

# Створення метрики колірних просторів на базі еліпсів МакАдама

О.Д. Купко

Національний науковий центр "Інститут метрології", вул. Мירוносицька, 42, 61002, Харків, Україна  
kupko@meta.ua

## Анотація

Проаналізовано історію питання створення рівноконтрастових колірних просторів. Відзначено, що розрахунки за результатами спектральних вимірювань недостатньо відповідають зоровому сприйняттю людини. Для всіх існуючих колірних просторів запропоновано створити рівноконтрастову метрику, тобто спосіб визначення довжини, площі та об'єму у відповідних просторах, таку, що відповідає зоровому сприйняттю людини. Метрику побудовано на базі еліпсів МакАдама, тобто на пороговому сприйнятті різниці в кольорах. Для кожної точки будь-якого колірному простору (двох або трьох вимірів) визначається ділянка простору навколо кожної точки, в межах якої людина не спроможна зафіксувати різницю в кольорі. Ділянка характеризується або еліпсом (двовимірний випадок), або еліпсоїдом (тривимірний випадок). Кількість ділянок уздовж лінії, по площині або в об'ємі є мірою відповідно довжини, площини або об'єму, тобто задає метрику. Зв'язок існуючих систем визначення кольору та зорового сприйняття людини здійснюється за допомогою масштабів. Масштаби пов'язують довжину, площу або об'єм будь-якої системи кольорів із зоровим сприйняттям людини. Масштаби залежать від точки простору та напрямку, в якому здійснюється пересування. Внаслідок цього потрібна велика кількість масштабів.

Запропоновано принципову схему вимірювань та апаратуру, за допомогою якої можливо провести відповідні вимірювання. Проведено оцінки щонайбільшої працездатності таких робіт. Визначено, яку найважливішу частину цих робіт можливо провести протягом декількох років. Для двовимірних просторів ( $x$ ,  $y$  та  $u$ ,  $v$ ) за допомогою результатів класичної роботи МакАдама визначено масштаби для зв'язку довжин та площ у цих просторах із зоровим сприйняттям людського ока. Визначено напрямки, в яких масштаби є найбільшими або найменшими. Зроблено висновки та пропозиції.

**Ключові слова:** колориметрія, рівноконтрастовий колірний простір, координати кольору, масштаб, порогове розрізнення кольору, еліпси МакАдама, зорове сприйняття.

Отримано: 12.12.2018

Відредаговано: 21.01.2019

Схвалено до друку: 30.01.2019

## Історія питання

Поняття кольору інтуїтивно зрозуміле для кожної людини з нормальним зором. Вимірювання кольору безпосередньо пов'язані з реакцією людського організму на випромінювання. Перехід від якісних до кількісних вимірювань став можливим завдяки відкриттю законів Грасмана; було показано, що будь-який колір можна отримати з трьох будь-яких інших лінійно незалежних кольорів. Після численних експериментів із колірними ліхтарями в 1931 році Міжнародна комісія з освітлення (МКО) прийняла монохроматичні випромінювання з довжинами хвиль: червоний колір (R) – 700 нм, зелений (G) – 546 нм, синій (B) – 435 нм як базові. Було з'ясовано, яку кількість цих кольорів необхідно мати для створення кольору всіх монохроматичних випромінювань у видимій області. За цими співвідношеннями закріпилися назва і позначення – функції складання кольорів або питомі координати кривих складання кольорів –  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ . Очевидним недоліком такого набору базових кольорів є необхідність нега-

тивних величин у синьо-зеленій області. У 1931 році МКО вибрала одне лінійне перетворення для переходу від функцій складання кольорів  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  до стандартних функцій складання  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ . Функції було табульовано. Формально це означає, що як базові було придумано такі не існуючі в природі кольори, для яких розкладання будь-якого існуючого в природі кольору призводить до позитивних коефіцієнтів розкладання  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (TRISTIMULUS VALUES). Самі координати є нормованими інтегралами від добутку  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  на спектр випромінювання, що потрапляє в око, тобто формально це нормовані редуковані величини.

Це дало основу для зручнішого точного кількісного опису будь-якого кольору. Використання в документації тривимірного простору виявилось вкрай незручним, тому велике поширення отримав колірний графік  $x$ ,  $y$  МКО 1931 – проекція кольорів із координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  на одиничну площину. Саме в цих координатах сформульовано переважну більшість вимог [1–4]. При дослідженні властивостей графіка  $(x, y)$  з'ясувалося, що він у край нерівномірний. Мінімальні не розрізнені оком зміни

координат кольору за відчуттям спостерігача різні для різних областей і мають форму еліпсів із суттєвою відмінністю довжин великої та малої осі [5]. Однакові відхилення в координатах колірності для точок, розташованих у різних частинах діаграми, призводять до різних вражень про ці відхилення. Було розроблено декілька варіантів лінійного перетворення координат для того, щоб виправити таку нерівномірність. Найбільше поширення отримало перетворення МакАдама [6], яке в 1960 році затвердили як рівноконтрастний колірний графік МКО 1960 ( $u$ ,  $v$ ). Доведено, що і лінійним і нелінійним перетворенням не можна домогтися перетворення еліпсів на ідеальні кола рівного діаметру [7, 8].

Оскільки сприйняття кольору залежить від яскравості, в 1964 році МКО рекомендувала розширити рівноконтрастний колірний графік МКО 1960 ( $u$ ,  $v$ ) до тривимірного простору. Роботи в цьому напрямі привели до створення рівноконтрастних колірних просторів МКО 1976 CIELAB із координатами  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  і CIELUV із координатами  $L^*$ ,  $u^*$ ,  $v^*$  [7]. Це дозволило порівнювати зображення з різним рівнем яскравості. Детальніше історію розвитку питання освітлено, наприклад, у [9]. Проте рівноконтрастність цих колірних просторів є умовною. У [10] було показано, що на основі еліпсів МакАдама можливо розрахувати поправочні коефіцієнти для відповідності величин площ у рівноконтрастному графіку  $u$ ,  $v$  і зорового враження. Обчислення поправочних коефіцієнтів для відстаней складніше, оскільки з'являється залежність від напрямку, в якому визначається відстань. Існуючі колірні простори точно визначають точку, відповідну до конкретного зразка відбиття, пропускання або джерела випромінювання, але з погляду людського сприйняття незадовільно визначають різницю між цими зразками. Враховуючи, що завдання коректного чисельного порівняння зорової відмінності кольорів є найбільш затребуваним, побудова метрики рівноконтрастних просторів наразі є актуальною. Необхідно мати відповідні нормативні документи, початкові дані та методи розрахунків, що регламентують зв'язок вимірних колірних величин і зорове враження.

