

О. А. ГАЛУЗА, О. В. КОСТЮК, А. О. САВЧЕНКО, А. А. БОЙКО

КІЛЬКІСНЕ ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КРИТЕРІЇВ КОЛІРНОЇ БЛИЗЬКОСТІ ОБ'ЄКТІВ З ВІДОМИМИ СПЕКТРАМИ

Робота присвячена проблемі порівняння об'єктів за кольором. Розглянуто таку постановку задачі: серед множини об'єктів необхідно знайти такий об'єкт, колір якого найбільш схожий на колір заданого об'єкта. При цьому вважається, що для кожного об'єкта відомий тільки його спектр (пропускання, відбиття чи випромінювання), що є вичерпною характеристикою кольору об'єкта. Крім того, вважається відомим спектр джерела випромінювання. Використання стандартних методів визначення колірних відмінностей показало, що задача немає однозначного розв'язку. Запропоновано два підходи до її вирішення: перший заснований на переході від спектру до колірних просторів з подальшим обчисленням евклідової відстані, а другий – на безпосередньому порівнянні спектрів як функціональних залежностей інтенсивності від довжини хвилі. В рамках кожного з підходів запропоновано два критерії «схожості» об'єктів за кольором, та запропоновано оригінальний підхід до оцінки ефективності цих критеріїв. Цей підхід ґрунтується на використанні експертних оцінок колірної близькості зразків скла з відомими спектрами пропускання зі стандартного набору. Для кожного зразка з набору експерти відбирали найближче за кольором скло з тих, що залишилися, після чого сформувався узагальнену думку експертів. Для отримання оцінки якості кожного з критеріїв, по кожному з них і для кожного тестового скла, решта зразків ранжувалися в порядку збільшення колірної відстані до даного досліджуваного скла. Після цього результати роботи критеріїв порівнювалися з узагальненою думкою експертів. Щоб зробити результат порівняння «нечітким», для кожного тестового скла запропоновано розглядати множину з п'яти найближчих за кольором зразків (по кожному з критеріїв). Отримано результуючі оцінки ефективності кожного з критеріїв для набору з 89 стекол та запропоновано підхід до побудови більш ефективних комплексних критеріїв.

Ключові слова: кольоровий зір, кольорова близькість об'єктів, колірні моделі, спектр, порівняння спектрів, багатокритеріальна оптимізація.

А. А. ГАЛУЗА, О. В. КОСТЮК, А. А. САВЧЕНКО, А. А. БОЙКО

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИТЕРИЕВ ЦВЕТОВОЙ БЛИЗОСТИ ОБЪЕКТОВ С ИЗВЕСТНЫМИ СПЕКТРАМИ

Работа посвящена проблеме сравнения объектов по цвету. Рассмотрена следующая постановка задачи: среди множества объектов необходимо найти такой объект, цвет которого наиболее похож на цвет заданного объекта. При этом предполагается, что для каждого объекта известен только его спектр (пропускания, отражения, излучения), который является исчерпывающей характеристикой цвета объекта. Кроме того, предполагается известным спектр источника излучения. Использование стандартных методов определения цветовых различий показало, что задача не имеет однозначного решения. Предложено два подхода к ее решению: первый основан на переходе от спектра к цветовым пространствам с последующим вычислением евклидова расстояния, а второй – на непосредственном сравнении спектров как функциональных зависимостей интенсивности от длины волны. В рамках каждого из подходов предложено два критерия «схожести» объектов по цвету, и предложен оригинальный подход к оценке эффективности этих критериев. Этот подход основан на использовании экспертных оценок цветовой близости образцов стекол с известными спектрами пропускания из стандартного набора. Для каждого образца из набора эксперты отбирали ближайшее по цвету стекло из оставшихся, после чего формировалось обобщенное мнение экспертов. Для получения оценки качества каждого из критериев, по каждому из них и для каждого тестового стекла, остальные образцы ранжировались в порядке увеличения цветového расстояния до данного исследуемого стекла. После этого результаты работы критериев сравнивались с обобщенным мнением экспертов. Чтобы сделать результат сравнения «нечетким», для каждого тестового стекла предложено рассматривать множество из пяти ближайших по цвету стекол (по каждому из критериев). Получены результирующие оценки эффективности каждого из критериев для набора из 89 стекол и предложен подход к построению более эффективных комплексных критериев.

Ключевые слова: цветное зрение, цветовая близость объектов, цветовые модели, спектр, сравнение спектров, многокритериальная оптимизация.

