

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗМІНИ КООРДИНАТ КОЛЬОРУ ПОВЕРХНЕВИХ ПОШКОДЖЕНЬ БІОТКАНИН ДЛЯ ЦИФРОВОЇ КОЛОРИМЕТРІЇ

Розроблено математичну модель зміни координат кольору поверхневих пошкоджень м'яких тканин людини від давності, що враховує зміну концентрацій продуктів деструкції гемоглобіну. Розв'язано обернену оптичну задачу встановлення давності виникнення поверхневих пошкоджень внаслідок травми тупими предметами за координатами кольору та відносними розмірами зон різного кольору пошкоджень, що можливо використати для цифрової колориметрії у судово-медичній експертизі.

Ключові слова: цифрова колориметрія, біотканини, судово-медична експертиза

O.E. KVATERNYUK, S.M. KVATERNYUK, V.G. PETRUK, A.O. SLOBODIANYUK

Vinnytsia National Technical University

O.I. MOKANYUK

National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya

MATHEMATICAL MODELING OF CHANGES IN THE COLOR COORDINATES OF THE SURFACE DAMAGE OF TISSUES FOR DIGITAL COLORIMETRY

Abstract. In this article was developed mathematical model of color change of coordinates of surface damage human soft tissue from time, that takes into account the change the concentration of hemoglobin degradation products. We solve inverse optical problems the establishment of the time of appearance of surface damage as a result of blunt trauma to the coordinates of color and relative sizes of different color zones of damage that can be used for digital colorimetry in forensic examination.

Key words: digital colorimetry, biological tissue, forensic examination

Вступ

Стан поверхневих патологій біотканин суттєво впливає на їх колір, а тому аналіз та класифікація поверхневих патологій біотканин за кольором особливо актуальні для судово-медичної експертизи. Для судової медицини *in vivo* важливим є можливість проведення швидких неінвазивних досліджень, оскільки їх результати необхідні для створення доказової бази злочину та можуть бути використані для пошуку злочинців у криміналістиці. Вирішуючи обернену оптичну задачу можливо визначити біофізичні характеристики поверхневих патологій за кольором.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення достовірності встановлення давності виникнення поверхневих пошкоджень м'яких тканин людини тупими предметами відповідно до задач судової медицини з урахуванням їх оптико-фізичних параметрів за рахунок вдосконалення методу колориметрії.

Математична модель впливу морфо-функціональних змін у поверхневому пошкодженні на координати кольору

Концентрації продуктів деструкції гемоглобіну у біотканинах поверхневого пошкодження залежать від давності їх виникнення. Координати кольору для поверхневого пошкодження залежать від концентрацій продуктів деструкції гемоглобіну. Тому координати кольору поверхневого пошкодження також залежать і від давності. У роботі [1, 4], з використанням теорії перенесення випромінювання для багатозарової моделі біотканини шкіри людини, розраховано залежності координат кольору від концентрацій продуктів деструкції гемоглобіну, що пов'язані з давністю виникнення ушкоджень, що дозволило визначити залежність координат кольору в давності. При розв'язуванні зворотної задачі, а саме встановлення давності виходячи з координат кольору поверхневого пошкодження можливо обчислити координати кольору, що характерні для кожного з інтервалів для встановлення давності і використати їх для створення шкали зразків кольорів (ШЗК). Це дозволить, на основі визначення найближчого за кольором до поверхневого пошкодження елемента із шкали зразків кольорів встановити давність його виникнення.

Однак, якщо враховувати відмінності у концентраціях продуктів деструкції гемоглобіну навіть в межах одного поверхневого пошкодження, то зображення поверхневого пошкодження завжди матиме декілька зон різного кольору. Наприклад, на

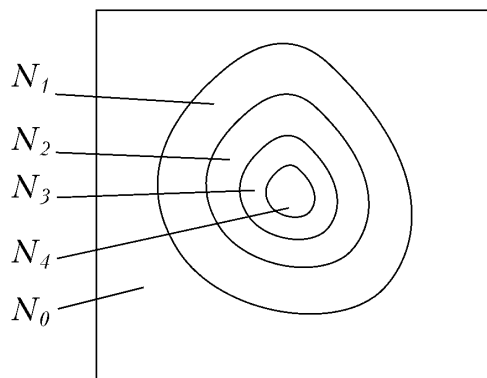


Рис. 1. Колірні зони поверхневого пошкодження м'яких тканин людини внаслідок травми тупим предметом

рис. 1. зображення поверхневого пошкодження на фоні інтактної шкіри розділено на зони різного кольору $N_1 - N_4$, а інтактна шкіра має колір N_0 .

