

# Меланопічна фотометрія

Л.А. Назаренко, О.М. Діденко

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна  
leonpaz@ukr.net

## Анотація

Гуманоцентричне освітлення (Human-centric Lighting) вивчає візуальні ефекти світла на діяльність людини. Для людей, чия діяльність припадає більше на день, візуальні й невізуальні потреби взагалі синхронізуються. Природне освітлення підтримує циркадне здоров'я.

У 2002 р. було відкрито третій тип фоторецептора – нервового вузла клітини в сітківці (photosensitive, Retinal Ganglion Cell, pRGC). Клітини pRGC містять пігменти меланопсину (melanopsin) і є відповідальними за спектральну чутливість фоточутливих клітин.

За допомогою кривих чутливостей L-, M-, S-колбочок і паличок, маючи спектри джерел світла і кількість світла на зовнішній поверхні ока, можна визначити спектрально зважені освітленості для п'яти фотопігментів в оці людини.

Для дослідницьких цілей бажано реєструвати значення освітленостей за всіма п'ятьма  $\alpha$ -освітленостями. Вони є індикаторами того, який із фоторецепторів реагує і до чого поширюється дійсний тип лампи.

Виробники джерел світла повинні бути здатні постачати  $\alpha$ -пічні освітленості для їхніх ламп. Міжнародна комісія з освітленості (МКО) запропонувала Exeltoolbox, який дозволяє обчислити ці освітленості за спектральним розподілом потужності ламп.

Колбочко-домінуючі метрики, такі як ККТ (корельована колірна температура), освітленість, яскравість, не є повними, тож необхідно розглядати фоточутливість, засновану на меланопсінні в специфікаціях, рекомендаціях і дослідженнях.

**Ключові слова:** біологічні ефекти; гуманоцентричне освітлення; фоторецептори;  $\alpha$ -опік освітленість; фотопігмент.

Отримано: 04.09.2023

Відредаговано: 29.09.2023

Схвалено до друку: 05.10.2023

## Вступ

Візуальні світлові ефекти серйозно вивчалися протягом більш ніж 500 років. І тільки два десятиріччя тому медики та біологи звернули увагу на те, що світло, яке потрапляє в око людини, має невізуальні, біологічні ефекти. Ці ефекти впливають на спосіб функціонування нашого тіла, тобто на наші здоров'я та самопочуття.

Величезна кількість публікацій у багатьох професійних журналах збільшується на повсякденних основах виявлення фундаментальних і прикладних аспектів невізуальних біологічних ефектів освітлення [1].

Гуманоцентричне освітлення (Human-centric Lighting) розглядає візуальні ефекти світла на підтримку позитивної людської діяльності [2, 3]. Для людей, активних удень, візуальні та невізуальні потреби взагалі синхронізуються. Світло від сонця і хмар натурально забезпечує цикл відношення "світло/темрява", який підтримує циркадне здоров'я. Електричне освітлення відіграє критичну роль у підтримці людського здоров'я в сучасному

світі, оскільки більшість із нас проводить багато часу всередині приміщень.

Візуальні та невізуальні відклики керуються фоторецепторами, які розташовані в сітківці й посилюють сигнали до мозку. Візуальні відклики в людей переважно керуються паличками і колбочками, невізуальні відклики – новим фоторецептором.

Імплементация успішного гуманоцентричного освітлювального рішення є комплексною, маючи на увазі реакції всіх фоторецепторів і вміння описувати відповідну реакцію.

МКО визначила в міжнародному стандарті термін "інтегральне освітлення" (integrative lighting) з тим самим сенсом, що й "людиноцентричне освітлення" – освітлення, спеціально розроблене для створення комфортних фізіологічних і психологічних ефектів для людей, включаючи візуальні та невізуальні ефекти (CIE 2016) [1].

У 2002 р. Берсон і співавтори (Berson et al., 2002) [4] відкрили третій тип фоторецептора – нервового вузла клітини в сітківці. Ця клітина

