

УДК 681.7: 616-71

Н.І. ЗАБОЛОТНА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ В БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІЙ СИСТЕМІ АЗИМУТАЛЬНО ІНВАРІАНТНОЇ МЮЛЛЕР- ПОЛЯРИМЕТРІЇ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ПАТОЛОГІЙ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com*

Анотація. В статті представлено метод підтримки прийняття рішення в багатопараметричній системі мюллер-матричної діагностики біологічних шарів на основі статистичного та вейвлет-аналізу колекції азимутальних інваріантів мюллер-поляриметрії та моделей дерев рішень для підвищення точності рішень. Розроблено тренувальні моделі дерев рішень на основі мінімізації індексу Джині для інформативних ознак розподілів азимутально незалежних інваріант біологічного шару м'язу шийки матки та оцінено точність виявлення патології на їх основі. Продемонстровано експериментальне застосування удосконаленого методу ППР при диференціації функціональних станів «норма» – «патологія» БШ м'язової тканини шийки матки із вимірюванням десяти розподілів азимутальних інваріант мюллер-поляриметричних параметрів БШ. Досягнуто зростання точності діагностики зразків БШ до рівня 97,2%.

Ключові слова: підтримка прийняття рішення, зображення, система мюллер-поляриметрії біологічного шару, статистичний аналіз, вейвлет-аналіз, метод дерев рішень.

Abstract. The article presents a method for supporting decision-making in a multiparametric system of Muller-matrix diagnostics of biological layers based on statistical and wavelet analysis of a collection of azimuthal invariants of Muller-polarimetry and decision tree models to increase the accuracy of decisions. Training decision tree models based on minimization of the Gini index for informative features of the distributions of azimuthally independent invariants of the biological layer of the cervix are developed and the accuracy of pathology detection based on them is assessed. The experimental application of the improved PPR method in the differentiation of functional states of "normal" and "pathology" of the cervical muscle tissue of the uterine cervix with the measurement of ten distributions of azimuthal invariants of the Muller-polarimetric parameters of the uterine cervix has been demonstrated. An increase in the diagnostic accuracy of uterine cervix samples to the level of 97.2% has been achieved.

Key words: decision support, images, biological layer Muller polarimetry system, statistical analysis, wavelet analysis, decision tree method.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-200-208

ВСТУП

Серед сучасних тенденцій розвитку технологій медичної лазерної діагностики біологічних тканин і рідин виокремлюється лазерна зображувальна мюллер-матрична поляриметрія [1–6]. Вона зарекомендувала себе як високочутливий та надійний метод додаткового оцінювання патологічних змін при онкологічних та запальних процесах тканин шийки матки, грудних залоз, кишечника, шлунку, в тому числі й на ранніх стадіях [6–10].

В основі мюллер-поляриметричної діагностики лежить встановлення взаємозв'язків зміни параметрів мікроструктурної оптичної анізотропії досліджуваних біологічних шарів (БШ), викликаних порушенням їх здорового фізіологічного стану в результаті захворювання, з 2D мюллер-матричними зображеннями (ММЗ) БШ [5, 6].

Використання аналізу вимірних азимутально інваріантних (АІ) елементів ММЗ біологічних шарів, специфічних сум та різниць окремих розподілів елементів ММЗ [11], які не змінюються при зміні положення зразка БШ відносно осі їх опромінення, підвищило достовірність діагностики БШ в системах мюллер-матричної поляриметрії.

З іншого боку, інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень (ППР), що базуються на машинному навчанні [12, 13], неймережевих [14], статистичних підходах [6], алгоритмах дерева рішень [15], зарекомендували себе як вагомий чинник для покращення достовірності діагностики в системах лазерної поляриметрії БТ. Так, імплементація методів ППР в системи АІ мюллер-матричної поляриметрії дозволила підвищити достовірність методів діагностики на основі ІММП біологічних тканин на 1,5%-2% [16, 17].

Проте актуальність пошуку нових методів аналізу АІ поляризаційних параметрів на основі ММЗ для діагностики БШ з поєднанням інтелектуальних методів ППР залишається очевидною.

Метою роботи є покращення діагностичних можливостей азимутально інваріантної поляриметрії БШ на основі ММЗ за рахунок удосконалення методу ухвалення діагностичного рішення в багатопараметричній системі зображувальної мюллер-поляриметрії при оцінюванні патологій.

