УДК 535.361; 535.555

М.М. СЛЬОТОВ, Ю.О. УШЕНКО, М.П. ГОРСЬКИЙ, І.В.СОЛТИС

БІОМЕДИЧНА СИСТЕМА ФАЗОМЕТРІЇ ОПТИКО-АНІЗОТРОПНИХ МЕРЕЖ ПЛІВОК СИНОВІАЛЬНОЇ РІДИНИ ДЛЯ ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ТРАВМАТИЧНИХ СТАНІВ СУГЛОБІВ ЛЮДИНИ

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
Україна, м. Чернівці, вул. Коцюбинського 2

Анотація. У роботі розглянуто можливості застосування методу фазометрії лазерних зображень для дослідження оптико-анізотропної структури біологічних рідин, зокрема синовіальної рідини колінного суглоба людини. Обґрунтовано актуальність використання нових інформаційних параметрів для підвищення ефективності діагностики патологічних станів, оскільки традиційні методи лазерної поляриметрії є недостатньо чутливими для оптично тонких середовищ. Запропоновано підхід до формування координатних розподілів фазових зсувів у лазерних зображеннях, що дозволяє отримати фазові мапи полікристалічної структури синовіальної рідини. На основі аналізу таких мап встановлено, що статистичні характеристики фазових розподілів істотно відрізняються для різних типів патологічних станів колінного суглоба, зокрема ревматоїдного артриту, післяопераційного синовіїту та септичного артриту. Показано, що координатні розподіли фазових зсувів мають складну просторову структуру, а їх кількісні параметри можуть бути використані як інформативні діагностичні критерії. Виявлено характерні відмінності у діапазоні фазових флуктуацій та значеннях статистичних моментів, що забезпечує можливість диференціації патологій. Отримані результати підтверджують високу чутливість і специфічність методу фазометрії. Запропонований підхід може бути використаний для розробки нових біомедичних систем лазерної діагностики, орієнтованих на аналіз оптико-анізотропних структур біологічних рідин, та має перспективи впровадження у клінічну практику для підвищення точності діагностики травматичних і запальних захворювань суглобів.

Ключові слова: фазометрія лазерних зображень, синовіальна рідина, оптична анізотропія, фазові мапи, статистичний аналіз, діагностика суглобів.

Abstract. The paper examines the possibilities of applying the method of laser image phasometry to study the optical-anisotropic structure of biological fluids, specifically human knee joint synovial fluid. The relevance of using new informational parameters to enhance the effectiveness of pathological state diagnostics is substantiated, as traditional laser polarimetry methods lack sufficient sensitivity for optically thin media. An approach for forming coordinate distributions of phase shifts in laser images is proposed, allowing for the generation of phase maps of the synovial fluid's polycrystalline structure. Based on the analysis of these maps, it was established that the statistical characteristics of phase distributions differ significantly across various pathological states of the knee joint, including rheumatoid arthritis, postoperative synovitis, and septic arthritis. The results confirm the high sensitivity and specificity of the phasometry method for the clinical diagnosis of traumatic and inflammatory joint diseases.

Keywords: laser image phasometry, synovial fluid, optical anisotropy, phase maps, statistical analysis, joint diagnostics.

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-174-180

ВСТУП

Серед методів оптичної діагностики біологічних тканин людини широко розповсюдження набули методи лазерної поляриметричної діагностики їх оптико – анізотропної структури [1 - 11].

Головним “інформаційним продуктом” таких методів є одержання координатних розподілів азимутів і еліптичності поляризації (поляризаційних мап) з наступним їх кореляційним (авто- і взаємо- кореляційні функції [1 – 3, 10]) і фрактальним (фрактальні розмірності [1 – 3, 8, 9]) аналізом.

© М.М. СЛЬОТОВ, Ю.О., УШЕНКО, М.П. ГОРСЬКИЙ, І.В.СОЛТИС, 2026

У результаті розроблена низка методик ранньої діагностики та диференціації патологічних змін структури біологічних тканин (БТ), пов'язаних з їх дегенеративно-дисторофічними та онкологічними змінами.