A. A. GALUZA, O. V. KOSTIUK, A. A. SAVCHENKO, A. A. BOIKO

QUANTITATIVE COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF THE COLOR PROXIMITY CRITERIA OF OBJECTS WITH KNOWN SPECTRA

The work is devoted to the problem of comparing objects by color. The following statement of the problem is considered: among the set of objects it is necessary to find such an object, the color of which is most similar to the color of the given object. It is assumed that for each object only its spectrum (transmission, reflection, radiation) is known, which is an exhaustive characteristic of the color of the object. In addition, the spectrum of the radiation source is assumed to be known. The use of standard methods for determining color differences has shown that the problem does not have an unambiguous solution. Two approaches to its solution have been proposed: the first is based on the transition from the spectrum to color spaces with the subsequent calculation of the Euclidean distance, and the second is based on a direct comparison of the spectra as functional dependences of the intensity on the wavelength. Within each of the approaches, two criteria for the "similarity" of objects in color are proposed, and an original approach to assessing the effectiveness of these criteria is proposed. This approach is based on the use of expert assessments of the color proximity of glass samples with known transmission spectra from a standard set. For each sample from the set, experts selected the glass closest in color from the remaining ones, after which a generalized opinion of experts was formed. To obtain an assessment of the quality of each of the criteria, for each of them and for each test glass, the remaining samples were ranked in order of increasing color distance to the given test glass. After that, the results of the criteria were compared with the generalized opinion of experts. To make the comparison result "fuzzy", for each test glass it was proposed to consider a set of five glasses closest in color (for each of the criteria). The resulting estimates of the effectiveness of each of the criteria for a set of 89 glasses are obtained and an approach to the construction of more effective complex criteria is proposed.

Key words: color vision, color proximity of objects, color models, spectrum, spectra comparison, multi-criterial optimization.

Вступ. Для людини колір – одна з найважливіших характеристик предметів навколишнього світу. Крім естетичної цінності, колір предметів має велику інформаційну цінність. Наприклад, колір харчових продуктів містить інформацію про їх якість [1], колір слизових оболонок пов'язаний зі станом здоров'я людини чи тварини

[2], відтінки дорогоцінних каменів та мінералів дозволяють судити про їх походження та композиційні характеристики [3] тощо. З іншого боку, у дизайні, криміналістиці, текстилі, поліграфії тощо часто виникає задача вибору об'єктів, подібних за кольором до даного об'єкта. Наприклад, відомо, що стекла однієї марки, але з різних партій, дещо відрізняються за кольором [4]. Відповідно, дизайнеру може знадобитися знайти вітраж з різних партій, який за кольором максимально наближений до наявного. Навпаки, криміналіст повинен визначити партію, з якої виходить конкретний зразок скла. Порівнюючи колір слизової оболонки пацієнта з атласом кольору слизової для різних патологій, можна поставити правильний діагноз [5].

Людське око може розрізнити до 10 мільйонів відтінків кольору, і навіть незначна різниця в кольорі може здатися нам помітною. Водночас людське сприйняття кольору відносно, тобто людина чітко бачить різницю кольорів двох сусідніх об'єктів, але не може відтворити колір об'єкта, який вона бачила раніше. Крім того, сприйняття кольору людиною дуже індивідуальне і залежить від багатьох об'єктивних та суб'єктивних факторів. Тому люди не є найкращим інструментом кількісного аналізу кольору [6].

Аналіз останніх досліджень. Для об'єктивного кількісного опису кольору були створені різні спеціальні математичні моделі, так звані *кольорові простори (КП)*, які дозволяють розглядати колір як точку у *багатовимірному* (зазвичай *тривимірному*) просторі [7]. Такі уявлення дозволяють використовувати *математичні методи* для роботи з кольором, зокрема для вимірювання відстані між кольорами. Однак виявляється, що навіть моделі, спеціально створені для вимірювання кольорних відмінностей, дають різні результати та мають обмежену сферу застосування [8].

Колір предметів є наслідком того факту, що кожен з них має унікальний *спектр пропускання* (або *випромінювання, поглинання, відбиття*). Спектр однозначно визначає колір об'єкта (але не навпаки), відповідно, саме спектр є вичерпною характеристикою кольору. Тому, швидше за все, точніше порівнювати кольори об'єктів, порівнюючи безпосередньо їх спектри. На практиці спектри вимірюються за допомогою спеціальних оптичних приладів: *спектрофотометрів* та *рефлектометрів*. Пряме оцінювання спектрального кольору – це безконтактний і неруйнівний метод, який є значною перевагою з практичної точки зору.

