

УДК 681.784.7:615.849.19

Ю. О. УШЕНКО, В. М. СКЛЯРЧУК, О. В. ДУБОЛАЗОВ, І. В. СОЛТИС,  
О. В. ОЛАР, Д. І. УГРИН, Ю. Я. ТОМКА, Л. Й. ПІДКАМІНЬ, Ю. О. ПИЛИПЕЦЬ

## ПОЛЯРИЗАЦІЙНИЙ КОРЕЛОМЕТР ФАЗОВИХ МАП ЛАЗЕРНО-ІНДУКОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НАДМОЛЕКУЛЯРНИХ МЕРЕЖ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ ПЛІВОК КРОВІ У ДІАГНОСТИЦІ ОБ'ЄМУ КРОВОВТРАТИ

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна  
Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна*

**Анотація.** Розроблено і експериментально апробовано лазерну поляризаційну систему, яка забезпечує кореляційний аналіз фазових мап полікристалічних дегідратованих плівок крові для експресного визначення об'єму крововтрати. У межах експериментальної медицини проведений експеримент у межах контрольної і дослідних груп пацієнтів з різними об'ємами крововтрати. Одержано сукупність фазових мап та встановлений алгоритм визначення об'єму крововтрати шляхом обчислення ексцесу гостроти піку автокореляційних функцій. Відзначено перспективи застосування лазерно-індукованої автофлуоресцентної поляриметрії для розширення функціональних можливостей методу та покращення його чутливості на наноструктурному рівні надмолекулярних мереж плівок крові.

**Ключові слова:** лазер, поляризація, оптична анізотропія, кореляція, плівка крові, крововтрата

**Abstract.** A laser autofluorescence polarization system was developed and experimentally tested, which provides a correlation analysis of phase maps of polycrystalline dehydrated blood films for the express determination of the volume of blood loss. Within the framework of experimental medicine, an experiment was conducted within control and experimental groups of rats with different volumes of blood loss. A set of phase maps was obtained and an algorithm for determining the volume of blood loss was established by calculating the excess of the peak sharpness of the autocorrelation functions. The prospects of using laser-induced autofluorescence polarimetry to expand the functional capabilities of the method and improve its sensitivity at the nanostructural level of supramolecular networks of blood films are noted.

**Key words:** laser, polarization, autofluorescence, optical anisotropy, correlation, blood film, blood loss

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-104-110

### ВСТУП

За останні роки у галузі біомедичних і технічних апаратів і систем, а також у біомедичній оптиці широкого розповсюдження набули лазерні діагностичні методи з використанням поляризованого випромінювання [1-3]. Використання таких систем забезпечує унікальну можливість прямого експериментального детектування оптичних проявів і візуалізації або інтроскопії полікристалічної складової біологічних тканин і рідин органів людини [4-6].

Найбільш повну інформацію про поляризаційні прояви оптичної анізотропії можна отримати шляхом використання вектор-параметричного описання лазерних пучків і застосування Мюллер-матричного формалізму для характеристики полікристалічної архітектури біологічних препаратів [7-10]. У результаті шляхом застосування статистичного аналізу координатних розподілів величини елементів матриці Мюллера було успішно реалізовано діагностику патологічних (рак) і некротичних (причини і давність настання смерті) деструктивних змін біологічних тканин [11-16].

---

© Ю.О. УШЕНКО, В.М. СКЛЯРЧУК, О.В. ДУБОЛАЗОВ, І.В. СОЛТИС,  
О.В. ОЛАР, Д.І. УГРИН, Ю.Я. ТОМКА, Л.Й. ПІДКАМІНЬ, Ю.О. ПИЛИПЕЦЬ, 2024