При цьому зі зміною давності ушкодження зони певних кольорів зменшуватимуться, а іншого збільшуватимуться, що створюватиме співвідношення між відносними розмірами цих зон характерне для певного часового діапазону давності виникнення поверхневих пошкоджень. На основі співвідношення відносних розмірів зон поверхневого пошкодження різного кольору з'являється можливість встановити його давність. Для того, щоб визначити функціональну залежність, яка дозволить встановлювати давність проведемо дослідження координат кольору поверхневих пошкоджень для групи з 128 потерпілих. При цьому координати кольору поверхневих пошкоджень визначаються за допомогою методу цифрової візуалізації з використанням цифрового фотоапарату Nikon D3100 з калібруванням на основі вимірювань координат кольору за допомогою промислового колориметра WF-32 (Shenzhen VTT Technology Co., Ltd., Китай). Результати вимірювань залежності координат кольору у системі координат RGB від давності пошкодження наведено на рис. 2.

Використовуючи регресію за допомогою поліномів третього порядку, визначаємо функціональні залежності координат кольору в системі координат RGB поверхневого пошкодження при зміні давності виникнення травми тупим предметом і отримуємо емпіричну модель:

$$\begin{cases} R = 121,776 + 0,204T - 3,388 \cdot 10^{-4}T^2 + 2,067 \cdot 10^{-7}T^3, \\ G = 111,042 + 0,224T - 3,073 \cdot 10^{-4}T^2 + 1,056 \cdot 10^{-7}T^3, \\ B = 102,937 + 0,146T - 2,029 \cdot 10^{-4}T^2 + 1,033 \cdot 10^{-7}T^3, \end{cases} \quad (1)$$

де R, G, B – координати кольору поверхневих пошкоджень у системі RGB; T – давність виникнення травми тупим предметом.

Міжнародна комісія по освітленню (МКО) рекомендує для порівняння координат кольору різних об'єктів та встановлення колірної відмінності використовувати систему координат LAB. Для того, щоб перейти від координат кольору у системі RGB до координат кольору у системі LAB необхідно перейти спочатку до координат у системі XYZ.

Для переходу від координат кольору поверхневих пошкоджень у системі координат RGB до системи координат XYZ необхідно використати формули [2]. При цьому враховується 8-бітне представлення кожної координати кольору, що відповідає 24-бітній загальній глибині кольору RGB зображень. Коефіцієнти у формулах наведені для випадку застосування стандартного джерела освітлення типу D₆₅, стандартизованої геометрії освітлювач/спостерігач (D/0°) та заданої апертури фотоприймача спостерігача (10°). Розраховуємо координати кольору поверхневих пошкоджень у системі координат XYZ в залежності від давності виникнення на основі координат кольору у системі RGB (див. рис. 3.).

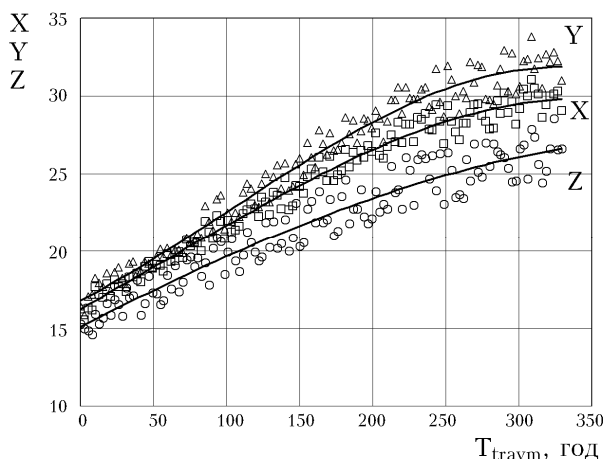


Рис. 3. Залежності координат кольору поверхневих пошкоджень у системі координат XYZ від давності

Використовуючи регресію за допомогою поліномів третього порядку, визначаємо функціональні залежності координат кольору в системі координат XYZ поверхневого пошкодження при зміні давності виникнення травми тупим предметом:

$$\begin{cases} X = 16,033 + 0,064T - 5,781 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,518 \cdot 10^{-8} T^3, \\ Y = 16,567 + 0,063T - 5,644 \cdot 10^{-6} T^2 - 1,333 \cdot 10^{-7} T^3, \\ Z = 15,392 + 0,04T + 1,835 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,057 \cdot 10^{-7} T^3, \end{cases} \quad (2)$$

де X , Y , Z – координати кольору поверхневих пошкоджень у системі XYZ; T – давність виникнення травми тупим предметом.