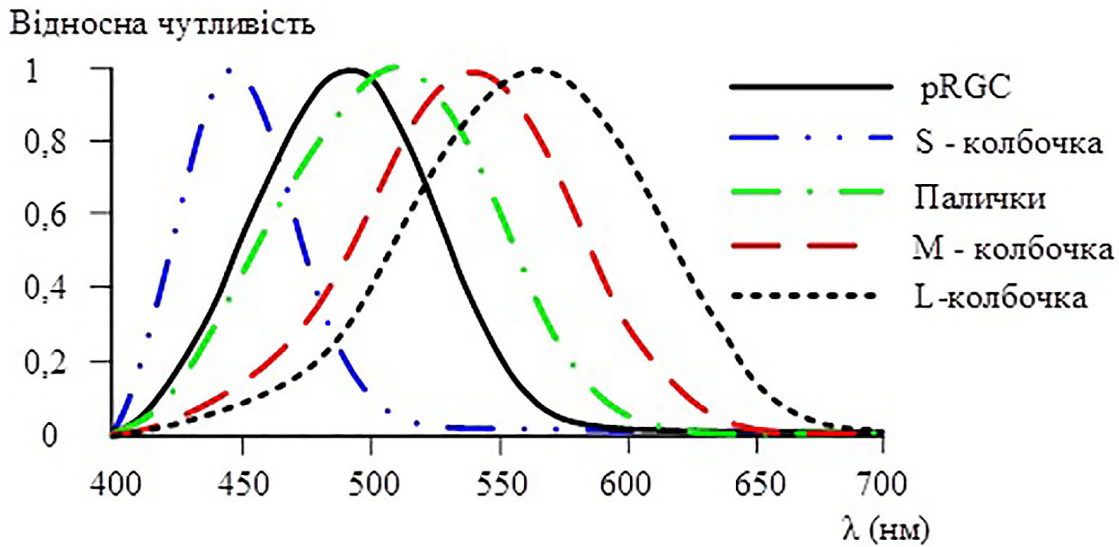


Рис. 1. Відносні спектральні чутливості фоторецепторів: рRGC L-, М-, S-колбочок і паличок

називається світлочутливою нервовою клітиною сітківки (photosensitive, Retinal Ganglion Cell, рRGC).

Клітини рRGC містять пігменти меланопіну (melanopsin). Як фотопігменти, що є відповідальними за спектральну чутливість фоточутливих клітин, рRGC клітини мають власну внутрішню притаманну їм специфіку спектральної чутливості.

Подібно до “нормальних” нервових клітин, рRGC отримують сигнали від колбочок і паличок і передають ці сигнали до області мозку, відповідальної за створення візуального відчуття. Ці самі клітини рRGC також трансформують світло, що падає на їхню поверхню, в сигнал, який передається до частини мозку, в якому міститься супрахіазматичне ядро (suprachiasmatic nucleus, SCN), – орган, що задає ритм (темп) і є біологічним годинником. Так вони мають подвійну функцію. Нейронна провідність у сітківці результується в певну взаємодію між колбочками, паличками та рRGC світлоперетворюючими електричними сигналами.

### Основна частина

МКО визначає спектральну чутливість меланопіну, засновану на вимірюваннях спектрів поглинання фотопігментів меланопіну, в міжнародному стандарті [5]. Він визначає чутливість, внутрішню притаманну клітинам рRGC, без взаємодіючого ефекту колбочок і паличок через нейронне передавання.

На рис. 1 показано криву спектральної чутливості меланопіну МКО.

Максимальна чутливість меланопіну досягається за довжини хвилі приблизно 480 нм. На рис. 1 також показані криві чутливостей L-, М-, S-колбочок і паличок, засновані на їхніх специфічних пігментах.

За допомогою цих кривих можливо обчислити, маючи спектри джерел світла і кількість світла на зовнішній поверхні ока, спектрально зважені освітленості для п'яти фотопігментів в оці людини.

Символ освітленості  $E_e$ , індекс “e” означає енергетичну освітленість. Спектральна зважена освітленість, наприклад, меланопіну, одержується за формулою

$$E_{e, mel} = \int E_e(\lambda) S_{mel}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де  $E_{e, mel}$  – меланопіні, зважена освітленість у Вт/м<sup>2</sup>;  $E_e(\lambda)$  – освітленість на довжині хвилі (відома зі спектрів джерел світла);

$S_{mel}(\lambda)$  – відносна спектральна чутливість меланопіну на довжині хвилі  $\lambda$ , нормалізована на 1 у максимумі.

Колективна назва для п'яти зважених освітленостей – це  $\alpha$ -опік освітленість. Кожна з п'яти індивідуальних  $\alpha$ -опік освітленостей має власну назву, що вказується після їх фотопігментної назви: меланопічна (рRGC), родопічна (паличкова), ціанопічна (S-колбочкова), хлоропічна (М-колбочкова), еритропічна (L-колбочкова) освітленість, як вказано в табл. 1.

На рис. 2 наведені результати обчислення  $\alpha$ -опік освітленостей п'яти фоторецепторів для типових ламп за умови 1000 лк на зовнішній поверхні ока. Величини обчислені на основі формули (1), наведеної вище для прикладу меланопічної освітленості.