Особлива складність у порівнянні кольорів полягає у виділенні однакових кольорів (відтінків). Це пояснюється нерівномірністю всіх наявних КП [9]. Нерівномірність КП означає, що рівні геометричні відстані відповідають не різним кольоровим відмінностям у різних областях КП. Спроби вирішити цю проблему йдуть шляхом побудови нелінійних перетворень і поки не привели до остаточного успіху. Це підтверджується великою кількістю різних методів розрахунку невеликих кольорних відмінностей (понад 100), створених для різних застосувань [10, 11]. Ці методи регулярно оновлюються, що підтверджує актуальність цієї проблеми.

В якості критерію наближеності об'єктів за кольором можна використати або відстань між кольорами, як точками у відповідних КП, або близькість їх спектрів безпосередньо. Відповідно, можна запропонувати численну кількість таких критеріїв, але залишається питання, який з них найкраще відповідає дійсності.

Враховуючи вище сказане, актуальною **задачею** є вирішення проблеми вибору найкращої підмножини об'єктів, подібних за кольором до даного, за умови, що всі об'єкти визначені їх спектрами. **Метою роботи** є розробка методології кількісного порівняння критеріїв та формулювання рекомендації щодо їх використання у розглянутій проблемі.

Постановка задачі. Нехай для деякого об'єкта r задано спектр (пропускання або відбиття) $t(\lambda)$. Надалі цей об'єкт буде називатися *опорним об'єктом*. Нехай також буде задано множину $S = \{s_k\}$ ($k = 1 \dots K$) із K об'єктів (далі – *тестові об'єкти*). Кожен з тестових об'єктів також визначається своїм спектром $T_k(\lambda)$ ($k = 1 \dots K$). Необхідно вибрати з множини S об'єкт, найбільш близький за кольором до опорного об'єкта r . Таким чином, ми отримуємо задачу оптимізації:

$$J(t(\lambda), T_k(\lambda)) \rightarrow \min_{k=1 \dots K}, \quad (1)$$

де $J(x(\lambda), y(\lambda))$ є мірою відмінності кольору об'єктів з довільними спектрами $x(\lambda)$ і $y(\lambda)$.

Для розрахунків отримаємо табульовані значення спектрів із кроком $\Delta\lambda$ на проміжку $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. Оскільки ми маємо справу з видимим діапазоном, ми встановили $\lambda_{\min} = 380$ нм, $\lambda_{\max} = 720$ нм. Потім представляємо спектр еталонного об'єкта у вигляді вектору:

$$t = (t_i) = (t(\lambda_i)), \quad i = 1 \dots N \quad (2)$$

і набір спектрів тестових об'єктів у вигляді матриці:

$$T = (T_{i,k}) = T_k(\lambda_i), \quad i = 1 \dots N, \quad k = 1 \dots K, \quad (3)$$

де $\lambda_i = \lambda_{\min} + (i-1)\Delta\lambda$ – довжина хвилі; $N = \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{\Delta\lambda} + 1$ – кількість табульованих значень λ ; K – кіль-

кість тестованих об'єктів. У цьому позначенні функціонал (1) набуває вигляду:

$$J(t, T) \rightarrow \min_{k=1 \dots N} . \quad (4)$$

Таким чином, для завершення формальної постановки проблеми необхідно побудувати критерій J . Оскільки йдеться про кольори, здається розумним використати одну із стандартних метрик у відповідному КП як міру наближеності (відмінності) кольорів. У рамках цього підходу необхідно перетворити спектри об'єктів до точок у певному векторному просторі (звичай тривимірному) з подальшим вимірюванням відстані між цими точками. Однак, як зазначалося вище, таких КП та показників існує велика кількість. Велика кількість просторів і метрик пов'язана з емпіричним характером їх побудови і свідчить про відсутність на даний момент єдиного «правильного» підходу до вимірювання різниці кольорів. З іншого боку, здається розумним безпосередньо порівнювати спектри об'єктів як функціональні залежності інтенсивності випромінювання від довжини хвилі.

Отже, у цьому дослідженні для аналізу було обрано чотири критерії ($J_1 \dots J_4$) близькості кольорів двох об'єктів, заданих своїми спектрами. Критерії J_1 і J_2 ґрунтуються на подібності спектральних кривих, а J_3 і J_4 – на вимірюванні евклідової відстані у двох різних КП.

Коефіцієнт кореляції Пірсона використовується у якості критерію J_1 як міра різниці між двома функціональними залежностями [12]:

$$J_1(t, T_k) = -\sum_{i=1}^N \frac{(\bar{t} - t_i)(\bar{T}_k - T_{i,k})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\bar{t} - t_i)^2 \sum_{i=1}^N (\bar{T}_k - T_{i,k})^2}} \rightarrow \min_{k=1 \dots N} , \quad (5)$$

де верхню ризикою позначено усереднення відповідного значення.