## Метод

Усі перераховані колірні простори визначаються на основі спектральних вимірювань аналітично, за допомогою формул. Формули є громіздкими й багатоступінчастими [11]. Таблиці для розрахунків також громіздкі, наприклад, у [12] передбачено використання окремих таблиць і способів розрахунку для вимірювань із кроком 20 нм, 10 нм, 5 нм і 1 нм. Зрозуміло, що аналітичний підхід був необхідний у 1931 і навіть у 1976 році. Проте сьогодні у зв'язку з розповсюдженням використанням обчислювальної техніки проведення рутинних розрахунків практично не вимагає витрат часу. Тому можливі значно

складніші алгоритми обчислень. Можливість використання значного обсягу довідкового матеріалу і відсутність практичного обмеження у складності розрахунків роблять можливим обчислення відстаней між точками в колірному просторі та розрахунок об'єму або площі в заданих межах в одиницях мінімально реєстрованих оком відмінностей. МакАдам у 25 точках на площині  $x$ ,  $y$  визначив розміри зон (еліпси МакАдама), в межах яких людське око не помічає відмінностей у кольорі. За наявності достатньо великого обсягу експериментального матеріалу для будь-якої траєкторії між двома точками в будь-якому колірному просторі (дво- або тривимірному) можливо розрахувати, яке число дотичних зон (далі для тривимірного випадку – еліпсоїди МакАдама), в межах яких людина не розрізняє відмінностей у кольорі, ця траєкторія перетинає. Для досягнення єдності вимірювань координати і параметри еліпсів (еліпсоїдів) МакАдама повинні бути загально визначеними. Відстань між двома точками визначиться числом дотичних еліпсоїдів МакАдама, які перетинає ця траєкторія. Траєкторія, яка перетинає найменше число таких зон, визначить найменшу відстань між точками. Ця відстань буде коректною мірою відмінності кольору з точки зору людського сприйняття. Очевидно, що така траєкторія не обов'язково буде прямою в існуючих колірних просторах. Аналогічно для поверхні, визначеної декількома точками, можна визначити її площу як число еліпсоїдів (еліпсів для двовимірних графіків) МакАдама, які вона перетинає. Об'єм області визначиться як число еліпсоїдів МакАдама, які містяться між тими поверхнями, що визначають цю область. Очевидно, що число еліпсів або еліпсоїдів не буде цілим, тобто число еліпсоїдів (еліпсів) є одиницею вимірювання відстані, площі або об'єму. Формально перерахунок координат кольору й областей, зафіксованих у нормативній документації (наприклад, вказаних у [1–4]), не буде потрібен, оскільки такий підхід не стосується способів визначення координат кольору, а пропонує метод визначення відстаней, площі і об'ємів в існуючих колірних просторах.

Для колірного графіка ( $x$ ,  $y$ ) МакАдам використовував як параметри велику і малу осі еліпсів та кут нахилу великої осі. Можливо, що для тривимірного колірного простору як параметрів буде достатньо третьої осі та ще одного кута. Можливо, що виявиться необхідним детальніше знання функції розподілу координат точок у колірному просторі, не відмінних за кольором від вибраної. У будь-якому випадку для визначення довжини, площі або об'єму між вибраними межами для будь-якого колірного простору потрібно буде використовувати безперервну функцію – масштаб  $M^c(X, Y, Z)$ , який переводить малий відрізок лінії, малу площу або малий об'єм поблизу кожної точки колірного простору в число еліпсоїдів МакАдама. Індекси позначають так:  $\alpha$  – кут, вибір напрямку;

