

УДК 615.47:616.073

К. О. РАДЧЕНКО, О. В. КАРАСЬ

МЕТОД ТА СИСТЕМА ДЖОНС-МАТРИЧНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК ПЛАЗМИ КРОВІ ПРИ ПАТОЛОГІЯХ МОЛОЧНИХ ЗАЛОЗ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: kostia.radchenko@gmail.com*

Анотація. В роботі розглянуто Джонс-матричне моделювання оптико-анізотропних властивостей плівок плазми крові людини (зі здоровою молочною залозою та патологією). Проведено статистичний аналіз отриманих зображень. Отримано результати аналізу та сформовано критерії диференціації оптичних властивостей плівок плазми крові з «нормою» та «патологією» молочної залози.

Ключові слова: матриця Джонса, молочна залоза, статистичний аналіз, полікристалічна мережа, плазма крові

Аннотация. В работе рассмотрено Джонс-матричное моделирование оптико-анизотропных свойств пленок плазмы крови человека (со здоровой молочной железой и патологией). Проведен статистический анализ полученных изображений. Получены результаты анализа и сформированы критерии дифференциации оптических свойств пленок плазмы крови с «нормой» и «патологией» молочной железы.

Ключевые слова: матрица Джонса, молочная железа, статистический анализ, поликристаллическая сеть, плазма крови.

Abstract. Jones-matrix modelling of optical anisotropic properties of blood plasma films («norma» and «pathology» of mammary gland) were examined in this paper. The statistical analysis of obtained images were held. A criterias of differentiation were formed. The results of the analysis were obtain and the criteria for differentiation-ray optical properties of the plasma films with the «norm» and «pathology» of the mammary gland were formed.

Keywords: Jones matrix, mammary gland, statistical analysis, polycrystalline network, blood plasma.

ВСТУП

В останній час широко набули розвитку методи оптичної діагностики біологічних об'єктів. Результати, отримані, наприклад, в циклі робіт [1—3] однозначно вказують на перспективність використання поляриметричних досліджень для розробки нових методів та підходів в дослідженні біологічних об'єктів.

Існує велика кількість практичних методик, що базуються на вимірюванні та аналізі елементів матриці Джонса для об'єктивного аналізу структури досліджуваних зразків різної природи, зокрема — біологічної [4—6]. Іншою групою методів, що широко використовуються для аналізу та оцінки біологічних об'єктів, є методи, засновані на вимірюванні та аналізі матриці Мюллера [7, 8]. Зокрема, в роботах [7, 8] запропонований метод та оцінка інформативності поляризаційного картографування азимутів і фазових елементів поляризації мікроскопічних лазерних зображень плівок плазми крові для діагностики доброякісних та злоякісних змін молочної залози.

Попри існуючі методи для диференціації та діагностування досліджуваних зразків молочних залоз, можна стверджувати, що вони не є інформаційно повними, тому існує потреба в розширенні діапазону діагностичних критеріїв за рахунок впровадження нових методів для отримання таких критеріїв, зокрема — за рахунок Джонс-матричного методу.

Метою роботи є експериментальне дослідження оптично тонких шарів плазми крові людини за методом Джонс — матричного картографування дійсних елементів матриці Джонса з подальшою статистичною обробкою отриманих мап для отримання нових критеріїв диференціації досліджуваних зразків.

ДЖОНС-МАТРИЧНИЙ МОДЕЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОПИСУ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛІВОК ПЛАЗМИ КРОВІ ЛЮДИНИ

В основу моделювання оптичних властивостей плазми крові покладено положення про анізотропію протеїнових мереж біологічних тканин [7]:

— плівка плазми крові людини розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури;

— кристалічна компонента сформована сукупністю (мережею) кристалів альбуміну і глобуліну;

— оптично рідкі кристали амінокислот володіють властивостями оптично одноосних двоприменезаломлюючих кристалів, які характеризуються матричним оператором Джонса наступного вигляду [9, 11]:

$$\{C\} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \rho + \sin^2 \rho \exp(-i\delta); & \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; \\ \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; & \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \exp(-i\delta); \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де ρ — напрямок оптичної осі; $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n d$ — фазовий зсув між ортогональними складовими E_1 , E_2 амплітуди опромінюючої лазерної хвилі довжиною λ ; Δn — показник двоприменезаломлення.