Для умови в 1000 лк на зовнішній поверхні ока загальною формулою є:

$$E_{e, \alpha 1000, лк} = \int E_e(\lambda) S_{\alpha}(\lambda) d\lambda \cdot \frac{1000}{683} \int E_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

де  $E_{e, \alpha}$  –  $\alpha$ -опік зважена освітленість у Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$ -опік може бути як меланопічна паличкова; S-колбочкова, М-колбочкова або L-колбочкова;

Назви п'яти типів  $\alpha$ -опік освітленостей фотопігментів (CIE 2015)

Фоторецептор	Фотопігмент	$\alpha$ -опік освітленість	Символ	Одиниці
pRGC	меланопсін	меланопік	$E_{e, mel}$	Вт/м <sup>2</sup>
палички	родопсін	родопік	$E_{e, rod}$	
S-колбочка	фотопсін ціано	ціанопік	$E_{e, se}$	
M-колбочка	фотопсін хлоро	хлоропік	$E_{e, mc}$	
L-колбочка	фотопсін ері	ерітропік	$E_{e, lc}$	

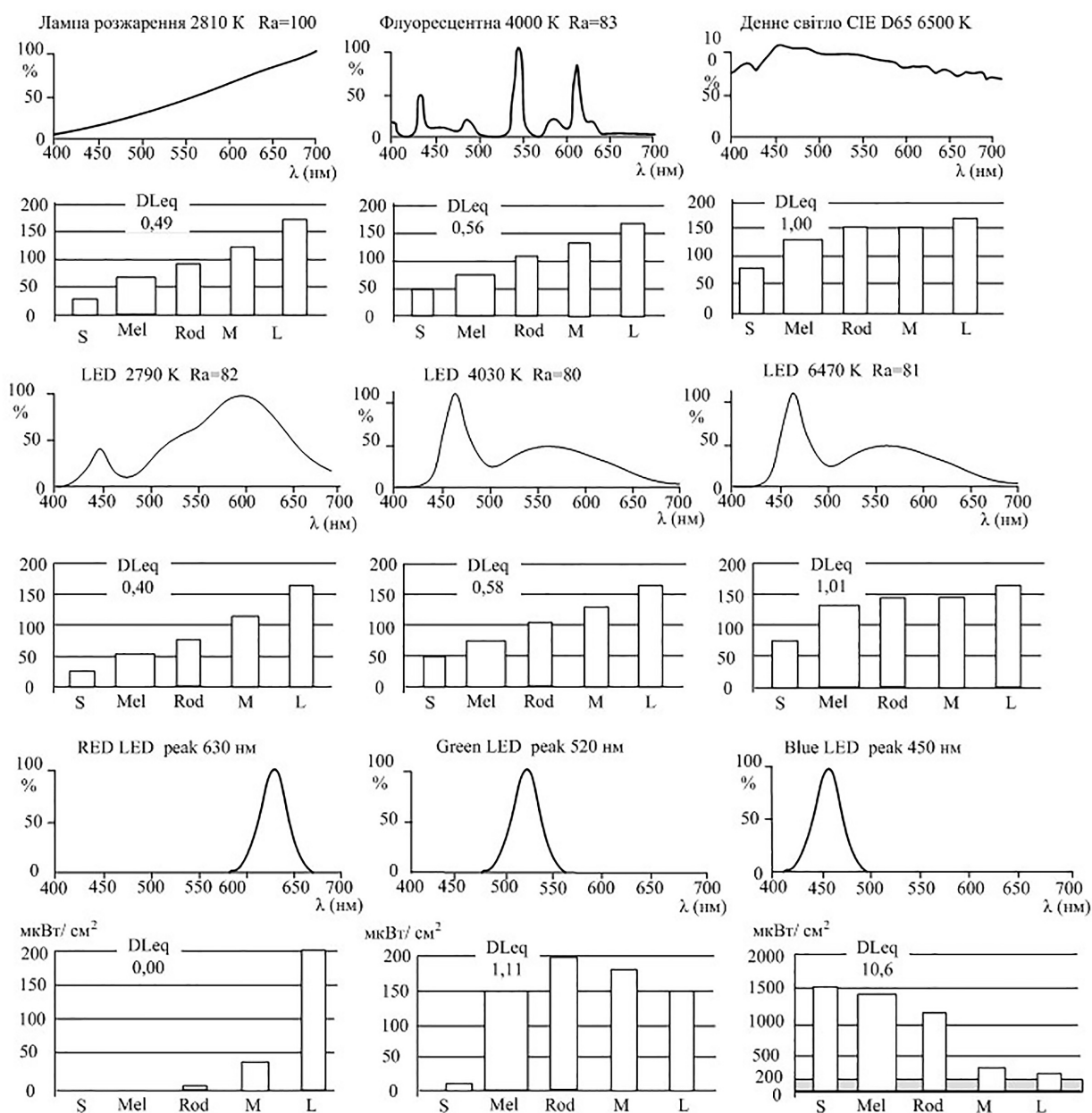


Рис. 2.  $\alpha$ -опік освітленості для різних типів ламп за умови 1000 лк на зовнішній поверхні ока: S (S-колбочка) – ціанопік освітленість, Mel (меланопсін) – меланопік освітленість, Rod – родопік освітленість, M (M-колбочка) – хлоропік освітленість і L (L-колбочка) – ерітропік освітленість; DLeq – еквівалентне меланопічне відношення денного світла (D65)

$E_e(\lambda)$  – освітленість на довжині хвилі  $\lambda$  у Вт/м<sup>2</sup> (відома зі спектрів ламп);

$S_\alpha(\lambda)$  – відносна спектральна чутливість  $\alpha$  фоторецептора на довжині хвилі  $\lambda$ , нормалізована на 1 в максимумі;

$V(\lambda)$  – стандартизована крива відносної спектральної чутливості для денного зору, нормалізована до значення 1 в максимумі.

