

УДК 681.7: 616-71

В.В. ШОЛОТА

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА БІОМЕДИЧНИХ СИСТЕМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ ІНТРОСКОПІЇ ДЕГІДРАТОВАНИХ ПЛІВОК БІОЛОГІЧНИХ РІДИН

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua*

Анотація. В статті проаналізовано відомі методи поляризаційної інтроскопії дегідратованих плівок біологічних рідин на основі Джонс-матричного підходу при діагностиці патологій біологічних тканин організму людини. Виконано порівняння їх діагностичних характеристик з урахуванням застосованого аналізу для формування ознак вимірних мап. Показано можливості методів інтелектуального аналізу, реалізованих в зазначених системах, їх переваги та недоліки.

Ключові слова: дегідратована плівка біологічної рідини, біомедична система, поляризаційна інтроскопія, матриця Джонса, діагностика функціонального стану органів.

Abstract. The article analyzes known methods of polarization introscopy of dehydrated films of biological origin based on the Jones matrix approach in the diagnosis of pathologies of biological tissues of the human body. Their diagnostic characteristics are compared taking into account the applied analysis for the formation of features of measured maps. The possibilities of intellectual analysis methods implemented in the specified systems, their advantages and disadvantages are shown.

Key words: dehydrated film of biological fluid, biomedical system, polarization introscopy, Jones matrix, diagnostics of the functional state of organs.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-50-2-269-276

ВСТУП

Упродовж останніх років сучасні методи та системи лазерної поляризаційної інтроскопії полікристалічної структури біологічних зразків набули стрімкого розвитку та застосування в різних медичних галузях [1–3], доповнюючи традиційні променеві технології діагностики. Узагальненням і розвитком численних підходів та систем лазерної поляриметрії стали технології Мюллер-матричної поляриметрії. Вони дають можливість на основі аналізу орієнтаційних, орієнтаційно-фазових та фазових елементів досліджуваних біологічних зразків отримувати комплексну інформацію про їх оптично анізотропні компоненти у вигляді інформативних показників [4–7], що слугують маркерами подальшої діагностики патологічних і некротичних змін у біологічних тканинах (БТ) людських органів.

Проте доступнішими та безпечнішими для забору та подальшого поляризаційного моніторингу при оцінюванні патологічних змін у БТ людини є біологічні рідини (БР) людини. Варто зауважити, що в сучасній клінічній медичній практиці застосовують в основному чисельні біохімічні показники БР, в той час як морфологічний аналіз БР є практично малодоступним [8].

З іншого боку, специфічні зміни оптико-анізотропної структури білкових молекул краплі БР, висушеної у вигляді плівки (дегідратованої плівки), та її властивостей несуть інформацію для ранньої поляризаційної діагностики порушення функціонального стану органів людини [9].

Наразі для аналізу зображень дегідратованих плівок біологічних рідин переважно застосовують візуальні методи. До них відносять різні види мікроскопії БР: з різними рівнями збільшення, освітленням білим або темновим полем, а також поляризаційну мікроскопію [10–13], мюллер-матричне картографування [12–15].

Враховуючи, що дегідратовані плівки є оптично тонким і недеполяризуючим середовищем, для їх поляризаційної інтроскопії підходить формалізм Джонса, що складається з вектора Джонса (який описує властивість поляризації світла) і матриці Джонса (яка описує властивості перетворення поляризації об'єкта). Матриця Джонса в порівнянні з матрицею Мюллера, яку теж застосовують для опису оптико-анізотропних характеристик досліджуваних плівок БР, має меншу розмірність, не має надлишкової інформації при аналізі поляризаційних характеристик БР та характеризує абсолютну фазу випромінювального променя. Проте її елементи є комплексними числами, що вносить певні складнощі в схему обчислення її елементів в результаті вимірювань, хоча вони не є такими значними.