Поряд з тим існує широко розповсюджена група оптико-анізотропних біологічних об'єктів, для яких методи лазерної поляриметричної діагностики недостатньо ефективні. До таких об'єктів відносяться оптично-тонкі (коефіцієнт ослаблення) шари різноманітних біологічних рідин (жовч, сеча, ліквар, синовіальна рідина, плаза крові та ін.). Біологічні рідини значно більш доступніші для безпосереднього лабораторного аналізу у порівняні із травматичними методами біопсії БТ.

Виходячи з цього актуальним постає завдання пошуку нових, додаткових параметрів для лазерної діагностики оптико-анізотропної структури біологічних рідин.

1. ДІАГНОСТИКА ТА ДИФЕРЕНЦІАЦІЇ ПАТОЛОГІЧНИХ СТАНІВ КОЛІННОГО СУГЛОБА МЕТОДОМ ФАЗОМЕТРІЇ ЛАЗЕРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ШАРІВ СИНОВІАЛЬНОЇ РІДИНИ

В роботах [1-5] продемонстрована можливість прямого експериментального вимірювання координатних розподілів фазових зсувів у точках лазерних зображень гістологічних зрізів оптико анізотропних біологічних тканин. Схемну реалізацію такого методу ілюструє рис. 1.

Площини пропускання і напрямки головних оптичних осей основні поляризаційних елементів – поляризаторів 4; 9 і фазових пластинок "$\lambda/4$" 3; 8 – орієнтують під кутами $\aleph = 45^0 + \Theta$ і $\aleph = 135^0 + \Theta$.

Установлено [7], що інтенсивність кожної точки такого зображення визначається наступним співвідношенням

$$I = cos^2\,\phi = cos^2(\delta + \theta). \quad (1)$$

Таким чином, формуючи схрещену систему фазової фільтрації, можна одержати координатний розподіл фазових зсувів полікристалічної складової синовіальної рідини або фазову мапу $\phi(m \times n)$. $\phi =$

$$\begin{pmatrix} \phi_{11} & \cdots & \phi_{1n} \\ & \phi_{jk} & \\ \phi_{m1} & \cdots & \phi_{mn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} arccos\sqrt{I_{11}} & \cdots & arccos\sqrt{I_{1n}} \\ & arccos\sqrt{I_{jk}} & \\ arccos\sqrt{I_{m1}} & \cdots & arccos\sqrt{I_{mn}} \end{pmatrix}. \quad (2)$$

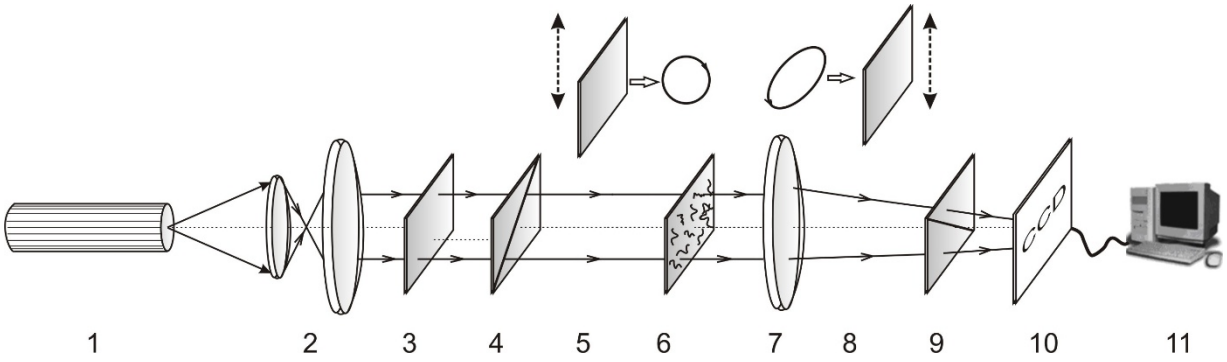

Рисунок 1 – Оптична схема поляриметра - фазометра, де 1 – He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова платівки; 4, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 6 – об'єкт дослідження; 7 – мікрооб'єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп'ютер.

