



## Дорожнє освітлення та мезопічний зір

Л.А. Назаренко, О.М. Діденко

Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, 61002, Харків, Україна  
leonnaz@ukr.net; olena.parhomenko@kname.edu.ua

### Анотація

Сприймати інформацію з навколишнього середовища людина може за допомогою органів чуття. Вважається, що зір забезпечує отримання найбільшої кількості інформації. Є три категорії зору: скотопічний, мезопічний, фотопічний. Активність двох типів світлочутливих рецепторів в оці, колбочок і паличок, є різною в кожній категорії. Колбочки і палички мають унікальну здатність до адаптації різних рівнів освітленості. Адаптація – це спроможність людського ока пристосуватися до умов освітлення, які змінюються. Завдяки такому механізму зорова система людини має здатність працювати в дуже широкому діапазоні освітленостей зниці, тобто адаптивних рівнів. За дуже низьких рівнів адаптації активними є тільки палички, і зір є скотопічним. Зі зростанням адаптивних рівнів, починаючи від 0,005 кд/м<sup>2</sup>, колбочки стають активними, а палички – менш активними, й зір тоді є мезопічним. За адаптивних рівнів вище 5 кд/м<sup>2</sup> тільки колбочки є активними, і зір є фотопічним. Колбочки й палички мають різні спектральні чутливості: палички більш чутливі до коротких довжин хвиль, водночас колбочки мають максимальну чутливість усередині видимого спектрального діапазону. Колбочки концентруються головним чином у тій частині ретини ока, яка використовується для прямого (on-line) зору, а палички локалізуються тільки в місцях, що використовуються для периферійного зору. Як наслідок, за мезопічного зору периферійний зір стає кращим із джерелами світла, які мають відносно велику компоненту коротких довжин хвиль. Те ж саме є справедливим для суб'єктивного відчуття яскравості. За низьких рівнів адаптації більше паличок стають активними, і, таким чином, ці переваги збільшуються за низьких рівнів освітленості.

Оскільки фотометричні одиниці базуються на фотопічному зорі, ці переваги неочевидні. Таким чином, коригуючі фактори повинні бути визначені відповідно до спектрів джерел світла, які характеризуються відношенням S/P і рівнями дорожнього освітлення.

**Ключові слова:** зір; мезопічний зір; колбочки; палички; дорожнє освітлення.

Отримано: 10.03.2023

Відредаговано: 27.03.2023

Схвалено до друку: 31.03.2023

### Вступ

Міжнародна комісія з освітлення (МКО) розробила стандарт (CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic) [1]: головні цілі дорожнього освітлення – забезпечити зорову працездатність, візуальний комфорт і дозволити водію зберігати пильність.

Рекомендації та стандарти дорожнього освітлення забезпечують дизайнерам змогу досягати своїх цілей так, щоб виконувалася кількість вимог до відповідних рівнів яскравості або освітленості, кольору або інших характеристик, виведених від розподілу секторальної потужності та просторового розподілу.

Нещодавні дослідження забезпечують експериментальну базу для перегляду рекомендацій, оскільки розвиток науки й техніки стимулює вказаний перегляд. Доказом необхідності перегляду

є припустимі переваги існуючого освітлення (поліпшення видимості та відчуття безпеки).

Поява світлодіодів привела до нових вимог для нових рекомендацій, пов'язаних зі спектром, просторовим розподілом і динамічним контролем. Малий фізичний розмір світлодіодів надає нові можливості їх застосування. Наприклад, використання самосвітних дорожніх позначок як маркерів переходів є кращим рішенням, ніж надземне дорожнє освітлення. Це очевидно зменшує енергоспоживання.