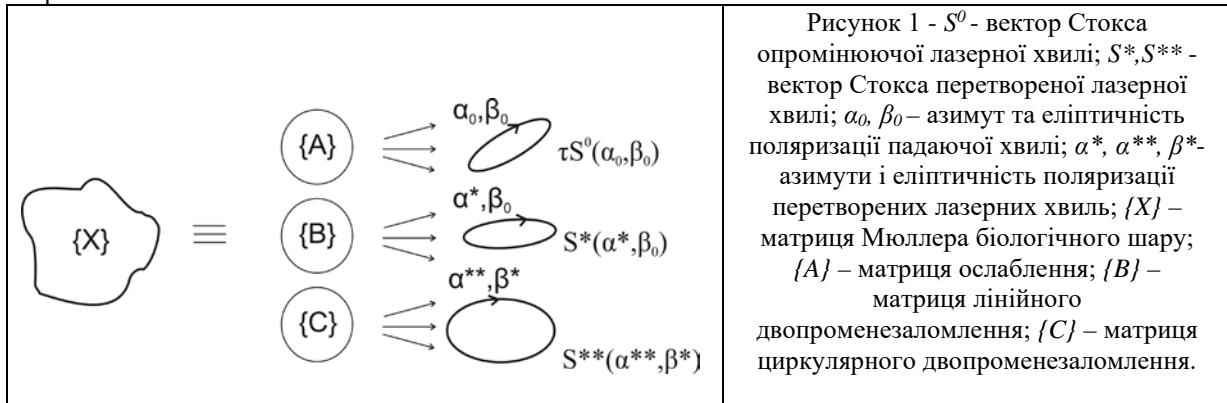
Разом з тим, “поза увагою” дослідників залишилися більш легко доступні (які не потребують травматичної операції біопсії) біологічні препарати – різноманітні рідини органів людини.

Окрім цього, нову і діагностично важливу інформацію про координатну структуру полікристалічної архітекtonіки на молекулярному нанорівні може дати кореляційний підхід до аналізу поляризаційної структури лазерно індукованих автофлуоресцентних картин.

Наша робота спрямована на дослідження у рамках експериментальної медицини інструментально-аналітичних можливостей визначення об’єму крововтрати шляхом автокореляційного аналізу Мюллер-матрично відтворених фазових мап полікристалічних плівок крові щурів.

### КОРОТКА ТЕОРІЯ

Для фізичного аналізу результатів Мюллер-матричної томографії полікристалічних плівок крові ми скористалися добре апробованими у численних дослідженнях [7-16] модельними уявленнями, - рис. 1.



Матриці Мюллера лінійного і циркулярного двопронезаломлення надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж полікристалічних плівок крові аналітично пов’язані з параметрами фазової анізотропії полікристалічної архітекtonіки і мають наступний вигляд [1-6]

Матриця лінійного двопронезаломлення  $\{B\}$ :

$$\{B\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix}; b_{22} = \cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma \cos \phi; b_{42;42} = \sin 2\gamma \sin \phi; b_{44} = \cos \phi; b_{23;32} = \cos^2 2\gamma \sin 2\gamma (1 - \cos \phi); b_{33} = \sin^2 2\gamma + \cos^2 2\gamma \cos \phi; b_{34;43} = \cos 2\gamma \sin \phi. \quad (1)$$

де  $\gamma$  - напрямок орієнтації оптичної осі;  $\phi$  - фазовий зсув між лінійно- та ортогонально поляризованими складовими амплітуди перетвореної лазерної хвилі.

Матриця циркулярного двопронезаломлення  $\{C\}$ :

$$\{C\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{22} & \omega_{23} & 0 \\ 0 & \omega_{32} & \omega_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \omega_{22} = \omega_{33} = \cos 2\chi; \omega_{23} = -\omega_{32} = \sin 2\chi. \quad (2)$$

де  $\chi$  - кут обертання площини поляризації перетвореної лазерної хвилі.

З аналізу виразів (1) і (2) випливає можливість одержання про фазову анізотропію полікристалічної архітекtonіки надмолекулярних мереж дегідратованих плівок крові шляхом експериментального вимірювання координатного розподілу матричного елемента  $b_{44}(x, y) = \cos \phi(x, y)$ .

### ОПТИЧНА СХЕМА І МЕТОДИКА ВИМІРЮВАНЬ

У серії публікацій [18-23] запропоновано і наведено детальну інформацію про поляризаційно-інтерференційний метод фазометрії Мюллер-матричного зображення  $b_{44}(x, y)$ . Виходячи з цього у нашій роботі для полегшення сприйняття матеріалу ми представляємо тільки оптичну схему поляризаційно-інтерференційного Мюллер-матричного корелятора, - рис. 2.