На рис. 2 – рис. 4 представлені координатні розподіли (ліві частини) та їх тривимірна реконструкція (праві частини) виміряні шляхом поляризаційної фільтрації для зразків синовіальної рідини всіх груп. На серії рис. 5 – рис. 7 приведені гістограми (праві частини) розподілів випадкових значень у площині лазерних зображень (ліві частини).

Таблиці 1 – 3 ілюструють величини статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують розподіли випадкових значень фаз у лазерних зображеннях шарів синовіальної рідини колінних суглобів з різної патологією – ревматоїдний артрит – група 1; післяопераційний синовіїт – група 2, септичний артрит – група 3.

У таблиці 4 і таблиці 5 представлено дані про специфічність і чутливість методу фазометрії полікристалічної компоненти синовіальної рідини у діагностиці та диференціації патологічних станів колінного суглоба.

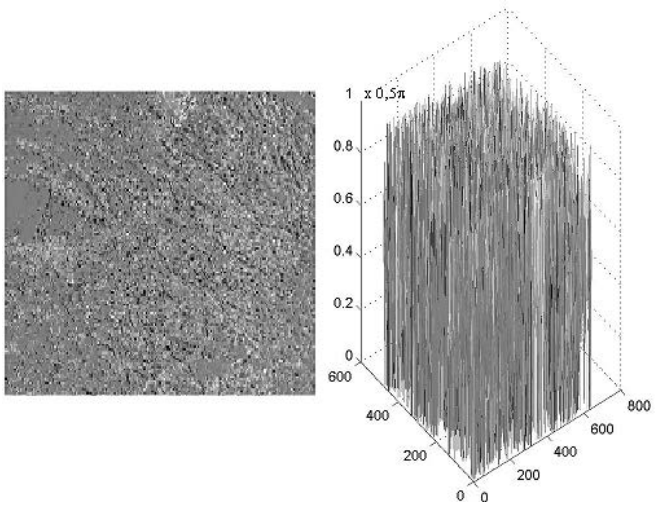

Рисунок 2 – Координатні дво- (ліва частина) і тривимірний (права частина) розподіли фазових зсувів у лазерному зображенні синовіальної рідини з групи 1.

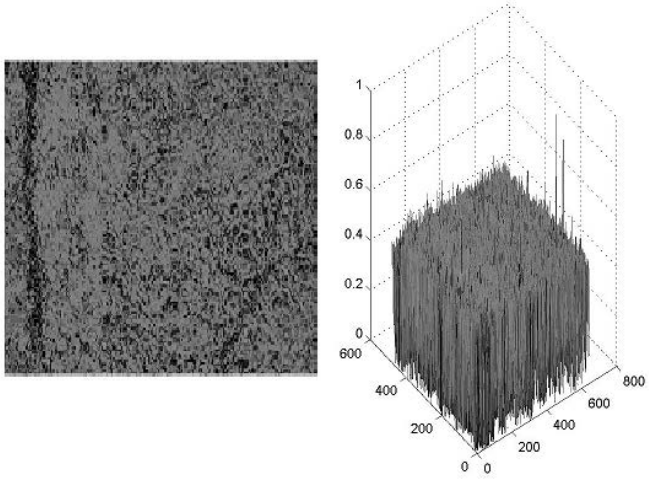

Рисунок 3 – Координатні дво- (ліва частина) і тривимірний (права частина) розподіли фазових зсувів у лазерному зображенні синовіальної рідини з групи 2.