Водночас візуальні умови для дорожнього освітлення безумовно змінюються в присмерковій (мезопічній) області, де як палички, так і колбочки забезпечують суттєві відклики. При цьому відзначимо, що рекомендації дорожнього освітлення ґрунтуються на використанні фотопічних величин. Так, наприклад, рекомендовані освітленості (або

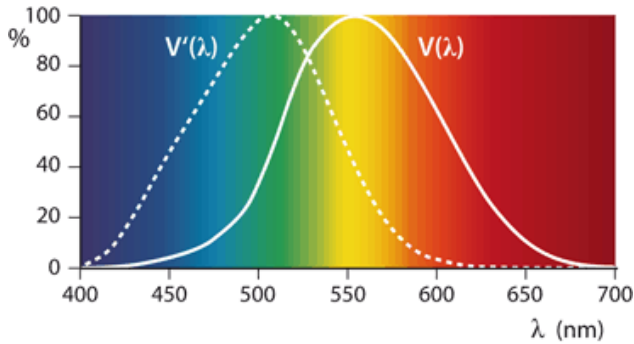


Рис. 1. Спектральна чутливість фотопічного  $V(\lambda)$  та скотопічного  $V'(\lambda)$  зору

яскравості) виводяться за стандартним фотопічним спостерігачем, і, таким чином, ігнорується внесок від паличок (ї чутливості до коротких довжин хвилі паличок). Тільки фотопічне наближення не може бути адекватним для дорожнього освітлення, враховуючи зміни спектрального розподілу джерел світла. Це обмеження стає більш важливим, оскільки широке впровадження світлодіодів суттєво підвищило можливості спектрального розподілу потужності.

### Спектральна чутливість ока

В органах зору людини наявні два різних типи світлочутливих рецепторів у сітківці ока: колбочки і палички. Вони мають унікальну здатність до адаптації різних рівнів освітленості. Адаптація — це спроможність людського ока пристосовуватися до умов освітлення, які змінюються. Завдяки такому механізму зорова система людини має здатність працювати в дуже широкому діапазоні освітленостей зіниці, тобто адаптивних рівнів. Активність колбочок і паличок залежить від освітлювального рівня, до якого адаптоване око. За високих адаптивних рівнів (більше  $5 \text{ кд/м}^2$ ) активними є колбочки. В цьому випадку ми говоримо про фотопічний зір. Завдяки тому, що ми маємо три види колбочок, а саме червоні, зелені та блакитні, можливий колірний зір. Спектральна чутливість фотопічного зору характеризується  $V(\lambda)$  кривою і досягає максимуму чутливості на довжині хвилі 555 нм, що відповідає жовто-зеленій області спектра (рис. 1). Усі фотометричні одиниці (світловий потік, сила світла, освітленість, яскравість та ін.) базуються на функції  $V(\lambda)$ . За низьких адаптивних рівнів, нижчих за  $0,005 \text{ кд/м}^2$  (“темна смола”), активними є тільки палички, що відповідає скотопічному зору.

Палички мають більшу чутливість до світла, ніж колбочки. Зі скотопічним, або паличковим зором колірний зір неможливий. Спектральна чутливість скотопічного зору характеризується  $V'(\lambda)$  кривою і досягає максимуму чутливості за довжини хвилі близько 505 нм, що відповідає блакитно-зеленій області спектра, яка відносно  $V(\lambda)$  кривої зсунута в напрямку блакитного кінця спектра (рис. 1).

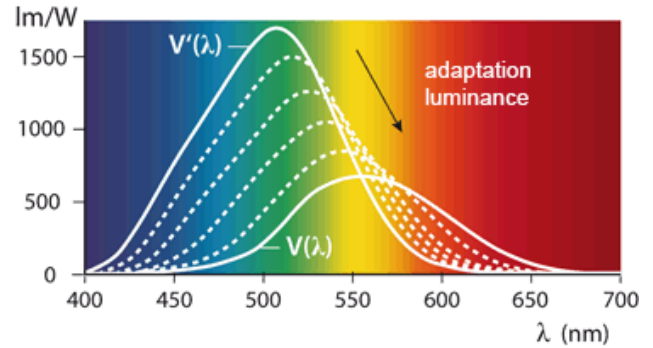


Рис. 2. Зсув спектральної чутливості

У діапазоні адаптивних рівнів між  $5$  і  $0,005 \text{ кд/м}^2$  активними є і колбочки, і палички. В цьому випадку ми говоримо про мезопічний зір. У діапазоні мезопічного зору активність паличок стає більш важливою, залежно від високого до низького рівня освітленості зіниці ока людини. Як результат, спектральна чутливість поступово зсувається в напрямку малих довжин хвилі (рис. 2).

