

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-367-24>

УДК 677.11:543.42:006.83:664

КАЛІНСЬКИЙ ЄВГЕН

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-2605-8759>kalinsky30@gmail.com**РОССОЛОВ ВІТАЛІЙ**

Херсонський національний технічний університет

<https://orcid.org/0009-0007-4362-1607>rossolov0512@gmail.com**МАТЕМАТИЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОЛОРИМЕТРИЧНОГО
КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ЛУБОВОЛОКНИСТОЇ СИРОВИНИ**

Стаття присвячена розробці математичних основ автоматизованого колориметричного контролю якості лубоволокнистої сировини, що забезпечують об'єктивне, відтворюване та швидке визначення кольорових характеристик волокна. Підкреслюється, що традиційні органолептичні методи визначення якості, регламентовані ДСТУ 4015:2001, характеризуються високим рівнем суб'єктивності (похибка до 15-20%), трудомісткістю (30-60 хвилин на зразок) та низькою продуктивністю, що унеможливує оперативний контроль якості в умовах промислового виробництва. Теоретично обґрунтовано доцільність використання послідовності кольорових перетворень $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow CIE\ L^*a^*b^*$ для забезпечення перцептивної рівномірності колориметричних вимірювань. Показано, що простір $CIE\ L^*a^*b^*$ забезпечує значно кращу відповідність геометричних відстаней візуальним відмінностям кольорів порівняно з апаратно-залежним простором RGB. Розроблено математичні моделі нелінійних перетворень між кольоровими просторами з урахуванням гамма-корекції для стандартного освітлювача D50. Детально формалізовано процес перетворення через матричні операції та кусково-задану нелінійну функцію, що моделює психофізіологічні особливості сприйняття яскравості людським оком. Обґрунтовано вибір метрики кольорової різниці Delta E CMC (l:c) з параметрами l:c = 2:1 для задач класифікації лубоволокнистої сировини. Формалізовано алгоритм обчислення компенсаційних факторів SL, SC, SH, що враховують нерівномірність сприйняття кольорових різниць людським оком у різних областях кольорового простору. Метрика CMC забезпечує на 30-40% вищу точність порівняно з базовою формулою Delta E*ab для текстильних матеріалів. Розроблено статистичні методи обробки колориметричних даних для множини пікселів зображення. Визначено мінімальний розмір вибірки $n_{min} \approx 139$ пікселів для забезпечення точності $\pm 0,5$ одиниці L^* при рівні довіри 95%, при цьому рекомендовано використовувати вибірки обсягом 500-1000 пікселів для забезпечення високої статистичної надійності результатів. Формалізовано алгоритм класифікації зразків за методом найближчого еталону для чотирьох груп якості лляного волокна згідно з ДСТУ 4015-2001 на основі критерію мінімізації Delta E CMC. Побудовано математичну модель похибок вимірювання з розділенням систематичної ($\Delta L^* = \pm 3-5$ для некаліброваних систем) та випадкової компонент (шви, $L \approx 0,5-1,5$). Обґрунтовано методи компенсації похибок через калібрування та статистичне усереднення, що дозволяє досягти сумарної похибки визначення Delta E CMC на рівні $\sigma \Delta E \approx 0,1-0,2$ одиниці. Розроблені математичні основи забезпечують створення автоматизованих систем контролю якості з точністю $\pm 0,1-0,2$ Delta E CMC, відтворюваністю результатів з коефіцієнтом варіації $CV < 3\%$ та можливістю класифікації зразків за декілька секунд, що суттєво перевищує можливості традиційних органолептичних методів.

Ключові слова: лубоволокниста сировина, колориметрія, автоматизований контроль якості.