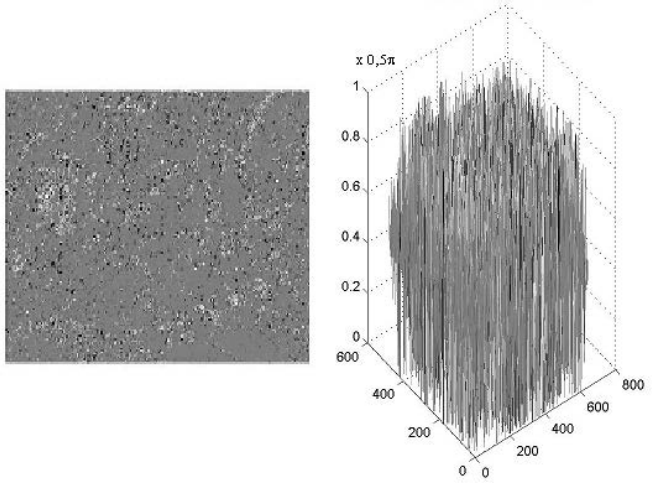

Рисунок 4 – Координатні дво- (ліва частина) і тривимірний (права частина) розподіли фазових зсувів у лазерному зображенні синовіальної рідини з групи 3.

З одержаних даних видно, що:

- координатні розподіли фаз $\phi(m \times n)$ або фазові мапи полікристалічної складової мазків синовіальної рідини характеризуються складною, координатно неоднорідною структурою – рис. 2 – рис. 4 (ліві частини);
- загальна величина і діапазон зміни локальних фазових зсувів індивідуальні для кожного типу патології колінного суглоба – рис. 2 – рис. 4 (праві частини);
- найбільший діапазон фазових флуктуацій у лазерному зображенні, що вносить полікристалічна компонента синовіальної рідини, має місце для випадків ревматоїдного (рис. 2) і септичного (рис. 4) артриту, відповідно;
- мінімальний діапазон фазових зсувів спостерігається у лазерних зображеннях синовіальної рідини колінного суглоба с післяопераційним синовіїтом.

Кількісно структуру фазових мап $\phi(m \times n)$ (ліві частини) для всіх типів патології колінного суглоба людини ілюструють гістограми випадкових розподілів фазових зсувів (праві частини), які приведені на серії рис. 5 – рис. 7.

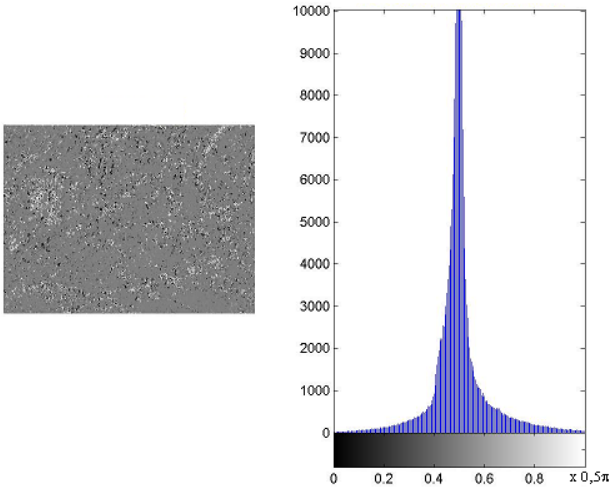

Рисунок 5 – Гістограма випадкових значень у координатному розподілі фазових зсувів лазерного зображення синовіальної рідини з групи 1.

З рис. 5 (права частина) видно, що значення фази ϕ у площині лазерного зображення змінюється не тільки у максимально широкому діапазоні ($0 \le \phi \le 0.5\pi$), але й володіє великими значеннями імовірності в околі $\phi_{max} = 0.25\pi$. Таку структуру ілюструє достатньо симетрична гістограма випадкових значень ϕ відносно головного екстремуму ϕ_{max}, ймовірність якого у 2 – 3 порядки вища за ймовірності інших екстремумів $0 \le \phi \le 0.5\pi$.

