

УДК: 004.92, 004.93, 004.67, 535.5

Ю. О. УШЕНКО, О. В. ДУБОЛАЗОВ, І. В. СОЛТИС, Ю. Я. ТОМКА,  
О. Г. УШЕНКО, І. Ю. ГОРДЕЙ, П. А. ГОРОДЕНСЬКИЙ, М. М. ДЕМКІВ

## КОМП'ЮТЕРНИЙ СИНГУЛЯРНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ АВТОФЛУОРЕСЦЕНЦІЇ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЮЮЧИХ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна,  
[a.dubolazov@chnu.edu.ua](mailto:a.dubolazov@chnu.edu.ua)*

**Анотація.** Визначено аналітичні умови формування сингулярностей елементів матриці Джонса двопробних заломлюючих мереж біологічних тканин. Встановлено кореляцію між координатними положеннями характеристичних точок двовимірних елементів матриці Мюллера оптично тонкого шару біологічної тканини та мережі S- та C – точок у її лазерному зображенні. Продемонстровано ефективність Мюллер – матричної сингулярної діагностики не тільки онкологічних змін тканини міометрія, а й диференціації ступеня їх тяжкості.

**Ключові слова:** поляризація, кореляція, біологічна тканина, статистика, матриця Мюллера

**Abstract.** The analytical conditions for the formation of singularities of the Jones matrix elements of birefringent networks of biological tissues are determined. The correlation between coordinate positions of characteristic points of two-dimensional elements of the Mueller matrix of an optically thin layer of biological tissue and the network of S- and C-points in its laser image is established. The effectiveness of the Mueller matrix singular diagnostics of not only oncological changes in the myometrial tissue, but also the differentiation of their severity is demonstrated.

**Keywords:** polarization, correlation, biological tissue, statistics, Mueller matrix

**DOI:** 10.31649/1681-7893-2023-45-1-114-120

### 1. ВСТУП

Важливим напрямом неруйнівної діагностики органічних фазово-неоднорідних шарів є лазерна автофлуоресцентна поляриметрія [1,2], яка дозволяє отримувати інформацію про оптичну анізотропію [3-5] біологічних тканин (БТ). Для статистичного аналізу такої поляриметричної інформації розроблено модельний підхід, що ґрунтується на наступних положеннях [6-23]:

- морфологічна будова БТ розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури;

- кристалічна компонента або позаклітинна матриця сформована мережею оптично одновісних двопробних заломлюючих протеїнових (колаген, міозин, еластин та ін.) фібрил або біологічних кристалів;

Розвитком зазначених статистичних досліджень став новий підхід для опису лазерних автофлуоресцентних зображень БТ, що ґрунтується на аналізі координатних розподілів поляризаційних сингулярностей [3-5]. До них відносяться лінійно (S-точки) та циркулярно (C-точки) поляризовані стани світлових коливань.

**Метою роботи** є розвиток методів лазерної автофлуоресцентної поляриметрії на основі визначення сингулярних взаємозв'язків "об'єкт – поле" для діагностики трансформації орієнтаційно фазової структури позаклітинної матриці БТ, пов'язаних із передраковою зміною їх фізіологічного стану.

## 2. КОРОТКА ТЕОРІЯ СИНГУЛЯРНОГО ПІДХОДУ В АНАЛІЗІ ДВОПРОМЕНЕВИХ МЕРЕЖ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

З математичного погляду сингулярність комплексного матричного елемента визначають такі умови [3-5]

$$\begin{cases} (Re d_{ik})^2 + (Im d_{ik})^2 = 0; \\ tg \left[ \frac{Im(d_{ik})}{Re(d_{ik})} \right] = \infty. \end{cases} \quad (1)$$

З урахуванням (1) комплексні вирази елементів матриці Джонса двопронезаломлюючої БТ набувають вигляду [6-11]

$$d_{11} \Leftrightarrow \begin{cases} (\cos^2 \rho + \sin^2 \rho \cos \delta)^2 + \sin^4 \rho \sin^2 \delta = 0; \\ \cos^2 \rho + \sin^2 \rho \cos \delta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

$$d_{22} \Leftrightarrow \begin{cases} (\sin^2 \rho + \cos^2 \rho \cos \delta)^2 + \cos^4 \rho \sin^2 \delta = 0; \\ \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \cos \delta = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$d_{12} = d_{21} \Leftrightarrow \begin{cases} 2 \cos^2 \rho \sin^2 \rho (1 + \cos \delta) = 0; \\ \cos \rho \sin \rho (1 + \cos \delta) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