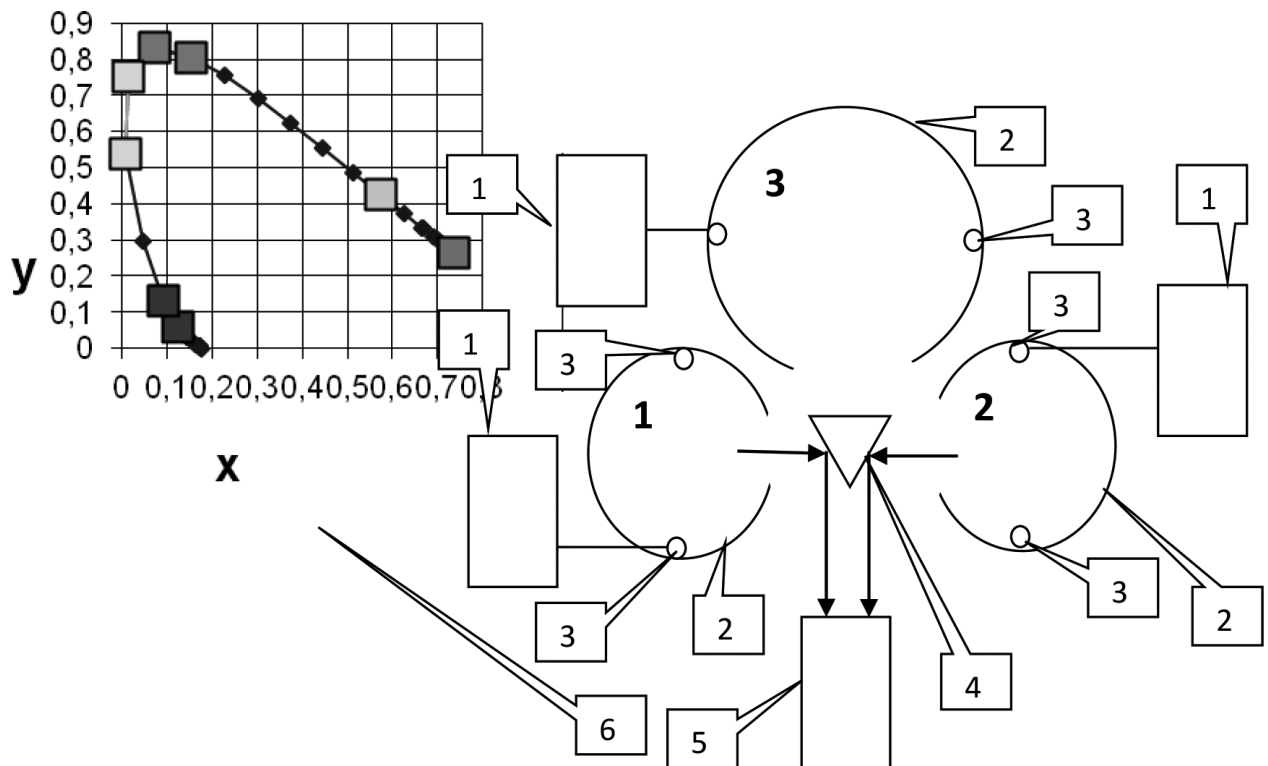


Рис. 1. Принципова схема установки для досліджень еліпсоїдів МакАдама та координати кольоровості квазімонохроматичних світлодіодів: 1 – багатоканальний регульований блок живлення; 2 – фотометричні сфери (1, 2, 3); 3 – група світлодіодів; 4 – прилад для зорового компарування; 5 – спостерігач; 6 – локус спектрально-чистих кольорів і можливі координати кольоровості світлодіодів

$i$  – вибір відстані, площі або об'єму;  $(X, Y, Z)$  – позначення колірних простору, наприклад  $(X, Y, Z)$ ,  $(L^*, a^*, b^*)$ ,  $(L^*, u^*, v^*)$  або  $(x, y)$ ,  $(u, v)$  для двовимірного простору).

Очевидно, що масштаби для різних точок і для різних напрямів відрізнятимуться. Аналогічна, але простіша для обчислень ситуація довгий час існує у фотометрії, де енергетичні параметри перетворюються у світлові з різним масштабом (відносна світлова ефективність монохроматичного випромінювання для денного зору –  $V(\lambda)$ ) для кожної довжини хвилі. Практика показала доцільність такого підходу, незважаючи на численні особливості сприйняття. За наявності загально визнаної методики і повсюдно поширеної обчислювальної техніки ускладнення обчислень не призведе до значних додаткових незручностей. Другим позитивним моментом буде відповідність результатів вимірювань і обчислень до зорової реакції людини. Ще одним позитивним моментом буде відсутність необхідності переглядати існуючі нормативні документи; координати точок у колірних просторах не переглядатимуться, по-іншому обчислюватимуться тільки відстані, площі та об'єми у всіх раніше існуючих колірних просторах.

#### Експериментальне устаткування

Для розвитку описаного підходу буде потрібно створити велику базу даних щодо еліпсів

(еліпсоїдів) МакАдама. Для її створення необхідна спеціалізована апаратура. Зрозуміло, що має бути одне джерело для створення випромінювання із заданими координатами кольору на всій площі джерела, наприклад, фотометрична сфера. Необхідне і друге джерело, за допомогою якого спостерігач може намагатися створити такий самий колір, маючи обмежене число стимулів. Потрібен також пристрій зорового компарування, розташований у світлоізольованому просторі. Необхідно забезпечити поверхню, на тлі якої відбуватиметься компарування. Потрібен пристрій, який фіксуватиме координати кольору випромінювання для всіх джерел, що використовуються. Створювати випромінювання із заданими координатами кольору можна різними засобами, наприклад, за допомогою групи вузькосмугових світлодіодів, довжини хвиль яких дозволяють максимально охопити весь колірний простір. Чим меншою буде спектральна смуга випромінювання світлодіодів, тим ближче можливо буде наблизитися до локусу спектрально-чистих кольорів, що важливо, тому що в багатьох документах допустимі області прилягають безпосередньо до локусу. Для зміни інтенсивності випромінювання необхідні стабільні джерела живлення, що регулюються, і, можливо, ослаблювачі. Спрощену принципову схему установки наведено на рис. 1. Там же умовно надані координати кольоровості умовно монохроматичних світлодіодів, за допомогою яких можна досягти синтезування майже всіх

кольорів у межах локусу спектрально-чистих кольорів. Очевидно, що необхідне більше число джерел у тих областях, де локус має помітну кривизну; на прямолінійних ділянках можна обійтися малим числом джерел. Можливо, що для визначення меж еліпсів МакАдама з боку пурпурних кольорів для частини світлодіодів доведеться забезпечити постійність відношення потужності випромінювання синіх і червоних світлодіодів. Улаштована таким чином установка дозволить зрівнювати колір 1-ї та 2-ї сфери на тлі 3-ї сфери за допомогою регульованого блоку живлення. Для такої схеми можна оцінити максимальне і мінімальне число експериментів для реалізації описаного підходу.

Враховуючи середню довжину еліпсів МакАдама і припускаючи, що розглядаються вимірювання координат кольору, можна оцінити орієнтовне число — близько трьох мільйонів. Облік регіональних, расових, статевих відмінностей, а також відмінностей, пов'язаних із розмірами об'єктів, тимчасових відмінностей може суттєво збільшити цю оцінку. Якщо вважати, що межі еліпсоїдів повинні бути позначені так само щільно, як і в експериментах МакАдама, для тривимірного випадку на один еліпсоїд буде потрібно близько 100 вимірювань. Припустимо, що спостерігач зможе зрівняти кольори за 0,1 години, тоді буде потрібно більше трьох тисяч років для виконання цієї роботи. Тому спочатку має сенс обмежитися двовимірним випадком, для цього необхідно буде задатися стандартною яскравістю у фотометричних сферах (наприклад, типовою яскравістю екрана монітора) і забезпечити постійність яскравості при зміні спектрального складу випромінювання у сферах. Число еліпсів скоротиться до 20000, число вимірювань одного еліпса — до 20. Враховуючи, що типовий термін роботи МКО над публікацією становить 4 роки, то на готовій апаратурі 10 учасників можуть упоратися з таким обсягом робіт. Якщо в процесі виконання вимірювань з'ясується, що апроксимація дає задовільні результати, то час роботи суттєво зменшиться. Використання для еліпсів ледве помітних відмінностей у кольорі ще на порядок скоротить обсяг досліджень. Створення, оптимізація, виготовлення і дослідження описаних установок, включаючи розробку програмного забезпечення, також вимагатимуть певного часу. Таким чином, цілком можливо за порівняно невеликий час позбутися проблеми нерівноконтрастності кольорних просторів для координат кольоровості. Всі існуючі нормативні документи, які, як правило, використовують двовимірні кольорні простори, не потребуватимуть змін. З'явиться тільки можливість оцінювати відстані та площі з точки зору людського сприйняття. Розповсюдження такого підходу на складніші випадки не вимагатиме помітних ідеологічних змін, але суттєво збільшить час.