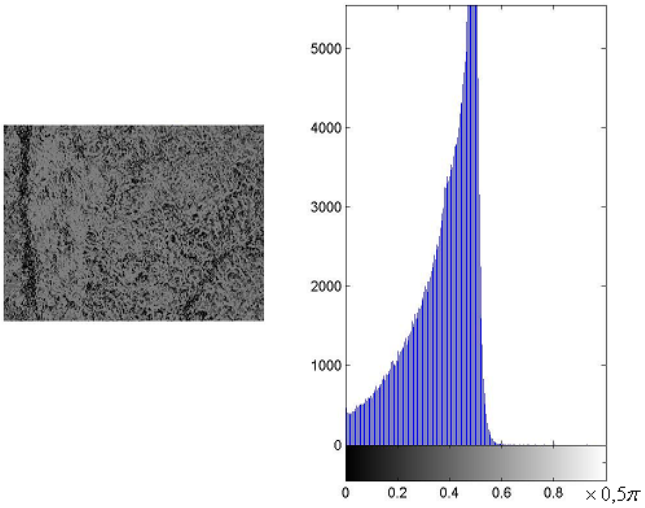

Рисунок 6 – Гістограма випадкових значень у координатному розподілі фазових зсувів лазерного зображення синовіальної рідини з групи 2.

Порівняльний аналіз фазових мап синовіальної рідини колінного суглоба групи 1 і групи 2 (рис. 5 і рис. 6) показує, що фазозсуваюча здатність оптико – анізотропної складової зразка синовіальної рідини колінного суглоба с післяопераційним синовіїтом менша.

Кількісно такий процес виявляється у перерозподілі (асиметризації) екстремумів ймовірностей фазових зсувів у бік менших значень $\phi = 0 \div 0.15\pi$.

Координатну та статистичну структура фазової мапи лазерного зображення зразка синовіальної рідини колінного суглоба з септичним артритом (група 3) ілюструють залежності, що наведені на рис. 7.

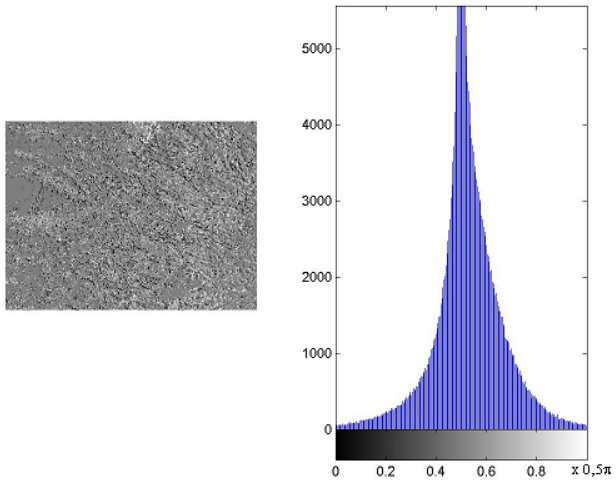

Рисунок 7 – Гістограма випадкових значень у координатному розподілі фазових зсувів лазерного зображення синовіальної рідини з групи 3.

Аналіз одержаних результатів (рис. 7) вказує на зростання оптичної анізотропії речовини синовіальної рідини з групи 3. Відповідна гістограма (рис. 7, права частина) розподілу випадкових значень фазових зсувів у межах їх координатного розподілу (рис. 7, ліва частина) у порівняні з попередніми даними (рис. 5 і рис. 6) характеризується більшими локальними екстремумами у всьому діапазоні $\phi = 0 \div 0{,}5\pi$.

2. СТАТИСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ КООРДИНАТНИХ РОЗПОДІЛІВ ФАЗ ЛАЗЕРНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

У таблиці 1. приведені значення і діапазони зміни величини статистичних моментів $W_{l=1;2;3;4}(\phi)$, які характеризують координатні розподіли фазових зсувів, сформованих оптико анізотропними полікристалічними мережами, у лазерних зображеннях серії зразків синовіальної рідини колінного суглоба людини з трьома типами патології.

Таблиця 1 – Статистичні моменти $W_{l=1;2;3;4}(\phi)$ координатних розподілів фаз лазерних зображень полікристалічних мереж синовіальної рідини

$W_{l=1;2;3;4}(\phi)$	Група 1 ($n = 23$)	Група 2 ($n = 21$)	Група 3 ($n = 12$)
$W_{l=1}(\phi)$	0.72 ± 0.012	0.38 ± 0.058	0.87 ± 0.13
$W_{l=2}(\phi)$	0.095 ± 0.013	0.19 ± 0.029	0.145 ± 0.023
$W_{l=3}(\phi)$	0.84 ± 0.11	4.14 ± 0.78	2.09 ± 0.34
$4(\phi)$	4.12 ± 0.68	1.13 ± 0.16	2.23 ± 0.36