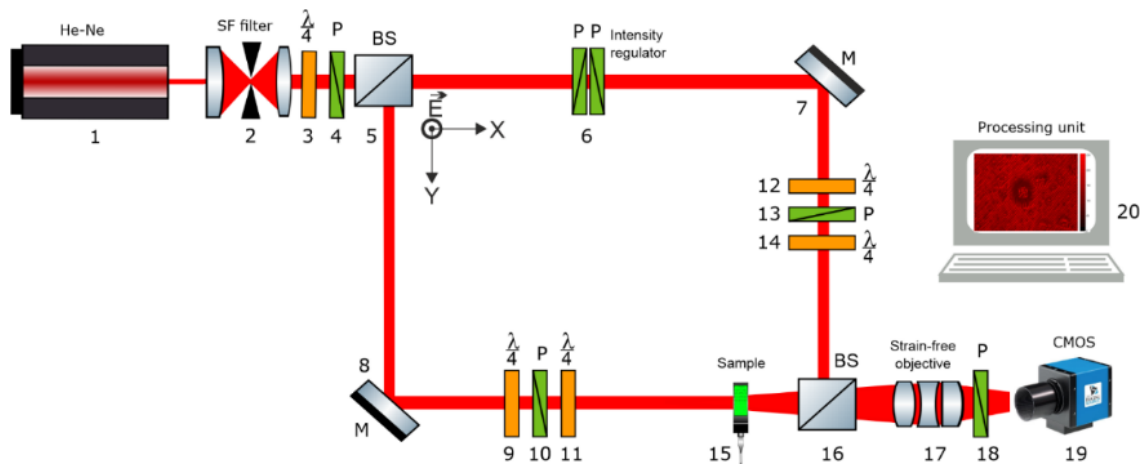


Рисунок 2 – Поляризаційний інтерферометр Маха-Цандера для вимірювання фазових карт дегідратованих плівок крові.

Вимірювання фазової карти полікристалічної плівки відбувається у перехрещених право- і ліво циркулярно поляризованих станах опорного  $I_0$  (12 - 14) і об'єктного  $I(m, n)$  (9 - 11) лазерних пучків за наступним алгоритмом

$$\phi(m, n) = 2 \arccos \sqrt{\left( \frac{I(m, n)}{I_0} \right)}. \quad (3)$$

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження було сформовано три групи зразків полікристалічних плівок крові щурів з різними об'ємами крововтрати

- Контрольна група 1 – 12 зразків;
- Дослідна група 2 (об'єм крововтрати  $1 \text{ mm}^3$ ) – 12 зразків;
- Дослідна група 3 (об'єм крововтрати  $1,5 \text{ mm}^3$ ) – 12 зразків.

На рис. 3 і рис. 4 представлена серія відтворених фазових карт (співвідношення (3)) і гістограм розподілів  $\phi(m, n)$  всіх зразків плівок крові з дослідної групи 2.