### Попередні оцінки

Оскільки матеріали досліджень еліпсів МакАдама доступні, можна заздалегідь оцінити характер поведінки масштабів  $M_i^\alpha(x, y)$ , де  $\alpha$  — кут, що позначає напрям,  $i$  — відстань у вибраному напрямі ( $l$ ) або площа ( $S$ ). Очевидно, що для площі напрямом не має значення. Масштаб за довжиною легко обчислити як величину, зворотну розміру еліпсів МакАдама у вказаному напрямі. Масштаб за площею визначиться як величина, зворотна площі відповідного еліпса. Масштаби  $M_i^\alpha(x, y)$  і  $M_i^\alpha(u, v)$  за розмірністю є числом довжин еліпсів МакАдама у вибраному напрямку, поділеним на одиницю довжини у відповідному просторі. Масштаби  $M_S(x, y)$  і  $M_S(u, v)$  за розмірністю є числом еліпсів МакАдама, що поділено на одиницю площі у відповідному просторі.

У роботі [5] для 25 еліпсів із координатами кольоровості  $(x, y)$  наведено великі та малі осі еліпсів і кут нахилу великої осі до осі  $x$ . Вирішивши просте завдання з планіметрії та знаючи формулу площі еліпса, легко отримати попередні оцінки поведінки масштабів  $M_i^\alpha(x, y)$ . Оскільки координати  $(x, y)$  однозначно визначають координати рівноконтрастового кольорного простору  $(u, v)$ , аналогічні оцінки можна отримати і для нього. Враховуючи, що масштаби для просторів  $(x, y)$  і  $(u, v)$  суттєво змінюються в залежності від напрямку, спочатку було знайдено напрями — кути  $\alpha$  для простору  $(x, y)$ , для яких відношення найбільшої довжини еліпсів МакАдама до найменшої довжини еліпсів приймало найбільше і найменші значення. Для кожного напрямку обчислювалася різниця між максимальною і мінімальною довжиною еліпсів МакАдама в просторах  $(x, y)$  і  $(u, v)$ . Різниця нормувалася на середню довжину еліпсів у тому ж просторі. Змінним параметром був кут у просторі  $(x, y)$ . Результати розрахунків подано на рис. 2. Розрахунки проводилися для кутів із кроком 20 градусів. Для простору  $(x, y)$  було знайдено уточнені напрями, в яких цей параметр набував найбільших (107 градусів) і найменших (28 градусів) значень. Ці значення також вказано на графіку.

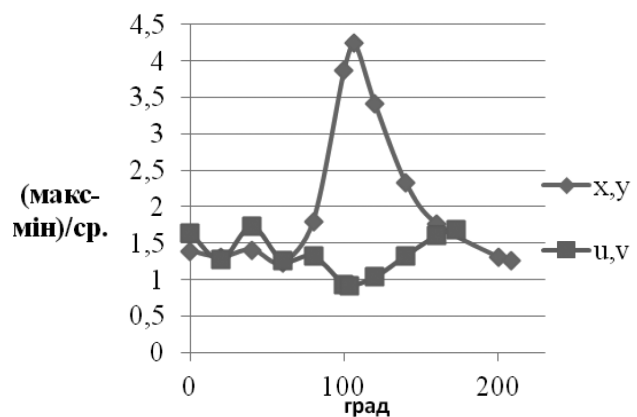


Рис. 2. Нормована різниця між максимальними і мінімальними довжинами еліпсів МакАдама для різних напрямків