З (2) – (4) слідує, що сингулярності матричних елементів  $d_{ik}$  обумовлені певними (характеристичними) значеннями орієнтаційного  $\rho^*$  та фазового  $\delta^*$  параметрів мережі біологічних кристалів позаклітинної матриці

$$\begin{cases} \rho^* = 0^0, 90^0; \\ \delta^* = 0^0, 90^0, 180^0. \end{cases} \quad (5)$$

З іншого боку, співвідношення (5) є необхідними умовами для формування оптично одновісним двопронезаломлюючим кристалом поляризаційних сингулярних станів (S- ( $\delta = 0^0; 180^0$ ) і C- ( $\delta = \pm 90^0$ ) точок) лазерного пучка. Звідси випливає, що існує прямий теоретичний взаємозв'язок між сингулярностями елементів матриці Джонса біологічного кристала та поляризаційними сингулярностями у його лазерному зображенні.

## 3. ОПТИЧНА СХЕМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рис. 1 показано оптичну схему лазерного автофлуоресцентного поляриметра [12-17] для вимірювання елементів матриці Мюллера гістологічних зрізів БТ

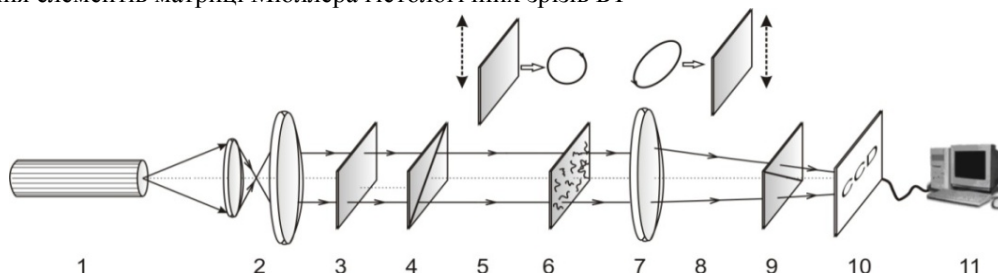


Рисунок 1 – Оптична схема поляриметра, де 1 - He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова пластівки; 5, 8 - механічно рухливі чвертьхвильові пластинки; 4, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 6 – об'єкт дослідження; 7 – мікрооб'єктив; 10 - CCD камера; 11 – персональний комп'ютер

Освітлення проводилося паралельним ( $\varnothing = 104$  мкм) пучком He-Ne лазера ( $\lambda = 0.6328$  мкм,  $W = 5.0$  мВт). Поляризаційний освітлювач складається з чвертьхвильових пластин 3; 5 і поляризатора 4 і послідовно формує серію лінійно ( $I_0; I_{90}; I_{45}; I_{135}$ ) з азимутами  $0^0; 90^0; 45^0; 135^0$  і право- ( $I_{\otimes}$ ), ліво- ( $I_{\oplus}$ )

циркулярно поляризованих зондуєчих БТ лазерних пучків. Зображення БТ мікрооб'єктивом (4 ×) 7 проектувалися в площину світлочутливої площини (800x600 пікселів) CCD камери 10. Поляризаційний аналіз зображень БТ здійснювався за допомогою поляризатора 9 та чвертьхвильової пластинки 8 за наступною методикою:

**4. ЛАЗЕРНА АВТОФЛУОРЕСЦЕНТА СИНГУЛЯРНА ДІАГНОСТИКА ТА ДИФЕРЕНЦІАЦІЯ ПАТОЛОГІЧНИХ ЗМІН ТКАНИН ЖІНОЧОЇ РЕПРОДУКТИВНОЇ СФЕРИ**

Як об'єкти дослідження використовувалися три групи гістологічних зрізів основної тканини жіночої репродуктивної сфери – міометрія:

- біопсія здорової тканини репродуктивної сфери жінки (тип "А");
- біопсія тканини в передраковому стані ектонії (тип "Б");

Використовувалася така методика:

- координатні мережі характеристичних значень матричних елементів  $M_{44}^*(m \times n) = 0; \pm 1$  сканувалися у напрямі  $x \equiv 1, \dots, m$  з кроком  $\Delta x = 1pix$ ;
- в межах отриманих вибірок  $(1pix \times n_{pix})^{(k=1,2,\dots,m)}$  для координатного розподілу елемента  $M_{44}(m \times n)$  підраховувалася загальна кількість ( $N^{(k)}$ ) характеристичних точок ( $0; \pm 1$ ), які задають (співвідношення (7)) повний ансамбль сингулярних точок  $N(x) \equiv (N^{(1)}, N^{(2)}, \dots, N^{(m)})$ ;

На рис. 2 показані координатні розподіли матричних елементів  $M_{44}(m \times n)$  гістологічних зрізів тканин міометрія "А" і "Б" – типів.

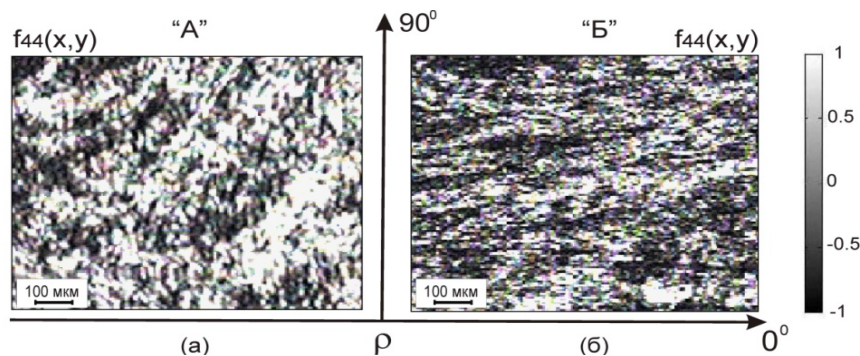


Рисунок 2 – ММІ елемента  $f_{44}$  тканин міометрія «А» (а) та «Б» (б) типів.

Рис. 3 і рис. 4 ілюструють розподіли кількості сингулярностей  $N(x); N_{0;90}(x); N_{45;135}(x)$  тканин міометрія "А" (ліва колонка), "Б" (права колонка) типів.

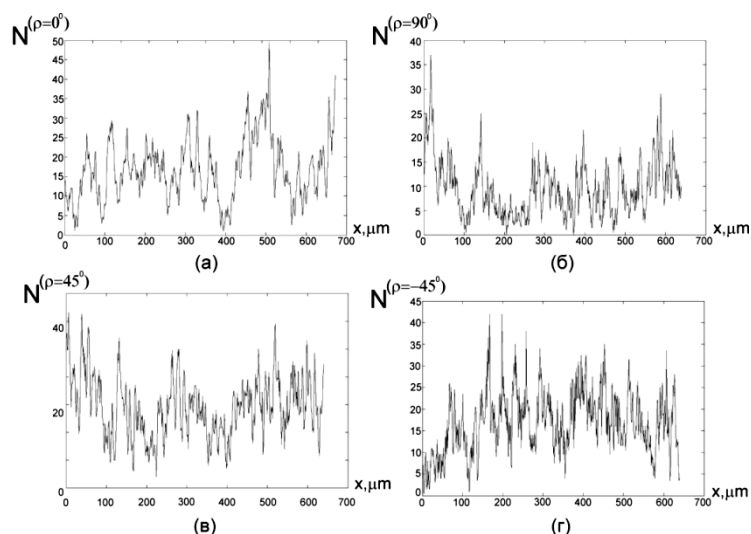


Рисунок 3 – Залежності кількості сингулярностей  $N^{(j)}(x)$  тканин міометрія типу «А».