Критерієм J_2 є середньоквадратична різниця спектрів:

$$J_2(t, T_k) = \sum_{i=1}^N (t_i - T_{i,k})^2 \rightarrow \min_{k=1 \dots N} . \quad (6)$$

Критерії J_3 і J_4 – це евклідова відстань між векторами відповідно до кольорових просторів CIE XYZ та CIE Lab [7].

Вибір цих двох просторів обумовлений наступним. XYZ, еталонна колірна модель, є головною моделлю для більшості інших КП, що використовуються в технічних областях. При розробці цієї моделі було враховано особливості сприйняття кольорів людиною та використано функції зіставлення кольорів стандартного колориметричного спостерігача. У свою чергу, простір CIE Lab є одним з найбільш однорідних просторів, і тому широко використовується для вимірювання невеликих колірних відмінностей у різних сферах застосування [7]. Наприклад, стандартний метод аналізу стійкості кольору текстильних матеріалів використовує цей простір [13].

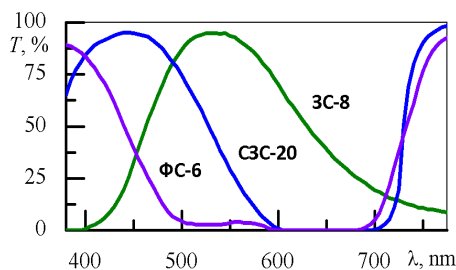


Рис. 1 – Фотографічне зображення зразків (а) і спектри пропускання стекол 3C8, 3C20 і 3C6 (б).

У нашому випадку кольори як точки в колірному просторі насправді є проєкціями точок з простору $C_{[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]}$ функцій, які є неперервними в інтервалі $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$ спектру у простір R^3 . Або, у випадку дискретного представлення спектрів, проєкціями від R^N до R^3 . Спосіб побудови такої проєкції визначає конкретний КП. Математичні перетворення «спектр \rightarrow CIE XYZ \rightarrow CIE Lab» досить громіздкі і наведені у численних джерелах [7, 8], тому ми не наводимо їх тут.

Після перетворень «спектр \rightarrow CIE XYZ» та «CIE XYZ \rightarrow CIE Lab» колір опорного об'єкта r представляється у вигляді векторів $t^{XYZ} = (t^X, t^Y, t^Z)$ і $t^{Lab} = (t^L, t^a, t^b)$ у відповідних просторах. Аналогічно, множина S тестових об'єктів представлена $(K \times 3)$ –матрицею:

$$T^{XYZ(Lab)} = \left(T_k^{X(L)}, T_k^{Y(a)}, T_k^{Z(b)} \right), \quad K = 1 \dots K . \quad (7)$$

Відповідно критерії J_3 і J_4 набувають вигляду:

$$J_{3(4)}\left(t^{XYZ(Lab)}, T_k^{XYZ(Lab)}\right) = \left|t^{XYZ(Lab)} - T_k^{XYZ(Lab)}\right| \rightarrow \min_{k=1...N}, \quad (8)$$

де $|\cdot|$ позначено евклідову відстань у R^3 .

Таким чином, сформульовано 4 критерії (5) – (8) для вибору об'єкта з множини S , найближчого за кольором до опорного об'єкта r . S задається або набором спектрів (3), або набором колірних координат (7). Далі сформулюємо підхід до оцінки ефективності критеріїв з метою вибору найкращого критерію.

Оцінка ефективності критеріїв для порівняння кольорів об'єктів. В якості тестових об'єктів використовувались стекла із набору $K = 89$ стандартних кольорових стекол (фільтрів) з відомими спектрами пропускання [4]. Об'єктами були пластини 40×40 мм товщиною $2 \div 3$ мм. На рис. 1 показано фотографії кількох стекол (рис. 1, а) та відповідні спектри пропускання (рис. 1, б). Стекла в цьому наборі є відсічними та смуговими фільтрами для всього видимого діапазону довжин хвиль, що дозволяє використовувати різноманітні кольори та відтінки. Кожне скло у S ідентифікується серійним номером i ($i = 1...K$) та унікальною текстовою назвою (марка скла).

Для оцінки ефективності побудованих критеріїв було використано експертні оцінки. Із множини S було вибрано підмножину R ($P = |R| = 43$) еталонних об'єктів. Для кожного об'єкта $r \in R$, група з 5 експертів обрали найближче за кольором скло з решти підмножини S/r . Для отримання експертних оцінок ми використовували установку, описану в [14], зі стандартним джерелом світла D65 (Philips Master TL-D 90 DeLuxe 18W/965).