АЗИМУТАЛЬНІ ІНВАРІАНТИ МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЇ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ ТА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ДЛЯ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Зразки досліджуваних біологічних шарів, підготовлених за технологією нативних гістологічних зрізів певних ділянок біологічних тканин, зберігаються в замороженому вигляді. Вимоги до них: геометрична товщина до 30 мкм та коефіцієнт оптичної екстинції до 0,1. Остання вимога задовільняє умову одноразової взаємодії фотону з матеріалом БШ, що обумовлює можливість достовірної строгої діагностики структури БШ під впливом патологічних, біологічних чи запальних змін.

Основні елементи та взаємозв'язки багатопараметричної системи для вимірювання АІ мюллер-поляриметрії досліджуваних БШ проілюстровано схемою на рисунку 1.

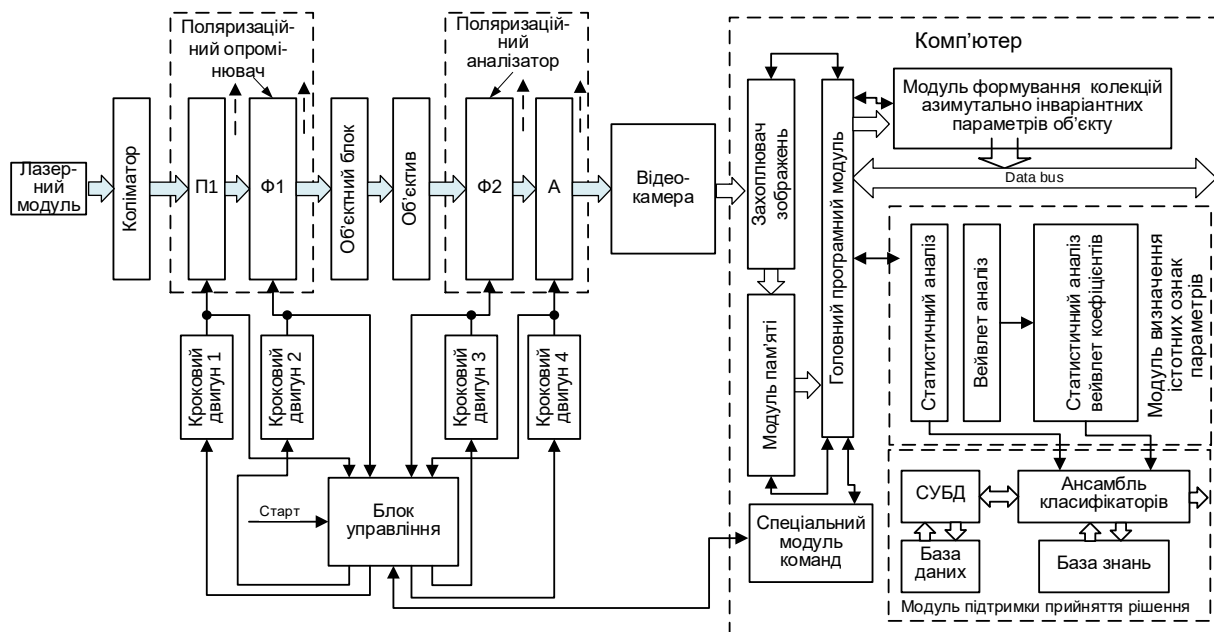


Рисунок 1 – Багатопараметрична система для вимірювання АІ мюллер-поляриметрії БШ з інтелектуальними методами ППР

Модуляцію поляризації світла від лазерного джерела на довжині хвилі 450 мкм виконує поляризаційний опромінювач, який містить поляризатор лінійний П1 та фазову чвертьхвильову пластинку Ф1, що можуть обертатись навколо своїх осей, застосовуючи приводи від двох відповідних крокових двигунів. Поліризаційний аналізатор містить такі ж елементи Ф2 та А (аналізатор) та з такою ж

властивістю обертання навколо своїх осей, як і поляризаційний опромінювач, але розташовані в зворотному порядку. Вони також здійснюють обертання із застосуванням приводів від третього та четвертого крокових двигунів. Крім того, є ще можливість Ф1 та Ф2 прибирати із шляху проходження лазерного променя.