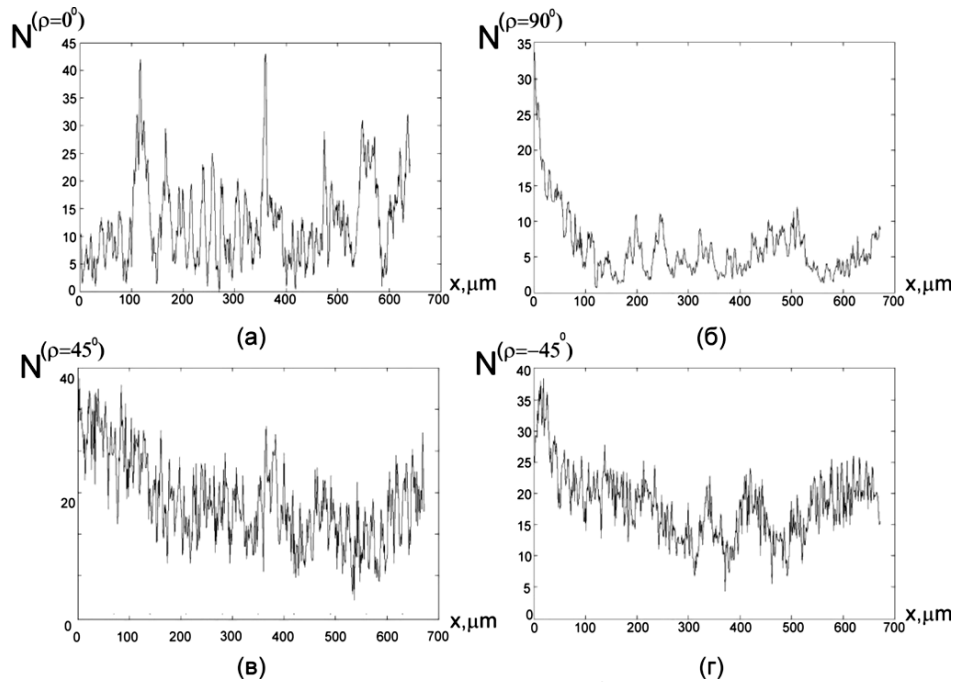


Рисунок 4 – Залежність кількості сингулярностей  $N^{(j)}(x)$  тканин міометрія типу «Б».

Порівняльний аналіз отриманих даних показує:

- координатні розподіли елементів  $M_{44}(m \times n)$  матриці Мюллера тканини міометрія всіх типів характеризуються індивідуальними за кількісною та топологічною структурою мережами сингулярних точок;
- загальна кількість  $\pm C$  –точок ( $M_{44}^*(m \times n) = 0$ ) послідовно зростає для зразків міометрія "А", "Б" типів (рис. 6 "а", "б", "в");
- залежності  $N_{0;90}(x)$  кількості сингулярних значень матричних елементів для зразків тканини міометрію всіх типів близькі за структурою;
- розподіли  $N_{45;135}(x)$  для зразків тканини міометрія "Б"-типу характеризуються суттєвим (у 2 - 3 рази) збільшенням кількості сингулярних значень порівняно з аналогічними залежностями  $N_{0;90}(x)$  (рис. 6 "д", "з").

Отримані результати можна пов'язати зі зростанням двопронезаломлення ( $\Delta n \approx 1,5 \times 10^{-2}$ ) колагенових фібрил патологічно зміненого міометрію "Б" - типу.

З фізичної точки зору такі морфологічні процеси виявляються у збільшенні ймовірності формування  $\pm C$  - точок (зразки міометрія "Б" - типу), а також у виникненні асиметрії між діапазонами зміни значень залежностей  $N_{0;90}(x)$  і  $N_{45;135}(x)$ , які характеризують число ортогональних S- і C- точок.

У таблиці 2 наведено статистично усереднені в межах обох груп зразків тканини міометрія значення  $Z_{1;2;3;4}(N(x); N_{0;90}(x); N_{45;135}(x))$ .

**Таблиця 2**

**Коефіцієнти асиметрії Z сингулярних значень розподілів  $N(\rho=0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ)$  Мюллер-матричних зображень  $f_{44}(m, n)$  тканини міометрію**

$Z$	Міометрій (здоровий) (25 зразків)	Міометрій (патологічно змінений) (23 зразка)
$Z_M^{0-90}$	$0,03 \pm 0,002$	$0,45 \pm 0,05$
$Z_\sigma^{0-90}$	$0,02 \pm 0,001$	$0,12 \pm 0,01$
$Z_M^{45,-45}$	$0,025 \pm 0,001$	$0,28 \pm 0,03$
$Z_\sigma^{45,-45}$	$0,03 \pm 0,003$	$0,14 \pm 0,02$

З наведених даних випливає:

- Метод Мюллер – матричної автофлуоресцентної сингулярної діагностики ефективний у диференціації оптичних властивостей всіх типів зразків – статистичні моменти 3-го та 4-го порядків розподілів для зразків “А” та “Б” - типів різняться відповідно до 1,7 та 2, 5 разів.
- Для розподілів  $N_{45;135}(x)$  кількості ортогональних сингулярних точок  $S_{45;135}$ –;  $C_{45;135}$  тканини міометрія “А” та “Б” типів спостерігаються максимальні (від 2,2 до 4,1 разів) відмінності між усіма статистичними моментами  $M_{j=1;2;3;4}$ .