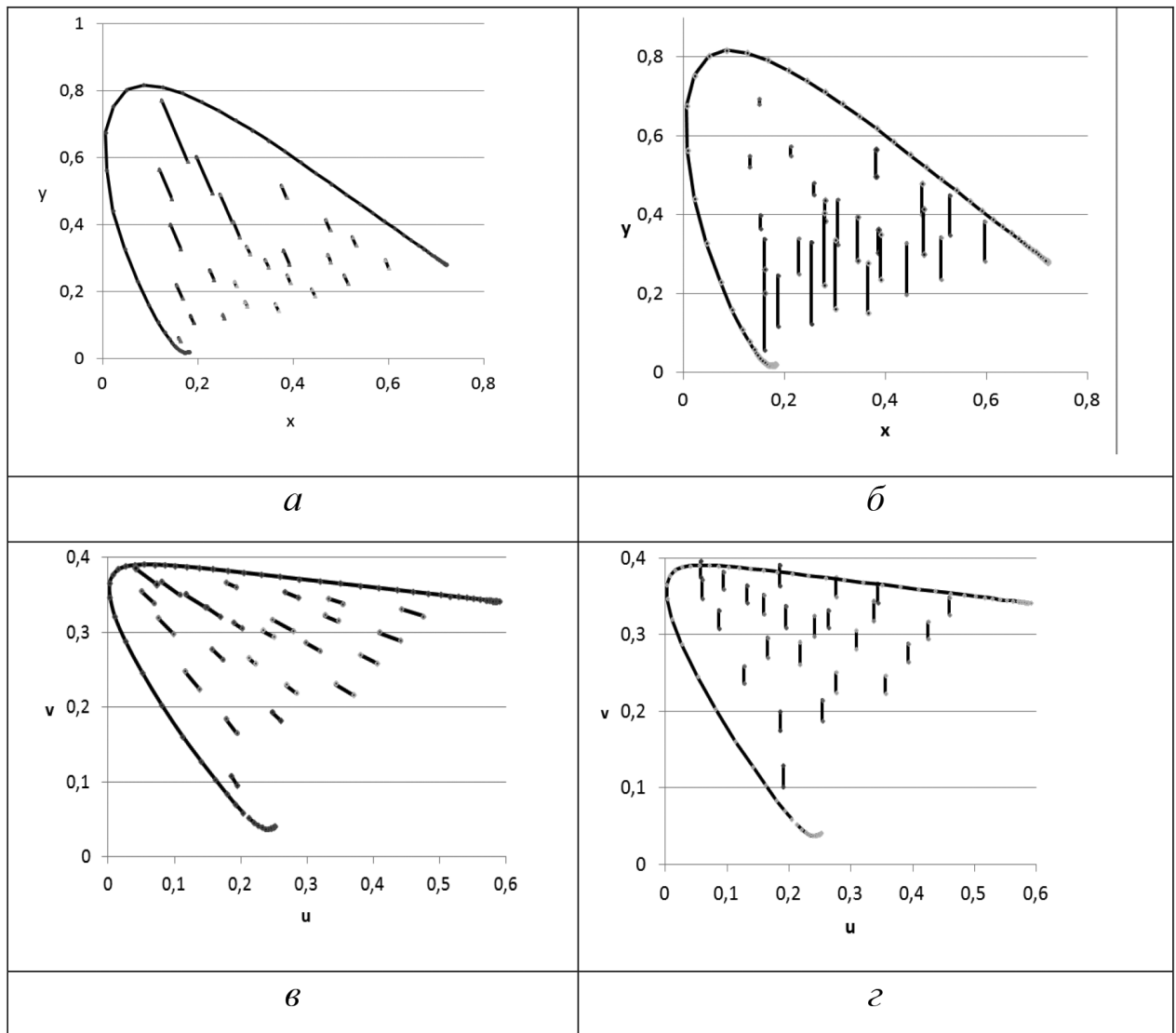


Рис. 3: а — довжина еліпсів МакАдама в просторі  $(x, y)$ , у напрямі 107 град до осі  $x$ ; б — масштаби еліпсів МакАдама в просторі  $(x, y)$ , у напрямі 107 град —  $M^{107}_i(x, y)$ ; в — довжина еліпсів МакАдама в просторі  $(u, v)$ , у напрямі 107 град (для простору  $(x, y)$ ) довжини і орієнтація тих же відрізків у просторі  $(u, v)$ ; г — масштаби еліпсів МакАдама в просторі  $(u, v)$ , у напрямі 107 град (для простору  $(x, y)$  — масштаб  $M^{107}_i(u, v)$ )

Видно, що простір  $(u, v)$  суттєво більш однорідний, ніж простір  $(x, y)$ , а у просторі  $(x, y)$  існує напрям, що явно відрізняється. На рис. 3 подано результати розрахунку довжин еліпсів у тих напрямках, де різниця між максимальними і мінімальними довжинами еліпсів МакАдама приймає найбільше значення (107 градусів), і відповідні цим напрямкам графіки  $M^a(x, y)$ .

Максимальна довжина еліпсів МакАдама  $9,6 \cdot 10^{-3}$ , мінімальна  $0,35 \cdot 10^{-3}$ , максимальна площа  $69,3 \cdot 10^{-6}$ , мінімальна  $0,93 \cdot 10^{-6}$ , розміри довжин еліпсів МакАдама у відповідних напрямках на рис. 3а та 3в збільшені в 10 разів. На рис. 3б та 3г довжина ліній від центру кожного еліпса МакАдама відповідає масштабу в цій точці та в цьому напрямку для просторів  $(x, y)$  та  $(u, v)$  відповідно. Аналогічні обчислення було виконано і для простору  $(u, v)$ . Максимальна довжина еліпсів МакАдама  $0,039 \cdot 10^{-3}$ , мінімальна  $0,013 \cdot 10^{-3}$ , максимальна площа  $0,055 \cdot 10^{-6}$ , мінімальна  $0,01 \cdot 10^{-6}$ .

На рис. 4 подано результати розрахунку довжин еліпсів у тих напрямках, де різниця між максимальними і мінімальними довжинами еліпсів МакАдама приймає найменше значення (28 градусів), і відповідні цим напрямкам графіки  $M^a(x, y)$ . Розміри довжин еліпсів МакАдама у відповідних напрямках на рис. 4а та 4в збільшені в 10 разів. На рис. 4б та 4г довжина ліній від центру кожного еліпса МакАдама відповідає масштабу в цій точці та в цьому напрямку для просторів  $(x, y)$  та  $(u, v)$  відповідно.

Аналогічні розрахунки було виконано для площ еліпсів МакАдама. На рис. 5 подано результати розрахунку масштабів  $M_s(x, y)$  і  $M_s(u, v)$ . На рис. 5а та 5б довжина ліній від центру кожного еліпса МакАдама відповідає масштабу для площ у цій точці для просторів  $(x, y)$  та  $(u, v)$  відповідно. У цих графіках масштаби  $M_s(x, y)$  і  $M_s(u, v)$  вибрані з міркувань наочності. У абсолютному вигляді масштаби наведено в таблиці. Видно, що простір  $u, v$  набагато більш рівномірний.