Ці п'ять “освітленостей через 1000 лк” дають хорошу інформацію про ефективність лампи і виявлення реакції кожного із п'яти фоторецепторів. Це може бути доволі цікавим для застосувань невізуальних біологічних освітленостей для порівняння меланопічної освітленості тестового джерела світла з меланопічною освітленістю денного світла (за такого ж рівня освітленості на оці). Для цих цілей рис. 2 також дає “меланопічне еквівалентне відношення денного світла” для кожного типу ламп. Це відношення меланопічної освітленості лампи до меланопічної освітленості денного світла в 6500 К (МКО стандарт D65). Це відношення також трактується як ефективність меланопічного денного світла D65 [6].

Перші два рядки (рис. 2) демонструють результати для білих джерел світла, всі з колірним передаванням принаймні 80. Перший стовпчик показує джерела світла з корельованою колірною температурою (ККТ) 2800 К (лампа розжарення і СД), другий стовпчик – ККТ 4000 К (люмінесцентна і СД) і останній стовпчик – ККТ 6500 К (денне світло D65 і СД). Коли порівнюють відмінності в освітленостях за тими ж самими значеннями ККТ, найбільша різниця виходить для випадку 2800 К. Лампа розжарення має більшу меланопічну освітленість (у цьому випадку 63 мкВт/см<sup>2</sup>), ніж для СД лампи з тією ж ККТ (52 мкВт/см<sup>2</sup> або на 17% менше). Трактуювання цього прикладу є в тренді інших досліджень [7, 8]. Коли порівнюють меланопічні освітленості для різних діапазонів корельованих колірних температур, очевидний тренд: із вищими значеннями ККТ – вищі меланопічні освітленості. Часто кажуть, що більша частка блакитного світла в білому світлі викликає більший ефект фотопігментів меланопіну.

Останній рядок (рис. 2) показує результати колірних, вузькосмугових спектральних СД, відповідно, червоного, зеленого і блакитного. Відзначимо, що шкала блакитного СД є різною: її діапазон від 0 до 1000 мкВт/см<sup>2</sup>, водночас для всіх інших ламп діапазон від 0 до 200 мкВт/см<sup>2</sup>.

Блакитний СД забезпечує набагато вищі освітленості для всіх фоторецепторів, зокрема, у випадку меланопічних і ціанопічних (S-колбочки) освітленостей. Червоний СД не забезпечує ціанопічну і меланопічну освітленості. Ці певною мірою контрастуючі властивості, особливо червоних і блакитних СД, є важливими в терапевтичному

застосуванні світла. На перший погляд, це може здаватися дивним, що блакитний СД робить внесок в освітленості M- і L-колбочками. Причиною є факт, що спектральні M- і L-колбочки, які мають пік у зеленій і червоній частинах діапазону довжин хвиль, відповідно, також досягають і блакитної частини діапазону, як очевидно із рис. 1.

Відношення меланопічного еквівалента денного світла (D65) до джерел світла може також бути використано для виразу будь-якої фотометричної величини (наприклад, світлового потоку, сили світла, яскравості або освітленості) в еквівалентну величину денного світла (D65).

Приклади білих світлодіодних ламп (рис. 2) можуть виглядати таким чином:

- СД освітлювальна інсталяція (2790 К) з меланопічним відношенням еквівалентного денного світла (D65), рівним 0,40, і світловим потоком 500 лк має меланопічний світловий потік еквівалентного денного світла (D65) в  $0,40 \times 500 = 200$  лк;

- СД освітлювальна інсталяція (4030 К) з меланопічним відношенням еквівалентного денного світла (D65) в 0,58 забезпечує освітлення в 600 лк і має меланопічну еквівалентну денному світлу (D65) освітленість ( $E_{e,D65}$ ) в  $0,58 \times 600 = 348$  лк;

- СД освітлювальна інсталяція (6470 К) з меланопічним відношенням еквівалентного денного світла (D65) в 1,01 забезпечує освітлення в 600 лк і має меланопічну еквівалентну денному світлу (D65) освітленість в  $1,01 \times 600 = 606$  лк.