KALINSKY EUGEN, ROSSOLOV VITALII

Kherson National Technical University

**MATHEMATICAL FOUNDATIONS OF AUTOMATED COLORIMETRIC QUALITY CONTROL OF
BAST FIBER RAW MATERIALS**

The article is devoted to the development of mathematical foundations for automated colorimetric quality control of bast fiber raw materials, providing objective, reproducible and rapid determination of fiber color characteristics. It is emphasized that traditional organoleptic quality determination methods regulated by DSTU 4015:2001 are characterized by high subjectivity (error up to 15-20%), labor intensity (30-60 minutes per sample) and low productivity, making operational quality control impossible under industrial production conditions. The feasibility of using the sequence of color transformations $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow CIE\ L^*a^*b^*$ to ensure perceptual uniformity of colorimetric measurements is theoretically substantiated. It is shown that the $CIE\ L^*a^*b^*$ space provides significantly better correspondence of geometric distances to visual color differences compared to the device-dependent RGB space. Mathematical models of nonlinear transformations between color spaces have been developed taking into account gamma correction for the standard D50 illuminant. The transformation process through matrix operations and a piecewise-defined nonlinear function that models the psychophysiological features of human brightness perception has been formalized in detail. The choice of the Delta E CMC (l:c) color difference metric with parameters l:c = 2:1 for classification tasks of bast fiber raw materials is substantiated. An algorithm for calculating compensation factors SL, SC, SH, which account for the non-uniformity of color difference perception by the human eye in different areas of the color space, has been formalized. The CMC metric provides 30-40% higher accuracy compared to the basic Delta E*ab formula for textile materials. Statistical methods for processing colorimetric data from multiple image pixels have been developed. The minimum sample size $n_{min} \approx 139$ pixels has been determined to ensure accuracy of $\pm 0.5\ L^*$ units at a 95% confidence level, with samples of 500-1000 pixels recommended to ensure high statistical reliability of results. A classification algorithm based on the nearest reference method for four quality groups of flax fiber according to DSTU 4015-2001 has been formalized based on the Delta E CMC minimization criterion. A mathematical model of measurement errors has been constructed with separation of systematic ($\Delta L^* = \pm 3-5$ for uncalibrated systems) and random components (strand, $L \approx 0.5-1.5$). Methods for error compensation through calibration and statistical averaging have been substantiated, allowing achievement of total Delta E CMC determination error at the level of $\sigma \Delta E \approx 0.1-0.2$ units. The developed mathematical foundations enable creation of automated quality control systems with accuracy of $\pm 0.1-0.2$ Delta E CMC, result reproducibility with coefficient of variation $CV < 3\%$, and capability to classify samples within seconds, significantly exceeding the capabilities of traditional organoleptic methods.

Keywords: bast fiber raw materials, colorimetry, automated quality control.



Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Луб'яні волокна (льон, коноплі) є перспективною сировиною для виробництва фільтрувальних матеріалів, що застосовуються у харчових виробництвах для очищення технологічної води. Харчова промисловість висуває жорсткі вимоги до якості води у виробництві напоїв, хлібобулочних, молочних та м'ясних виробів, а фільтрувальні матеріали з луб'яних волокон забезпечують ефективне видалення механічних домішок завдяки двошаровій ієрархічній пористості та природній капілярній структурі. Проте ефективність таких фільтрів безпосередньо визначається якістю вихідної сировини, зокрема ступенем зрілості волокон, яка корелює з їх кольоровими характеристиками.

Оцінка якості лубоволокнистої сировини, зокрема лляного волокна, є критично важливим етапом у ланцюгу виробництва фільтрувальних матеріалів для харчової промисловості та текстильного виробництва. Колір волокна виступає одним з основних показників якості, який корелює зі ступенем зрілості, механічною міцністю та фільтраційними характеристиками волокна [1].

Традиційні методи визначення якості лубоволокнистих матеріалів, регламентовані ДСТУ 4015:2001 "Льон. Визначення кольору волокна", базуються переважно на органолептичних підходах, що передбачають візуальне порівняння зразків з еталонними шкалами [2]. Цей підхід характеризується високим рівнем суб'єктивності, оскільки результати оцінювання залежать від індивідуальних особливостей сприйняття кольору експертом, умов освітлення та психофізіологічного стану оцінювача. Дослідження Толмачова В.С. показують, що похибка органолептичної оцінки може сягати 15-20%, що є неприйнятним для сучасних вимог стандартизації та забезпечення якості продукції [3].

Додаткові обмеження традиційних методів пов'язані з їх трудомісткістю та низькою продуктивністю. Час, необхідний для проведення однієї серії вимірювань кваліфікованим експертом, становить від 30 до 60 хвилин, що унеможливає оперативний контроль якості в умовах промислового виробництва [4]. Крім того, відсутність кількісних критеріїв оцінки ускладнює статистичну обробку результатів та їх міжлабораторне порівняння, що є критичним для забезпечення відтворюваності вимірювань згідно з вимогами міжнародних стандартів [5].

Впровадження автоматизованих колориметричних систем контролю якості вимагає розробки відповідного математичного апарату, який би забезпечував об'єктивне, відтворюване та швидке визначення кольорових характеристик волокна. Основним викликом є необхідність врахування особливостей людського сприйняття кольору, оскільки традиційні експертні оцінки базуються саме на візуальному аналізі. Це потребує використання перцептивно-рівномірних кольорових просторів та спеціалізованих метрик кольорової різниці, що адаптовані до специфіки текстильної промисловості [6, 7].

Аналіз досліджень та публікацій

Фундаментальні основи колориметрії були закладені Міжнародною комісією з освітлення (CIE) та систематизовані в серії стандартів, серед яких базовим є CIE 015:2018 "Colorimetry" [6]. Цей документ визначає основні колориметричні системи, стандартних спостерігачів та джерела освітлення, що стали основою для розробки прикладних методів оцінки кольору. Wyszecki та Stiles у класичній монографії "Color Science" [8] детально розглядають математичні основи кольорових перетворень, включаючи тристимульні значення та функції колірної змішування, що є основою для розуміння процесів цифрової колориметрії.