Шкала чутливості, наведена на рис. 2, не є відносною, тому ефект більшої чутливості паличок стає очевидним. Такий зсув у напрямку зелено-блакитного кінця спектра може бути однією з вимог для умов освітлення доріг. У мезопічному діапазоні зору джерела світла, які містять більше зелено-блакитного (холодного, білого) світла, аніж жовто-червоного (теплого, білого) світла, є більш ефективними для зору.

Такі вимоги є корисними для периферійного, проте не для прямого зору.

### Прямий (on-line) і периферійний (off-line) зір

Колбочки концентруються в частині сітківки, яка називається фовеа. Число колбочок у фовеа дорівнює приблизно 4000, а щільність — 1800 тис. на  $\text{мм}^2$ . Це область сітківки, на яку проєктуються різні зображення. Фовеа не містить паличок. Поза фовеа число колбочок зменшується дуже швидко до низького і більш-менш постійного числа (рис. 3).

Таким чином, за “центрального”, або “прямого” зору (він також називається фовеальним) використовуються тільки колбочки. Крива  $V(\lambda)$  забезпечує характеристики фовеального (прямого) зору, і для цього аспекту повинні використовуватись фотопічні світлові одиниці.

Поле фовеального зору дуже мале і становить лише  $2^\circ$ . Однак ми отримуємо набагато більшу площину зображення. Це тому, що наші очі підсвідомо зсувають свій погляд неперервно в напрямку фіксації точок сцени. Протяжність фіксації триває близько  $0,25 \text{ с}$ . Через рухи очей багато різних фовеальних зображень компонується мозком в одну картинку з чітким зображенням поверхні, більшої ніж  $2^\circ$ . Усі колбочки в фовеа мають індивідуальні нервові з'єднання в мозку.

Концентрація паличок збільшується на зовнішній (периферійній) поверхні сітківки, в той

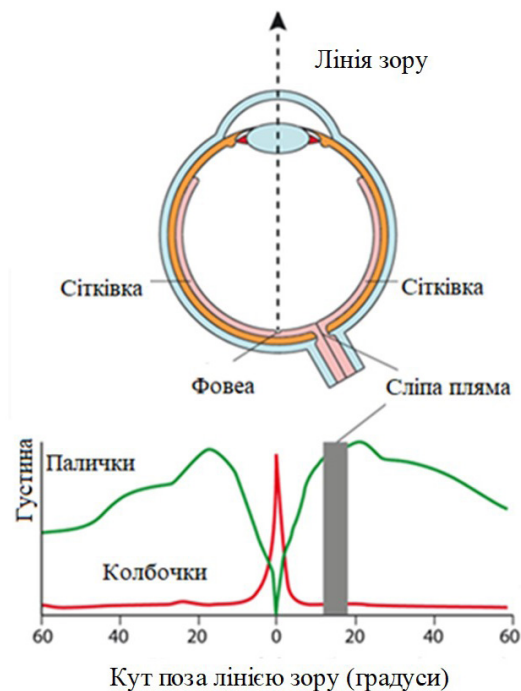


Рис. 3. Кількість паличок та колбочок відносно лінії зору

час як концентрація колбочок зменшується. Максимальна концентрація паличок міститься в зовнішній області сітківки. В сітківці ока є близько 150 млн паличок (рис. 3).

Палички важливі для бічного, “периферійного” зору. Більшість паличок з’єднані між собою так, що сигнал у мозку втрачає інформацію, де сигнал спочатку виникає, і відповідно периферійне зображення, яке сформувалося, є не різким, а розмитим.