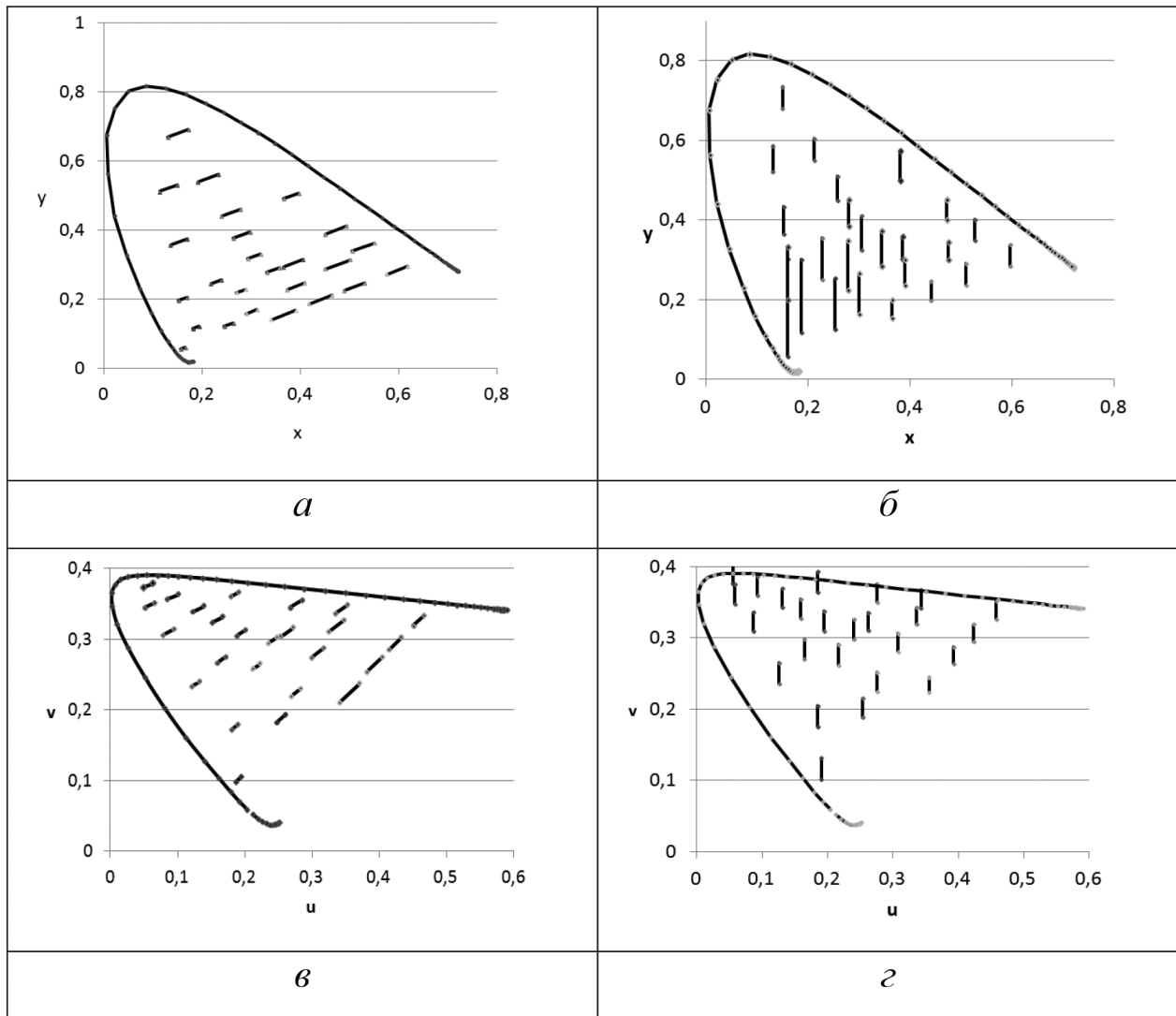


Рис. 4: а — довжини еліпсів МакАдама в просторі  $(x, y)$ , у напрямі 28 град до осі  $x$ ; б — масштаби еліпсів МакАдама в просторі  $(x, y)$ , у напрямі 28 град (масштаб  $M_1^{28}(x, y)$ ); в — довжина еліпсів МакАдама в просторі  $(u, v)$ , у напрямі 28 град (для простору  $(x, y)$ ); г — масштаби еліпсів МакАдама в просторі  $(u, v)$ , у напрямі 28 град (для простору  $(x, y)$  масштаб  $M_1^{28}(u, v)$ )

Візуалізацію повної картини лінійних масштабів унаслідок залежності від двох координат і напрямку ускладнено, тобто потрібний чотиривимірний графік. Масштаби для площ у вигляді тривимірного графіка побудувати можна, проте наочності він не дає у зв'язку зі складністю поверхонь  $M_s(x, y)$  і  $M_s(u, v)$ . Тому в таблиці наведено тільки максимальні та мінімальні чисельні значення масштабів.

Максимальні та мінімальні масштаби, розраховані за еліпсами МакАдама  $M_1^{\alpha}(x, y)$ ,  $M_1^{\alpha}(u, v)$ ,  $M_s^{\alpha}(x, y)$ ,  $M_s^{\alpha}(u, v)$

$\alpha$ , град	$M$ , у числі еліпсів МакАдама на одиницю довжини	$S$ , у числі еліпсів МакАдама на одиницю площі
	простір $(x, y)$	
109	Min $M_1^{109}(x, y)=104$	Min $M_s(x, y)=14400$
28	Max $M_1^{28}(x, y)=2860$	Max $M_s(x, y)=1070000$
простір $(u, v)$		
109	Min $M_1^{109}(u, v)=25600$	Min $M_s(u, v)=1820000$
28	Max $M_1^{28}(u, v)=76900$	Min $M_s(u, v)=1000000$

Зрозуміло, що мала кількість еліпсів МакАдама не дає можливості практично використовувати їх для апроксимації в інших точках. Залежність масштабів від координат та кутів дуже значна. Найбільш відрізняються масштаби для синьої та зеленої зон. Наприклад, для кута 107 градусів три еліпси з близькими координатами  $(x)$  (0,15, 0,152, 0,16), але різними  $(y)$  мають масштаби, що відрізняються більш ніж у 20,6 разів, а для кута 28 градусів – у 4,4 рази. Але якщо мати потрібну кількість даних, то апроксимація буде достатньо точною.

**Висновки**

Світлові та колірні вимірювання орієнтовані на сприйняття людини, в цьому їх основна особливість. Вимірювання наразі зазвичай проводяться апаратними засобами. Часто для колірних вимірювань використовуються спектральні дані. Результати вимірювань помножуються на стан-