Падаючий лазерний пучок з обраним типом поляризації $a \in \{0^0, 90^0, +45^0, \otimes\}$ потрапляє на об'єктний блок із зразком БШ. Після розсіювання зразком лазерний пучок проходить через об'єкти, конфігуруючи потім можливі стани поляризації аналізатора $b \in \{0^0, 90^0, +45^0, 135^0, \otimes, \oplus\}$. В результаті для обчислення повного набору ММЗ маємо 24 розподіли інтенсивності $I_b^a(x, y)$, виявлені відеокамерою та збережені в комп'ютері. На їх основі можна обчислити повний набір $M_{kl}(x, y), k = \overline{1:4}; l = \overline{1:4}$ ММЗ зразка БШ за відомими формулами [6, 16]. Проте в даній статті інтерес представляють лише АІ елементи набору ММЗ.

За результатами досліджень [11, 16, 17] встановлено колекцію АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, яка містить такі елементи: $M_{11}(x, y), M_{14}(x, y), M_{41}(x, y), M_{44}(x, y)$; суперпозиції $S_{22,33}(x, y)$ (додавання), $D_{23,32}(x, y)$ (віднімання) інших ММЗ (додавання та віднімання); розподіли $VD_{12,13}(x, y), VD_{21,31}(x, y), VD_{24,34}(x, y), VD_{42,43}(x, y)$ векторних відстаней між елементами ММЗ, які визначають за формулами:

$$\begin{aligned} S_{22,33}(x, y) &= M_{22}(x, y) + M_{33}(x, y), \\ D_{23,32}(x, y) &= M_{23}(x, y) - M_{32}(x, y), \\ VD_{12,13}(x, y) &= \sqrt{M_{12}^2(x, y) + M_{13}^2(x, y)}, \\ VD_{21,31}(x, y) &= \sqrt{M_{21}^2(x, y) + M_{31}^2(x, y)}, \\ VD_{42,43}(x, y) &= \sqrt{M_{42}^2(x, y) + M_{43}^2(x, y)}, \\ VD_{24,34}(x, y) &= \sqrt{M_{24}^2(x, y) + M_{34}^2(x, y)}. \end{aligned} \tag{1}$$

За допомогою модуля визначення істотних ознак вимірних розподілів (1) та модуля ППР в системі, наведений на рисунку 1, здійснюється подальше діагностичне оцінювання патологій.

МЕТОД ППР НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОЛЕКЦІЇ АЗИМУТАЛЬНИХ ІНВАНІАНТІВ МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЙ ТА МОДЕЛЕЙ ДЕРЕВ РІШЕННЯ

Сучасний аналіз двовимірних розподілів поляризаційних характеристик базується, зокрема, на статистичному підході. Застосування оцінок статистичних моментів $M_1 - M_4$ від першого до четвертого порядків дозволило охарактеризувати ступінь різноманітності досліджуваних двовимірних розподілів вимірних поляризаційних мюллер-матричних параметрів при оцінюванні патологій БТ [18], зменшуючи при цьому обсяг обчислень, необхідних для проведення діагностичної класифікації.

Проте з аналізом та класифікацією великорозмірних зображень без переходу до відповідних векторів їх ознак допомагають справлятися сучасні технології машинного навчання, результати застосування яких до розподілів мюллер-матричних елементів БШ описано в ряді публікацій [12, 13]. В той же час, відсутність достатньої за обсягом бази знань мюллер-матричної діагностики БШ спонукає до пошуку інших шляхів у отриманні унікальної додаткової інформації про досліджуваний оптико-анізотропний БШ.

В цьому сенсі доцільним є застосування вейвлет-аналізу для оцінювання різномасштабної структури зображень АІ мюллер-поляриметрії БШ, який називають «математичним мікроскопом» [8]. Він надає інформацію про розвиток відносного вкладу компонент різного масштабу в двовимірний розподіл АІ ММЗ у вигляді так званого спектру коефіцієнтів вейвлет – перетворення $\Psi_{a,b}(x)$. В цій

функції за аналогією з «математичним мікроскопом» параметри a та b відображають параметри «збільшення» та «точку фокусу мікроскопу» відповідно.