Метою даної роботи є аналіз відомих методів та систем на основі формалізму Джонса для поляризаційної інтроскопії дегідратованих плівок БР при виявленні патологічних станів та визначення перспектив досліджень на їх основі.

ДЖОНС-МАТРИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК БІОЛОГІЧНИХ РІДИН ТА АНАЛІЗ СИСТЕМ ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ

З теоретичних досліджень, започаткованих в роботах [16, 17], відомо, що уявлення про оптичну поляризаційну модель тонкої дегідратованої плівки БР дозволяють її представляти мережею оптичних одноосних біологічних кристалів (БК) [18].

Властивості такої мережі БК плівки БР, яким притаманні властивості подвійного променезаломлення, описують матрицею Джонса J [18]:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma e^{-i\varphi} & \cos \gamma \sin \gamma (1 - e^{-i\varphi}) \\ \cos \gamma \sin \gamma (1 - e^{-i\varphi}) & \sin^2 \gamma + \cos^2 \gamma e^{-i\varphi} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де γ – напрямок осі БК; φ – зсув фаз між проекціями E_x і E_y на відповідні осі амплітуди лазерного пучка довжиною хвилі λ , яким опромінюють плівку БР, що визначається за величиною показника подвійного променезаломлення Δn , товщиною кристалу d та довжиною хвилі λ як $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n$.

Вираз (1) зручно застосовувати для моделювання залежностей багатошарової мережі БК від орієнтаційно-фазових параметрів плівки БР [18].

Для експериментального картографування елементів матриці Джонса оптично тонких біооб'єктів на основі вимірювань інтенсивностей матрицю Джонса можна подати в такому вигляді [18]:

$$J = \begin{bmatrix} R_{11}e^{i\theta_{11}} & R_{12}e^{i\theta_{12}} \\ R_{21}e^{i\theta_{21}} & R_{22}e^{i\theta_{22}} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де R_{kl} – модуль відповідного комплексного елемента J_{kl} матриці Джонса, θ_{ij} – фаза відповідного комплексного елемента J_{kl} матриці Джонса.

Базова схема системи для експериментального вимірювання елементів матриці Джонса БР наведена на рисунку 1 [18]. Вона складається із: вимірювального оптичного каналу, утвореного елементами 1–9, що формує поляризаційно фільтровані інтенсивності поляризаційного випромінювання, трансформованого зразком 6; матричного фотоприймача 10 у вигляді камери; комп'ютера 11.

До переліку елементів вимірювального каналу входить лазер з робочою довжиною хвилі $\lambda = 0,6328$ мкм, коліматор 2, чвертьхвильові фазові пластинки 3 (стаціонарна) та 5 і 8 (рухомі), поляризатор 4 і аналізатор 5, об'єкти 7 та досліджуваний об'єкт 6 у вигляді дегідратованої плівки БР.

В схемі узгоджено кутову апертури мікрооб'єктива 7 з кутовою характеристикою індикатриси розсіювання дослідного зразку дегідратованої плівки БР.

Серед відомих способів поляризаційного Джонс-матричного картографування, які реалізовано системою на рисунку 1, застосованих до конкретних типів дегідратованих БР, виділяють такі як: визначення мап модулів $R_{ij}(x, y)$ елементів матриці Джонса плівок плазми крові [19]; визначення мап

лінійного та циркулярного подвійного променезаломлення плівок жовчі. При цьому кореляційні моменти також відрізняються в 2,5 разів.

Крім статистичного та кореляційного аналізу в роботах [18, 23] застосовано фрактальний підхід до аналізу розподілів «орієнтаційних» та «фазових елементів» дійсної та уявної частин матриці Джонса, різних типів БР, в тому числі амінокислот плазми крові [23], що дозволило виявити критерії жовчокам'яної хвороби та туберкульозу [18].