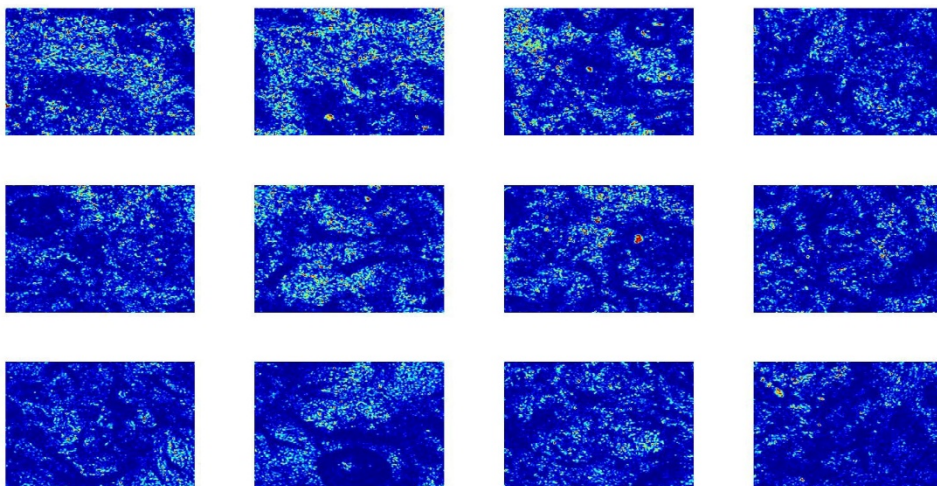


Рисунок 3 – Фазові карти полікристалічних плівок крові щурів з об'ємом крововтрати  $1 \text{ mm}^3$ .

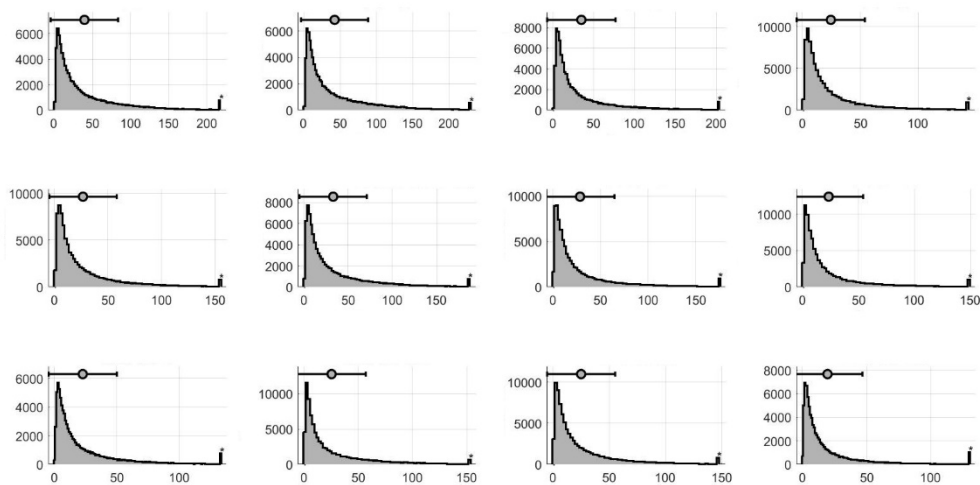


Рисунок 4 – Гістограми розподілів випадкових значень фазових зсувів полікристалічних плівок крові щурів з об'ємом крововтрати  $1 \text{ mm}^3$ .

Результати поляризаційної корелометрії фазових карт полікристалічних плівок крові щурів з усіх груп представлені на рис. 5 – рис. 7

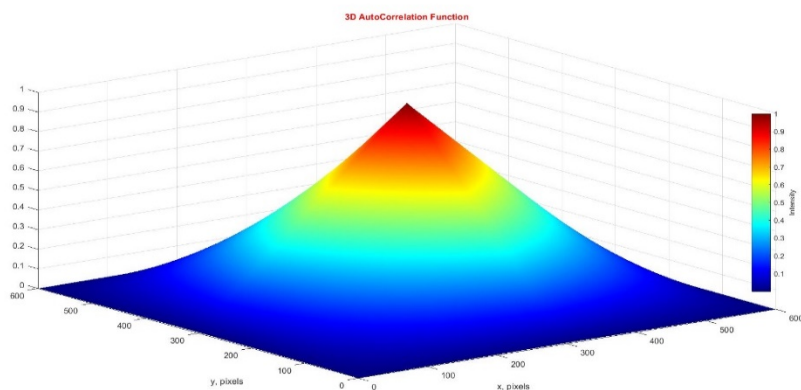


Рисунок 5 – Автокореляційна функція плівок крові щурів з групи 1.