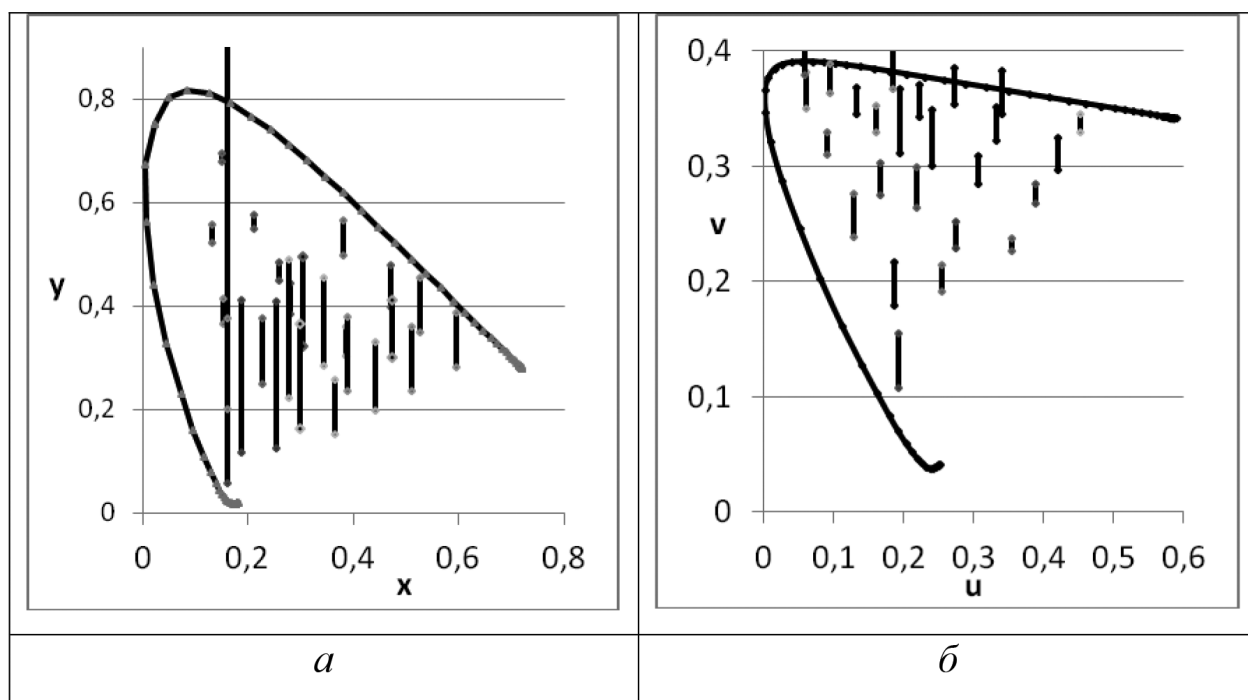


Рис. 5. Результати розрахунку масштабів  $M_s(x, y)$  і  $M_s(u, v)$  за еліпсами МакАдама: а – масштаби для площі еліпсів МакАдама в просторі  $(x, y)$ ; б – масштаби для площі еліпсів МакАдама в просторі  $(u, v)$

дартизовані криві  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  за загальнови-знаною методикою. Людське око – дуже складний орган; його поведінку, чутливість до випромінювання неможливо описати такою простою моделлю. Тому для зв'язку результатів розрахунків за даними спектральних вимірювань і чутливості людського ока до зміни кольору потрібні додаткові коефіцієнти, наприклад, запропоновані масштаби. З'ясувати, якими саме механізмами визначаються такі коефіцієнти, можливо тільки за наслідками глибокого вивчення механізмів зору. У цій роботі для зв'язку пропонується використовувати результати експериментальних вимірювань. Через багатство колірного сприйняття таких результатів потрібно чимало. Однак рішення завдання зв'язку результатів апаратних вимірювань і реакції людського ока варте таких зусиль.

Позитивним моментом при рішенні цього завдання є його яскраво виражена поетапність. У роботі наведено приблизні попередні оцінки на основі еліпсів МакАдама. Використання достатньо великого числа еліпсів дозволить провести деталізацію наведеного підходу для двовимірних просторів – координат кольоровості  $(x, y)$  і  $(u, v)$  та фіксованого рівня яскравості. Розповсюдження на тривимірний випадок (координати кольору) потребуватиме значного збільшення числа вимірювань та буде наступним етапом. Облік впливу фону та інших можливих чинників впливу вимагатиме подальшого суттєвого збільшення числа вимірювань.

Наступним позитивним моментом у запропонованому підході є незалежність окремих частин дослідження. Створення генератора кольору

з автоматичним регульованим рівнем освітленості (реалізація фотометричних сфер на рис. 1) є абсолютно незалежним технічним завданням, яке може бути затребуваним для широкого кола досліджень. Розробка програмних продуктів із можливістю послідовного підключення нових експериментальних даних про поведінку еліпсів (еліпсоїдів) МакАдама, можливістю інтерполяції даних, розрахунком відстані, довжини та об'єму в метриці, що створюється, – абсолютно незалежне завдання, вирішувати його можливо до завершення інших частин дослідження. Експериментальні дослідження та їх аналіз можуть виконуватися на будь-якому з варіантів генераторів кольору і програмного забезпечення.

Особливість застосування запропонованого підходу полягає в необхідності його міжнародного визнання. Необхідно, так само як це було при затвердженні стандартизованої залежності відносної спектральної чутливості для монохроматичного випромінювання, ухвалити узгоджене рішення про доцільність такого підходу, незважаючи на численні чинники, що впливають на сприйняття. Зрозуміло, що необхідно буде розглядати результати різних лабораторій і вибирати найбільш достовірні з них. Після всебічного обговорення можливо буде використовувати вже існуючі результати досліджень за пороговим розрізненням кольору, як зроблено в цій роботі. Для цього потрібна авторитетна організація. Розпочинати подібні роботи має сенс тільки за умови узгодженої думки провідних фахівців і організацій про доцільність початку таких робіт. Попередні дискусії в цьому випадку абсолютно необхідні.

# Создание метрики цветковых пространств на базе эллипсов МакАдама

А.Д. Купко

Национальный научный центр "Институт метрологии", ул. Миросицкая, 42, 61002, Харьков, Украина  
kupko@meta.ua

## Аннотация

Проанализирована история вопроса создания равноконтрастных цветковых пространств. Для всех существующих цветковых пространств предложено создать равноконтрастную метрику, т. е. способ определения длины, площади и объема в соответствующих пространствах, такую, которая отвечает зрительному восприятию человека. Метрика построена на базе эллипсов МакАдама, т. е. на пороговом восприятии разницы в цветах. Для каждой точки любого цветкового пространства (двух или трех измерений) определяется участок пространства вокруг каждой точки, в пределах которой человек не способен зафиксировать разницу в цвете. Участок характеризуется или эллипсом (двухмерный случай), или эллипсоидом (трехмерный случай). Количество участков вдоль линии, по плоскости или в объеме является мерой соответственно длины, плоскости или объема, т. е. задает метрику. Связь существующих систем определения цвета и зрительного восприятия человека осуществляется с помощью масштабов. Масштабы связывают длину, площадь или объем любой системы цветов со зрительным восприятием человека. Масштабы зависят от точки пространства и направления, в котором осуществляется передвижение. Вследствие этого нужно большое количество масштабов.