### S/P відношення джерел світла

Для кількісного оцінювання ефекту спектра джерела світла на периферійний зір у діапазоні мезопічної яскравості ми повинні характеризувати спектр джерела світла в  $V(\lambda)$  і  $V'(\lambda)$  областях відповідно. Так зване S/P відношення демонструє придатне вимірювання цього ефекту. S/P відношення може бути легко обчисленим зі спектра джерела світла. Наприклад, візьмо теоретичне монохроматичне джерело світла із довжиною хвилі 500 нм. Із рис. 1 ми бачимо, що відносне скотопічне  $V'(\lambda)$  значення для цієї довжини хвилі дорівнює 0,99 і таке ж відносне фотопічне значення

дорівнює 0,30. Щоб перетворити ці відносні значення в абсолютне значення, вони повинні бути помножені на максимальну чутливість ока скотопічного (1700) і фотопічного (683) зору, відповідно. Таким чином, у цьому прикладі S/P значення буде дорівнювати:

$$(0,99 \cdot 1700) / (0,30 \cdot 683) = 8,2. \quad (1)$$

Для немонохроматичного світла ця процедура повинна бути для всіх довжин хвиль, які містить джерело світла. Багато виробників дають S/P відношення своїх ламп як частину характеристик світильника. Табл. 1 надає типові значення S/P для різних джерел світла, які використовуються в дорожньому освітленні. Як видно, тепло-білі джерела мають відносно низьке S/P відношення, а блакитно-білі джерела мають високі значення.

За умов дорожнього освітлення яскравість у полі зору не є однорідною. Для спрощення усереднену за дорожньою поверхнею яскравість часто неправильно сприймають як адаптаційну яскравість. Багато інших, часто високих значень яскравостей відіграють роль у візуальному полі.

Уявимо яскраві дорожні світильники, головні фари автомобілів, світлові знаки і світло, відбите від різних поверхонь. Усі вони будуть збільшувати адаптаційну яскравість до значення більшого, ніж середня яскравість дорожньої поверхні. Зсув спектра в напрямку малих довжин хвиль буде меншим, ніж могло бути зробленим від однієї середньої яскравості дорожньої поверхні.

**Предметом дослідження** є спосіб точного визначення адаптаційної яскравості. Зокрема, використовуються окоспрямувальні інструментарії для вивчення напрямку зору і фіксації точок.

**Метою дослідження** є визначення, де адаптаційне поле є центрованим, якими є його контур і розмір. Технічний комітет МКО (CIE JTC – 1 “Implementation of CIE 191 mesopic photometry in outdoor lighting”) [5] координує цю роботу. Якщо адаптаційне поле відоме, наступним кроком є визначення того, як різні яскравості в цьому полі повинні бути зважені. Ефект блиску джерел в адаптивному полі може бути грубо оцінено їхньою вуальною яскравістю [2]. Ми обчислили на

Таблиця 1

Приблизний коефіцієнт S/P для різних джерел світла

Джерела світла	S/P відношення
Натрієва лампа низького тиску	0,25
Натрієва лампа високого тиску	0,65
Тепла “біла” металогалогенна	1,25
Тепла “біла” світлодіодна	1,3
Холодна “біла” металогалогенна	1,8
Блакитна світлодіодна	2,15

Таблиця 2

Відсоток додавання до значень середньої яскравості дорожньої поверхні для різних рівнів яскравості

Ti (%)	$L_{av} = 0,1$ кд/м <sup>2</sup>	$L_{av} = 0,5$ кд/м <sup>2</sup>	$L_{av} = 1$ кд/м <sup>2</sup>
10	24(%)	18(%)	15(%)
15	37(%)	26(%)	23(%)

цій базі відсотки, які повинні бути доданими до значень середньої яскравості дорожньої поверхні для різних рівнів яскравості. Результати наведені в табл. 2.

З табл. 2 зрозуміло, що в більшості ситуацій дорожнього освітлення принаймні 25% середньої яскравості дорожнього освітлення має бути додано до дійсної середньої яскравості дорожньої поверхні, коли враховують адаптаційну яскравість.

Із вищенаведеного зрозуміло, що за умов мезопічного зору фотометричні величини освітлювального рівня яскравості та освітленість необхідно коригувати, оскільки це враховується їх вплив на периферійний зір залежно від адаптивного стану спостерігача. Зір, проте, є комплексним явищем, у якому відіграють роль палички і три типи колбочок: короткохвильові чутливі колбочки (S – колбочки з максимумом чутливості в блакитній частині), середньохвильові чутливі колбочки (M – колбочки з максимумом чутливості в зеленій області) і довгохвильові чутливі колбочки (L – колбочки з максимумом у червоній області).