Розвиток цифрових технологій викликав необхідність розробки методів перетворення між апаратно-залежним простором RGB та апаратно-незалежними колориметричними системами. Sharma та Bala у всебічному довіднику "Digital Color Imaging Handbook" [12] представили детальний аналіз алгоритмів кольорових перетворень, включаючи гамма-корекцію та матричні операції для переходу між RGB та XYZ просторами. Reinhard та співавтори [13] розширили цей підхід, запропонувавши оптимізовані алгоритми для обробки зображень у реальному часі, що є важливим для промислового застосування.

У сфері стандартизації методів контролю кольору текстильних матеріалів ключовим документом є ISO 105-J03:2009 [5], який регламентує процедури обчислення кольорових різниць для оцінки стійкості забарвлення. Цей стандарт рекомендує використання метрик CMC та CIEDE2000 залежно від специфіки завдання та вимог до точності. Billmeyer та Saltzman у "Principles of Color Technology" [14] систематизували практичні аспекти застосування колориметричних методів у різних галузях, включаючи текстильну промисловість.

Специфічні аспекти контролю якості натуральних волокон, зокрема льону, розглядалися в роботах вітчизняних дослідників. Толмачов В.С. [3] у дисертаційному дослідженні проаналізував можливості сенсорного аналізу для оцінки якості лляного волокна та встановив кореляційні зв'язки між органолептичними показниками та фізико-механічними властивостями. Проте запропоновані підходи залишаються суб'єктивними та недостатньо формалізованими для автоматизованого контролю.

Окремої уваги заслуговують роботи з практичного застосування колориметрії в системах комп'ютерного зору. Stokman та Gevers [9] дослідили методи вимірювання кольору за допомогою спектрометрії зображень та показали, що точність визначення кольорових координат суттєво залежить від якості калібрування пристроїв

введення. Pointer [15] підкреслив важливість використання ICC-профілів для забезпечення відтворюваності колориметричних вимірювань при переході між різними пристроями.

Критичний аналіз літературних джерел показує, що попри значний обсяг досліджень у сфері колориметрії, питання математичного обґрунтування автоматизованих методів контролю якості лубоволокнистої сировини залишається недостатньо розробленим. Наявні роботи зосереджені або на загальнотеоретичних аспектах [6, 7, 8], або на специфіці синтетичних волокон [5, 14], що зумовлює потребу в розробці спеціалізованого математичного апарату. Особливості структури та кольорових характеристик натурального лляного волокна, зокрема його неоднорідність та природна варіабельність кольору, потребують адаптації класичних колориметричних підходів та розробки спеціалізованого математичного апарату.

Формулювання цілей статті

Метою дослідження є розробка математичних основ автоматизованого колориметричного контролю якості лубоволокнистої сировини, що забезпечують об'єктивне, відтворюване та швидке визначення кольорових характеристик волокна з метою відбору сировини, придатної для виробництва фільтрувальних матеріалів харчових виробництв.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. теоретично обґрунтувати вибір послідовності кольорових перетворень $RGB \rightarrow XYZ \rightarrow CIE\ L^*a^*b^*$ для забезпечення перцептивної рівномірності колориметричних вимірювань;
2. обґрунтувати вибір метрики кольорової різниці Delta E CMC (1:c) для задач класифікації лубоволокнистої сировини та формалізувати алгоритм обчислення компенсаційних факторів;
3. розробити статистичні методи обробки колориметричних даних та визначити мінімальний розмір вибірки;
4. формалізувати алгоритм класифікації зразків за групами якості; 5. Побудувати математичну модель похибок вимірювання та обґрунтувати методи їх компенсації.

Виклад основного матеріалу

Основою автоматизованого колориметричного контролю є послідовне перетворення первинних RGB-значень, отриманих від пристроїв цифрового введення зображень (сканерів, камер), у стандартизовані колориметричні простори, що забезпечують апаратно-незалежне представлення кольору та перцептивну рівномірність. Цей процес включає два послідовних етапи: перетворення $RGB \rightarrow XYZ$ для отримання тристимульних значень та наступне перетворення $XYZ \rightarrow CIE\ L^*a^*b^*$ для забезпечення відповідності геометричних відстаней візуальному сприйняттю кольорових різниць [12, 6] (рис. 1).