Для узагальнення висновків експертів використовувався стандартний метод [15]. В результаті утворюється множина E пар:

$$E = \left\{ \left(z_j, w_j \right) \right\}, \quad j = 1...P, \quad (9)$$

де z_j і w_j – марки j -го еталонного скла та його найближчого аналога з S/r (відповідно до думки експертів) відповідно. Фрагмент множини E показано у табл. 1.

Таблиця 1 – Фрагмент множини E
(j – номер елемента з множини R)

j	z_j	w_j
1	ЖЗС-1	ЗС-1
2	ЖЗС-5	ЖЗС-6
3	СЗС-20	СЗС-22
.....		
42	СС-5	СС-8
43	ФС-6	ФС-7

M залежить від конкретної задачі. Оскільки значення M жодним чином не впливає на всі подальші міркування, встановимо $M = 5$. Таким чином, у цій роботі ми шукаємо множину $Top5 \subset S/r$.

У рамках цього підходу кожному j -му еталонному склу ставимо у відповідність множину $Top5_j^h$ з п'яти елементів (марки 5 найближчих стекол) для кожного критерію J_h ($h = 1...4$):

$$Top5_j^h = \left(k_{j1}^h, k_{j2}^h, \dots, k_{j5}^h \right) = \left(k_{jl}^h \right), \quad j = 1...P, \quad (10)$$

де $l = 1...5$ – це місце, де скло k_j^h знаходиться у $Top5_j^h$ за критерієм J_h .

Таблиця 2 – Набори $Top5_j^h$ для деяких еталонних стекол j для кожного з критеріїв J (z_j – марка j -го скла, а w_j – марка для j -го скла за думкою експертів) множини E (j – номер елемента з множини R)

j	z_j	w_j	J_1	J_2	J_3	J_4
2	ЖЗС-5	ЖЗС-6	ЖЗС-10, ЖЗС-6, ЖС-16, ЖС-12, ЖС-3	ЖЗС-10, ОС-6, ЖЗС-6, ЖС-16, ЖС-12	ОС-6, ЖЗС-10, ЗС-8, НС-6, ПС-5	ЖС-12, ЖС-19, ЖЗС-10, ЗС-8, ОС-6
3	ЖЗС-13	ЖЗС-17	ЖЗС-12, ЗС-2, ЖЗС-1, ЗС-10, ЗС-1	ТС-4, ТС-2, ЖЗС-12, НС-13, НС-10	КС-18, КС-19, КС-17, ИКС-1, ТС-6	ТС-4, ТС-2, НС-13, ТС-6, ТС-7
7	ЖС-16	ЖС-17	ЖС-19, ЖЗС-5, ЖС-17, ЖС-12, ЖЗС-6	ЖС-17, ЖС-12, ЖЗС-5, ЖЗС-10, ОС-6	ЖС-17, ЖС-19, ЖС-12, ЖЗС-10, ОС-6	ЖЗС-6, ЖЗС-18, ОС-6, ЖЗС-5, ЖС-19
12	ЗС-8	ЖЗС-9	ЗС-1, ЖЗС-9, ЖЗС-1, ТС-2, ЗС-11	ЖЗС-9, ЖЗС-18, СЗС-16, НС-7, ЖЗС-6	ЖЗС-18, ЖЗС-6, ЖЗС-5, НС-1, СЗС-16	ЖЗС-5, ЖС-12, ЖЗС-10, ЖС-19, ЖЗС-9

Продовження таблиці 2						
15	ИКС-1	УФС-6	ФС-7, НС-1, УФС-8, ФС-6, УФС-6	НС-10, НС-13, ТС-4, ТС-2, ЖЗС-13	ТС-6, ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5	ТС-6, ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5
24	ПС-8	ОС-14	КС-11, КС-10, КС-13, КС-14, ТС-7	КС-13, КС-11, КС-10, КС-14, ОС-5	КС-11, КС-10, ТС-1, ЖЗС-1, ЗС-10	КС-14, КС-13, КС-15, КС-11, КС-17
29	СЗС-20	СЗС-22	СС-1, СС-13, СС-9, СС-5, СС-2	СС-1, СС-2, ФС-6, СЗС-8, СЗС-22	СЗС-22, СЗС-8, СС-2, СЗС-9, СЗС-3	СЗС-9, СЗС-22, СЗС-8, СЗС-3, СЗС-21
33	СС-4	СС-15	ФС-6, ПС-15, СС-2, ПС-11, ФС-7	ФС-6, ПС-15, ПС-11, ФС-7, НС-3	ПС-11, СС-14, ПС-15, СС-8, СС-11	ПС-11, СС-11, СС-14, ПС-15, СС-5
37	ТС-1	ТС-7	КС-18, КС-19, КС-17, НС-13, ТС-6	НС-9, УФС-8, ТС-7, НС-3, НС-8	НС-3, КС-13, НС-9, ЗС-6, ЗС-11	НС-3, ТС-4, ЖЗС-12, НС-13, ТС-2
42	ФС-1	ФС-7	СС-11, СС-14, СС-9, ФС-6, СС-8	СС-14, СС-11, СС-8, СС-5, ПС-13	ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5, УФС-6	ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5, УФС-6
43	ФС-6	ФС-7	ФС-7, СС-4, СС-11, ИКС-1, ФС-1	СС-4, ФС-7, ФС-1, СС-11, ПС-15	ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5, УФС-6	ТС-7, УФС-1, УФС-2, УФС-5, УФС-6