Для дослідницьких цілей бажано реєструвати значення освітленостей за всіма п'ятьма  $\alpha$ -освітленостями. Вони є індикаторами того, який із фоторецепторів реагує і до чого поширюється дійсний тип лампи. Можливо, в майбутньому стане більш відомо про дію нейронної провідності фоторецепторів, і ця інформація матиме важливе значення. П'ять освітленостей можуть бути записані як п'ять значень або зображень на графіках, як показано на рис. 2.

Виробники джерел світла повинні бути здатні постачати  $\alpha$ -опік освітленості для їхніх ламп. МКО запропонувала Exeltoolbox, який дозволяє обчислити ці освітленості за спектральним розподілом потужності ламп [9].

Дискутуються різні способи вимірювання  $\alpha$ -опік освітленості:

- $\alpha$ -опік освітленість, виміряна на вертикальній площині (аналог вертикальної освітленості);

- $\alpha$ -опік освітленість, виміряна на вертикальній половині циліндра (аналог напівциліндричної освітленості);

- $\alpha$ -опік освітленість, виміряна в горизонтальному напрямку в 180°, вертикальному від +20° до -70° всередині й від +50° до -70° зовні.

Наступні приклади  $\alpha$ -опік величин:



•  $\alpha$ -опік освітленість (ELR) (efficacy of luminous radiation) – ефективність світлового випромінювання:

$$K_{e,v} = \frac{E_{\alpha}}{E_v} \left( \frac{\text{Вт}}{\text{лм}} \right) - \text{дріб від } \alpha\text{-опік освітленості } E_{\alpha} \text{ і освітленості } E_v;$$

•  $\alpha$ -опік освітленість (EDI) (equivalent daylight (D65) illuminance) – еквівалентна освітленість денного світла D65:

$$E_{v,\alpha}^{D65} = \frac{E_{\alpha}}{E_{\alpha,v}^{D65}} (\text{лк}) - \text{рівень освітленості денного}$$

світла (D65), що продукує освітленість  $\alpha$ -опік  $E_{\alpha}$ , рівну тестовому джерелу світла;

•  $\alpha$ -опік (DER) ( $\alpha$ -опік daylight (D65) illuminance efficacy ratio):

$$\gamma_{\alpha,v}^{D65} = \frac{K_{\alpha,v}}{K_{\alpha,v}^{D65}} - \text{відношення } \alpha\text{-опік ELR тестового}$$

джерела  $K_{\alpha,v}$  до  $\alpha$ -опік ELR денного світла (D65),  $K_{\alpha,v}^{D65}$ .

Приклад: 1 лк стандартного денного світла має меланопічну освітленість 1,33 мВт/м<sup>2</sup>, меланопічна ефективність світлового випромінювання (для D65) = меланопічна освітленість D65/освітленість

$$E_{mel,v} = 1,33 \text{ мВ / лм.}$$

Перетворюючи меланопічну освітленість у меланопічну еквівалентну освітленість денного світла (D65) (меланопічну EDI), маємо:

$$E_{mel} = 1,33 \text{ мВт / м}^2 \Rightarrow \text{меланопік EDI}=1 \text{ лк;}$$

$$E_{mel} = 1,33 \text{ мВт / м}^2 \Rightarrow \text{меланопік EDI}=100 \text{ лк.}$$

Відношення світлового виходу (джерела світла), що оцінюються використанням скотопічної функції ефективності до світлового виходу, пов'язано з фотопічною функцією ефективності, відомі як S/P-відношення.

S/P-відношення є характеристикою спектрального розподілу світла і, за визначенням, дорівнює 1 для монохроматичного випромінювання з частотою  $540 \times 10^{12}$  Гц або довжиною хвилі 555 нм (в повітрі). S/P вище 1 означає, що джерело світла більш активне до паличок.

Клітини ipRGCs можуть бути включені в регулювання мезопічної та фотопічної візуальних чутливостей. Нещодавні дослідження допускають можливість подальшого меланопічного впливу на візуальні відклики.

Фотосприйняття, засноване на меланопсіні ipRGCs, виявляється важливим драйвером для невізуальних відкликів. Багато дизайнерів-світлотехніків уже схильні до широкого розуміння візуальних архітектурних і фізіологічних аспектів світла та освітлення.

Розуміння серед професіоналів з освітлення, що наступною після колбочководомінуючих метрик, таких як корельована колірна тем-

пература (ККТ), освітленість і яскравість, є необхідність розглядати фотосприйняття, засноване на меланопсіні в специфікаціях, кодах, рекомендаціях і дослідженнях. Усі ці метрики є корисними інструментами для кількісної оцінки або порівнювання індивідуальних аспектів усередині освітлювальної схеми, проте вони не можуть замінити необхідне експериментальне дизайнерське оцінювання взаємодії між різними ефектами світла. На додаток, фотосприйняття невізуальних ефектів світла відноситься до світла, що потрапляє в око з усіх напрямків. Це потребує рекомендацій, побудованих на термінах світла, що прибуває на рівні ока, – тобто виміряного нормально до візуальних вісей у вертикальній площині – на відміну від референса до світла, що падає на горизонтальну поверхню, стіни або предмети.