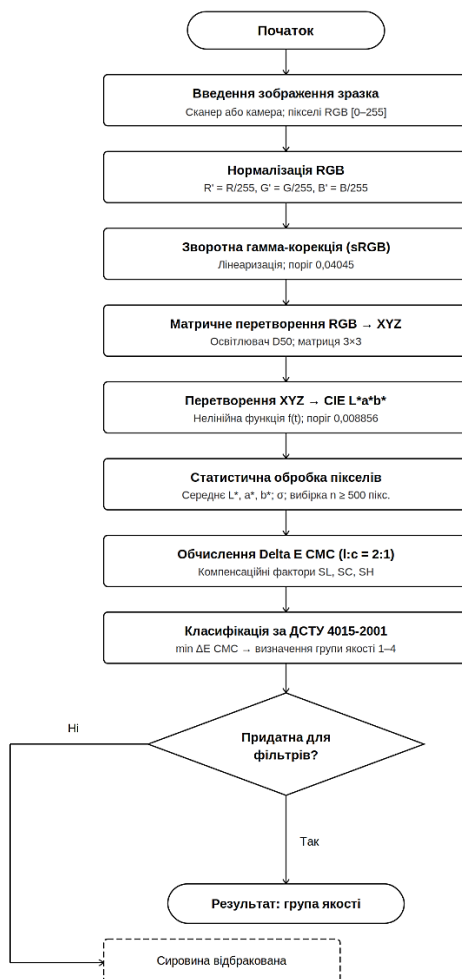


Рис. 1. Алгоритм колориметричного контролю якості лубоволокнистої сировини

Нормалізація RGB-значень здійснюється за формулами:

$$R_{\text{норм}} = R/255, G_{\text{норм}} = G/255, B_{\text{норм}} = B/255 \quad (1)$$

де R, G, B – первинні цілочислові значення каналів; $R_{\text{норм}}$, $G_{\text{норм}}$, $B_{\text{норм}}$ – нормалізовані значення в діапазоні [0, 1].

Наступним етапом є зворотна гамма-корекція (лінеаризація), що компенсує нелінійну характеристику пристроїв відображення. Для стандартного кольорового простору sRGB застосовується кусково-задана функція [12, 13]:

$$R' = \begin{cases} \frac{R_{\text{норм}}}{12,92}, & \text{якщо } R_{\text{норм}} \leq 0,04045 \\ R_{\text{норм}} + 0,055, & \text{якщо } R_{\text{норм}} > 0,04045 \end{cases} \quad (2)$$

Аналогічні перетворення застосовуються для каналів G і B. Фізичний зміст цього перетворення полягає в компенсації нелінійності людського сприйняття яскравості, що описується законом Вебера-Фехнера [10, 8]. Порогове значення 0.04045 визначає межу між лінійною областю (для малих значень яскравості) та степеневую функцією з показником 2.4, що апроксимує гамму відображувальних пристроїв.

Після лінеаризації виконується матричне перетворення у простір XYZ. Коефіцієнти матриці визначаються колориметричними характеристиками первинних кольорів sRGB та параметрами стандартного освітлювача. Для освітлювача D50, що імітує денне світло і є стандартним для контролю якості текстильних та харчових матеріалів [5], матричне перетворення має вигляд [12]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4361 & 0.38951 & 0.1413 \\ 0.2225 & 0.7169 & 0.0606 \\ 0.0139 & 0.0971 & 0.7142 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (3)$$

Простір CIE XYZ, хоча і є незалежним від використаних приладів, не забезпечує перцептивної рівномірності: рівні Евклідові відстані в різних областях цього простору не відповідають рівним візуальним відмінностям кольорів. Для вирішення цієї проблеми в 1976 році CIE запропонувала простір $L^*a^*b^*$, що забезпечує значно кращу перцептивну рівномірність [6, 11].

Перетворення базується на нелінійній функції, що моделює психофізіологічні особливості сприйняття яскравості людським оком [10, 8]:

$$R' = \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & \text{якщо } t > 0,008856 \\ 7,787t + \frac{16}{116}, & \text{якщо } t \leq 0,008856 \end{cases} \quad (4)$$

Порогове значення $0.008856 = (6/29)^3$ забезпечує безперервність функції та її першої похідної в точці переходу, що є важливим для коректності обчислень [11]. Кубічний корінь у першій гілці функції відображає нелінійність сприйняття яскравості, а лінійна апроксимація в другій гілці запобігає виникненню сингулярності при малих значеннях аргументу.

Координати простору CIE $L^*a^*b^*$ обчислюються за формулами [6, 11]:

$$L^* = 116 \cdot f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \quad (5)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right] \quad (6)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right] \quad (7)$$

де (X_n, Y_n, Z_n) – тристимульні значення білої точки освітлювача. Для стандартного освітлювача D50: $X_n = 0.96422$, $Y_n = 1.0$, $Z_n = 0.82521$ [6].