Установлені наступні відмінності між величинами статистичних моментів 1-го – 4-го порядків $W_{l=1;2;3;4}(\phi)$, які характеризують координатні розподіли $\phi(m \times n)$ шарів синовіальної рідини всіх груп:

- статистичний момент 1-го порядку $W_{l=1}(\phi)$ – 1.9 – 2.1 рази;
- статистичний момент 2-го порядку $W_{l=2}(\phi)$ – 1.6 – 2 рази;
- статистичний момент 3-го порядку $W_{l=3}(\phi)$ – 2.2 – 5 разів;
- статистичний момент 4-го порядку $W_{l=4}(\phi)$ – 2.1 – 3.7 рази.

Експериментально виявлені суттєві відмінності між всіма статистичними параметрами фазових мап забезпечили високий рівень чутливості (таблиця 2) і специфічності (таблиця 3) методу фазометрії у діагностиці та диференціації патологічних станів колінного суглоба людини.

Таблиця 2 – Чутливість Se методу фазометрії лазерних зображень

$W_{l=1;2;3;4}(\phi)$	$W_{l=1}(\phi)$	$W_{l=2}(\phi)$	$W_{l=3}(\phi)$	$W_{l=4}(\phi)$
Стан 1	58%	64%	77%	73%
Стан 2	56%	63%	75%	79%
Стан 3	59%	66%	69%	75%

Таблиця 3 – Специфічність Sb методу фазометрії лазерних зображень

$W_{l=1;2;3;4}(\phi)$	$W_{l=1}(\phi)$	$W_{l=2}(\phi)$	$W_{l=3}(\phi)$	$W_{l=4}(\phi)$
Стан 1	54%	59%	62%	64%
Стан 2	57%	63%	65%	67%
Стан 3	58%	64%	68%	69%

З аналізу одержаних даних видно, що використання нового інформаційного параметру – фазового зсуву між ортогональними складовими амплітуди фазових мап $\phi(m \times n)$ забезпечує досягнення високого рівня і $Sy{\sim}65\% - 80\%$ і $Sb{\sim}65\% - 70\%$.

ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано теоретико-методичний підхід до застосування лазерної фазометрії для аналізу оптично тонких середовищ, яким є синовіальна рідина. Доведено, що формування координатних розподілів фазових зсувів у лазерних зображеннях дозволяє отримати більш детальну інформацію про полікристалічну структуру біологічних рідин порівняно з традиційними методами поляриметрії.
2. Встановлено характерні відмінності у просторовій структурі та статистичних характеристиках фазових мап синовіальної рідини для різних патологічних станів. Виявлено, що ревматоїдний артрит, післяопераційний синовіїт та септичний артрит мають унікальні «відбитки» у діапазоні фазових флуктуацій, що обумовлено змінами в анізотропній архітектоніці рідини під впливом запальних процесів.
3. Підтверджено високу діагностичну ефективність методу за допомогою розрахунку статистичних моментів 1-го – 4-го порядків. Кількісні параметри фазових розподілів продемонстрували високу чутливість і специфічність, що дозволяє використовувати їх як об’єктивні інформативні критерії для диференціальної діагностики патологій колінного суглоба.
4. Запропоновано перспективи впровадження розробленого підходу в клінічну практику. Створення біомедичних систем на основі методу фазометрії лазерних зображень дозволить підвищити точність і швидкість діагностики травматичних та запальних захворювань суглобів, мінімізуючи вплив суб'єктивного фактора при аналізі біологічних рідин.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України №2023.03/0174.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Alexander G. Ushenko and Vasilii P. Pishak, “Laser Polarimetry of Biological Tissue: Principles and Applications”, in Handbook of Coherent-Domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science, Vol. 1, pp. 93-138, edited by Valery V. Tuchin, Kluwer Academic Publishers, 2004.
2. O. V. Angelsky, Yu. Ya. Tomka, A. G. Ushenko, Ye. G. Ushenko, and Yu. A. Ushenko, “Investigation of 2D Mueller matrix structure of biological tissues for pre-clinical diagnostics of their pathological states,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 38(23), pp. 4227-4235, 2005.
3. Oleg V. Angelsky, Alexander G. Ushenko, and Yevheniya G. Ushenko, “Complex degree of mutual polarization of biological tissue coherent images for the diagnostics of their physiological state,” J. Biomed. Opt., vol. 10(6), 060502, 2005.