Немає єдиного діючого спектра або проксі, які можуть описувати всі опосередковані відклики до світла. Всі п'ять відомих типів рецепторів можуть робити внесок до цих відкликів, і відносний внесок кожного індивідуального рецептора може змінюватися залежно від специфіки відклику і властивостей світлової експозиції, таких як інтенсивність, спектр, тривалість, таймінг (зовнішній і внутрішній (циркадний)), попередня світлова історія, стан втрати сну індивідуума.

Меланопік DER представляє відношення меланопічного потоку ("M") до фотопічного потоку ("P") тестового джерела світла, і ця безрозмірна величина може бути корисною як нове M/P-відношення. За визначенням, це відношення дорівнює 1 для референсного випромінювача D65. S/P-відношення є встановленою освітлювальною метрикою. Воно дорівнює 1 для монохроматичного випромінювання в 555 нм, так що S/P-відношення ефективно використовує випромінювання в 555 нм як його нормалізуючий референсний випромінювач. У випадку меланопічного EDI в 30 лк, тестове джерело світла має такий самий активуючий ефект на ipRGCs, як 30 лк випромінювання, пристосованого до спектра D65 денного світла. Таким самим чином скотопічне освітлення в 30 лк вказує, що тестове джерело світла має той же ефект на паличках, як і 30 лк випромінювання за 555 нм.

Щоб обчислити  $\alpha$ -опік величини в радіометричній, фотонній та фотометричній схемах і перетворити від однієї системи до другої, МКО опублікувала інтерактивну Excel ТМ програму. Доступ є вільним на вебсайті МКО.

МКО запропонувала "інтегральне освітлення" як офіційний термін для освітлення, яке признається інтегрувати візуальні та невізуальні ефекти, виробляючи фізіологічні та психологічні ефекти на людях, що відбивається в наукових свідченнях. У цьому контексті нового підходу

Характеристики джерел світла (ККТ, S/P, M/P)

Джерело світла	ККТ	S/P	M/P (МВт/лм)
Високого тиску	1960	0,63	0,24
Високого тиску	2970	0,81	0,29
Теплий білий	2850	1,03	0,43
Теплий білий	2900	1,09	0,47
МГЛ 2700 К	2650	1,16	0,53
Білий (флуоресцентний)	3540	1,26	0,51
Ultralume 30 (флуоресцентний)	3130	1,28	0,55
Холодний білий	4060	1,30	0,57
МГЛ 3200 К	3320	1,36	0,63
МГЛ 3000 К	2910	1,38	0,65
Лампа розжарювання	2810	1,39	0,64
Освітлювач А	2850	1,41	0,66
МГЛ 3700 К	3440	1,48	0,70
Світло біле	4250	1,49	0,71
МГЛ 4000 К	3880	1,54	0,73
Холодний білий	4340	1,59	0,73
Ultralume 4000	4190	1,62	0,78
Світлодіодний дорожній ліхтар	5010	1,68	0,79
Холодний білий	4270	1,79	0,89
Ultralume 5000	5190	1,89	0,92
МГЛ 5000 К	5160	1,98	1,01
5000 KFL	5180	1,99	1,06
Світлодіодний	5500	2,09	1,11
Білий флуоресцентний	5140	2,09	1,07
В (сонячне світло – 4900 К)	4880	2,13	1,12
Флуоресцентний (6500 К)	6380	2,26	1,18
D 55 (денне світло 5500 К)	5500	2,27	1,20
D 65 (денне світло 6500 К)	6510	2,46	1,33
МС (денне світло 6800 К)	6760	2,50	1,36
D 75 (денне світло 7500 К)	6510	2,61	1,43

переглядається світло, яким люди опромінюються під час їхньої денної активності.

Важлива більш детальна оцінка абсолютного і відносного меланопічного контенту багатьох джерел світла.

Денні варіації світлового оточення (навколишнього середовища) є важливими для сну, самопочуття і довготривалого здоров'я. Знання основ, які торкаються внесками і взаємодіями всіх ретинальних фоторецепторів у впровадженні невізуальних ефектів, стає більш зрілим. Хоча наука є незавершеною, вимірювання в термінах меланопічного EDI має тепер екологічну цінність. Нові рекомендації очікуються в майбутньому для інкорпорації як мінімальних порогів для денного часу, так і максимальних порогів для нічного меланопічного EDI.