У [9] описано загальний модельний підхід щодо визначення матриці Джонса планарної мережі біологічних кристалів, згідно якого узагальнений матричний оператор $\{Y\}$ планарної мережі оптично одноосних двоприменезаломлюючих кристалів має ідентичну структуру, що й матриця Джонса для окремого парціального кристала:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{B_{11}(\rho) + D_{11}(\rho, \delta)\}; & \{B_{12}(\rho) + D_{12}(\rho, \delta)\}; \\ \{B_{21}(\rho) + D_{21}(\rho, \delta)\}; & \{B_{22}(\rho) + D_{22}(\rho, \delta)\}; \end{bmatrix} \Leftrightarrow, \quad (2)$$

$$\Leftrightarrow \begin{bmatrix} \cos^2 \rho + \sin^2 \rho \exp(-i\delta); & \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; \\ \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)]; & \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \exp(-i\delta); \end{bmatrix}$$

при цьому також має місце квазігармонічна координатна модуляція ($\sim \text{"cos}^2\text{"}, \text{"sin}^2\text{"}, \text{"cos-sin"}$) величин елементів $Y_{ik}(x, y)$ матриці Джонса, що вказує на переважний вплив на орієнтаційний змін напрямів $\rho(x, y)$ оптичних осей парціальних кристалів планарної оптико-анізотропної мережі плазми крові.

Таким чином, для одержання критеріїв поляризаційних проявів оптичної анізотропії дослідних зразків плазми крові людини необхідно проводити комплексне дослідження дійсної складової координатних розподілів елементів матриці Джонса $R_{11}(m \times n)$ і $R_{12;21}(m \times n)$, які, відповідно до (1)—(2), характеризують прояви орієнтаційної ρ та фазової δ складової структури ансамблю кристалів плазми крові.

СПОСІБ І СИСТЕМА ДВОВИМІРНОГО ДЖОНС-МАТРИЧНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ЗРАЗКІВ ПЛАЗМИ КРОВІ ЛЮДИНИ

Для дослідження було обрано два зразки плазми крові, взятих у пацієнта зі здоровою молочною залозою та патологічними відхиленнями відповідно.

Зразки плазми крові готувались в таких умовах: крапля плазми крові з піпетки наносилася на підкладку з оптично однорідного скла таким чином, щоб плазма рівномірно розтікалася по поверхні скла. Утворена плівка просувувалася при кімнатній температурі протягом 24 годин.

На рис. 1 показано оптичну схему універсальної архітектури двовимірної системи лазерної поляриметрії для вимірювання сукупності координатних розподілів елементів матриці Джонса плівок плазми крові людини [12].

Система містить: лазер 1 довжиною хвилі $\lambda = 0,638$ мкм, коліматор 2, який формує розширений пучок променів, блок поляризаційного опромінення 3, чвертьхвильові пластинки 4₁, 4₂, 4₃ лінійний поляризатор 5₁, 5₂, об'єкт 6, проєкційний блок 7, блок поляризаційної фільтрації 8, цифрова світлочутлива камера 9, персональний комп'ютер, блок мікроконтролерного керування 11, крокові серводвигуни 13₁, — 13₅, драйвери серводвигунів 12₁, — 12₅, позиційні датчики 14₁, — 14₄. Більш розлого про принцип функціонування даної системи описано в роботі [12].

Варто відзначити, що дана система є універсальною, що дозволило адаптувати її до методу Джонс-матричного картографування досліджуваних зразків плазми крові за рахунок зміни алгоритму фізичного функціонування системи в 11 та програмного алгоритму в 10. В додатковій матеріальній базі та будь-яких удосконалень архітектури системи потреби не виникло.