Навіть світлочутливі нервові клітини сітківки, які відіграють важливу роль у невізуальних біологічних ефектах освітлення, також впливають на зір, наприклад, на зміну розміру зіниці. Як фундаментальний наслідок, мезопічне коригування фотометричних величин відрізняється від різних завдань і різних умов. Як видно з вищенаведеного, для дорожнього освітлення характеристики завдання і відчуття яскравості є особливо важливими.

Коригуючий фактор МКО (2010) визначає систему мезопічної фотометрії для характеристики периферійного завдання. Для розвитку цієї системи потрібно визначити ефект різних спектрів на характеристику периферійних завдань, які

необхідні для проведення за різних умов дорожнього освітлення. Величезну кількість типів досліджень було проведено багатьма інститутами в США [3], Європі [4] та Азії [5]. Це привело до утворення двох систем: так званої американської USP (United System of Photometry) і європейської MOVE (Mesopic Optimisation of visual Efficiency). Система USP ґрунтується на вимірюванні часу реакції в присутності об'єктів за різних периферійних позицій. Система MOVE ґрунтується на трьох периферійних підзавданнях: 1) здатність візуально виявляти об'єкт; 2) швидкість детектування об'єкта; 3) здібність розрізняти деталі об'єкта. На основі цих досліджень і в співдружності з наданими від обох дослідницьких груп МКО опублікувала "рекомендовану систему для мезопічної фотометрії, засновану на візуальних характеристиках" (МКО, 2010). Ця система визначає спектральні функції ефективності  $V_{mes}(\lambda)$ , криві рис. 2, функції наводять у вигляді

$$V_{mes}(\lambda) = mV(\lambda) + (1-m)V'(\lambda), \quad (2)$$

де  $m$  – функція адаптивної яскравості і дійсного спектра в S/P відношенні. Для  $L_{adapt} \geq 5$  кд/м<sup>2</sup>  $m = 1$ , для  $L_{adapt} \leq 5$  кд/м<sup>2</sup>  $m = 0$ . У додатку дається значення "m" як функції адаптивної яскравості та S/P відношення, так що  $V_{mes}(\lambda)$  може бути обчислено. Це в свою чергу дозволить обчислити коригуючі фактори з метою застосування (для периферійного зору) для дійсної яскравості дорожнього покриття або яскравості для даного спектра джерела світла. На щастя, немає потреби обчислювати  $V_{mes}(\lambda)$  для кожної відмінної ситуації, тому що та ж сама МКО дає коригуючі фактори для широкого діапазону значень S/P відношень і адаптивних яскравостей. Табл. 3 демонструє суму відповідних МКО таблиць, дає ці коригуючі

Таблиця 3

Коригуючі фактори  $CF_{mes}$  для фотометричної яскравості для периферійного мезопічного бачення різних джерел світла, які характеризуються їх S/P відношенням. Основа: характеристика завдання, завдання позацентрове  $10^9$  від лінії спостереження  $L_{adapt}$ , кд/м<sup>2</sup> (МКО, 2010) [6]

$CF_{mes}$			
S/P	$L_{adapt} = 0,03$	$L_{adapt} = 0,3$	$L_{adapt} = 3$
0,65	0,80	0,92	0,99
1	1,00	1,00	1,00
1,45	1,22	1,09	1,01
2,25	1,57	1,24	1,04

