

УДК 535.361; 535.555

О.Г. УШЕНКО, О.В. ДУБОЛАЗОВ, І.Г. КУРЕК, О.В. ОЛАР, А.Ю. ВОЛОВИК

ДИЗАЙН І МЕТОДОЛОГІЯ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ФАЗОВОГО КАРТОГРАФУВАННЯ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПЛІВОК КРОВІ ЩУРІВ У ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІЙ ДІАГНОСТИЦІ СТУПЕНЯ ВАЖКОСТІ СЕПСИСУ

*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна
Вінницький національний технічний університет, Україна*

Анотація. У роботі розв'язано задачу диференціальної діагностики ступеня важкості сепсису на основі аналізу мікроскопічних зображень плівок крові. Запропоновано метод багатопараметричного фазового картографування, що базується на статистичному аналізі розподілів фазових зсувів. Експериментально встановлено, що зі зростанням важкості патологічного процесу зменшуються середнє значення та дисперсія фазових розподілів, а асиметрія та ексцес зростають. Отримані результати підтверджують ефективність методу для кількісної оцінки ступеня патології. Оцінка ефективності методу показала високий рівень диференціації між групами. Зокрема, для параметрів асиметрії та ексцесу досягнуто відмінної якості діагностики (понад 90 % збалансованої точності), тоді як для середнього значення та дисперсії отримано хороші та задовільні показники залежно від порівнюваних груп. Це підтверджує високу інформативність статистичних параметрів фазових мап як діагностичних критеріїв. Отримані результати підтверджують ефективність застосування методу поляризаційно-фазового картографування для об'єктивної диференціальної діагностики ступеня важкості сепсису та демонструють його чутливість до структурних змін у біологічних середовищах.

Ключові слова: фазове картографування, сепсис, поляризаційна мікроскопія, статистичний аналіз, біологічні тканини

Abstract. The paper addresses the problem of differential diagnosis of sepsis severity based on microscopic images of blood films. A multiparametric phase mapping method based on statistical analysis of phase shift distributions is proposed. It is experimentally shown that with increasing pathology severity, the mean and variance decrease, while skewness and kurtosis increase. The results confirm the effectiveness of the method for quantitative assessment of pathological states. The evaluation of the effectiveness of the method showed a high level of differentiation between groups. In particular, for the parameters of asymmetry and kurtosis, excellent diagnostic quality was achieved (over 90% balanced accuracy), while for the mean and variance, good and satisfactory indicators were obtained depending on the groups being compared. This confirms the high informativeness of the statistical parameters of phase maps as diagnostic criteria. The obtained results confirm the effectiveness of the polarization-phase mapping method for objective differential diagnosis of the severity of sepsis and demonstrate its sensitivity to structural changes in biological environments.

Keywords: phase mapping, sepsis, polarization microscopy, statistical analysis, biological tissues

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-160-167

ВСТУП

Проблема об'єктивної діагностики патологічних станів біологічних тканин, зокрема септичних процесів, є однією з актуальних задач сучасної біомедичної оптики та медичної діагностики [1-4]. Традиційні методи дослідження крові часто не забезпечують достатньої чутливості до ранніх змін мікроструктури, що обумовлює необхідність розробки нових оптико-інформаційних підходів [1-7].

Одним із перспективних напрямів є використання поляризаційної та фазової мікроскопії, що дозволяє отримувати інформацію про оптичну анізотропію та структурну організацію біологічних середовищ.

© О.Г. УШЕНКО, О.В. ДУБОЛАЗОВ, І.Г. КУРЕК, О.В. ОЛАР, А.Ю. ВОЛОВИК, 2026

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

У ряді робіт показано, що фазові характеристики мікроскопічних зображень є чутливими до змін морфології та фізико-хімічного стану біологічних об'єктів, однак питання їх комплексного статистичного аналізу для задач диференціальної діагностики залишаються недостатньо дослідженими [5-10].

Особливої актуальності набуває застосування таких методів для аналізу полікристалічних плівок крові, структура яких змінюється при розвитку сепсису. У цьому випадку виникає задача встановлення взаємозв'язку між параметрами фазових розподілів мікроскопічних зображень та ступенем важкості патологічного процесу [11-15].

У даній роботі розглядається підхід багатопараметричного фазового картографування, що дозволяє здійснювати кількісну оцінку змін структури біологічних середовищ на основі статистичних характеристик фазових мап і може бути використаний для підвищення точності диференціальної діагностики сепсису.