Таким чином, багатопараметричний аналіз розподілів елементів матриці Джонса та відтворених на їх основі параметрів анізотропії БР дозволяє виявляти інформативні ознаки, на основі яких може бути проведено подальший класифікаційний аналіз, проте потреба в його подальшому розвитку. Адже бажаний рівень достовірності діагностики БТ на основі поляризаційного Джонс-матричного картографування БР ще не досягнуто.

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В ДЖОНС-МАТРИЧНИХ СИСТЕМАХ КАРТОГРАФУВАННЯ ПЛІВОК БР

Серед можливих напрямків, які доповнюватимуть перелік вищенаведених методів об'єктивного аналізу розподілів дійсних та уявних частин елементів матриці Джонса та відтворених на їх основі орієнтаційно-фазових параметрів БР, важливу роль відіграє інтелектуальний аналіз, основною метою якого є формування рішення, рекомендованого при діагностиці БТ.

В роботі [24] наведено порівняльні характеристики підсистем та методів підтримки прийняття рішень (ППР), які застосовано в системах поляризаційної інтроскопії біологічних шарів, що ґрунтуються на Мюллер-матричному підході. Розглянемо в цьому контексті застосування інтелектуального аналізу в інтроскопічних поляризаційних системах Джонс-матричного картографування плівок БР.

Так, в роботах [22, 25, 26] продемонстровано ефективність застосування інтелектуальних методів ППР в системах Джонс-матричного картографування плівок плазми крові для діагностики фіброаденоми молочної залози.

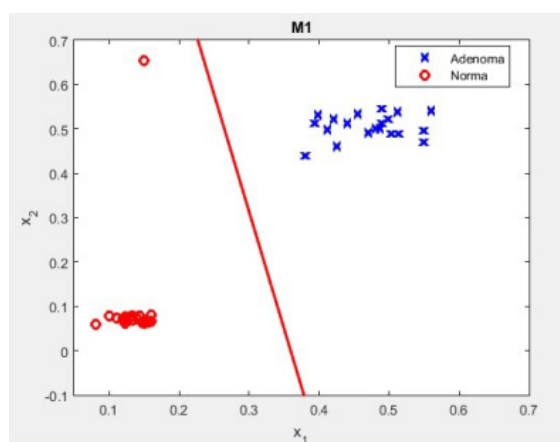


Рисунок 3 – Дискримінантна функція двох змінних (параметри «орієнтація» та «фаза») для вибірки значень «навчання» для 1-го статистичного моменту [25]

На основі ідеї дискримінантного аналізу в роботі [25] розраховувалась евклідова відстань між усередненими статистично векторами ознак (статистичні моменти 1-4 порядку) орієнтаційних та фазових елементів матриці Джонса зразків висушених плівок плазми крові, які характеризували фізіологічний стан класу «норми» (20 зразків) та класу «фіброаденома молочної залози» (20 зразків). На рисунку 3 показано, як приклад, вигляд дискримінантної функції двох змінних для «навчальної» вибірки на основі значень статистичного моменту 1-го порядку параметрів орієнтаційних та фазових елементів матриці Джонса зразків плівок плазми крові.

Побудувавши дискримінантну функцію чотирьох змінних (елементи вектора ознак), було здійснено дискримінацію зразків на тестовій вибірці із 40 висушених плівок плазми крові. Отримані показники чутливості, специфічності та точності диференціації фіброаденоми та стану норми молочної залози склали відповідно: $Se = 81\%$, $Sp = 84,2\%$, $Ac = 82,7\%$ [25]. Отримані результати можна вважати «хорошою» якості з точки зору доказової медицини.