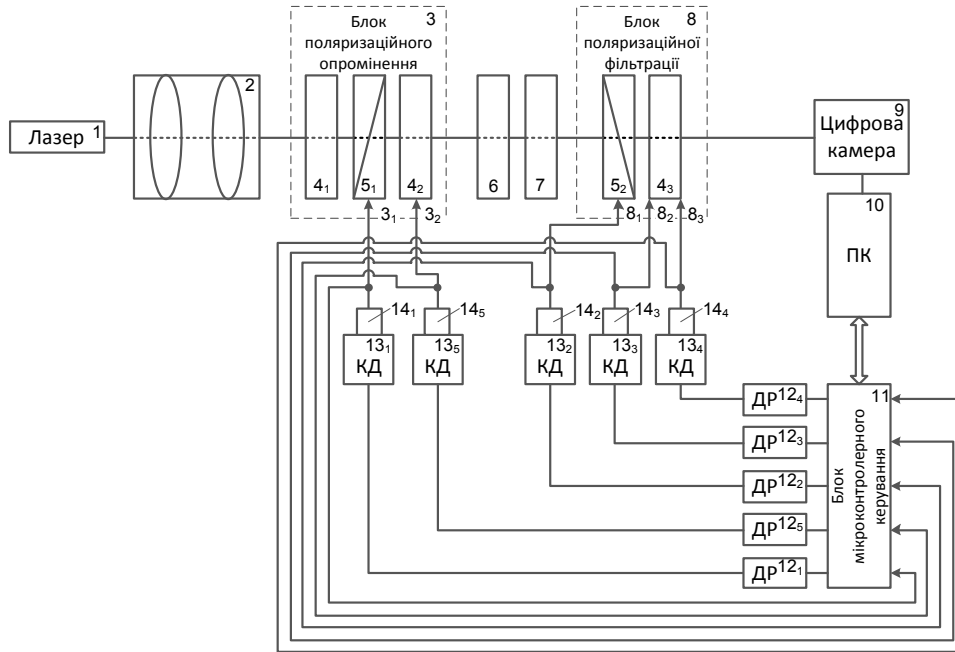


Рис. 1. Архітектура універсальної системи двовимірної лазерної поляриметрії

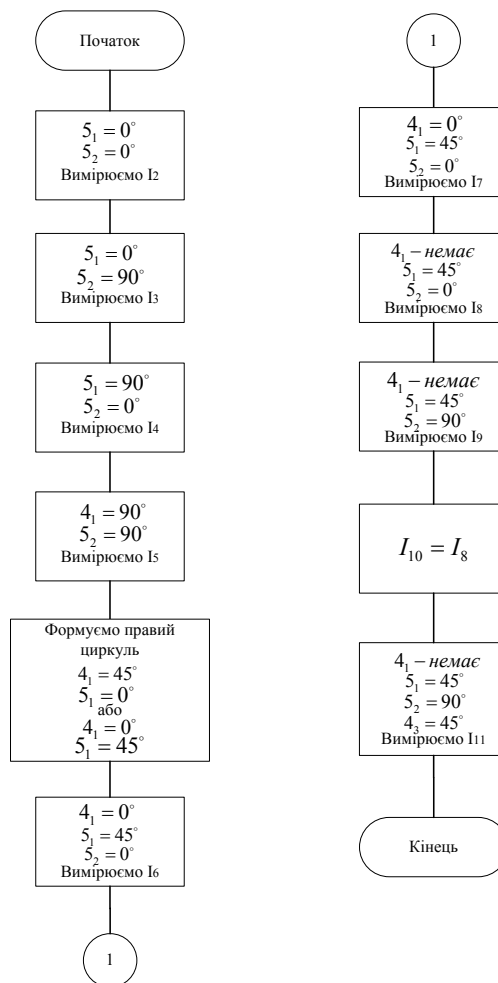


Рис. 2. Алгоритм Джонс-матричного картографування плівок плазми крові людини на системі лазерної поляриметрії

Алгоритм Джонс-матричного картографування плівок плазми крові полягає в експериментальному визначенні дійсної та уявної складової частини матриці Джонса. Сукупність комплексних елементів матриці Джонса біологічного шару як у декартових, так і в полярних координатах можна представити в наступному вигляді [9, 13]:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} + iY_{11} & X_{12} + iY_{12} \\ X_{21} + iY_{21} & X_{22} + iY_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} \exp(i\Theta_{11}) & R_{12} \exp(i\Theta_{12}) \\ R_{21} \exp(i\Theta_{21}) & R_{22} \exp(i\Theta_{22}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Шляхом послідовної зміни значень світлових потоків лазерного випромінювання в системі, утворених орієнтаційними комбінаціями поляризаційних компонентів системи (рис. 1), отримується серія з десяти поляризаційних зображень досліджуваного зразка плазми крові людини. Схематично послідовний алгоритм вимірювання поляризаційних зображень досліджуваного зразка на системі, що зображено на рис. 1, можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 2).