4. O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, and Ye. G. Ushenko, “Investigation of the correlation structure of biological tissue polarization images during the diagnostics of their oncological changes,” Phys. Med. Biol., vol. 50, pp. 4811-4822, 2005.
5. O.V. Angelsky, S.B. Yermolenko, O. Prydij, A.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko, Ye.G. Ushenko, “Polarization-interference structure of speckle fields of the rough skin surface,” Journal of Holography and Speckle, vol. 3(1), pp. 27-34, 2006.
6. O.V. Angelsky, A. G. Ushenko , Yu. A. Ushenko and Ye. G. Ushenko, “Polarization singularities of the object field of skin surface,” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 91(16), pp. 3547-3558, 2006.
7. Oleg V. Angelsky, Alexander G. Ushenko, Yevheniya G. Ushenko, Yuriy Y. Tomka, “Polarization singularities of biological tissues images,” J. Biomed. Opt., vol. 11(5), 054030, 2006.
8. O.V. Angelsky, A.G. Ushenko, A.O. Angelska, Yu.A. Ushenko, “Correlation- and singular-optical approaches in diagnostics of polarization inhomogeneity of coherent optical fields from biological tissues,” Ukrainian Journal of Physical Optics, vol. 8(2), pp. 105-123, 2007.
9. O.G. Ushenko, S.G. Guminetsky, A.V. Motrich, “Optical properties of urine, blood plasma and pulmonary condensate of the patients with pulmovnary form of tuberculosis,” Fotoelektronika, vol.16, pp. 133-139, 2007.
10. A.G. Ushenko, I. Z.Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns’ka, A. P. Peresunko, Omar Kamal Numan, and T. G. Moiysuk, “Evolution of Statistic Moments of 2D-Distributions of Biological Liquid Crystal Net Mueller Matrix Elements in the Process of Their Birefringent Structure Changes,” Advances in Optical Technologies, vol. 2010, Article ID 423145, 2010.
11. O. V. Dubolazov, A. G. Ushenko, V. T. Bachynsky, A. P. Peresunko, and O. Ya. Vanchulyak, “On the Feasibilities of Using the Wavelet Analysis of Mueller Matrix Images of Biological Crystals,” Advances in Optical Technologies, vol. 2010, Article ID 162832, 2010.

Дата надходження: 15.01.2026
Дата прийняття до друку після рецензування: 28.02.2026
Дата публікації: 18.06.2026

Ця робота ліцензується відповідно до
Creative Commons Attribution 4.0 International License

СЛЬОТОВ МИХАЙЛО МИХАЙЛОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна, ***e-mail: m.slyotov@chnu.edu.ua,*** **https://orcid.org/0000-0003-0037-3934**

УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна**,**
e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua, **https://orcid.org/0000-0003-1767-1882**

ГОРСЬКИЙ МИХАЙЛОВИЧ ПЕТРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, доцент комп’ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна**,** ***e-mail: m.gorskiy@chnu.edu.ua,*** **https://orcid.org/0000-0003-4658-0584**

СОЛТИС ІРИНА ВАСИЛІВНА – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна**,** ***e-mail: i.soltys@chnu.edu.ua,*** **https://orcid.org/0000-0003-2156-7404**

Mykhailo SLYOTOV, Yurii USHENKO, Mykhailo GORSKIY, Iryna SOLTYS

BIOMEDICAL SYSTEM OF PHASOMETRY OF OPTICAL-ANISOTROPIC NETWORKS OF SYNOVIAL FLUID FILMS FOR DIFFERENTIATION OF TRAUMATIC CONDITIONS OF HUMAN JOINTS
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University