До цієї ж задачі діагностики фіброаденоми молочної залози на основі аналізу статистичних моментів (ознак) розподілів дійсної та уявної частини комплексних значень елементів матриці Джонса плівок плазми крові було застосовано алгоритм CART (дерево класифікації та регресії) [26]. Було побудовано бінарне дерево рішень, де кожен вузол поділу мав лише двох нащадків. Ключові етапи побудови таких дерев включають: визначення ознаки, за якою здійснюється поділ вибірки; вибір критеріїв, що визначають момент зупинки побудови дерева (використано значення індексу Джині як критерію зупинки в алгоритмі CART). В цьому випадку отримані покращені значення показників чутливості, специфічності та точності діагностики молочної залози за Джонс-матричним картографуванням плівок плазми крові: $Se = 85,8\%$, $Sp = 89,5\%$, $Ac = 87\%$ [25].

Подальшого покращення показників точності діагностики фіброаденоми молочної залози було досягнуто в вищезгаданій системі Джонс-матричної поляриметрії БР при застосуванні нечіткої логіки до виведення класифікаційних нечітких правил ППП [22, 25]. Нечітка логіка, подібно до більшості згаданих вище моделей ППП, оперує не самими зображеннями, а їхніми характеристиками. Її основною перевагою є здатність формувати набір правил навіть за умов обмеженої кількості даних, а також відсутність необхідності жорстко прив'язувати ознаки до чітко визначених порогів, оскільки інформація подається у вигляді нечітких лінгвістичних термів. Водночас суттєвим недоліком є значна чутливість методів до вибору функцій належності цих термів, які потрібно або задавати вручну, або попередньо погоджувати з фахівцями.

Застосування нечітких баз даних та виведення класифікаційних правил на їх основі для ППП дозволило покращити ефективність Джонс-матричної діагностики в описаній системі. Було отримано значення [25]: $Se = 90,5\%$, $Sp = 100\%$, $Ac = 95,3\%$, при обсязі вибірки 40 зразків плівок плазми крові.

Перспективи застосування машинного навчання при поляриметричній Мюллер-матричній візуалізації виявлення патологічних станів продемонстровано в окремих розробках іноземних вчених [26-28]. Так, в роботі [26] було розглянуто виявлення ракового ураження ділянок шийки матки на основі матриць Мюллера за допомогою методів машинного навчання (дерева рішень, багатосаровий перцептрон та згорток нейронна мережа). Недоліком є те, що в системі здійснюється оцінювання не цілої ділянки або зразка БШ, а окремих пікселів зображення матриць Мюллера з середньою точністю моделі рішення на рівні $81,2\%$ [26].

В роботі [27] було розглянуто підсистему ППП на основі методів машинного навчання для зображень «зон інтересу» не окремих пікселів, а всього зразка БШ з ймовірним колоректальним раком, для кожного з яких було виміряно 16 матриць Мюллера і 9 додаткових поляризаційних параметрів. Найефективніший метод прийняття рішення XGBoost дав 86% точності діагностичного рішення на повному наборі вхідних даних, що демонструє його високу чутливість до викидів.

В роботі [28] застосовано окремі ідеї поєднання матричної поляриметрії Мюллера, згорткових нейронних мереж та методів К-найближчих сусідів для автоматизованої класифікації зразків БШ. Навчання та тестування в системі [28] обмежені 11 та 5 зрізами фібрилярних колагенових та еластичних волокон у шийці матки миші відповідно, отримана при цьому точність виявлення та класифікації колагену та еластину шийки матки - 85% .

Отже, продемонстровано значний потенціал застосування методів інтелектуального аналізу в системах поляризаційної інтроскопії БР для підвищення достовірності діагностики функціонального стану органів людини.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано відомі методи та системи на основі формалізму Джонса для поляризаційної інтроскопії дегідратованих плівок БР та обґрунтовано перспективи їх застосувань для виявлення патологічних станів тканин організму людини, в тому числі на ранніх стадіях захворювання.

Розглянуто особливості вимірювання, відтворення параметрів анізотропії та багатопараметричного аналізу в відомих системах Джонс-матричного картографування дегідрованих плівок БР.