Ці рекомендації повинні бути ретельно узгоджені з візуальними компонентами в існуючі освітлювальні коди. Як один зі способів обмеження вечірнього меланопічного EDI міг би бути рекомендований димінг (dimming) освітлення, і це

є більш ефективним, ніж одночасне пониження меланопічного DERs (тобто зменшення M/P-відношення).

Експерименти свідчать, що меланопічне DER денного світла в ясний день є суттєво більшим, ніж меланопічне DER усередині приміщення, освітлюваного білим LED із діапазоном ККТ. Це підтримує точку зору, що LED зразки є відносно менш ефективними в продукуванні меланопічного світла для даної комбінації ККТ і світлового потоку [10]. Переважними характеристиками для денного внутрішнього освітлення є вищі M/P-відношення. Вищі M/P-відношення, подібно до денного світла, можуть розглядатися як переважні характеристики для денного внутрішнього освітлення. Денне світло, яке потрапляє у будівлю, – хороший спосіб досягнення цього (табл. 2) [11].

Якщо метою є мінімізація експозицій меланопічного світла, то освітлення, яке використовується вночі для навігації та відчуття безпеки, повинно бути обмежено низькими M/P-відношеннями.

## Висновки

Незважаючи на бурхливий прогрес світлових технологій, пов'язаних із використанням світлодіодів і виявленням нового фоторецептора, освітлювальні стандарти залишаються фотопічними, тобто повністю заснованими на єдиній функції спектрального розподілу світлової ефективності – фотопічній  $V(\lambda)$ . Тим самим до розгляду залучені тільки два фоторецептори: М- і L-колбочки. Введення мезопічної спектральної функції розподілу  $V_{mes}(\lambda)$  дало поштовх для нормування дорожнього освітлення. Із цієї ж точки зору меланопічна фотометрія дає можливість мультиплікативного підходу до вирішення актуального гамоцентричного освітлення, технології продукування дизайну фоторецепторно направлено світла.

Спільнота з освітлювальних технологій підсумовує результати наукових досліджень, проте ще не пропонує керівництво з дизайну. Між тим самі дизайнери намагаються відрізнити достовірні знання від технологій, які є сумнівними. Є багато питань, вартих дослідження, враховуючи складний характер повного ефекту світла й освітлення для людей.

Необхідно узгодження методів кількісної оцінки потенційності світлового стимулу. Пропонується кілька наближень, можливо, жоден із них не є точним, і необхідно розвивати метрику кількісної оцінки біологічного потенціалу світла як теоретично, так і практично.

Практика освітлення виграє від встановлення консенсусних логістичних функцій, які пов'язують біологічний потенціал освітлювальних стимулів із різними реакціями. Такі функції дозволили б приймати рішення про ефективність будь-якого запропонованого дизайну освітлення для бажаної відповіді, а також про відносний вплив змін в освітленні.

Освітлювальні дизайнерські проекти часто включають до себе багато вимог. Наприклад, освітлювальний дизайн повинен відповідати заданим рівням світла, обмежувальній близькості та забезпечувати відповідне колірне передавання, водночас не перевищуючи енергетичний бюджет, визначений для цього проекту. Для певних проектів циркадний розгляд було нещодавно додано до переліку критеріїв дизайну. Циркадне освітлення – мета освітлювальної системи забезпечити циркадну підтримку, що стимулює циркадну систему тільки протягом дня.

На сьогодні циркадний освітлювальний дизайн типово заснований на забезпеченні рівня специфічної меланопічної освітленості для мешканців протягом дня і залишається нижче специфічного рівня меланопічної освітленості під час ночі. Для заповнення прогалини між типовим фотопічним освітлювальним дизайном і циркадним освітлювальним дизайном корисною метрикою є меланопічна ефективність світлового випромінювання.

# Melanopic photometry

L. Nazarenko, O. Didenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine  
leonnaz@ukr.net

## Abstract

Visual lighting effects have been seriously studied for more than 500 years. It was not until 2002 that physicians and biologists paid attention to the fact that the light that enters the human eye has non-visual, biological effects.

Human Centric Lighting (HCL) examines the visual effects of light on human activity. Electric lighting plays a critical role in maintaining human health in today's world, as most of us spend much of our time indoors.

In 2002, a third type of photoreceptor was discovered – a nerve node cell in the retina (photosensitive, Retinal Ganglion Cell, pRGC). pRGC cells contain melatonin pigments (melanopsin) and are responsible for the spectral response of photosensitive cells.

The maximum response of melatonin is achieved at a wavelength of approximately 480 nm. Fig. 1 also shows the response curves of L-, M-, and S-cones and rods based on their specific pigments.

Using the response curves of L-, M-, and S-cones and rods, and having the spectra of light sources and the amount of light on the outer surface of the eye, it is possible to determine the spectrally weighted illuminances for five photopigments in the human eye.