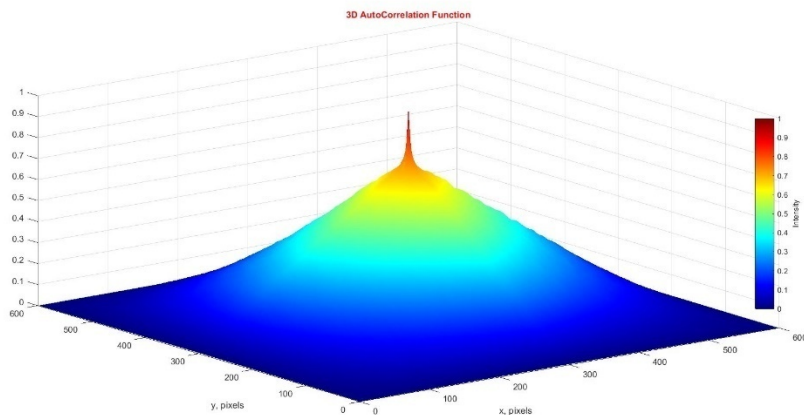


Рисунок 6 – Автокореляційна функція плівок крові щурів з групи 2.

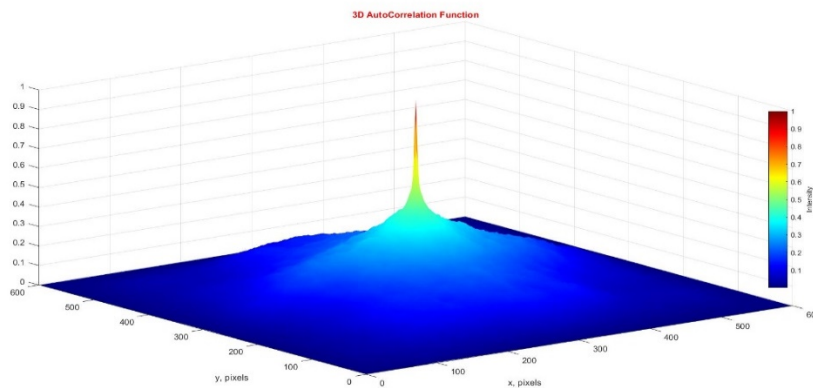


Рисунок 7 – Автокореляційна функція плівок крові щурів з групи 3.

Співставлення даних статистичного аналізу результатів прямого Мюллер-матричного картографування фазових проявів оптичної анізотропії надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж дегідратованих плівок крові (рис. 3) не виявив суттєвих відмінностей між ними. Як видно (рис. 4) гістограми розподілів випадкових значень фазових зсувів між ортогональними складовими амплітуди лазерного випромінювання практично не відрізняються. Даний факт можна пов'язати з тим, що концентраційно полікристалічна архітектура надмолекулярних протеїнових мереж плівок крові практично не зазнає змін при крововтраті. Тому набір випадкових значень фазових зсувів статистично подібний, незалежно від об'єму крововтрати.

Процес крововтрати призводить до зменшення концентрації формених елементів крові. За рахунок цього міняються умови надмолекулярної альбумін-глобулінової кристалізації. За рахунок цього їх координатна архітектура виявляється залежною від об'єму крововтрати.

Порівняльний аналіз одержаних даних Мюллер-матричної поляризаційної корелометрії виявив зростання координатної неоднорідності фазових мап полікристалічних плівок крові щурів із збільшенням об'єму крововтрати. На даний факт вказує зростання "гостроти" піку відповідних автокореляційних залежностей.

Для кількісного визначення об'єму крововтрати ми скористалися обчисленням статистичного моменту 4-го порядку  $K_4$ , який характеризує ексцес автокореляційних розподілів (рис. 5 – рис. 7), і відомим (у рамках статистичного аналізу мап фазової анізотропії біологічних тканин [7-16]) алгоритмом визначення цього параметру, - таблиця 1.

**Таблиця 1**

**Автокореляційне визначення об'єму крововтрати**

Автокореляційний ексцес $K_4$	Реальний об'єм крововтрати	Вимірний об'єм крововтрати	Похибка кореляційних вимірювань
0,39	0	0,03 $mm^3$	0,03 $mm^3$
1,43	1 $mm^3$	1,04 $mm^3$	0,04 $mm^3$
3,17	1,5 $mm^3$	1,56 $mm^3$	0,06 $mm^3$

### ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розроблена і експериментально апробована поляризаційно-інтерференційна система відтворення оптично анізотропних параметрів полікристалічних дегідратованих плівок крові виявилася ефективною у детектуванні об'єму крововтрати шляхом автокореляційного аналізу алгоритмічно відтворених фазових мап надмолекулярних мереж на мікроструктурному рівні їх архітектури.