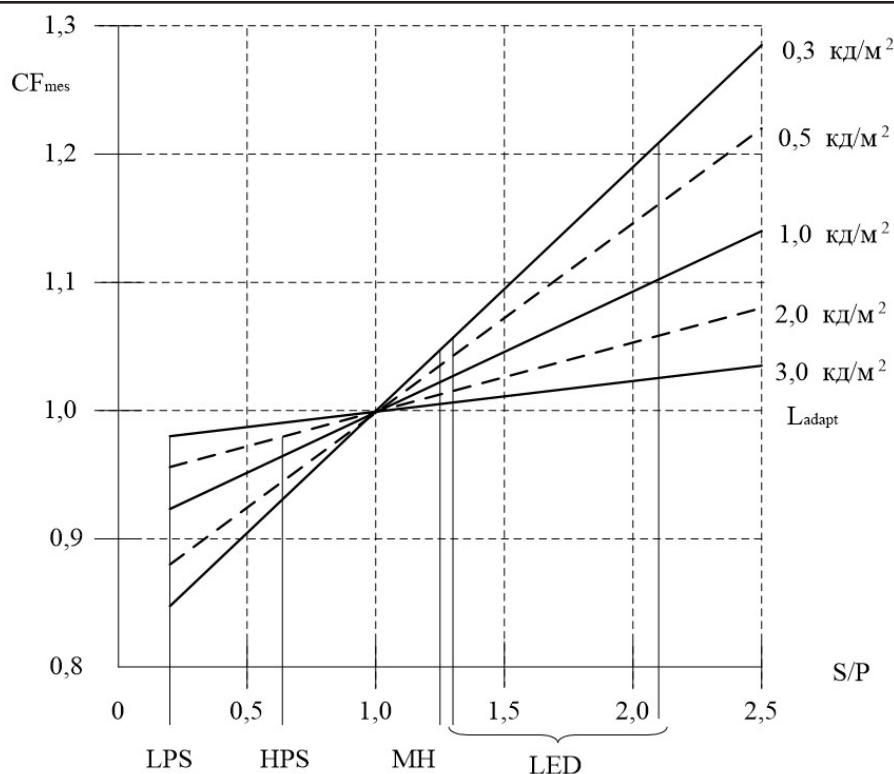


Рис. 4. Мезопічний коригуючий фактор  $CF_{mes}$  для характеристик периферійного завдання залежно від  $S/P$  відношення і адаптаційної яскравості: LPS – натрієва лампа низького тиску, HPS – натрієва лампа високого тиску, MH – металогалогенна лампа

фактори для трьох різних значень адаптаційної яскравості.

Наприклад, для периферійного зору за адаптаційної яскравості в  $0,3$  кд/м<sup>2</sup> джерела світла із  $S/P$  відношенням в  $0,65$  (такі як натрієві лампи високого тиску) насправді мають ефективність із фактором  $1,09/0,92 = 1,18$  і вище. Для білого з суттєвим блакитним джерела з відношенням  $S/P$  у  $2,25$  (такого як блакитнуватий білий світлодіод) ефективність є  $1,24/0,92 = 1,35$  і вище. Можна також побачити, що за вищих адаптаційних рівнів коригування стає більш або менш нехтовним: для тих же самих  $S/P$  прикладів при  $3$  кд/м<sup>2</sup>, тільки  $1,01/0,99 = 1,02$  і  $1,04/0,99 = 1,05$  відповідно. Графічні показники таблиці МКО, як наведено на рис. 4, дають загальний огляд коригуючих факторів для діапазону адаптаційних яскравостей, прийнятих у дорожньому освітленні.

## Висновки

Для впровадження знань про мезопічний зір необхідно відповісти на питання: периферійний чи фовеальний прямий зір є більш важливим у конкретному застосуванні. Там, де периферійний зір є менш важливим, фовеальний зір є ключовим аспектом відповідного візуального завдання, і коригування не повинно застосовуватися. Зрозумілим прикладом такого застосування є освітлення автостради для доріг із бар'єрами безпеки на обох сторонах частин доріг, які мають відкриті рівні перехрестя. Для тих зовнішніх освітлювальних інсталяцій, де периферійний зір визначається як

важлива частина відповідних візуальних завдань, коригуючий фактор для відповідної адаптаційної яскравості, що дається в табл. 3, може бути застосовано для дійсного використовуюваного спектра джерел світла, який характеризується  $S/P$  відношенням. Якщо говорити про периферійний зір, то освітлювальний рівень може бути зменшено цим фактором. При цьому необхідно мати на увазі, що фовеальне центрове візуальне завдання може бути менш добре виконано. Цей негативний побічний ефект є більш важливим для людей похилого віку. Дослідження, які сформувавши основи для коригуючої таблиці МКО, були проведені із суб'єктами у віковому діапазоні  $20-35$  років. Кристалічні лінзи в людському оці з віком стають жовтуватими, – це означає, що блакитне світло більш поглинається в лінзі. Отже, мезопічні переваги блакитного світла, описаного вище, є небажаними для людей похилого віку.