Більш детально фізичний та математичний зміст вимірювань матриці Джонса шарів плівок плазми крові людини описано в роботі [9].

Фактично весь процес вимірювань зводиться до визначення значення інтенсивності I_n лазерного пучка, що потрапляє на відповідний піксель світлочутливої матриці камери 9. Далі, на основі отриманих значень інтенсивностей, за допомогою спеціалізованого програмного комплексу в 10 обраховуються відповідні значення дійсної та уявної складової елементів матриці Джонса та, відповідно, формується результуюча матриця Джонса.

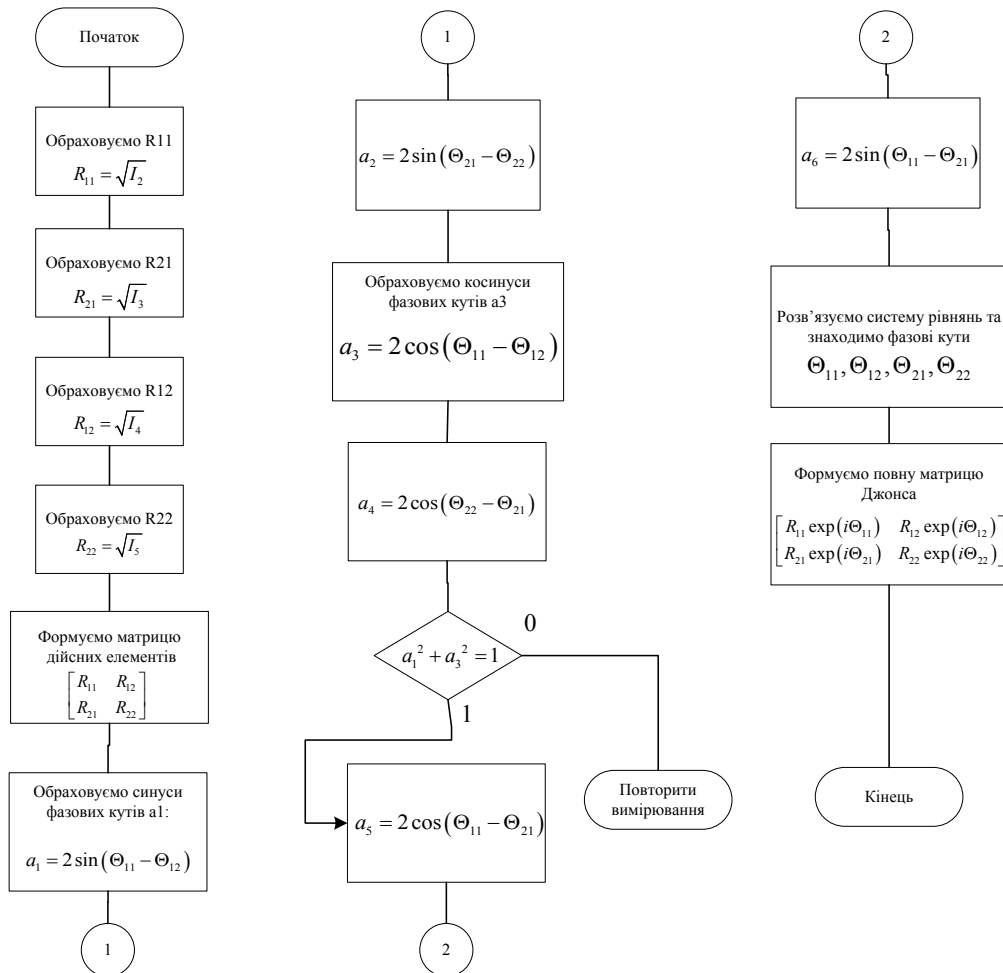


Рис.3. Алгоритм обчислень повної матриці Джонса шарів плазми крові людини

Для визначення дійсної складової в кожному jk -тому пікселі поляризаційного зображення використовують такий математичний підхід [9]:

$$\begin{aligned}
 R_{11}(jk) &= \sqrt{I_2(jk)}; & R_{21}(jk) &= \sqrt{I_3(jk)} \\
 R_{12}(jk) &= \sqrt{I_4(jk)}; & R_{22}(jk) &= \sqrt{I_5(jk)}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