З метою подальшого розширення функціональних можливостей і покращення чутливості та точності поляризаційно-інтерференційної системи пропонується використання принципів лазерно-індукованої автофлуоресцентної поляриметрії.

Вказаний метод і система його реалізації забезпечать поєднання принципів поляризаційного аналізу лазерно-індукованої автофлуоресценції окремих молекулярних доменів полікристалічної архітектури дегідратованих плівок різноманітних біологічних рідин.

Зокрема, перспективним є використання такого підходу для неінвазивного моніторингу та кількісного оцінювання процесів регенерації ран різного генезу.

### ВИСНОВКИ

У результаті проведеної роботи продемонстровано можливість експресного поляризаційно-кореляційного визначення об'єму крововтрати шляхом Мюллер-матричної інтерферометрії об'єктних полів полікристалічних плівок крові дослідних груп щурів з точністю від 4% до 6%

*Дослідження виконано за підтримки грантів Національного фонду досліджень України 2022.01/0034 і №2023.03/0174.*

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Lee H. R. et al. Digital histology with Mueller polarimetry and Fast DBSCAN. *Appl. Opt.* (2022). 61(32): 9616-9624.
2. Kim M. et al. Optical diagnosis of gastric tissue biopsies with Mueller microscopy and statistical analysis. *J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ.* (2022). 18(2):10.
3. Lee H. R. et al. Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations. *J. Biomed. Opt.* (2019). 24(7): 076004.
4. et P. Li al. Analysis of tissue microstructure with Mueller microscopy: logarithmic decomposition and Monte Carlo modeling *J. Biomed. Opt.* (2020). 25(1): 015002.
5. Lee H. R. et al. Mueller microscopy of anisotropic scattering media: theory and experiments. *Proc. SPIE 10677 Unconventional Optical Imaging* (2018). 10677:1067718.
6. Ma H., He H., Ramella-Roman J. C "Mueller matrix microscopy" In: J. C. Ramella-Roman, T. Novikova, editors. *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing*. Springer: Cham (2023). p.281-321.
7. Ushenko YA, Koval GD, et.al. Mueller-matrix of laser-induced autofluorescence of polycrystalline films of dried peritoneal fluid in diagnostics of endometriosis. *Journal of Biomedical Optics* 2016, 21 (7), 071116-071116.
8. Angelsky PO, Ushenko AG, Dubolazov AV et. al. The singular approach for processing polarization-inhomogeneous laser images of blood plasma layers. *Journal of Optics* 2013, 15 (4), 044030.
9. Angelsky OV, Ushenko AG, Pishak VP, et. al. Coherent introscopy of phase-inhomogeneous surfaces and layers. *Photonics, Devices, and Systems* 1999, 4016, 413-418.
10. Ushenko AG, Dubolazov AV, Ushenko VA, Novakovskaya OY. Statistical analysis of polarization-inhomogeneous Fourier spectra of laser radiation scattered by human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations. *Journal of Biomedical Optics* 2016, 21 (7), 071110-071110.
11. Yermolenko S Ushenko, A, Ivashko P et. al. Spectropolarimetry of cancer change of biotissues. *Ninth International Conference on Correlation Optics 2009*, 7388, 404-410.
12. Ushenko VA, Hogan BT, Dubolazov A et.al. Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures. *Scientific Reports* 2021, 11 (1), 3871.
13. Olar EI, Ushenko AG, Ushenko YA. Correlation microstructure of the Jones matrices for multifractal networks of biotissues. *Laser Physics* 2004, 14 (7), 1012-1018.
14. Ushenko A, Sdobnov A, Dubolazov A, Grytsiuk M, et.al. Stokes-correlometry analysis of biological tissues with polycrystalline structure. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2018, 25 (1), 1-12.
15. Angelsky OV, Ushenko AG, Zenkova CY, Felde CV, et.al. *Optical measurements: polarization and coherence of light fields*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
16. Pishak VP, Ushenko AG, Gryhoryshyn P, et.al. Polarization structure of biospeckle fields in crosslinked tissues of a human organism: 1. Vector structure of skin biospeckles. *International Conference on Correlation Optics 1997*, 3317, 418-424.
17. Peyvasteh M., Tryfonyuk L., Ushenko V. et al. 3D Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours. *Laser Physics Letters* (2020). 17 (11):115606.