Предложена принципиальная схема измерений и аппаратура, с помощью которой возможно провести соответствующие измерения. Определено, какую наиболее важную часть этих работ возможно провести в течение нескольких лет. Для двухмерных пространств ( $x$ ,  $y$  и  $u$ ,  $v$ ) с помощью результатов классической работы МакАдама определены масштабы для связи длин и площадей в этих пространствах со зрительным восприятием человеческого глаза. Определены направления, в которых масштабы являются наибольшими или наименьшими.

**Ключевые слова:** колориметрия, равноконтрастное цветковое пространство, координаты цвета, масштаб, пороговое различие цвета, эллипсы МакАдама, зрительное восприятие.

## Creating color space metrics based on MacAdam ellipses

O. Kupko

National Scientific Centre "Institute of Metrology", Myronosytska Str., 42, 61002, Kharkiv, Ukraine  
kupko@meta.ua

## Abstract

The history of the issue on creation of uniform color spaces is analyzed. For all existing color spaces, it has been proposed to create a uniform metric, a method for determining the length, area and volume in the corresponding spaces, one that corresponds to the human visual perception. The metric is based on MacAdam ellipses, that is, on the threshold perception of the difference in colors. For each point of any color space (two or three measurements) is determined the area of space around each point, within which a person is not able to fix the difference in color. The area is characterized by either an ellipse (two-dimensional case) or an ellipsoid (three-dimensional case). The number of sections along a line, along a plane, or in a volume is a measure of length, a plane, or in a volume and sets a metric. The connection of the existing systems for determining color and visual perception of a person is carried out using scales. Scales associate the length, area or volume of any color system with a person's visual perception. The scale depends on the point of space and the direction in which the movement takes place. As a result, a large number of scales is needed. It is established, that as a result of the development of computing technology, a large amount of data and a large amount of computation are not a significant obstacle. A schematic diagram of the measurements and the equipment with the help of which it is possible to carry out the corresponding measurements are proposed. Estimates of the greatest labour intensity of such works are carried out. It is determined what is the most important part of these works is possible to carry out within a few years. For two-dimensional spaces ( $x$ ,  $y$  and  $u$ ,  $v$ ), using the results of the classical work of MacAdam, we determined the scales for connecting the lengths and areas in these spaces with the visual perception of the human eye. The directions in which the scales are largest or smallest are determined. Conclusions and suggestions are made.

**Keywords:** colorimetry, uniform color spaces, color coordinates, scale, threshold color difference, MacAdam ellipses, visual perception.



## Список літератури

1. ДСТУ ISO 3864–1:2005. Графічні символи. Кольори та знаки безпеки. Частина 1. Принципи проектування знаків безпеки для робочих місць та місць громадського призначення [Чинний з 01.10.2006]. 23 с.
2. ГОСТ 24179–80. Светофильтры, светофильтры-линзы, линзы, рассеиватели и отклоняющие вставки стеклянные для сигнальных приборов железнодорожного транспорта. Технические условия. 45 с.
3. ДСТУ 4100–2002. Знаки дорожні. Загальні технічні умови. Правила застосування. Київ: Держстандарт, 2002 [Чинний з 03.06.2002]. 66 с.
4. ДСТУ 4092–2002. Безпека дорожнього руху. Світлофори дорожні. Загальні технічні вимоги, правила застосування та вимоги безпеки [Чинний з 01.01.2003]. 27 с.
5. MacAdam D. Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 1942, vol. 32, issue 5, pp. 247–274.
6. MacAdam D. Projective Transformations of I.C.I. Color Specifications. *Journal of the Optical Society of America*, 1937, vol. 27, issue 8, pp. 294–299.
7. MacAdam D. Specification of small chromaticity difference. *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, issue 1, pp. 18–26.
8. MacAdam D. The graphical representation of small color differences. *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, issue 12, pp. 675–679.
9. Джадд Д., Вышецкий Г. Цвет в науке и технике. Москва, 1978. 592 с.
10. Купко О.Д. Кількісний метод оцінки якості кольору на екранах. *Метрологія та прилади*. 2018. № 6. С. 39–46.
11. CIE 15.3:2004. Colorimetry. Third edition. 82 p.
12. Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using CIE System ASTM E 308–01. 32 p.
2. State Standard 24179–80. Svetofiltry, svetofiltry-linzy, linzy, rasseivатели i otklonyayushie vstavki steklyannye dlya signalnyh priborov zheleznodorozhnogo transporta. Tehnicheskie usloviya [Light filters, light filters-lenses, lenses, diffusers and deflecting inserts glass for signaling devices for railway transport. Technical conditions]. 45 p. (in Russian).
3. State Standard 4100–2002. Znaki dorozhni. Zagalni tehnicni umovi. Pravila zastosuvannya [Road signs. General specifications. Rules of application]. Kiev, Gosstandart, 2002. 66 p. (in Ukrainian).
4. State Standard 4092–2002. Bezpeka dorozhnogo ruhu. Svitlofori dorozhni. Zagalni tehnicni vimogi, pravila zastosuvannya ta vimogi bezpeki [Road safety. Traffic lights. General technical requirements, correct application and safety requirements]. 27 p. (in Ukrainian).
5. MacAdam D. Visual sensitivities to color differences in daylight. *Journal of the Optical Society of America*, 1942, vol. 32, issue 5, pp. 247–274.
6. MacAdam D. Projective Transformations of I.C.I. Color Specifications. *Journal of the Optical Society of America*, 1937, vol. 27, issue 8, pp. 294–299.
7. MacAdam D. Specification of small chromaticity difference. *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, issue 1, pp. 18–26.
8. MacAdam D. The graphical representation of small color differences. *Journal of the Optical Society of America*, 1943, vol. 33, issue 12, pp. 675–679.
9. Djudd D, Wyszecki G. *Tsvet v nauke i tekhnike* [Color in business, science and industry]. Moscow, 1978. 592 p. (in Russian).
10. Kupko O.D. Kilkistnyi metod otsinky yakosti koloru na ekranakh [Quantitative method of estimation of the quality of color on the screens]. *Metrolohiia ta Prylady*, 2018, no. 6, pp. 39–46 (in Ukrainian).
11. CIE 15.3:2004. Colorimetry. Third edition. 82 p.
12. Standard Practice for Computing the Colors of Objects by Using CIE System ASTM E 308–01. 32 p.

## References

1. State Standard 3864–1:2005. Grafichni simboli. Kolori ta znaki bezpeki. Chastina 1. Principi