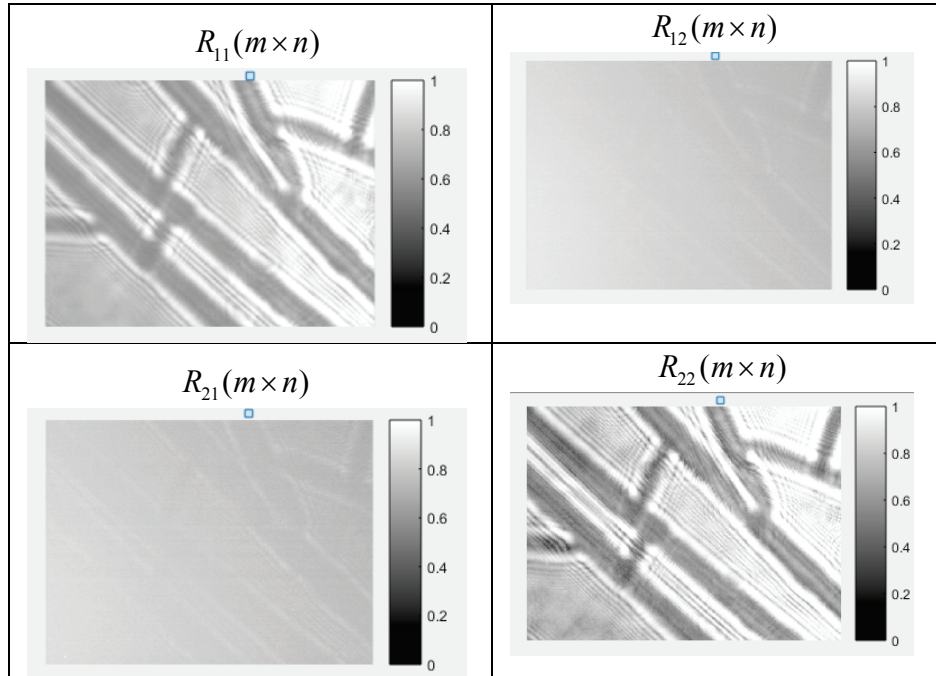


Рис. 4. Координатні розподіли дійсних елементів матриці Джонса плазми крові людини зі здоровою молочною залозою