Для кількісного оцінювання відмінності між кольорами та класифікації зразків необхідна відповідна метрика, що забезпечує числове вираження кольорової різниці. Незважаючи на перцептивну рівномірність простору CIE $L^*a^*b^*$, проста Евклідова відстань (ΔE^*ab) не забезпечує достатньої точності для всіх областей кольорового простору, оскільки чутливість людського ока до кольорових різниць варіює залежно від світлості, хроматичності та відтінку [18, 19].

Метрика Delta E CMC (Colour Measurement Committee) була розроблена в 1984 році Clarke, McDonald та Rigg спеціально для текстильної промисловості з метою врахування специфіки сприйняття кольорових різниць у текстильних матеріалах [18]. Ця метрика вводить компенсаційні фактори, що залежать від положення кольору в просторі $L^*a^*b^*$, забезпечуючи кращу відповідність візуальним оцінкам експертів порівняно з базовою формулою ΔE^*ab [5].

Формула Delta E CMC має вигляд [18]:

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{l \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{l \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{l \cdot S_H}\right)^2} \quad (8)$$

де $\Delta C^* = C^*_2 - C^*_1$,

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (9)$$

ΔH^* – різниця відтінку, що обчислюється через різниці координат a^* і b^* з урахуванням різниці хроматичності:

$$\Delta H^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2 - (\Delta C^*)^2} \quad (10)$$

Параметри l і c – ваги для компонент світлості та хроматичності відповідно; S_L , S_C , S_H – компенсаційні фактори, що враховують нерівномірність сприйняття [18].

Фактор світлості S_L враховує зміну чутливості ока до різниць у світлості залежно від абсолютного рівня світлості базового кольору [18]:

$$S_L = \begin{cases} 0.511, & \text{якщо } L_1^* < 16 \\ \frac{0.040975 \cdot L_1^*}{1 + 0.01765 \cdot L_1^*}, & \text{якщо } L_1^* \geq 16 \end{cases} \quad (11)$$

Фактор хроматичності S_C визначається за формулою [18]:

$$S_C = (0.0638 \cdot C_1^*) / (1 + 0.0131 \cdot C_1^*) + 0.638 \quad (12)$$

Фактор відтінку S_H є найбільш складним та залежить від двох додаткових параметрів [18]:

$$S_H = S_C \cdot (F \cdot T + 1 - F) \quad (13)$$

де F – фактор насиченості.

$$F = \sqrt{[C_1^*]^4 / (C_1^*]^4 + 1900)} \quad (14)$$

T – фактор відтінку, що залежить від кута відтінку $h^\circ = \arctan(b^*/a^*)$

Для текстильної промисловості стандартним є співвідношення $l:c = 2:1$ [18, 5], встановлене емпірично на основі експертних оцінок прийнятності кольорових відхилень у текстильних зразках.

Порівняльні дослідження показують, що метрика СМС зменшує середню похибку прогнозування візуальних оцінок на 30–40% порівняно з базовою формулою Delta E*ab для текстильних матеріалів [19, 17].

Цифрове зображення зразка лубоволокнистої сировини містить множину пікселів, кожен з яких характеризується власним набором координат RGB. Після перетворення у простір CIE L*a*b* кожний піксель отримує індивідуальні значення L^* , a^* , b^* , що формують статистичний ансамбль колориметричних даних. Неоднорідність природної сировини, зокрема варіабельність кольору в межах одного зразка, обумовлює необхідність статистичної обробки множини значень для отримання репрезентативних характеристик кольору [12, 7].

Обчислення середніх значень координат. Для статистичного представлення кольору зразка обчислюються середні арифметичні значення координат простору $L^*a^*b^*$ по всій множині пікселів зображення [13].

Оцінка варіабельності кольору. Для кількісної характеристики неоднорідності кольору зразка обчислюються стандартні відхилення координат $L^*a^*b^*$ [12]:

$$\sigma_L = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_i^* - \bar{L}^*)^2}}{N - 1} \quad (15)$$

Для лубоволокнистої сировини типові значення стандартних відхилень становлять $\sigma_L = 2-5$ одиниць L^* , $\sigma_a = 1-3$ одиниці a^* , $\sigma_b = 2-4$ одиниці b^* , що відображає природну варіабельність кольорових характеристик натуральних волокон. Високі значення стандартних відхилень можуть свідчити про неоднорідність сировини або присутність домішок [14].

Довірчий інтервал для середнього кольору. Для статистичної оцінки надійності визначення середнього кольору зразка обчислюється довірчий інтервал. При достатньо великій кількості пікселів ($N > 30$) розподіл середніх значень координат наближається до нормального згідно з центральною граничною теоремою, що дозволяє застосувати стандартні методи інтервального оцінювання [12, 13].

Довірчий інтервал для середнього значення координати L^* при рівні довіри 95% визначається як:

$$\bar{L}^* \pm z_{0.95} \cdot \frac{\sigma_L}{\sqrt{N}} \quad (16)$$

де $z_{0.95} = 1.96$ – квантиль стандартного нормального розподілу для рівня довіри 95%.