Розподіл будь-якого елемента колекції АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, представлений в одновимірному вигляді як $f(x)$, можна розкласти в ряд у вигляді

$$f(x) = \sum_{a,b=-\infty}^{+\infty} C_{a,b} \cdot \Psi_{a,b}(x), \quad (2)$$

де $C_{a,b}$ – розрахункові коефіцієнти на масштабах, заданих параметрами масштабування a , а також зміщення b .

Якщо просканувати в кожному рядку досліджуваній розподіл АІ ММЗ розмірності $(m \times n)$ в напрямку осі ОХ з визначеним кроком функцією МНАТ [19] з подальшим усередненням, то отримаємо двовимірний розподіл вейвлет коефіцієнтів $\Psi_{a,b}(x)$ та їх різномасштабні двовимірні перерізи у вигляді $C_{a,b}$.

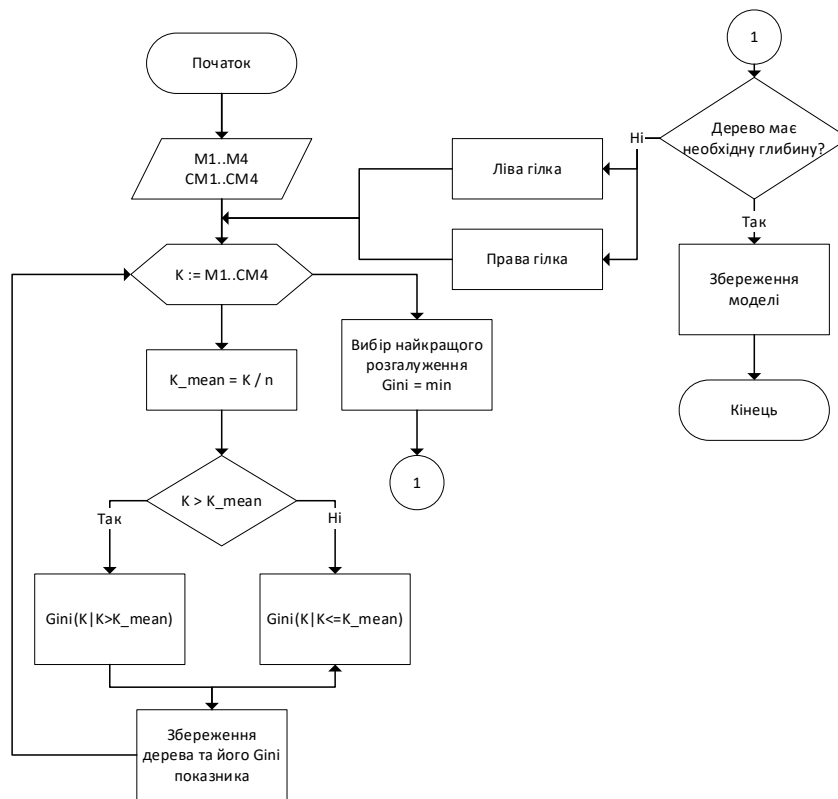


Рисунок 2 – Алгоритм роботи модуля ППР на основі методу дерев рішень

Застосовуючи до двовимірних розподілів $C_{a,b}(x)$ на різних масштабах $a_{\min} \div a_{\max}$ статистичний аналіз, визначаємо середнє, дисперсію, асиметрію та ексцес таких розподілів, як додаткові інформативні $CM_1 \div CM_4$ параметри АІ мюллер-поляриметричних зображень БТ.

Отже, в результаті застосування статистичного аналізу до двовимірних розподілів АІ мюллер-поляриметрії та розподілів вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах, отримаємо вектор інформативних ознак із 8 елементів для подальшої класифікації біологічних шарів при їх діагностиці, представлений як

$$V = [M_1, M_2, M_3, M_4, CM_1, CM_2, CM_3, CM_4]. \quad (2)$$

Враховуючи необхідність виконання класифікації за всіма елементами колекції АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, отримаємо ансамбль класифікаторів, кожен із яких може видавати свій результат.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Для вирішення такої задачі було обрано інтелектуальний метод дерев рішень [19], що базується на правилах, знайдених в даних тренувальної вибірки. Представлення моделі рішення зі структурою дерева, дозволяє рухатись по гілках та вузлах, кожного разу ставлячи питання екземпляру, аж до моменту остаточного визначення класу в кінцевих вузлах.