У табл. 2 наведені множини $Top5_j^h$ для деяких еталонних стекол відповідно до всіх критеріїв J_h ($h = 1...4$). З табл. 2 видно, що множини $Top5_j^h$ є різними для всіх h і j . Скло w_j (вибір експертів) рідко займає перше місце у $Top5_j^h$, більше того, для деяких стекол z_j експертна оцінка w_j взагалі не потрапила до $Top5$.

Обчисливши $Top5_j^h$ для кожного скла j ($j = 1...P$) та для кожного критерію J_h (табл. 2), порівняємо їх з відповідними експертними оцінками (табл. 1). Для цього нами запропоновано такий підхід. Задаємо числові оцінки $Est_j^h \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$ за критеріями J_h ($h = 1...4$) для кожного скла z_j . Якщо скло w_j , рекомендоване експертами як найближче за кольором до скла j , знаходиться на першому місці у $Top5_j^h$ $w_j = k_{j1}^h$, критерій h отримує 5 балів, якщо $w_j = k_{j5}^h$, то 1 бал. Якщо вибір експертів w_j не належить $Top5_j^h$, то критерій отримує 0 балів. Тобто, відповідно до (10), якщо $w_j = k_{jl}^h$, то $Est_j^h = \max(0, M - l + 1)$.

У табл. 3 представлено оцінки ефективності всіх критеріїв для еталонних стекол з табл. 2. Значення Est_j^h вважаються мірою узгодженості критерію J_h та експертних оцінок w_j ($j = 1...P$).

Таблиця 3 – Оцінки Est_j^h для деяких стекол j

j	z_j	w_j	J_1	J_2	J_3	J_4
2	ЖЗС-5	ЖЗС-6	<u>4</u>	3	0	0
3	ЖЗС-13	ЖЗС-17	0	0	0	0
7	ЖС-16	ЖС-17	3	<u>5</u>	<u>5</u>	0
12	ЗС-8	ЖЗС-9	4	<u>5</u>	0	1
15	ИКС-1	УФС-6	1	0	0	0
19	НС-1	НС-6	0	1	2	<u>5</u>
23	ПС-5	ПС-7	0	0	0	0
24	ПС-8	ОС-14	0	0	0	0
29	СЗС-20	СЗС-22	0	1	<u>5</u>	5
33	СС-4	СС-15	0	0	0	0
37	ТС-1	ТС-7	0	3	0	0
42	ФС-1	ФС-7	0	0	0	0
43	ФС-6	ФС-7	<u>5</u>	4	0	0

Аналіз табл. 3 показує, що деякі стекла рекомендовано лише за першим (наприклад, №№ 2 та 43), лише за другим (наприклад, №№ 7, 12 та 37), лише за третім (наприклад, № 29) або лише за четвертим (наприклад, № 19) критерієм. Для деяких стекол кілька критеріїв дали однакові результати (наприклад, № 7). Для 5 стекол ($j = 3, 23, 24, 33, 42$) відповідність взагалі не вдалося знайти. Загалом, найменша кількість помилок було допущено за критерієм J_2 (6 помилок), а найбільша за критерієм J_3 (14 помилок). Більш того, різні критерії дають «правильні» результати для різних стекол.