Визначення мінімального розміру вибірки. Для забезпечення заданої точності колориметричних вимірювань необхідно визначити мінімальну кількість пікселів, що повинна бути включена в статистичну обробку. Виходячи з вимоги, щоб напівширина довірчого інтервалу не перевищувала допустимої похибки Δ , отримуємо формулу для мінімального розміру вибірки [12]:

$$n_{min} = \frac{(z_{0.95} \cdot \sigma_L)^2}{\Delta^2} \quad (17)$$

Для забезпечення точності визначення світлості L^* з похибкою не більше ± 0.5 одиниць L^* при типовому стандартному відхиленні $\sigma_L = 3$ та рівні довіри 95%, мінімальний розмір вибірки становить:

$$n_{min} = \frac{(1.96 \cdot 3)^2}{0.5^2} = (11.76)^2 \approx 139 \text{ пікселів} \quad (18)$$

На практиці, з урахуванням неоднорідності лубоволокнистої сировини та необхідності забезпечення репрезентативності вимірювань, рекомендується використовувати вибірки обсягом не менше 500-1000 пікселів, що значно перевищує теоретичний мінімум та забезпечує високу статистичну надійність результатів [13, 14].

Точність методу визначається сукупністю систематичних ($\Delta L^* = \pm 3-5$ для некаліброваних систем) та випадкових (свиц, $L \approx 0.5-1.5$) похибок. Калібрування та статистичне усереднення по 500-1000 пікселів дозволяє досягти сумарної похибки $\sigma \Delta E \approx 0.1-0.2$ одиниці Delta E CMC [7, 5].

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Теоретично обґрунтовано доцільність використання послідовності кольорових перетворень RGB→XYZ→CIE L*a*b* для забезпечення перцептивної рівномірності колориметричних вимірювань. Показано, що простір CIE L*a*b* забезпечує значно кращу відповідність геометричних відстаней візуальним відмінностям кольорів порівняно з апаратно-залежним простором RGB, що є критичним для адекватної класифікації зразків за кольоровими характеристиками.

Обґрунтовано вибір метрики кольорової різниці Delta E CMC (l:c) для задач класифікації лубоволокнистої сировини. Показано, що метрика CMC з параметрами l:c = 2:1, спеціально адаптована для текстильної промисловості, забезпечує значно вищу точність порівняно з базовою формулою Delta E*ab завдяки введенню компенсаційних факторів SL, SC, SH, що враховують нерівномірність сприйняття кольорових різниць людським оком у різних областях кольорового простору. Формалізовано алгоритм обчислення всіх компонент метрики через формули (6-13).

Формалізовано алгоритм класифікації зразків за методом найближчого еталону з використанням перцептивної метрики кольорової різниці. Розроблено математичну модель класифікації для чотирьох груп якості лляного волокна згідно з ДСТУ 4015-2001 на основі критерію мінімізації Delta E CMC. Показано, що метод забезпечує об'єктивність оцінювання, високу відтворюваність результатів та швидкість обробки, що робить його придатним для оперативного контролю якості в умовах промислового виробництва.

Розроблені математичні основи забезпечують створення автоматизованих систем контролю якості лубоволокнистої сировини з наступними характеристиками: точність визначення кольорових координат $\pm 0.1-0.2$ Delta E CMC після калібрування та статистичного усереднення, відтворюваність результатів з коефіцієнтом варіації CV < 3%, можливість одночасного визначення кольорових характеристик та класифікації зразків за декілька секунд. Ці показники суттєво перевищують можливості традиційних органолептичних методів контролю та забезпечують відповідність вимогам міжнародних стандартів якості.

Перспективами подальших досліджень є: експериментальна верифікація розроблених моделей на представницькій вибірці зразків різних сортів; розробка програмного забезпечення для практичної реалізації методу; розширення підходу на інші натуральні волокна (коноплі, джут).