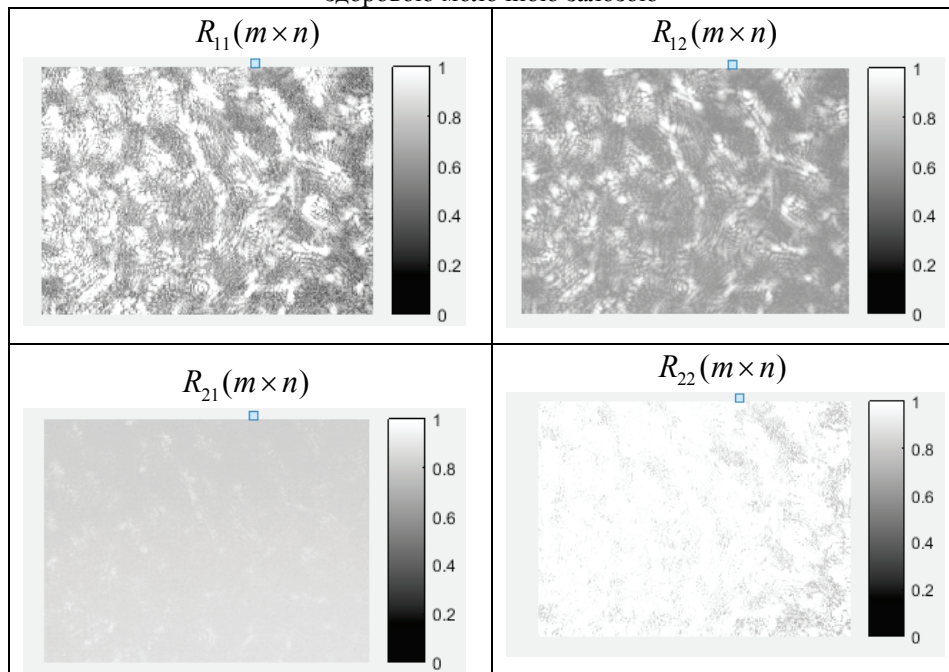


Рис. 5. Координатні розподіли дійсних елементів матриці Джонса плазми крові людини з патологічними відхиленнями молочної залози

В даній роботі проводився аналіз лише дійсних складових елементів матриці Джонса; процес обчислення повної матриці Джонса (дійсних та уявних елементів) можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 3).

На рис. 4 показано розраховані за співвідношеннями (4) значення координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса плазми крові людини зі здоровою молочною залозою, на рис. 5 — з патологічними відхиленнями.

Найбільш повно статистичну структуру координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса $R_{ik}(X, Y)$ досліджуваних зразків плазми крові характеризує оцінка на основі визначення набору їх статистичних моментів 1-го — 4-го порядків [10]:

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (|R_{ik}|)_j; M_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{ik}^2)_j};$$

$$M_3 = \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{ik}^3)_j; M_4 = \frac{1}{M_2^4} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (R_{ik}^4)_j, \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ МЕТОДА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК

Наведемо результати дослідження координатних розподілів дійсної складової «орієнтаційних» $R_{11}(m \times n)$ і «фазових» $R_{12,21}(m \times n)$ елементів матриці Джонса, які характеризують оптичну активність полікристалічних мереж білків альбумінів і глобулінів плівок зразків плазми крові пацієнтів зі здоровою молочною залозою та, відповідно, з патологічними відхиленнями.

У таблиці 1 приведені розраховані значення статистичних моментів M_n координатних розподілів дійсної складової елементів матриці Джонса лазерних мікроскопічних зображень полікристалічних мереж білків альбумінів і глобулінів зразків плівок плазми крові пацієнтів обох груп.

Таблиця 1.

Середнє M_1 , дисперсія M_2 , асиметрія M_3 та ексцес M_4 розподілів «орієнтаційних» $R_{11}(m \times n)$ і «фазових» $R_{12,21}(m \times n)$ поляризаційних зображень зразків плівок плазми крові

M_n	$R_{11}(m \times n)$ норма	$R_{12,21}(m \times n)$ норма	$R_{11}(m \times n)$ патологія	$R_{12,21}(m \times n)$ патологія
M_1	0,784	0,716	0,797	0,826
M_2	0,143	0,089	0,123	0,045
M_3	0,127	0,694	1,189	1,016
M_4	3,761	7,079	3,262	3,021

В ході аналізу одержаних даних було встановлено, що найбільш чутливим (за діапазоном зміни величини) до орієнтаційних $R_{11}(m \times n)$ механізмів перетворення параметрів лазерного випромінювання двопротенезаломлюючою сіткою мереж білків альбумінів і глобулінів є 3-й статистичний момент (в 8 — 9 разів).

Відповідно, найбільш чутливими до фазових $R_{12,21}(m \times n)$ механізмів є 2-ий (в 1,9 раз), 3-ий (в 1,5 раз) та 4-ий (в 2 — 2,5 разів) статистичні моменти.

Виходячи з цього, за визначеними критеріями можна однозначно диференціювати між собою досліджувані зразки плазми крові людей зі здоровою молочною залозою та патологічними змінами в ній. Актуальним є подальший аналіз та розширення критеріїв диференціації за рахунок, наприклад, кореляційного та фрактального аналізу координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса.

ВИСНОВКИ

На основі запропонованого методу Джонс — матричного картографування дійсних елементів матриці Джонса для описання поляризаційних властивостей плівок плазми крові була доведена ефективність останнього для задач диференціації вимірних координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса, а саме — зразків плазми людей зі здоровою молочною залозою та з патологічними змінами в ній. Задача була досягнена за рахунок статистичного підходу з порівняльним аналізом одержаних мап дійсних елементів матриці Джонса для «норми» та «патології» молочної залози.