Мінімізація функції витрат, яка застосовується в процесі машинного навчання за методом дерев рішень, відбувається за коефіцієнтом $Gini_i$ [20], обчисленим для i -го вузла на основі ймовірності p_{ij} появи екземпляру певного класу серед загальної кількості екземплярів у вузлі за формулою:

$$Gini_i = 1 - \sum_{j=1}^R (p_{ij})^2. \quad (3)$$

Блок-схема алгоритму роботи модуля ППР на основі методу рева рішень наведена на рисунку 2. Визначивши серед обрахованих коефіцієнтів $Gini_i$ для кожної істотної ознаки вектора (2) найкращу з точки зору мінімального значення, формується перше розгалуження в блок-схемі. Після поточної перевірки на досяжність деревом необхідної глибини відбувається збереження моделі за позитивної відповіді та подальше розгалуження обчислень в рекурсивному порядку за негативної відповіді.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В наведеній на рисунку 1 системі було проведено вимірювання колекції із 10 азимутальних інваріантів ММЗ для зразків м'язової тканини шийки матки контрольної групи (21 зразок) та групи з патологією шийки матки (21 зразок). Приклади візуалізації шести із десяти відповідних двовимірних розподілів АІ ММЗ представників обох груп наведено на рисунку 3.

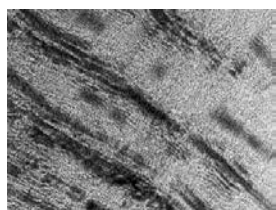
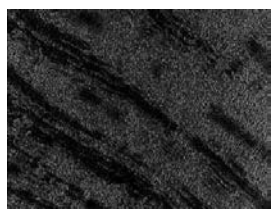
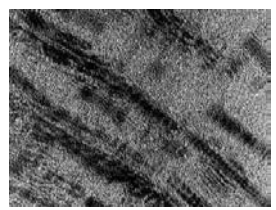
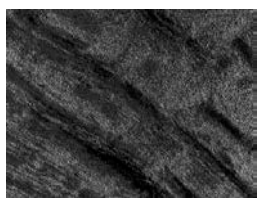
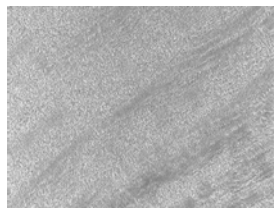
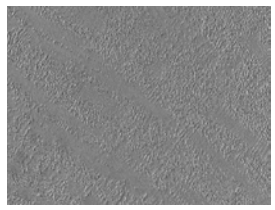
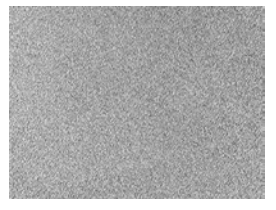
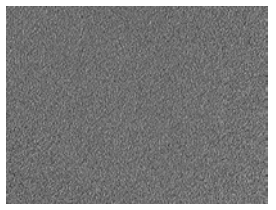
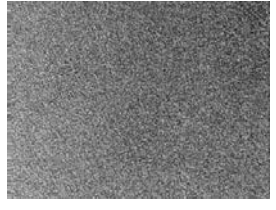
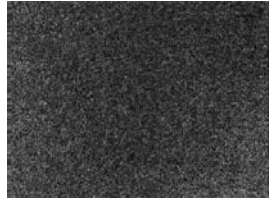
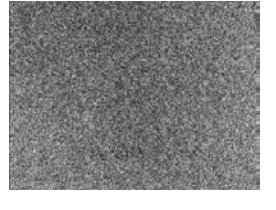
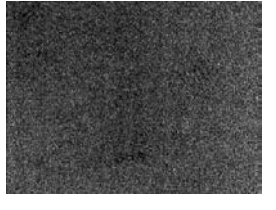
	$VD_{12,13}$ норма	$VD_{21,31}$ норма	$VD_{24,34}$ норма	$VD_{42,43}$ норма
				
	$S_{22,33}$ норма	$D_{23,32}$ норма	$S_{22,33}$ патологія	$D_{23,32}$ патологія
2				
	$VD_{12,13}$ патологія	$VD_{21,31}$ патологія	$VD_{24,34}$ патологія	$VD_{42,43}$ патологія
				