Література

1. Калінський Є.О., Россолов В.В. Удосконалення способу оцінювання якості лубоволокнистої сировини // Наукові проблеми харчових технологій та промислової біотехнології в контексті євроінтеграції: програма та тези матеріалів XIII Міжнародної науково-технічної конференції, 21 листопада 2024 р., м. Київ. – К.: НУХТ, 2024. – С. 347–348. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/47126>
2. ДСТУ 4015:2001. Льон. Визначення кольору волокна. – [Чинний від 2002-01-01]. – К.: Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2001. – 8 с.
3. Толмачов В.С. Удосконалення методів контролю якості лляного волокна на основі сенсорного аналізу: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.С. Толмачов; Херсон. нац. техн. ун-т. – Херсон, 2012. – 20 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0413U002588>
4. Калінський Є. О., Воронко О. В., Россолов В. В. Мікроскопічний аналіз геометричних характеристик технічних волокон льону для визначення поправочного коефіцієнта площі // Якість та товарознавча характеристика товарів різного функціонального призначення: матеріали Всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. студентів і молодих учених (Хмельницький, 27 трав. 2025 р.). – Хмельницький: ХНТУ, 2025. – С. 75–78. URL: <https://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/62225>
5. ISO 105-J03:2009. Textiles – Tests for colour fastness – Part J03: Calculation of colour differences. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 12 p. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:105:-J03:ed-2:v1:en>
6. CIE 015:2018. Colorimetry, 4th edition. – Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 2018. – 93 p. URL: <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition>
7. Hunt R.W.G., Pointer M.R. Measuring Colour, 4th Edition. – John Wiley & Sons, 2011. – 469 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/286354964_Measuring_Colour_Fourth_Edition
8. Wyszecki G., Stiles W.S. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition. – John Wiley & Sons, 2000. – 968 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/253395684_Color_Science_Concepts_and_Methods_Quantitative_Data_and_Formulae_2nd_Edition
9. Stokman H., Gevers T. Color measurement by imaging spectrometry // Computer Vision and Image Understanding. – 2000. – Vol. 79, Issue 2. – P. 236–249. DOI: 10.1006/cviu.2000.0860
10. Fairchild M.D. Color Appearance Models, 3rd Edition. – John Wiley & Sons, 2013. – 465 p. URL: <https://scis.uohyd.ac.in/~chakacs/cipclass/lecs/ColourAppearance.pdf>

11. ISO 11664-4:2019. Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019. – 6 p. URL: <https://www.iso.org/standard/74166.html>
12. Sharma G., Bala R. Digital Color Imaging Handbook. – CRC Press, 2003. – 816 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/229476136_Digital_Color_Imaging_Handbook
13. Reinhard E., Khan E.A., Akyüz A.O., Johnson G. Color Imaging: Fundamentals and Applications. – A K Peters/CRC Press, 2008. – 518 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/328900626_Color_imaging_Fundamentals_and_applications
14. Billmeyer F.W., Saltzman M. Principles of Color Technology, 3rd Edition. – John Wiley & Sons, 2000. – 301 p. DOI:10.1002/col.10083
15. Pointer M.R. Measuring colour, 3rd ed. // Coloration Technology. – 2006. – Vol. 122, Issue 3. – P. 167–168. DOI: 10.1111/j.1478-4408.2006.00023.x
16. Luo M.R., Hunt R.W.G. The structure of the CIE 1997 colour appearance model (CIECAM97s) // Color Research & Application. – 1998. – Vol. 23, Issue 3. – P. 138–146. URL: https://www.researchgate.net/publication/270511438_The_CIE_1997_Colour_Appearance_Model_CIECAM97s
17. Mahy M., Van Eycken L., Oosterlinck A. Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV // Color Research & Application. – 1994. – Vol. 19, Issue 2. – P. 105–121. DOI: 10.1002/col.5080190206
18. Clarke F.J.J., McDonald R., Rigg B. Modification to the JPC79 colour-difference formula // Journal of the Society of Dyers and Colourists. – 1984. – Vol. 100, Issue 4. – P. 128–132. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1984.tb00969.x
19. Melgosa M., Huertas R., Berns R.S. Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas // Journal of the Optical Society of America A. – 2004. – Vol. 21, Issue 12. – P. 2269–2275. DOI: 10.1364/JOSAA.21.002269
20. Luo M.R., Cui G., Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 // Color Research & Application. – 2001. – Vol. 26, Issue 5. – P. 340–350. DOI: 10.1002/col.1049