На основі координат кольору у стандартній колориметричній системі XYZ можливо досліджувати стан біотканини шкіри для задач судово-медичної експертизи. При цьому також можливо, за допомогою корегуючих коефіцієнтів, врахувати спектральні характеристики джерела освітлення, а також геометрії освітлювач/спостерігач та апертури фотоприймача спостерігача.

У колірному просторі (L^*, a^*, b^*) кожному кольору відповідає точка, положення якої визначається трьома незалежними координатами: світлотою – L^* і двома хроматичними координатами – a^* та b^* пов'язаними з координатами кольору X , Y , Z . Розраховуємо координати кольору поверхневих пошкоджень у системі координат LAB в залежності від давності виникнення на основі координат кольору поверхневих пошкоджень у системі XYZ за формулами [2, 3] (див. рис. 4.).

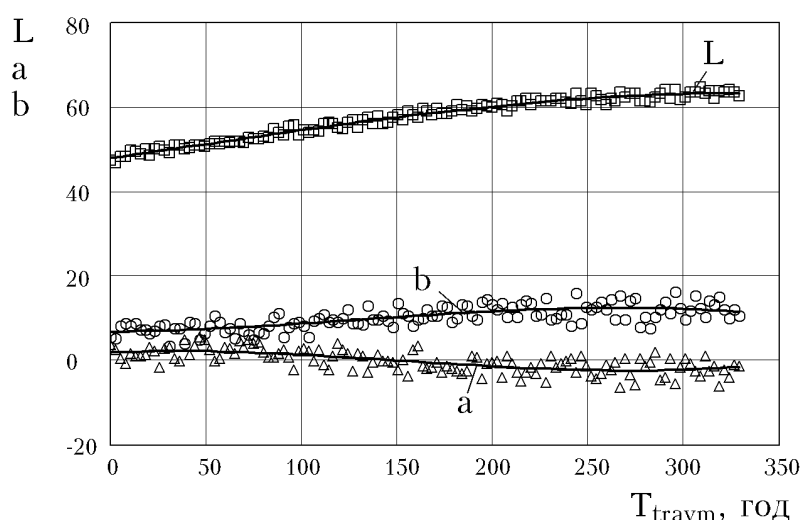


Рис. 4. Залежності координат кольору поверхневих пошкоджень у системі координат (L^*, a^*, b^*) від давності

Використовуючи регресію за допомогою поліномів третього порядку визначаємо функціональні залежності координат кольору в системі координат LAB поверхневого пошкодження при зміні давності виникнення після нанесення травми тупим предметом:

$$\begin{cases} a = -1,951 - 0,029T + 2,297 \cdot 10^{-5} T^2 + 2,295 \cdot 10^{-8} T^3, \\ b = 3,041 + 0,035T - 6,042 \cdot 10^{-5} T^2 + 2,366 \cdot 10^{-8} T^3, \\ L = 47,6 + 0,085T - 1,307 \cdot 10^{-4} T^2 + 6,513 \cdot 10^{-8} T^3, \end{cases} \quad (3)$$

де a , b , L – координати кольору поверхневих пошкоджень у системі LAB; T – давність виникнення травми тупим предметом.

Вставлення давності поверхневих пошкоджень за параметрами їх кольору

На основі отриманих залежностей координат кольору в системі координат LAB патологічної біотканини поверхневого пошкодження від зміни часу після нанесення травми тупим предметом для задач судово-медичної експертизи необхідно встановити давність виникнення поверхневих пошкоджень у одному з часових інтервалів, а саме до 1 години, від 1 до 3 годин, від 3 до 6 годин, від 6 до 12 годин, від 12 до 24 годин, від 24 до 48 годин, від 48 до 72 годин, від 72 до 96 годин та понад 96 годин.

Визначимо середньоарифметичне значення координат кольору у системі LAB \bar{L} , \bar{a} , \bar{b} та їх середньоквадратичне відхилення σ_L , σ_a , σ_b для кожного з інтервалів давності виникнення поверхневих пошкоджень.