Метод для визначення дійсної адаптивної яскравості в неоднорідному оточенні все ще не визначено і не стандартизовано. Рекомендується, що принаймні 25% середньої яскравості дорожнього полотна повинно додаватися до дійсної яскравості дорожньої поверхні, коли оцінюють адаптаційну яскравість.

Кілька досліджень показали, що спектр джерела світла також впливає на суб'єктивне відчуття світлоти [7–10]. В діапазоні мезопічного зору джерела світла із відносно великою пропорцією випромінювання світла в короткохвильовій області спектра, з високими кольорними температурами і

S/P відношенням, продукують вищу світлоту за тієї ж самої освітленості. МКО (2011) розвинула “допоміжну фотометричну систему”, за якої джерела світла або освітлювальні об’єкти можуть бути оцінені в термінах порівняльної світлоти. Інші моделі, що ґрунтуються на можливих взаємодіях різних типів світлових чутливих клітин, дискутуються [8, 10, 11].

Fotios and Cheal (2011) випробували прогнозування світлоти різних моделей за експертизою світлоти, зробленою для ламп, які типово використовуються для дорожнього освітлення. Лампи були порівняні в двосторонніх вимірвальних камерах. Референсна яскравість

становила  $0,25 \text{ кд/м}^2$ . Допоміжна система МКО для оцінки світлоти показала хороший результат (коефіцієнт коригування):  $R^2 = 0,89$ . Із практичних міркувань систему МКО повинно бути використано для обох периферійних характеристик візуального завдання і прогнозування світлоти [10]. Подальші тестування за референтних яскравостей вище ніж  $0,25 \text{ кд/м}^2$  могли б служити підсиленням цих рекомендацій. На практиці рекомендації означають, що коригуючі фактори подані в МКО (2010). Публікації, підсумовані в табл. 3 і рис. 4, можуть бути застосовані для периферійних характеристик завдання і прогнозування світлоти.

## Road lighting and mesopic vision

L. Nazarenko, O. Didenko

*O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Marshal Bazhanov Str., 17, 61002, Kharkiv, Ukraine  
leonnaz@ukr.net; olena.parhomenko@kname.edu.ua*

### Abstract

Human beings perceive information from the environment by using their sense organs. Vision is believed to provide the most information. There are three categories of vision: scotopic, mesopic, and photopic vision. The activity of two types of light-sensitive receptors in the eye, cones and rods, is different for each category. Cones and rods have a unique ability to adapt to different levels of illumination. Adaptation is the ability of the human eye to adapt to changing lighting conditions. Thanks to this mechanism, the human visual system has the ability to operate in a very wide range of pupil illuminations, that is, at different adaptive levels. At very low adaptive levels, only the rods are active, and the vision is called scotopic. As adaptive levels increase, starting at  $0.005 \text{ cd/m}^2$ , the rods become less active, meanwhile the cones become active, and then the vision is called mesopic. At adaptive levels above  $5 \text{ cd/m}^2$ , only cones are active, and the vision becomes photopic. Cones and rods have different spectral sensitivities: rods are more sensitive to short wavelengths, while cones are most sensitive within the visible spectral range. Cones are concentrated mainly in the part of the retina of the eye that is used for direct (on-line) vision, while rods are localized only in the areas used for peripheral vision. As a result, in case of mesopic vision, the peripheral vision becomes better with light sources that have a relatively large component of short wavelengths. The same is true for the subjective perception of brightness. At low adaptation levels, more rods become active, and thus these benefits are greater at low illumination levels.

Since photometric units are based on photopic vision, these advantages are not obvious. Thus, the correction factors should be determined according to the spectrum of light sources, which is characterized by the S/P ratio, and the illumination levels of road lighting.