Рисунок 3 – Візуалізація двовимірних розподілів поляризаційних АІ мюллер-поляриметрії БШ м'язу шийки матки при нормі та патології

Проведений аналіз отриманих розподілів дозволив визначити усереднені значення елементів вектора ознак (2) для класу норми та патології. На їх основі проводились тренування моделі ППР на основі методу дерев рішень та оцінка моделей. Бібліотека `scikit-learn` та класифікатор `DecisionTreeClassifier` було застосовано для тренування моделі, в якій використано змінні X з розмірністю (42 -число екземплярів, 10 – тип розподілу AI MM3, 8 – число інформативних ознак).

```
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
classifiers = []
for i in range(10):
    model = DecisionTreeClassifier(
        max_depth=3,
        criterion='gini',
        splitter='best'
    )
    model.fit(X[:, i], y)
    classifiers.append(model)
```

Рисунок 4 – Фрагмент коду для тренувального процесу на основі дерев рішень для AI MM3

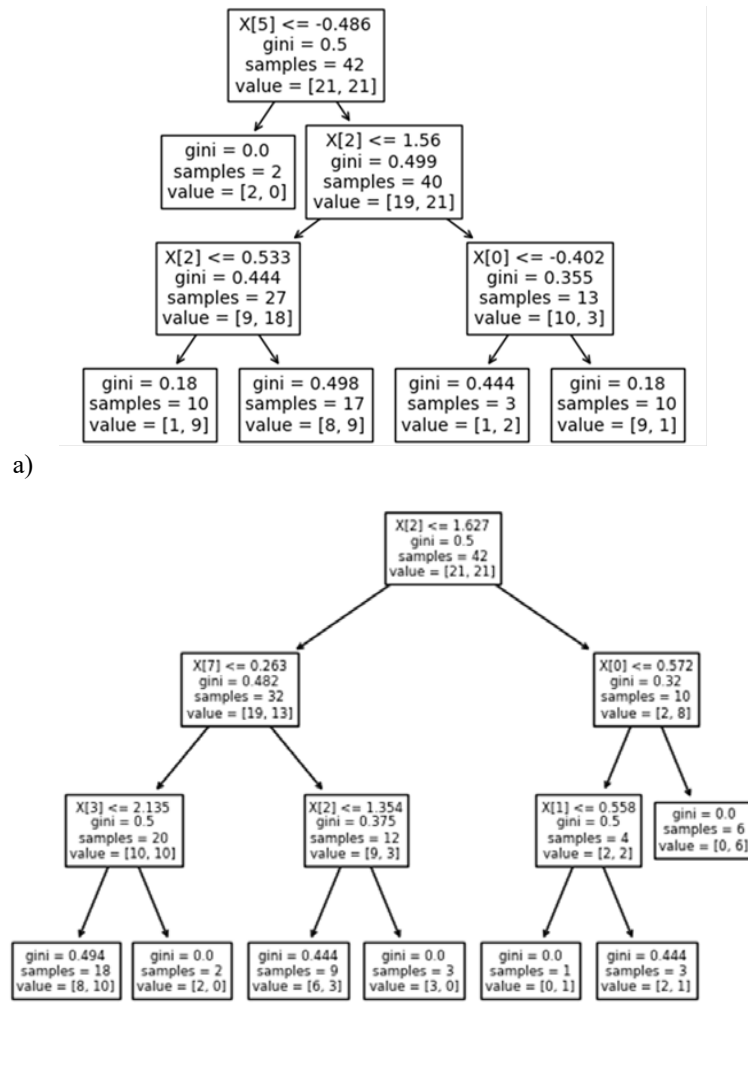


Рисунок 5 – Приклади структури моделі дерева рішення для класифікації БШ за AI MM3:

а) для M_{14} ; б) для $S_{22,33}$

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Моделі, натреновані від DecisionTreeClassifier, записано в змінну classifiers (рисунок 4). Приклад таких моделей для конкретних AI мюллер-поляриметриї БШ показано на рисунку 5.

Загальна точність класифікації (достовірність рішення) на основі натренованих моделей в подальшому визначалась на основі визначення відсотку правильно класифікованих досліджуваних екземплярів до загальної кількості досліджуваних екземплярів.