### ВИСНОВКИ

1. Визначено аналітичні умови формування сингулярностей елементів матриці Джонса двопробневих заломлюючих мереж біологічних тканин.
2. Показано можливість Мюллер - матричної селекції поляризаційних сингулярностей, сформованих біологічними кристалами з ортогонально орієнтованими ( $\rho = 0^0; 90^0$  і  $\rho = 45^0; 135^0$ ) оптичними осями.
3. Продемонстровано ефективність Мюллер – матричної сингулярної діагностики не тільки онкологічних змін тканини міометрія, а й диференціації ступеня їх тяжкості.

### ЛІТЕРАТУРА

1. W.-F. Cheong, S.A. Prah, A.J. Welch. *IEEE J. of Quan. Elec.*, 26, 2166-2185, 1990.
2. S.A. Prah, M. Keijzer, S.L. Jacques, A.J. Welch. *SPIE Proceedings of Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology*, 5, 102-111, 1989.
3. I. Freund, *Opt.Comm.* 226, 351 (2003).
4. J.F. Nye. and J.V. Hajnal. *Proc. R. Soc. A* 409, 21 (1987).
5. M.V. Berry and M.R. Dennis. *Proc. R. Soc. A* 457, 141 (2001).
6. V.A. Ushenko, B.T. Hogan, A. Dubolazov. “Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures”, (2021) *Scientific Reports*, 11 (1), № 3871.
7. M. Peyvaste, L. Tryfonyuk, etc. “3D Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours”, (2020) *Laser Physics Letters*, 17 (11), 115606.
8. V. Ushenko, A. Sdobnov, etc. “3D Mueller-matrix diffusive tomography of polycrystalline blood films for cancer diagnosis”, (2018) *Photonics*, 5 (4), 54.
9. Yu. A. Ushenko. “Spatial-frequency Fourier polarimetry of the complex degree of mutual anisotropy of linear and circular birefringence in the diagnostics of oncological changes in morphological structure of biological tissues”, *Quantum Electron*, 2012, Volume 42(8).
10. V.A. Ushenko. “Complex degree of mutual anisotropy of linear birefringence and optical activity of biological tissues in diagnostics of prostate cancer”, *Optics and Spectroscopy*, August 2013, Volume 115, Issue 2, pp 290-297.
11. Yu. A. Ushenko, V. T. Bachynsky, O. Ya. Vanchulyak, A. V. Dubolazov, M. S. Garazdyuk, and V. A. Ushenko, “Jones-matrix mapping of complex degree of mutual anisotropy of birefringent protein networks during the differentiation of myocardium necrotic changes,” *Appl. Opt.* 55, B113-B119 (2016).
12. V.G. Kolobrodov, Q.A. Nguyen, G.S Tymchik. “The problems of designing coherent spectrum analyzers.- Proc. of SPIE, 2013, vol. 9066, p. Article number 90660N, 11th International Conference on Correlation Optics 18 September 2013 through 21 September 2013, Code 103970.
13. V.A. Ostafiev., S.P. Sakhno S.V. Ostafiev., G.S. Tymchik. Laser diffraction method of surface roughness measurement.- *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, N63, pp.871-874.
14. Igor Chyzh, Valentin Kolobrodov, Anatoly Molodyk, Volodymyr Mykytenko, Grigoriy Tymchik, Ryszard Romaniuk, Piotr Kisała, Aliya Kalizhanova, Bakhyt Yerallyeva Energy resolution of dual-channel opto-electronic surveillance system.- *Proceedings Volume 11581, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020; 115810K* (2020) <https://doi.org/10.1117/12.2580338> Event: Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2020, 2020, Wilga, Poland.
15. V.H. Kolobrodov., V.I Mykytenko., G.S Tymchik. “Polarization model of thermal contrast observation objects”. *Thermoelectricity*, 2020, № 1, p. 36-49.