The International Commission on Illumination has prepared a standard (CIE 115:2010 Lighting of roads for motor and pedestrian traffic). The main goals of road lighting are to ensure visual performance, visual comfort and to keep drivers alert.

**Keywords:** vision; mesopic vision; cones; rods; road lighting.

### Список літератури

1. CIE 115:2010. Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna, 2010. 54 p.
2. Uchida T., Ohno Y. Effect of high luminance sources to peripheral adaptation state in mesopic range. *Towards a New Century of Light: Proceedings of CIE Centenary Conference*. Paris, 2013, pp. 529–539.
3. Rea M.S., Bullough J.D. Making the move to a unified system of photometry. *Lighting Research & Technology*, 2007, vol. 39(4), pp. 405–406.
4. Goodman T., Forbes A., Walkey H., Elohoma M. et al. Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications. *Lighting Research & Technology*, 2007, vol. 39(4), pp. 365–388.
5. Sagawa K., Takeichi K. System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of the Optical Society of America*, 1992, vol. 9A(8), pp. 1240–1246.
6. CIE 191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, 2010. 73 p.
7. Morante P. Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation Final Report for Groton Utilities. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2008. 70 p.
8. Rea M., Bullough J., Akashi Y. Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications. *Lighting Research & Technology*, 2009, vol. 41(4), pp. 297–320. doi:10.1177/1477153509102342
9. Knight C. Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. *Lighting Research & Technology*, 2010, vol. 42(3), pp. 313–329. doi:10.1177/1477153510376794
10. Fotios S.A., Cheal C. Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 2: Preferred appearance and visual acuity. *Lighting Research & Technology*, 2011, vol. 43(2), pp. 159–172. doi: <https://doi.org/10.1177/1477153510393933>
11. Bullough J.D., Radetsky L.C., Besenecker U.C., Rea M.C. Influence of spectral power distribution on scene brightness at different light levels. *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 2014, vol. 10(1), pp. 3–9. doi:10.1080/15502724.2013.827516

### References

1. CIE 115:2010. Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna, 2010. 54 p.
2. Uchida T., Ohno Y. Effect of high luminance sources to peripheral adaptation state in mesopic range. *Towards a New Century of Light: Proceedings of CIE Centenary Conference*. Paris, 2013, pp. 529–539.
3. Rea M.S., Bullough J.D. Making the move to a unified system of photometry. *Lighting Research & Technology*, 2007, vol. 39(4), pp. 405–406.
4. Goodman T., Forbes A., Walkey H., Elohoma M. et al. Mesopic visual efficiency IV: a model with relevance to nighttime driving and other applications. *Lighting Research & Technology*, 2007, vol. 39(4), pp. 365–388.
5. Sagawa K., Takeichi K. System of mesopic photometry for evaluating lights in terms of comparative brightness relationships. *Journal of the Optical Society of America*, 1992, vol. 9A(8), pp. 1240–1246.
6. CIE 191:2010. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. Vienna, 2010. 73 p.
7. Morante P. Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation Final Report for Groton Utilities. Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, 2008. 70 p.
8. Rea M., Bullough J., Akashi Y. Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications. *Lighting Research & Technology*, 2009, vol. 41(4), pp. 297–320. doi:10.1177/1477153509102342
9. Knight C. Field surveys of the effect of lamp spectrum on the perception of safety and comfort at night. *Lighting Research & Technology*, 2010, vol. 42(3), pp. 313–329. doi:10.1177/1477153510376794
10. Fotios S.A., Cheal C. Predicting lamp spectrum effects at mesopic levels. Part 2: Preferred appearance and visual acuity. *Lighting Research & Technology*, 2011, vol. 43(2), pp. 159–172. doi: <https://doi.org/10.1177/1477153510393933>
11. Bullough J.D., Radetsky L.C., Besenecker U.C., Rea M.C. Influence of spectral power distribution on scene brightness at different light levels. *The Journal of the Illuminating Engineering Society of North America*, 2014, vol. 10(1), pp. 3–9. doi: 10.1080/15502724.2013.827516