Встановлено, що застосування окремих методів виділення інформативних ознак та їх інтелектуального аналізу (нечіткої логіки, дерева рішень, нейромережових підходів) отриманих оцінок вимірних розподілів Джонс-матричних мап БР, що дозволили досягти певного підвищення точності діагностики БТ, потребують детальнішого дослідження та розвитку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghosh, N. "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* 16, 110801 (2011).
2. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," *J. Biomed. Opt.* 20(6), 061104 (2015).
3. Vitkin A., Ghosh N. & de Martino A. "Tissue Polarimetry," in *Photonics: Scientific Foundations, Technology and Applications* (ed. Andrews, D. L.) 239–321. John Wiley & Sons, Ltd. (2015).
4. Ushenko, A.G., Dubolazov, O.V., Ushenko, V.A., Novakovskaya, O.Y., Olar, O.V., "Fourier polarimetry of human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations," *Applied Optics* 55 (12), B56-B60 (2016).
5. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., *Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy*, Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
6. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
7. P. Li et al. "Analysis of tissue microstructure with Mueller microscopy: logarithmic decomposition and Monte Carlo modeling," *J. Biomed. Opt.*, 25(1), 015002 (2020).
8. Dash, S.; Garimella, S. V. "Droplet evaporation on heated hydrophobic and superhydrophobic surfaces," *Phys. Rev. E* 89(042402), 1–8 (2014).
9. Serra, J. *Image Analysis and Mathematical Morphology*; Academic Press: New York, 1988; p. 411.
10. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / за ред. О.Г. Ушенка, Т.М. Бойчука та ін. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2011. 656 с.
11. Dubolazov, A. V.; Pashkovskaya, N. V.; Ushenko, Y. A.; Marchuk, Y. F.; Ushenko, V. A.; Novakovskaya, O. Y. "Birefringence images of polycrystalline films of human urine in early diagnostics of kidney pathology," *Appl. Opt.* 55, B85–B90 (2016).
12. Заболотна, Н.І., Павлов, С.В., Шолота, В.В. Моделі, методи та системи лазерної поляриметрії плазми крові для діагностики молочних залоз: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2024. 145 с.
13. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В. "Двохвильова поляриметрична система відтворення та оцінювання анізотропії та дихроїзму плівок жовчі при діагностиці патологій," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. №2. С.93-99 (2023).
14. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," *Lasers in Med Sci.* 38 (1) (2023)
15. Ushenko V. et al., "3D Mueller-matrix diffusive tomography of polycrystalline blood films for cancer diagnosis," *Photonics*. Vol 5(4). №54 (2018).
16. Jones, C.R., "New calculus for the treatment of optical systems. VII. Properties of the N-matrices," *J Opt Soc Am.*; 38:671–685 (1948).
17. Barakat, R., "Exponential versions of the Jones and Mueller–Jones polarization matrices," *J Opt Soc Am A*. 1996; 13:158–163 (1996).
18. Ушенко О.Г., Савич В.О., Ушенко Ю.О., Дуболазов О.В., Паранський М.Д. Багатопараметрична Джонс-матрична мікроскопія плівок біологічних рідин людини у діагностиці та класифікації їхніх оптичних властивостей. Чернівці: 2015. 189 с.
19. Спосіб поляризаційного 2D-картографування модуля елементів матриці Джонса полікристалічних плівок плазми крові: пат. 148218 Україна. №u 2020 06767; заявл.21.10.2020; опубл. 21.07.2021, Бюл. №29. 3 с.
20. Спосіб поляризаційного 2D-картографування фази елементів матриці Джонса полікристалічних плівок синовіальної рідини: пат. 146959 Україна. №u 2020 06777; заявл. 21.10.2020; опубл. 31.03.2021, Бюл. №13. 3 с.
21. Спосіб 2D-Джонс-матричного картографування полікристалічних плівок жовчі: пат. 147804 Україна. №u 2020 06772; заявл.21.10.2020; опубл. 16.06.2021, Бюл. №24. 3 с.
22. Zabolotna N.I., Pavlov S.V., Karas O.V., Sholota V.V. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects. *Proceedings of SPIE*. 2018. 10750. 107500N.
23. Mishalov, V.D., et al. "Jones-matrix mapping of polycrystalline networks of layers of main types of amino acids," *Proc. of SPIE* 11456, 1145606 (2020) doi: 10.1117/12.2569783.
24. Шолота, В.В. "Аналіз методів підтримки прийняття рішень в системах поляризаційної інтроскопії біологічних тканин та рідин," *Опт.-ел. інф.-енерг. техн.*, 49(1), 185–192 (2025).
25. Zabolotna, N.I., Radchenko, K.O., Karas, O.V., "Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with "fuzzi" analysis in differentiation of breast pathology changes," *Proc. SPIE* 10612, 106121P (2018).
26. Radchenko, O.K., "Intellectualized Mueller-Jones matrix system of laser polarimetry for breast fibroadenoma diagnosis," *Proc. SPIE* 10750, 107500M (2018).
27. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al., "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," *J. Biomed. Opt.* 28(10), 102904 (2023).
28. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," *J. Biomed. Opt.* 29(15), 052915 (2024).
29. Camilo, Roa at al., "Auto-detection of cervical collagen and elastin in Mueller matrix polarimetry microscopic images using K-NN and semantic segmentation classification," *Biomedical Optics Express* 12(4), 2236-2249 (2021).