За даними таблиці 1, в якій наведено результати оцінювання збалансованої точності (A_c , %) методу дерев рішень для класифікації векторів ознак вимірюного AI мюллер-поляриметриї БШ, можна судити про достовірність оцінювання досліджуваної патології шийки матки. Прийняті в таблиці 1 позначення діагностованих станів: Тр (істинно «хворий»), Тп (істинно «здоровий»), Фр (хибно «хворий»), Фп (хибно «здоровий»). Обсяг вибірки зразків для діагностики в системі – 42 зразки, серед яких 28 зразків – навчальна вибірка.

Таблиця 1

Оцінка діагностичної точності за типами AI мюллер-поляриметриї БШ в системі з ППЗ на основі дерев рішень

Тип розподілу AI ММЗ	Розподіл рішень за категоріями,				Точність
	Тр	Fn	Тп	Фр	
$M_{11}(x, y)$	20	2	18	3	90,5%
$M_{14}(x, y)$	18	3	20	2	90,5%
$M_{41}(x, y)$	20	2	19	2	92,8%
$M_{44}(x, y)$	21	1	20	2	97,2%
$S_{22,33}(x, y)$	20	1	21	1	97,2%
$D_{23,32}(x, y)$	19	2	20	1	92,8%
$VD_{12,13}(x, y)$	20	2	18	3	90,5%
$VD_{21,31}(x, y)$	19	2	18	3	88,1%
$VD_{42,43}(x, y)$	19	2	19	2	90,5%
$VD_{24,34}(x, y)$	19	2	20	1	92,8%

Порівнюючи отримані результати оцінювання діагностичної точності зразків БШ м'яза шийки матки з формуванням різних типів розподілу вимірюваних параметрів AI ММЗ в розробленій системі, видно, що досягнуто показників здебільшого високого рівня точності діагностики.

У порівнянні з аналогами варто зазначити, що метод ППР на основі аналізу колекції AI мюллер-поляриметриї та моделей дерев рішення дозволив отримати максимальну точність діагностики на рівні 97,2% при виміряних елементах $M_{44}(x, y)$ та $S_{22,33}(x, y)$, що тенденційно узгоджується з результатами, описаними в роботах [16-18].

Розширення функціональних можливостей системи діагностики на основі вимірювання та аналізу не окремих розподілів AI ММЗ, а сукупності всіх десяти елементів колекції AI, залишається як можливий чинник подальшого зростання достовірності діагностики БШ.

В той же час, доречно зазначити, що моделі оцінювання точності машинного навчання при використанні повного обсягу навчальної вибірки схильні впливати на завищення показників точності, тому це питання потребує подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

Удосконалено метод ППР для системи багатопараметричної поляризаційної діагностики БШ біологічних шарів за рахунок застосування статистичного та вейвлет-аналізу колекції азимутальних інваріантів мюллер-поляриметриї БШ та моделей дерев рішення для підвищення точності прийнятих рішень.