Метою роботи є розробка і експериментальна апробація нової цифрової методики об'єктивної диференціальної діагностики ступеня важкості септичного процесу шляхом фазового картографування мікроскопічних зображень плівок крові лабораторних щурів.

1. МЕТОДИКА ФАЗОМЕТРИЧНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ БІОЛОГІЧНИХ ПРЕПАРАТІВ

Реалізація методики передбачає послідовне використання функціональних блоків з формуванням циркулярно поляризованого зонда, взаємодією з об'єктом дослідження, формуванням мікроскопічного зображення, його цифрову реєстрацію та подальшу обробку із визначенням фазових параметрів і статистичних характеристик їх розподілу.

Блок когерентного опромінення гістологічних зрізів внутрішніх органів і плівок крові лабораторних щурів
Блок формування циркулярної поляризації лазерного зонда
Об'єктний блок розміщення зразків біологічних препаратів
Блок формування мікроскопічного зображення зразків біологічних препаратів
Блок поляризаційно-фазового аналізу мікроскопічних зображень біологічних препаратів
Блок цифрової реєстрації поляризаційно-фазових мікроскопічних зображень біологічних препаратів
Комп'ютерний процесор розрахунку фаз мікроскопічних зображень біологічних препаратів
Комп'ютерний процесор статистичного аналізу розподілу фаз мікроскопічних зображень біологічних препаратів

2. КОРОТКА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження виконано на вибірках плівок крові лабораторних щурів, які включали контрольну групу та групи з різним ступенем важкості септичного процесу і тривалістю розвитку патології. Отримані фазові мапи та відповідні гістограми розподілів фазових зсувів демонструють суттєві відмінності як у топографічній структурі, так і у статистичних характеристиках між досліджуваними групами.

Досліджувалися наступні групи зразків біологічних препаратів щурів:

1. Інтактні щури – “контрольна” група 1 (39 зразків);
2. Хворі щури (сепсис - легка форма) - “дослідна” група 2:
 - тривалість 12 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 2.1;
 - тривалість 48 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 2.2.
3. Хворі щури (сепсис - середня форма) - “дослідна” група 3:
 - тривалість 12 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 3.1;
 - тривалість 48 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 3.2.
4. Хворі щури (сепсис – важка форма) - “дослідна” група 4:
 - тривалість 12 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 4.1;
 - тривалість 48 год. (39 зразків) - “дослідна” підгрупа 4.2.

3. СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ МЕТОДУ ФАЗОВОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

Диференціальна діагностика ступеня важкості сепсису за фазовими мапами мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові

Застосування методу поляризаційно-фазового картографування мікроскопічних зображень біологічних препаратів дозволяє отримати об'єктивну інформацію про структурно-оптичні властивості полікристалічних складових крові. Такий підхід забезпечує перехід від якісного візуального аналізу до кількісної оцінки фазових характеристик, що формуються внаслідок взаємодії когерентного випромінювання з анізотропними біологічними структурами.

Важливою перевагою запропонованої методики є можливість комплексного аналізу як топографічної структури фазових карт, так і статистичних закономірностей розподілу фазових зсувів у точках мікроскопічних зображень. Це створює передумови для виявлення прихованих змін у морфологічній та оптичній організації біологічних середовищ, які не можуть бути достовірно ідентифіковані традиційними методами мікроскопії [16-20].

На серії фрагментів рис. 1 – рис. 2 представлені фазові карти ((1),(3)) і гістограми розподілу величини фазових зсувів ((2),(4)), які визначені для цифрових мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові щурів з групи 1 (рис. 1, фрагменти (1),(2)), групи 2.1 (рис. 1, фрагменти (3),(4)), групи 3.1 (рис. 2, фрагменти (1),(2)) і групи 4.1 (рис. 2, фрагменти (3),(4)).