REFERENCES

1. Ghosh, N. "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," J. Biomed. Opt. 16, 110801 (2011).
2. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," J. Biomed. Opt. 20(6), 061104 (2015).
3. Vitkin A., Ghosh N. & de Martino A. "Tissue Polarimetry," in Photonics: Scientific Foundations, Technology and Applications (ed. Andrews, D. L.) 239–321. John Wiley & Sons, Ltd. (2015).
4. Ushenko, A.G., Dubolazov, O.V., Ushenko, V.A., Novakovskaya, O.Y., Olar, O.V., "Fourier polarimetry of human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations," Applied Optics 55 (12), B56-B60 (2016).
5. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy, Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
6. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," Proceedings of SPIE. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
7. P. Li et al. "Analysis of tissue microstructure with Mueller microscopy: logarithmic decomposition and Monte Carlo modeling," J. Biomed. Opt., 25(1), 015002 (2020).
8. Dash, S.; Garimella, S. V. "Droplet evaporation on heated hydrophobic and superhydrophobic surfaces," Phys. Rev. E 89(042402), 1–8 (2014).
9. Serra, J. Image Analysis and Mathematical Morphology; Academic Press: New York, 1988; p. 411.
10. Osnovy lazernoi poliaryometrii. Biologichni ridyny / za red. O.H. Ushenka, T.M. Boichuka ta in. Chernivtsi : Chernivetskyi nats. un-t, 2011. 656 s.
11. Dubolazov, A. V.; Pashkovskaya, N. V.; Ushenko, Y. A.; Marchuk, Y. F.; Ushenko, V. A.; Novakovskaya, O. Y. "Birefringence images of polycrystalline films of human urine in early diagnostics of kidney pathology," Appl. Opt. 55, B85–B90 (2016).
12. Zabolotna, N.I., Pavlov, S.V., Sholota, V.V. Modeli, metody ta systemy lazernoi poliaryometrii plazmy krovi dlia diahnostyky molochnykh zaloz: monohrafiia. Vinnytsia : VNTU, 2024. 145 s.
13. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V. "Dvokhvylova poliaryometrychna systema vidtvorennia ta otsiniuvannia anizotropii ta dykhroizmu plivok zhovchi pry diahnostytsi patolohii," Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii. №2. S.93-99 (2023).
14. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," Lasers in Med Scienc. 38 (1) (2023)
15. Ushenko V. et al., "3D Mueller-matrix diffusive tomography of polycrystalline blood films for cancer diagnosis," Photonics. Vol 5(4). №54 (2018).
16. Jones, C.R., "New calculus for the treatment of optical systems. VII. Properties of the N-matrices," J. Opt Soc Am.; 38:671–685 (1948).
17. Barakat, R., "Exponential versions of the Jones and Mueller–Jones polarization matrices," J. Opt Soc Am A. 1996; 13:158–163 (1996).