Реалізація запропонованого методу на універсальній системі поляризаційної лазерної поляриметрії (без будь-яких додаткових вдосконалень) надає потенційну можливість подальшого аналізу та розширення спектру критеріїв диференціації вимірюваних координатних розподілів дійсних елементів матриці Джонса за рахунок, наприклад, кореляційного та фрактального аналізу. Також, реальним є проведення змішаного Джонс-Мюллер-матричного методу для точності та достовірності результатів в задачах диференціації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / [Ушенко О. Г., Бойчук Т. М., Заболотна Н. І. та ін.]; під ред. О. Г. Ушенка. — Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. — 656 с.
2. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. — Berlin : Springer, 2006. — 285 p
3. Клімов О. С. Адаптивна поляриметрія послідовного зондування однорідних анізотропних об'єктів: дис. канд. фіз.- мат. наук: 01.04.05 / Клімов Олександр Сергійович. — К., 2010.— 186 с.
4. Shuichi Makita, Kazuhiro Kurokawa, Young-Joo Hong, Masahiro Miura, and Yoshiaki Yasuno, «Noise-immune complex correlation for optical coherence angiography based on standard and Jones matrix optical coherence tomography,» *Biomed. Opt. Express* 7, 1525—1548 (2016)
5. Yoshiaki Yasuno, Shuichi Makita, Takashi Endo, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai, Mari Takahashi, Chikatoshi Katada and Manabu Mutoh, «Polarization-sensitive complex Fourier domain optical coherence tomography for Jones matrix imaging of biological samples,» *Appl. Phys. Lett.* 85, 3023—3025 (2004).
6. Jiao S, Wang LV; Jones-matrix imaging of biological tissues with quadruple-channel optical coherence tomography. *J. Biomed. Opt.* 0001;7(3): 350—358.
7. Дроненко О. В. Застосування системи поляризаційного картографування азимутів лазерних зображень плівок плазми крові у діагностиці патології молочних залоз / О. В. Дроненко, К. О. Радченко, І. В. Колотченко. // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* — 2013. — С. 73—81.
8. Natalia I. Zabolotna, Bogdan P. Oliinychenko, Kostiantyn O. Radchenko, Anastasiia K. Krasnoshchoka, Olga K. Shcherba, «System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics», in *Polarization Science and Remote Sensing VII*, Daniel A. LeMaster; Joseph A. Shaw, Editors, *Proceedings of SPIE Vol. 9613 (SPIE, Bellingham, WA 2015)*, 961311.
9. Багатопараметрична Джонс-матрична мікроскопія плівок біологічних рідин людини у діагностиці та класифікації їхніх оптичних властивостей [Електронний ресурс] / [О. Г. Ушенко, В. О. Савич, Ю. О. Ушенко та ін.] // Чернівецький національний університет. — 2015. — Режим доступу до ресурсу : <http://arr.chnu.edu.ua/handle/123456789/1026>.
10. Natalia I. Zabolotna, Kostiantyn O. Radchenko, «A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues», in *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces IV*, Leonard M. Hanssen, Editors, *Proceedings of SPIE Vol. 9205 (SPIE, Bellingham, WA 2014)*, 92050V.
11. Спосіб диференціації поляризаційних полікристалічних мереж плівок жовчі: пат 83555 Україна: МПК А61В/ Т. М. Бойчук, О. Г. Ушенко, В. О. Баланецька, П. М. Григоришин. — № 201305507; заявл. 29.04.2013; опублік. 10.09.2013, Бюл. № 13.
12. Заболотна Н. І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин / Заболотна Н. І. // *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.* — 2013. — №1(25). — С. 54—65.
13. Introduction to matrix methods in optics / A. Gerrard, J. M. Burch. — New York: A Wiley-Interscience Publication, 1975.

