.532207
8. Brown T.M., Brainard G.C., Cajochen C., Czeisler C.A. et al. Recommendations for daytime, evening and nighttime indoor light exposure to best support physiology, sleep and wakefulness in healthy adults. *PLoS Biol*, 2022, vol. 20(3):e3001571. doi: 10.1371/journal.pbio.3001571