18. Ushenko V.A., Hogan B.T., Dubolazov A. et al. Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures. *Scientific Reports* (2021). 11 (1): 3871.
19. Zabolotna N.I., Sholota V.V., Maslovskiy V.Iu., Zhmahulova Sh. Nechitki modeli pryiniattia rishennia pry lazernii poliaryzatsiino invariantnii diahnostytsi ishemii miokarda. *Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii*. 2023. №1. S.97-105.
20. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>, eBook ISBN 9780429057618.
21. Metody i systemy lazernoi poliarymetrii optychnoi anizotropii zhovchi liudyny. T. 2 / Ushenko O.H., Pavlov S.V., Zabolotna N.I. ta in. Vinnytsia: Edelveis, 2019. 337 s.
22. Perspectives of the application of medical information technologies for assessing the risk of anatomical lesion of the coronary arteries / Pavlov S. V., Mezhiievskaya I. A., Wójcik W. [et al.]. *Science, Technologies, Innovations*. 2023. №1(25), 44-55 p.
23. Wójcik, W.; Mezhiievskaya, I.; Pavlov, S.V.; etc. Medical Fuzzy-Expert System for Assessment of the Degree of Anatomical Lesion of Coronary Arteries. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2023, 20, 979.

Надійшла до редакції 5.04.2024 р.

**УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – д.ф.м.н., професор, зав. кафедрою комп’ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [yu.ushenko@chnu.edu.ua](mailto:yu.ushenko@chnu.edu.ua)

**СКЛЯРЧУК ВАЛЕРІЙ МИХАЙЛОВИЧ** – д.ф.м.н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [v.skliarchuk@chnu.edu.ua](mailto:v.skliarchuk@chnu.edu.ua)

**ДУБОЛАЗОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ** – д.ф.м.н., професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [o.dubolazov@chnu.edu.ua](mailto:o.dubolazov@chnu.edu.ua)

**СОЛТИС ІРИНА ВАСИЛІВНА** – к.ф.м.н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [i.soltys@chnu.edu.ua](mailto:i.soltys@chnu.edu.ua)

**ОЛАР ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІУВИЧ** – к.ф.м.н., асистент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [o.olar@chnu.edu.ua](mailto:o.olar@chnu.edu.ua)

**УГРИН ДМИТРО ІЛІЧ** – д.ф.м.н., професор кафедри комп’ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [d.ugryn@chnu.edu.ua](mailto:d.ugryn@chnu.edu.ua)

**ТОМКА ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ** – д.ф.м.н., доцент кафедри комп’ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [yu.tomka@chnu.edu.ua](mailto:yu.tomka@chnu.edu.ua)

**ПІДКАМІНЬ ЛЕОНІД ЙОСИПОВИЧ** – к.ф.м.н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, **e-mail:** [l.pidkamin@chnu.edu.ua](mailto:l.pidkamin@chnu.edu.ua)

**ПИЛИПЕЦЬ ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА** - лікар, Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна, **e-mail:** [y.hopanchuk@med.mil.ua](mailto:y.hopanchuk@med.mil.ua)

Yuriy USHENKO, Valeriy SCKLIARCUK, Olexander DUBOLAZOV, Irina SOLTYS, Olexander OLAR,  
Dmytro UGRYN, Yuriy TOMKA, Leonid PIDKAMIN, Yuliia PYLYPETS

**POLARIZATION CORRELOMETER OF PHASE MAPS OF LASER-INDUCED IMAGES OF SUPRAMOLECULAR NETWORKS OF POLYCRYSTALLINE BLOOD FILMS IN THE DIAGNOSTICS OF VOLUME OF BLOOD LOSS**

Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University  
Military Medical Clinical Center of the Central Region, Vinnytsia, Ukraine