На основі результатів розрахунку виникає можливість розроблення правила для встановлення давності виникнення поверхневих пошкоджень м'яких тканин людини тупими предметами за координатами кольору:

$$T = \begin{cases} 0 < T \leq 1, & \text{if } (-1,980 < a \leq -1,951) \wedge (3,041 < b \leq 3,075) \wedge (47,600 < L \leq 47,685); \\ 1 < T \leq 3, & \text{if } (-2,037 < a \leq -1,980) \wedge (3,075 < b \leq 3,144) \wedge (47,685 < L \leq 47,855); \\ 3 < T \leq 6, & \text{if } (-2,122 < a \leq -2,037) \wedge (3,144 < b \leq 3,247) \wedge (47,855 < L \leq 48,108); \\ 6 < T \leq 12, & \text{if } (-2,292 < a \leq -2,122) \wedge (3,247 < b \leq 3,450) \wedge (48,108 < L \leq 48,606); \\ 12 < T \leq 24, & \text{if } (-2,627 < a \leq -2,292) \wedge (3,450 < b \leq 3,841) \wedge (48,606 < L \leq 49,575); \\ 24 < T \leq 48, & \text{if } (-3,275 < a \leq -2,627) \wedge (3,841 < b \leq 4,574) \wedge (49,575 < L \leq 51,404); \\ 48 < T \leq 72, & \text{if } (-3,893 < a \leq -3,275) \wedge (4,574 < b \leq 5,242) \wedge (51,404 < L \leq 53,094); \\ 72 < T \leq 96, & \text{if } (-4,478 < a \leq -3,893) \wedge (5,242 < b \leq 5,846) \wedge (53,094 < L \leq 54,650); \\ 96 < T, & \text{if } (a \leq -4,478) \wedge (5,846 < b) \wedge (54,650 < L). \end{cases} \quad (4)$$

Розроблене правило встановлення давності виникнення поверхневих пошкоджень м'яких тканин людини тупими предметами базуються на усереднених характеристиках біотканин, що не враховують індивідуальні особливості реципієнтів. При цьому координати кольору на границях часових інтервалів давності є нечіткими. Фактично правило встановлення давності виникнення поверхневих пошкоджень біотканин (4) формалізує суб'єктивний візуальний метод встановлення давності пошкоджень, який використовують судово-медичні експерти у своїй роботі з використанням шкали зразків кольорів. При цьому давність пошкодження визначається за кольором елемента шкали, який найбільш близький до кольору поверхневого пошкодження і є характерним для певного інтервалу давності виникнення.

Розрахуємо функції густини ймовірності координат кольору, характерних для кожного з інтервалів давності використавши закон нормального розподілу (функцію Гауса). На рис. 5 показано функції густини ймовірності для координати кольору L_i , що розраховані для кожного з інтервалів давності виникнення поверхневих пошкоджень.

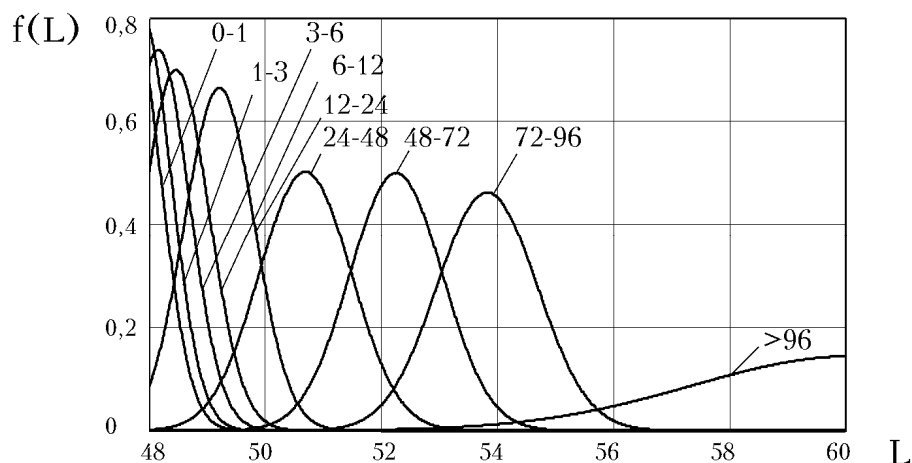


Рис. 5. Функції густини ймовірності для координати кольору L_i кожного з інтервалів давності виникнення поверхневих пошкоджень

Однак, як показано на рис. 1, зображення поверхневих пошкоджень має декілька зон різного кольору. Якщо для колірної сегментації зображень поверхневих пошкоджень використати шкалу зразків кольорів, з кольорами поверхневих пошкоджень характерними для відповідних інтервалів давності, то з врахуванням нормального закону розподілу функції густини ймовірності координат кольору поверхневих пошкоджень залежність відносних розмірів зон різного кольору від давності $f_{bruise i}(T)$ теж буде відповідати функції Гауса. При цьому функціональну залежність для встановленні давності поверхневого пошкодження, або, іншими словами, приналежності давності поверхневого пошкодження до j -того інтервалу можна записати таким чином:

$$f_j(T) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} \frac{k_i}{100} \cdot f_{bruise i}(T) = \sum_{i=1}^{i_{\max}} k_i \cdot a_i \cdot \exp\left(\frac{-(T - b_i)}{2 \cdot c_i^2}\right). \quad (5)$$

де k_i — вагові коефіцієнти для i -того кольору шкали зразків кольорів.