Результати оцінки ефективності критеріїв. Як інтегральну оцінку якості кожного критерію на всій мно-

жині S знаходимо середню оцінку Est^h по всій множині R еталонних стеклол:

$$Est^h = \frac{1}{P} \sum_{j=1}^P Est_j^h. \quad (11)$$

Інтегральні (на множині R) оцінки ефективності для всіх критеріїв наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Інтегральні оцінки ефективності критеріїв

Критерій	J_1 (Пірсона)	J_2 (СКВ)	J_3 (XYZ)	J_4 (Lab)
Est^h	2.79	3.26	2.74	2.93

Із таблиці видно, що всі критерії мають досить низький середній бал. Найкращий результат має критерій J_2 (6), заснований на середньоквадратичній різниці спектрів (3,26 бала). Найближчий до найліпшого результату критерій J_4 (8), заснований на вимірюванні колірної відстані в просторі CIE Lab, отримав лише 2,93 бали, хоча це, по суті, один із найпоширеніших методів вимірювання малих колірних відмінностей. Решта критеріїв J_1 (Пірсон) та J_3 (CIE XYZ) мають приблизно однаковий результат. Водночас слід зазначити, що для деяких зразків найкращі результати дали J_1 $j = (15, 43)$ або J_3 ($j = 29$).

Перспективи подальших досліджень. Таким чином, неможливо вказати єдиний ефективний критерій. Зважаємо, однак, що за окремими критеріями знайдено менше відповідних стеклол, ніж хоча б за одним критерієм. Тому, на думку авторів, видається доцільним побудувати єдиний комбінований критерій на основі критеріїв, розглянутих у цій роботі. Крім того, відсутність очевидного лідера серед розглянутих критеріїв дозволяє зробити висновок, що задача порівняння за кольором об'єктів, визначених їх спектрами, ще далека від вичерпного рішення.

Висновки. В роботі розглянуто задачу вибору колірної аналога (або множини аналогів) об'єкта з набору доступних, у випадку, коли всі об'єкти задані своїми спектрами пропускання.

Розглянуто чотири критерії порівняння за кольором подібних об'єктів. Два з них засновані на порівнянні безпосередньо спектральних кривих (середньоквадратична різниця та критерій Пірсона), а два – на колірній відстані у просторах CIE XYZ та Lab.

Запропоновано підхід до порівняння ефективності різних критеріїв вибору найближчого за кольором об'єкта з множини заданих. Запропонований метод заснований на порівнянні з вибором експерта. Виявилось, що найкращий середній результат дає критерій, заснований на середньоквадратичному порівнянні спектрів об'єктів.

Показано, що всі розглянуті критерії в даній задачі дають досить низький ступінь збігу з експертними оцінками. З іншого боку, показано, що множини еталонних об'єктів, на яких помиляється кожен із критеріїв, різні. Цей результат є підставою для побудови більш складних векторних критеріїв (заснованих на всіх розглянутих критеріях), а також для пошуку нових критеріїв порівняння об'єктів в розглянутих умовах.

Список літератури

1. Lee K., Baek S., Kim D., Seo J. A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek sheet and RGB color analysis // Food Packaging and Shelf Life. – 2019. - Vol. 19. – P. 40 – 46.
2. Schafer D., Glass S. A guide to yellow oral mucosal entities: etiology and pathology // Head and Neck Pathology. – 2019. – Vol. 13. – P. 33 – 46.
3. Sun I., Schmitt A., Häger T., Schneider M., Pappalardo L., Russo M. Natural blue zircon from Vesuvius // Mineralogy and Petrology. – 2021. – Vol. 115. – P. 21 – 36.
4. ГОСТ 9411 – 91. Стекло оптическое цветное. Технические условия. – М. : Комитет стандартизации и метрологии СССР, 1992. – 48 с.
5. Latini G., De Felice C., Barducci A., Chitano G., Pignatelli A., Grimaldi L., Tramacere F., Laurini R., Andreassi M., Portaluri M. Oral mucosal color changes as a clinical biomarker for cancer detection // European Journal of Cancer Prevention. – 2012. – Vol. 21. – issue 4. – P. 360 – 366.
6. Kremers J., Baraas R., Marshall N. Human color vision. – Cham : Springer, 2016. – 361 p.
7. Fairchild M. Color Appearance models. - John Wiley & Sons, 2013. – 472 p.
8. Hunt R. W. G. The Reproduction of color. - John Wiley & Sons, 2004. – 724 p.
9. Hill B., Roger Th., Vorhagen F. Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula // ACM Transactions on Graphics. – 1997. – Vol. 16. – P. 109 – 154.
10. Shamey R., Cárdenas L., Hinks D., Woodard R. Comparison of naïve and expert subjects in the assessment of small color differences // Journal of Optical Society of America A. – 2010. - Vol. 27. – no.6. - P. 1482 – 1489.
11. Imai F., Tsumura N., Miyake Y. Perceptual color difference metric for complex images based on Mahalanobis distance // Journal of Electronic Imaging. – 2001. - Vol. 10. – issue 2. – P. 385 – 393.
12. Dalgaard P. Introductory Statistics with R. – Cham : Springer, 2008. – 364 p.
13. Textiles – Tests for colour fastness – Part J03 : Calculation of colour differences, ISO Standard No. 105-J03:2009, 2020.
14. Galuza A., Shkoda M., Protsay N., Savchenko A. Modeling of an object chromaticity with a given emission spectrum // 2019 9th Int. Conf. on Advanced Computer Information Technologies, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. - P. 13 – 16.
15. Kochenderfer M. Decision making under uncertainty: theory and application. – Boston : The MIT Press, 2015. – 352 p.