REFERENCES

1. Osnovi lazernoї polyarimetrії. Biologičnī rīdini / [Ushenko O. G., Boychuk T. M., Zabolotna N. I. ta in.]; pīd red. O. G. Ushenka. — Chernīvtśi : Chernīvets'kiy nats. un-t, 2011. — 656 s.
2. Tuchin V. V. Optical Polarization in Biomedical Applications / Tuchin V. V., Wang L. V., Zimnyakov D. A. — Berlin : Springer, 2006. — 285 p.
3. Klīmov O. S. Adaptivna polyarimetrīya poslīdovnogo zonduvannya odnorīdnikh anīzotropnikh ob'ėktīv: dis. kand. fiz.— mat. nauk: 01.04.05 / Klīmov Oleksandr Sergīyovich. — K., 2010.— 186 s.
4. Shuichi Makita, Kazuhiro Kurokawa, Young-Joo Hong, Masahiro Miura, and Yoshiaki Yasuno, «Noise-immune complex correlation for optical coherence angiography based on standard and Jones matrix optical coherence tomography,» *Biomed. Opt. Express* 7, 1525—1548 (2016)
5. Yoshiaki Yasuno, Shuichi Makita, Takashi Endo, Masahide Itoh, Toyohiko Yatagai, Mari Takahashi, Chikatoshi Katada and Manabu Mutoh, «Polarization-sensitive complex Fourier domain

- optical coherence tomography for Jones matrix imaging of biological samples,» *Appl. Phys. Lett.* 85, 3023—3025 (2004).
6. Jiao S, Wang LV; Jones-matrix imaging of biological tissues with quadruple-channel optical coherence tomography. *J. Biomed. Opt.* 0001;7(3):350—358.
 7. Dronenko O. V. Zastosuvannya sistemi polarizatsiynogo kartografuvannya azimutiv lazernikh zobrazhen' plivok plazmi kroví u díagnostitsi patologii molochnikh zaloz / O. V. Dronenko, K. O. Radchenko, Í. V. Kolotchenko. // *Optiko-yelektronni ínformatsiyno-yenergetichni tekhnologii.* — 2013. — S. 73—81.
 8. Natalia I. Zabolotna, Bogdan P. Oliinychenko, Kostiantyn O. Radchenko, Anastasiia K. Krasnoshchoka, Olga K. Shcherba, «System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics», in *Polarization Science and Remote Sensing VII*, Daniel A. LeMaster; Joseph A. Shaw, Editors, *Proceedings of SPIE Vol. 9613* (SPIE, Bellingham, WA 2015), 961311.
 9. Bagatoparametrichna Dzhons-matrichna mikroskopiya plivok biologichnikh ridin lyudini u díagnostitsi ta klasi-fikatsii ikhnikh optichnikh vlastivostey [Yelektronniy resurs] / [O. G. Ushenko, V. O. Savich, YU. O. Ushenko ta ín.] // *Chernivets'kiy natsional'niy univrsitet.* — 2015. — Rezhim dostupu do resursu: <http://arr.chnu.edu.ua/handle/123456789/1026>.
 10. Natalia I. Zabolotna, Kostiantyn O. Radchenko, «A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues», in *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces IV*, Leonard M. Hanssen, Editors, *Proceedings of SPIE Vol. 9205* (SPIE, Bellingham, WA 2014), 92050V.
 11. Sposib diferentsiatsii polarizatsiynikh polikristalichnikh merezh plivok zhovchi: pat 83555 Ukraína: MPK A61B/ T. M. Boychuk, O. G. Ushenko, V. O. Balanets'ka, P. M. Grigorishin. — № 201305507; zayavl. 29.04.2013; opublik. 10.09.2013, Byul. №13.
 12. Zabolotna N.Í. Arkhitektura í algoritmi funktsionuvannya ta analízu danikh dvovimírnikh sistem lazernoí po-lyarimetrii biologichnikh tkanin / Zabolotna N.Í. // *Optiko-yelektronni ínformatsiyno-yenergetichni tekhnologii.* — 2013. — №1(25). — S. 54—65.
 13. *Introduction to matrix methods in optics* / A. Gerrard, J. M. Burch. — New York: A Wiley-Interscience Publication, 1975.

Надійшла до редакції 7.12.2016 р.

РАДЧЕНКО КОСТЯНТИН ОЛЕГОВИЧ — аспірант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.

КАРАСЬ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ — магістрант кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Україна.