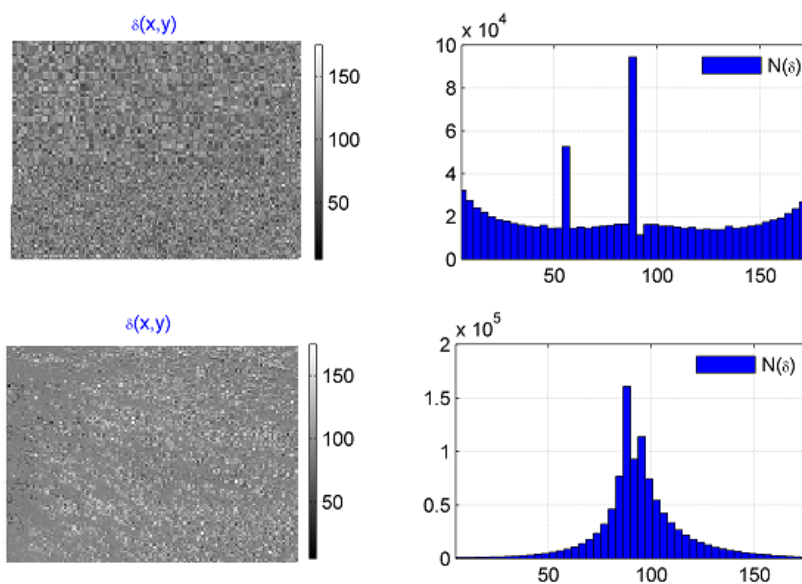


Рисунок 1 – Фазові карти (фрагменти (1),(3)) та гістограми (фрагменти (2),(4)) розподілів величини фазових зсувів в точках мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові щурів з групи 1 і групи 2.1

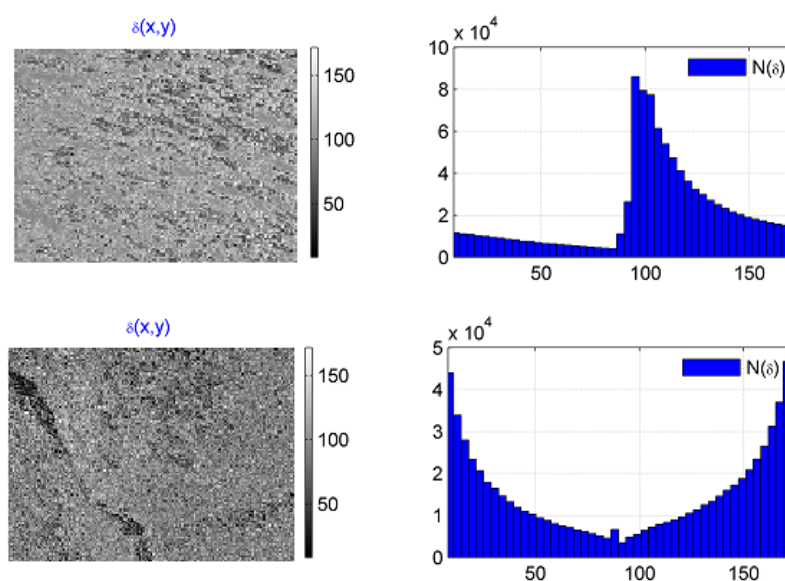


Рисунок 2 – Фазові карти (фрагменти (1),(3)) та гістограми (фрагменти (2),(4)) розподілів величини фазових зсувів в точках мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові щурів з групи 3.1 і групи 4.1.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Порівняльний аналіз одержаних даних поляризаційно-фазової мікроскопії полікристалічних плівок крові виявив:

- координатну і статистичну неоднорідність розподілів величини фазових зсувів, які сформовані полікристалічною складовою зразків з усіх груп;
- гістограми розподілів величини фазових зсувів (фрагменти (2),(4)) в точках мікроскопічних зображень характеризуються різною півшириною розкиду значень фаз;
- індивідуальну топографічну та статистичну структуру фазових мап (фрагменти (1),(3)) цифрових мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові шурів всіх груп;
- зменшення середнього та діапазону розкиду величини фаз у фазових мапах мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові шурів із збільшенням ступеня важкості септичного процесу (фрагменти (2),(4)) рис. 1 і рис. 2, відповідно).

Кількісно зазначені результати ілюструють приведені в таблиці 1 дані статистичного аналізу всієї сукупності фазових мап у межах кожної з чотирьох груп зразків біологічних препаратів плівок крові.

Таблиця 1 – Статистичні параметри фазових мап мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові

Групи	Група 1 Інтактні (n=39)	Група 2 Сепсис (легка) (n=39)		Група 3 Сепсис (середня) (n=39)		Група 4 Сепсис (важка) (n=39)	
		2.1 (12 год.)	2.2 (48 год.)	4.1 (12 год.)	4.1 (12 год.)	4.1 (12 год.)	4.2 (48 год.)
Тривалість	0 год.						
Середнє, <i>S</i>	1.53±0,067	1.22±0,045	0.91±0,041	0.39±0,021	0.39±0,021	0.39±0,021	0.32±0,018
Дисперсія, <i>D</i>	0.81±0,035	0.61±0,029	0.49±0,022	0.21±0,014	0.21±0,014	0.21±0,014	0.17±0,011
Асиметрія, <i>A</i>	0.58±0,023	0.78±0,034	0.94±0,042	1.81±0,079	1.81±0,079	1.81±0,079	1.91±0,081
Ексцес, <i>E</i>	1.56±0,077	1.18±0,052	0.89±0,042	0.33±0,018	0.33±0,018	0.33±0,018	0.28±0,014