16. V.H. Kolobrodov, M.S. Kolobrodov, G.S. Tymchik, etc. "The output signal of a digital optoelectronic processor". Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108080W (1 October 2018).
17. G.S. Tymchik., V.I. Skytsyuk., etc. "Diagnosis abnormalities of limb movement in disorders of the nervous system" Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2017, 2017/8/7, pp. 104453S-104453S-11. DOI 10.1117/12.228100
18. Shital Agrawal, Shailesh Kumar, " MLSMBQS: Design of a Machine Learning Based Split & Merge Blockchain Model for QoS-Aware Secure IoT Deployments", International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP), Vol.14, No.5, pp. 58-71, 2022. DOI:10.5815/ijigsp.2022.05.05
19. B. Premamayudu, Chavala Bhuvaneswari, " Covid-19 Automatic Detection from CT Images through Transfer Learning", International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP), Vol.14, No.5, pp. 84-95, 2022. DOI:10.5815/ijigsp.2022.05.07
20. A. Nenad, Slobodan N. Marković, Filip N. Bjelić, Marković, "Diagnostics Algorithms for Analysis and Assessment of Steady States and Disorders in Electrical Networks", International Journal of Image, Graphics and Signal Processing(IJIGSP), Vol.14, No.4, pp. 1-12, 2022. DOI:10.5815/ijigsp.2022.04.01
21. Farzin Salmasi, Mohammad Taghi Sattari, Halit Apaydin, " Mathematical Based Implicit and Explicit Finite Difference Techniques for Solving the Ground Water Flow Equations Using Spreadsheets", International Journal of Mathematical Sciences and Computing(IJMISC), Vol.8, No.4, pp. 1-14, 2022. DOI: 10.5815/ijmsc.2022.04.01
22. Arebu Dejen, Murad Ridwan, "A Review of Quantum Computing", International Journal of Mathematical Sciences and Computing(IJMISC), Vol.8, No.4, pp. 49-59, 2022. DOI: 10.5815/ijmsc.2022.04.05
23. Gholam Reza Moghissi, Ali Payandeh, "Revised Method for Sampling Coefficient Vector of GNR-enumeration Solution", International Journal of Mathematical Sciences and Computing(IJMISC), Vol.8, No.3, pp. 1-20, 2022. DOI:10.5815/ijmsc.2022.03.01/

#### ДОДАТКОВА ІНФОРМАЦІЯ

*Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, Проект 2020.02/0061*

*Надійшла до редакції 25.03.2023р.*

**УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: yuriyu@gmail.com](mailto:yuriyu@gmail.com)

**ДУБОЛАЗОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ** - доктор фізико-математичних наук, професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: a.dubolazov@chnu.edu.ua](mailto:a.dubolazov@chnu.edu.ua)

**СОЛТИС ІРИНА ВАСИЛІВНА** - кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: i.soltys@chnu.edu.ua](mailto:i.soltys@chnu.edu.ua)

**УШЕНКО ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ** - доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: o.ushenko@chnu.cv.ua](mailto:o.ushenko@chnu.cv.ua)

**ТОМКА ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: yu.tomka@chnu.cv.ua](mailto:yu.tomka@chnu.cv.ua)

**ГОРДЕЙ ІВАН ЮРІЙОВИЧ** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, [e-mail: hordei.ivan@chnu.edu.ua](mailto:hordei.ivan@chnu.edu.ua)

---

---

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

---

---

**ГОРОДЕНСЬКИЙ ПАВЛО АНДРІЙОВИЧ** – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, *e-mail: [horodenskyi.pavlo@chnu.edu.ua](mailto:horodenskyi.pavlo@chnu.edu.ua)*

**ДЕМКІВ МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ** – студент 5 курсу (магістратура) кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Україна, *e-mail: [demkiv.mykola@chnu.edu.ua](mailto:demkiv.mykola@chnu.edu.ua)*

Yurii USHENKO, Olexander DUBOLAZOV, Iryna SOLTYS, Yurii TOMKA,  
Olexander USHENKO, Ivan GORDEY, Pavlo HORODENSKY, Mykola DEMKIV

### COMPUTER SINGULAR ANALYSIS OF THE PROCESSES OF LASER AUTOFLUORESCENCE OF BIRTH-REFRACTING BIOLOGICAL TISSUES

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsjubynskyi Str. Chernivtsi, Ukraine