18. Ushenko O.H., Savych V.O., Ushenko Yu.O., Dubolazov O.V., Raranskyi M.D. Bahatoparametrychna Dzhonsmatrychna mikroskopiia plivok biologichnykh ridyn liudyny u diahnostytsi ta klasyfikatsii yikhnykh optychnykh vlastyvostei. Chernivtsi: 2015. 189 s.
19. Sposib poliaryzatsiinoho 2D-kartohrafuvannia modulia elementiv matrytsi Dzhonsa polikrystalichnykh plivok plazmy krovi: pat. 148218 Ukraina. №u 2020 06767; zaivl.21.10.2020; opubl. 21.07.2021, Biul. №29. 3 s.
20. Sposib poliaryzatsiinoho 2D-kartohrafuvannia fazy elementiv matrytsi Dzhonsa polikrystalichnykh plivok synovialnoi ridyny: pat. 146959 Ukraina. №u 2020 06777; zaivl. 21.10.2020; opubl. 31.03.2021, Biul. №13. 3 s/
21. Sposib 2D-Dzhons-matrychnoho kartohrafuvannia polikrystalichnykh plivok zhovchi: pat. 147804 Ukraina. №u 2020 06772; zaivl.21.10.2020; opubl. 16.06.2021, Biul. №24. 3 s.
22. Zabolotna N.I., Pavlov S.V., Karas O.V., Sholota V.V. Processing and analysis of images in the multifunctional classification laser polarimetry system of biological objects. Proceedings of SPIE. 2018. 10750. 107500N.
23. Mishalov, V.D., et all. "Jones-matrix mapping of polycrystalline networks of layers of main types of amino acids," Proc. of SPIE 11456, 1145606 (2020) doi: 10.1117/12.2569783.
24. Sholota, V.V. "Analiz metodiv pidtrymky pryiniattia rishen v systemakh poliaryzatsiinoi introskopii biologichnykh tkanyn ta ridyn," Opt-el. inf-enerh. tekhn., 49(1), 185–192 (2025).
25. Zabolotna, N.I., Radchenko, K.O., Karas, O.V., "Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with "fuzzi" analysis in differentiation of breast pathology changes," Proc. SPIE 10612, 106121P (2018).
26. Radchenko, O.K., "Intellectualized Mueller-Jones matrix system of laser polarimetry for breast fibroadenoma diagnosis," Proc. SPIE 10750, 107500M (2018).
27. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al., "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," J. Biomed. Opt. 28(10), 102904 (2023).
28. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," J. Biomed. Opt. 29(15), 052915 (2024).
29. Camilo, Roa et al., "Auto-detection of cervical collagen and elastin in Mueller matrix polarimetry microscopic images using K-NN and semantic segmentation classification," Biomedical Optics Express 12(4), 2236-2249 (2021).

Надійшла до редакції 10.10.2025р.

ШОЛОТА ВЛАДИСЛАВА ВЛАДИСЛАВІВНА – асистент кафедри комп'ютерних наук,
Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

SHOLOTA VLADYSLAVA VLADYSLAVIVNA– Assistant Professor, Department of Computer
Science, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, *e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua*

V.V. SHOLOTA

**ANALYSIS OF METHODS AND BIOMEDICAL SYSTEMS FOR POLARIZATION INTROSCOPY OF
DEHYDRATED FILMS OF BIOLOGICAL FLUIDS**

Vinnytsia National Technical University