Для кожного з інтервалів давності поверхневих пошкоджень функція приналежності, що відповідає даному інтервалу повинна мати максимальне значення, що визначає правило встановлення давності поверхневих пошкоджень:

$$T = \begin{cases} 0 < T \leq 1, \text{ if } f_0(T) = \max(f_j(T)); \\ 1 < T \leq 3, \text{ if } f_1(T) = \max(f_j(T)); \\ 3 < T \leq 6, \text{ if } f_2(T) = \max(f_j(T)); \\ 6 < T \leq 12, \text{ if } f_3(T) = \max(f_j(T)); \\ 12 < T \leq 24, \text{ if } f_4(T) = \max(f_j(T)); \\ 24 < T \leq 48, \text{ if } f_6(T) = \max(f_j(T)); \\ 48 < T \leq 72, \text{ if } f_7(T) = \max(f_j(T)); \\ 72 < T \leq 96, \text{ if } f_2(T) = \max(f_j(T)); \\ 96 < T, f_8(T) = \max(f_j(T)). \end{cases} \quad (6)$$

При цьому давність виникнення поверхневого пошкодження визначатиметься функцією приналежності давності до певного інтервалу, що матиме максимальне значення.

Висновки

Оскільки координати кольору поверхневих пошкоджень біотканин пов'язані з концентраціями продуктів деструкції гемоглобіну, які змінюються від давності виникнення поверхневих пошкоджень, то з'являється можливість визначити залежність координат кольору поверхневого пошкодження від давності виникнення. Для цього з використанням рекомендацій МКО та за умови використання стандартного джерела освітлення D_{65} розраховано координати кольору поверхневих пошкоджень біотканин у системах RGB, XYZ та LAB в залежності від давності.

З використанням регресії розраховано функціональні залежності координат кольору поверхневого пошкодження біотканини у системі LAB від давності пошкодження, а також розв'язана обернена задача знаходження залежності давності пошкодження від координат кольору. При цьому складені правила встановлення інтервалу давності пошкодження на основі координат кольору у системі LAB, які характерні для даного інтервалу. Розроблені правила встановлення давності є підґрунтям для вдосконалення методу встановлення давності та розробки відповідного апаратно-програмного засобу.

Література

1. Метод визначення координат кольору нормальних і патологічних біотканин / В. Г. Петрук, С. М. Кватернюк, О. Є. Кватернюк [та ін.] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 4. – С. 25–30.
2. Useful Color Equations [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.bruceindbloom.com/index.html?Equations.html>. – Дата звернення 10.08.2016.
3. ISO 7724-1: 1984 Paints and varnishes – Colorimetry – Part 1: Principals. Committee: ISO/TC 35/SC 9, Edition: 1, Publication date: 1984-09-01. – 12 p.
4. Changes of color coordinates of biological tissue with superficial skin damage due to mechanical trauma / V. Petruk, O. Mokanyuk, O. Kvaternyuk [et al.] // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2015. Vol. 9816, 98161I (17 December 2015). – P. 98161I-1–98161I-5; doi: 10.1117/12.2229037.

References

1. Metod vyznachennya koordynat kol'oru normal'nykh i patolohichnykh biotkanyn / V. G. Petruk, S. M. Kvaternyuk, O. E. Kvaternyuk [et al.] // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – 2015. – № 4. – P. 25–30.
2. Useful Color Equations. 2016. <http://www.bruceindbloom.com/index.html?Equations.html>.
3. ISO 7724-1: 1984 Paints and varnishes – Colorimetry – Part 1: Principals. Committee: ISO/TC 35/SC 9, Edition: 1, Publication date: 1984-09-01. – 12 p.
4. Changes of color coordinates of biological tissue with superficial skin damage due to mechanical trauma / V. Petruk, O. Mokanyuk, O. Kvaternyuk [et al.] // Proc. SPIE, Optical Fibers and Their Applications, 2015. Vol. 9816, 98161I (17 December 2015). – P. 98161I-1–98161I-5; doi: 10.1117/12.2229037.

Рецензія/Peer review : 27.10.2016 р. Надрукована/Printed : 8.11.2016 р.
Стаття рецензована редакційною колегією