For research purposes, it is desirable to record the illuminance values for all five  $\alpha$  illuminances. They indicate which of the photoreceptors is responding and where the light of the current lamp type is emitting.

The manufacturers of light sources should be able to provide  $\alpha$ -wave illuminances for their lamps. The International Commission on Illumination (CIE) suggested *Exeltoolbox*, which allows calculating these illuminances based on the spectral distribution of the lamp power.

Cone-dominant metrics such as CCT (correlated colour temperature), illuminance, and luminance are not comprehensive, so melanopsin-based photosensitivity should be considered in specifications, guidelines, and during research.

**Keywords:** biological effects; human-centric lighting; photoreceptors;  $\alpha$ -opic illumination; photopigment.

### Список літератури

1. CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light: Recommending Proper Light and the Proper Time. 2<sup>nd</sup> ed. Vienna, CIE, 2019.
2. Houser K.W., Boyce P.R., Zeitzer J.M., Herf M. Human-centric lighting: Myth, magic or metaphor? *Lighting Research & Technology*, 2020, vol. 53, issue 2. doi: <https://doi.org/10.1177/1477153520958448>
3. Kevin W. Houser, Tony Esposito. Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process. *Frontiers in Neurology*, 2021, Sec. Sleep Disorders, vol. 12. doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.630553>
4. Berson D.M., Dunn F.A., Takao M. Photo-transduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, 295(5557):1070-3. doi: [10.1126/science.1067262](https://doi.org/10.1126/science.1067262)
5. CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. Vienna, CIE, 2018. doi: [10.25039/S026.2018](https://doi.org/10.25039/S026.2018)
6. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry. CIE TN003:2015. Vienna, 2013. 39 p.
7. Wout Van Bommel. Incandescent replacement lamps and health. *Light and Engineering*, 2011, 19(1), pp. 8–14.
8. Matej B Kobav, Grega Bizjak. LED spectra and melatonin suppression action function. *Light and Engineering*, 2012, 20(3), pp. 15–22.
9. User Guide to the  $\alpha$ -opic Toolbox for implementing CIE S 026. Vienna, 2020. 29 p.
10. Sam Berman, Robert Clear. Simplifying Melanopsin Metrology. *Forum for Illumination Research, Engineering, and Science*. URL: <https://www.ies.org/research/fires/simplifying-melanopsin-metrology/>
11. Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., Brown T.M., Cooper H.M., Czeisler C.A. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci*, 2014, vol. 37, pp. 1–9. doi: [10.1016/j.tins.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004)

### References

1. CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. CIE Position Statement on Non-Visual Effects of Light: Recommending Proper Light and the Proper Time. 2<sup>nd</sup> ed. Vienna, CIE, 2019.
2. Houser K.W., Boyce P.R., Zeitzer J.M., Herf M. Human-centric lighting: Myth, magic or metaphor? *Lighting Research & Technology*, 2020, vol. 53, issue 2. doi: <https://doi.org/10.1177/1477153520958448>
3. Kevin W. Houser, Tony Esposito. Human-Centric Lighting: Foundational Considerations and a Five-Step Design Process. *Frontiers in Neurology*, 2021, Sec. Sleep Disorders, vol. 12. doi: <https://doi.org/10.3389/fneur.2021.630553>
4. Berson D.M., Dunn F.A., Takao M. Photo-transduction by retinal ganglion cells that set the circadian clock. *Science*, 2002, 295(5557):1070-3. doi: [10.1126/science.1067262](https://doi.org/10.1126/science.1067262)
5. CIE. Commission Internationale de l'Eclairage. CIE S 026/E:2018. CIE System for Metrology of Optical Radiation for ipRGC-Influenced Responses to Light. Vienna, CIE, 2018. doi: [10.25039/S026.2018](https://doi.org/10.25039/S026.2018)
6. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry. CIE TN003:2015. Vienna, 2013. 39 p.
7. Wout Van Bommel. Incandescent replacement lamps and health. *Light and Engineering*, 2011, 19(1), pp. 8–14.
8. Matej B Kobav, Grega Bizjak. LED spectra and melatonin suppression action function. *Light and Engineering*, 2012, 20(3), pp. 15–22.
9. User Guide to the  $\alpha$ -opic Toolbox for implementing CIE S 026. Vienna, 2020. 29 p.
10. Sam Berman, Robert Clear. Simplifying Melanopsin Metrology. *Forum for Illumination Research, Engineering, and Science*. Available at: <https://www.ies.org/research/fires/simplifying-melanopsin-metrology/>
11. Lucas R.J., Peirson S.N., Berson D.M., Brown T.M., Cooper H.M., Czeisler C.A. et al. Measuring and using light in the melanopsin age. *Trends Neurosci*, 2014, vol. 37, pp. 1–9. doi: [10.1016/j.tins.2013.10.004](https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004)