References

1. Kalinsky Ye.O. Udoshkonalennia sposobu otsiniuvannia yakosti lubovoloknystoi syrovyny / Ye.O. Kalinsky, V.V. Rossolov // Naukovi problemy kharchovykh tekhnolohii ta promyslovoi biotekhnolohii v konteksti yevrointehratsii: prohrama ta tezy materialiv XIII Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 21 lystopada 2024 r., m. Kyiv. – K.: NUKhT, 2024. – S. 347–348. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/47126> [in Ukrainian].
2. DSTU 4015:2001. Lon. Vyznachennia koloru volokna [Flax. Fibre colour determination]. – [Chynnyi vid 2002-01-01]. – Kyiv: Derzhavnyi komitet Ukrainy z pytan tekhnichnoho rehulivannia ta spozhyvchoi polityky, 2001. – 8 s. [in Ukrainian].
3. Tolmachov V.S. Udoshkonalennia metodiv kontroliu yakosti lianoho volokna na osnovi sensornoho analizu : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk / V.S. Tolmachov; Kherson. nats. tekhn. un-t. – Kherson, 2012. – 20 s. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0413U002588> [in Ukrainian].
4. Kalinsky Ye.O. Mikroskopichnyi analiz heometrychnykh kharakterystyk tekhnichnykh volokon lonu dlia vyznachennia popravochnoho koefitsienta ploshchi / Ye.O. Kalinsky, O.V. Voronko, V.V. Rossolov // Yakist ta tovaroznavcha kharakterystyka tovariv riznoho funktsionalnoho pryznachennia: materialy Vseukr. nauk.-prakt. internet-konf. studentiv i molodykh uchenykh (Khmelnytskyi, 27 trav. 2025 r.). – Khmelnytskyi: KhNTU, 2025. – S. 75–78. URL: <https://kntu.net.ua/ukr/content/view/full/62225> [in Ukrainian].
5. ISO 105-J03:2009. Textiles – Tests for colour fastness – Part J03: Calculation of colour differences. – Geneva: International Organization for Standardization, 2009. – 12 p. URL: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:105:-J03:ed-2:v1:en>
6. CIE 015:2018. Colorimetry, 4th edition. – Vienna: Commission Internationale de l'Eclairage, 2018. – 93 p. URL: <https://cie.co.at/publications/colorimetry-4th-edition>
7. Hunt R.W.G. Measuring Colour, 4th Edition / R.W.G. Hunt, M.R. Pointer. – John Wiley & Sons, 2011. – 469 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/286354964_Measuring_Colour_Fourth_Edition
8. Wyszecki G. Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd Edition / G. Wyszecki, W.S. Stiles. – John Wiley & Sons, 2000. – 968 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/253395684_Color_Science_Concepts_and_Methods_Quantitative_Data_and_Formulae_2nd_Edition
9. Stokman H. Color measurement by imaging spectrometry / H. Stokman, T. Gevers // Computer Vision and Image Understanding. – 2000. – Vol. 79, Issue 2. – P. 236–249. DOI: 10.1006/cviu.2000.0860
10. Fairchild M.D. Color Appearance Models, 3rd Edition / M.D. Fairchild. – John Wiley & Sons, 2013. – 465 p. URL: <https://scis.uohyd.ac.in/~chakcs/cipclass/lects/ColourAppearance.pdf>
11. ISO 11664-4:2019. Colorimetry – Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019. – 6 p. URL: <https://www.iso.org/standard/74166.html>
12. Sharma G. Digital Color Imaging Handbook / G. Sharma, R. Bala. – CRC Press, 2003. – 816 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/229476136_Digital_Color_Imaging_Handbook
13. Reinhard E. Color Imaging: Fundamentals and Applications / E. Reinhard, E.A. Khan, A.O. Akyuz, G. Johnson. – A K Peters/CRC Press, 2008. – 518 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/328900626_Color_imaging_Fundamentals_and_applications
14. Billmeyer F.W. Principles of Color Technology, 3rd Edition / F.W. Billmeyer, M. Saltzman. – John Wiley & Sons, 2000. – 301 p. DOI: 10.1002/col.10083
15. Pointer M.R. Measuring colour, 3rd ed. / M.R. Pointer // Coloration Technology. – 2006. – Vol. 122, Issue 3. – P. 167–168. DOI: 10.1111/j.1478-4408.2006.00023.x
16. Luo M.R. The structure of the CIE 1997 colour appearance model (CIECAM97s) / M.R. Luo, R.W.G. Hunt // Color Research & Application. – 1998. – Vol. 23, Issue 3. – P. 138–146. URL: https://www.researchgate.net/publication/270511438_The_CIE_1997_Colour_Appearance_Model_CIECAM97s
17. Mahy M. Evaluation of uniform color spaces developed after the adoption of CIELAB and CIELUV / M. Mahy, L. Van Eycken, A. Oosterlinck // Color Research & Application. – 1994. – Vol. 19, Issue 2. – P. 105–121. DOI: 10.1002/col.5080190206
18. Clarke F.J.J. Modification to the JPC79 colour-difference formula / F.J.J. Clarke, R. McDonald, B. Rigg // Journal of the Society of Dyers and Colourists. – 1984. – Vol. 100, Issue 4. – P. 128–132. DOI: 10.1111/j.1478-4408.1984.tb00969.x
19. Melgosa M. Relative significance of the terms in the CIEDE2000 and CIE94 color-difference formulas / M. Melgosa, R. Huertas, R.S. Berns // Journal of the Optical Society of America A. – 2004. – Vol. 21, Issue 12. – P. 2269–2275. DOI: 10.1364/JOSAA.21.002269
20. Luo M.R. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 / M.R. Luo, G. Cui, B. Rigg // Color Research & Application. – 2001. – Vol. 26, Issue 5. – P. 340–350. DOI: 10.1002/col.1049