References (transliterated)

1. Lee K., Baek S., Kim D., Seo J. A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*. 2019, vol. 19, pp. 40–46.
2. Schafer D., Glass S. A guide to yellow oral mucosal entities: etiology and pathology. *Head and Neck Pathology*. 2019, vol. 13, pp. 33–46.
3. Sun I., Schmitt A., Häger T., Schneider M., Pappalardo L., Russo M. Natural blue zircon from Vesuvius. *Mineralogy and Petrology*. 2021, vol. 115, pp. 21–36.
4. GOST 9411 – 91. *Steklo opticheskoye tsvetnoye. Tekhnicheskiye usloviya* [Colored optical glass. Specifications]. Moscow, Committee for Standardization and Metrology of the USSR Publ., 1992. 48 p.
5. Latini G., De Felice C., Barducci A., Chitano G., Pignatelli A., Grimaldi L., Tramacere F., Laurini R., Andreassi M., Portaluri M. Oral mucosal color changes as a clinical biomarker for cancer detection. *European Journal of Cancer Prevention*. 2012, vol. 21, issue 4, pp. 360–366.
6. Kremers J., Baraas R., Marshall N. *Human color vision*. Cham, Springer, 2016. 361 p.
7. Fairchild M. *Color Appearance models*. John Wiley & Sons, 2013. 472 p.
8. Hunt R. W. G. *The Reproduction of color*. John Wiley & Sons, 2004. 724 p.
9. Hill B., Roger Th., Vorhagen F. Comparative analysis of the quantization of color spaces on the basis of the CIELAB color-difference formula. *ACM Transactions on Graphics*. 1997, vol. 16, pp. 109–154.
10. Shamey R., Cárdenas L., Hinks D., Woodard R. Comparison of naïve and expert subjects in the assessment of small color differences. *Journal of Optical Society of America A*. 2010, vol. 27, no.6, pp. 1482–1489.
11. Imai F., Tsumura N., Miyake Y. Perceptual color difference metric for complex images based on Mahalanobis distance. *Journal of Electronic Imaging*. 2001, vol. 10, issue 2, pp. 385–393.
12. Dalgaard P. *Introductory Statistics with R*. Cham, Springer, 2008. 364 p.
13. Textiles – Tests for colour fastness – Part J03 : Calculation of colour differences, ISO Standard No. 105-J03:2009, 2020.
14. Galuza A., Shkoda M., Protsay N., Savchenko A. Modeling of an object chromaticity with a given emission spectrum. *2019 9th Int. Conf. on Advanced Computer Information Technologies*. Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019. pp. 13–16.
15. Kochenderfer M. *Decision making under uncertainty: theory and application*. Boston, The MIT Press, 2015. 352 p.

Надійшла (received) 09.10.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Галуза Олексій Анатолійович – доктор фізико-математичних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: Oleksii.Haluza@khpi.edu.ua.

Галуза Алексей Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: Oleksii.Haluza@khpi.edu.ua.

Galuz Alexey Anatol'evich – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (057) 707-63-51; e-mail: Oleksii.Haluza@khpi.edu.ua.

Костюк Ольга Василівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (067) 790-74-58; e-mail: Olha.Kostiuk@khpi.edu.ua.

Костюк Ольга Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (067) 790-74-58; e-mail: Olha.Kostiuk@khpi.edu.ua.

Kostiuk Olga Vasylivna – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (067) 790-74-58; e-mail: Olha.Kostiuk@khpi.edu.ua.

Савченко Алла Олександрівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-63-37; e-mail: Alla.Savchenko@khpi.edu.ua.

Савченко Алла Александровна – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-63-37; e-mail: Alla.Savchenko@khpi.edu.ua.

Savchenko Alla Oleksandrivna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (057) 707-63-37; e-mail: Alla.Savchenko@khpi.edu.ua.

Бойко Анастасія Андрійвна – студентка, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: Anastasiia.Boiko@cs.khpi.edu.ua.

Бойко Анастасия Андреевна – студентка, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-63-51; e-mail: Anastasiia.Boiko@cs.khpi.edu.ua.

Boiko Anastasiia Andriivna – Student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv; tel.: (057) 707-63-51; e-mail: Anastasiia.Boiko@cs.khpi.edu.ua.