Продemonстровано експериментальне застосування удосконаленого методу ППР при диференціації функціональних станів «норма» – «патологія» БШ м'язової тканини шийки матки із вимірюванням десяти розподілів азимутальних інваріант мюллер-поляриметричних параметрів БШ. Досягнуто зростання точності діагностики зразків БШ до рівня 97,2%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghosh, N., Vitkin, I. A., "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* 16(11), 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. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," *J. Biomed. Opt.* 27 (7), 076004 (2019).
4. Ma, H., He, H., Ramella-Roman, J.C., "Mueller matrix microscopy," *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing*. 11, P. 281–320 (2024).
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. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," *Lasers in Med Scienc.* 38 (1) (2023) DOI:10.1007/s10103-023-03712-6.
8. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L. et al., "Mueller-matrix imaging polarimetry elevated by wavelet decomposition and polarization-singular processing for analysis of specific cancerous tissue pathology," *J. Biomed. Opt.* 28(10), 102903 (2023).
9. Tumanova, K., Serra S., Madumdar, A. et al., "Mueller matrix polarization parameters correlate with local recurrence in patients with stage III colorectal cancer," *Sci Rep.* 13(1), 13424 (2023).
10. Kim, M., Lee, H.R., Ossikovskii, R. et al., "Optical diagnosis of gastric tissue with Mueller microscopy and statistical analysis," *J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ.* 18(2) (2022) DOI: 10.1051/jeos/2022011.
11. Dubozov, A., Peyvasteh, M., Tryfonyuk, M.L. et al., "Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours," *Laser Physics Letters*. 17(11), 115606 (2020).
12. 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) DOI: 10.1117/1.JBO.29.5.052915.
13. Dong, Y. et al., "A polarization-imaging-based machine learning framework for quantitative pathological diagnosis of cervical precancerous lesions," *IEEE Trans. Med. Imaging*. 40 (12). PP.3728-3738. (2021).
14. Qin, Z. et. al. "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," *CoRR abs/1804.11191* (2018).
15. Luu, N. T. et al., "Characterization of Mueller matrix elements for classifying human skin cancer utilizing random forest algorithm", *J. Biomed. Opt.* 2021. Vol. 26(7), 075001.
16. Zabolotna, N., Sholota, V., Satymbekov M. et al., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," *Proceedings of SPIE* 12476, 1247608. (2022) DOI: 10.1117/12.2659208/
17. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," *Proceedings of SPIE* 12985, 129850Q (2023).
18. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В., "Метод та підсистема підтримки прийняття рішення для мюллер-матричної лазерної поляризаційної діагностики біологічних тканин," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології* 1(43) С. 43–52 (2022) <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-43-52>.
19. 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).

REFERENCES

1. Ghosh, N., Vitkin, I. A., "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* 16(11), 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. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," J. Biomed. Opt. 27 (7), 076004 (2019).
4. Ma, H., He, H., Ramella-Roman, J.C., "Mueller matrix microscopy," Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. 11, P. 281–320 (2024).
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. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," Lasers in Med Scienc. 38 (1) (2023) DOI:10.1007/s10103-023-03712-6.
8. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L. et al., "Mueller-matrix imaging polarimetry elevated by wavelet decomposition and polarization-singular processing for analysis of specific cancerous tissue pathology," J. Biomed. Opt. 28(10), 102903 (2023).
9. Tumanova, K., Serra S., Madumdar, A. et al., "Mueller matrix polarization parameters correlate with local recurrence in patients with stage III colorectal cancer," Sci Rep. 13(1), 13424 (2023).
10. Kim, M., Lee, H.R., Ossikovskii, R. et al., "Optical diagnosis of gastric tissue with Mueller microscopy and statistical analysis," J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ. 18(2) (2022) DOI: 10.1051/jeos/2022011.
11. Dubozov, A., Peyvaste, M., Tryfonyuk, M.L. et al., "Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours," Laser Physics Letters. 17(11), 115606 (2020).
12. 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) DOI: 10.1117/1.JBO.29.5.052915.
13. Dong, Y. et al., "A polarization-imaging-based machine learning framework for quantitative pathological diagnosis of cervical precancerous lesions," IEEE Trans. Med. Imaging. 40 (12). PP.3728-3738. (2021).
14. Qin, Z. et al. "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," CoRR abs/1804.11191 (2018).
15. Luu, N. T. et al., "Characterization of Mueller matrix elements for classifying human skin cancer utilizing random forest algorithm", J. Biomed. Opt. 2021. Vol. 26(7), 075001.
16. Zabolotna, N., Sholota, V., Satymbekov M. et al., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," Proceedings of SPIE 12476, 1247608. (2022) DOI: 10.1117/12.2659208/
17. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," Proceedings of SPIE 12985, 129850Q (2023).
18. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., "Metod ta pidsystema pidtrymky pryiniattia rishennia dlia miuller-matrychnoi lazernoi poliarizatsiinoi diahnozyky biolohichnykh tkanyn," Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii 1(43) S. 43–52 (2022).
19. 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).

Надійшла до редакції 17.04.25 р.

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА – д.т.н., доцент, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

N.I.ZABOLOTNA

**INTELLECTUAL METHOD OF SUPPORTING DECISION MAKING IN A MULTI-PARAMETER
SYSTEM OF AZIMUTHALLY INVARIANT MUELLER-POLARIMETRIC
IN PATHOLOGIES ASSESSMENT**

Vinnitsia National Technical University