У результаті послідовного порівняльного аналізу даних про статистичну структуру фазових мап мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові шурів з контрольної та дослідних груп встановлено [16-20]:

1. Статистичний момент 1-го порядку:
 - середньогрупова величина у межах репрезентативних вибірок “група 1 – група 4” зменшується від 1.53 до 0.39;
 - міжгрупові відмінності – статистично достовірні ($p_{1\div 4}, p_{2\div 3}, p_{3\div 4}, p_{2\div 4} < 0.05$);
2. Статистичний момент 2-го порядку:
 - середньогрупова величина у межах репрезентативних вибірок “група 1 – група 4” зменшується у межах від 0.81 до 0.17;
 - міжгрупові відмінності – для всіх груп статистично достовірні ($p_{1\div 4}, p_{2\div 3}, p_{3\div 4}, p_{2\div 4} < 0.05$).
3. Статистичний момент 3-го порядку:
 - середньогрупова величина у межах репрезентативних вибірок “група 1 – група 4” зростає у межах від 0.58 до 1.91;
 - міжгрупові відмінності – для всіх груп статистично достовірні ($p_{1\div 4}, p_{2\div 3}, p_{3\div 4}, p_{2\div 4} < 0.05$).
4. Статистичний момент 4-го порядку:
 - середньогрупова величина у межах репрезентативних вибірок “група 1 – група 4” зменшується у межах від 1.56 до 0.48;
 - міжгрупові відмінності – статистично достовірні ($p_{1\div 4}, p_{2\div 3}, p_{3\div 4}, p_{2\div 4} < 0.05$);
5. Для всіх статистичних моментів міжгрупові відмінності “4.1-4.2” статистично недостовірні.

Для кількісного підтвердження виявлених закономірностей проведено аналіз статистичної достовірності диференціації фазових мап за параметрами розподілу фазових зсувів, результати якого наведено в таблиці 2.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 2 – Ефективність статистичної диференціації фазових мап мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові

Статистична достовірність, p_i							
Групи	“1 - 2,3,4” $P_{1(2,3,4)}$	“2 - 3” P_{23}	“2 - 4” P_{24}	“3 - 4” P_{34}	“2.1-2.2” $P_{2(12)}$	“3.1-3.2” $P_{3(12)}$	“4.1-4.2” $P_{4(12)}$
Середнє, S	$P < 0.05$						$P > 0.05$
Дисперсія, D							
Асиметрія, A							
Ексцес, E							

З одержаних результатів випливає, що для септичних станів притаманне зменшення фазовозсуваючої здатності полікристалічної складової плівок крові щурів з усіх дослідних груп. На виявлений факт вказує зменшення величини середнього та дисперсії фазових зсувів в точках мікроскопічних зображень [18,19]. Така трансформація статистичної структури фазових мап пов'язана з некротичною деградацією (анемія) оптично анізотропних структур гемоглобіну, а також із зменшенням кількості оптично активних еритроцитів у змінній внаслідок запального процесу крові щурів з різною важкістю запального процесу.

4. ІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ МЕТОДУ ФАЗОВОГО КАРТОГРАФУВАННЯ

Для здійснення інформаційного аналізу використано наступну класифікацію величини збалансованої точності диференціальної діагностики септичного ураження методом поляризаційно-фазової мікроскопії

Рівень збалансованої точності	Діапазон, %	Позначення
НЕЗАДОВІЛЬНИЙ	< 75%	
ЗАДОВІЛЬНИЙ	75% – 80%	
ХОРОШИЙ	80% – 85%	
ДУЖЕ ХОРОШИЙ	85% – 90%	
ВІДМІННИЙ	> 90%	

Операційні характеристики сиду методу диференціальної діагностики ступеня важкості сепсису за фазовими мапами мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові

У таблиці 3 представлені результати визначення збалансованої точності методу фазового картографування мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові здорових і хворих на сепсис щурів.

Виявлено наступні діапазони максимальної збалансованої точності:

- інтактні – хворі “1 – (2,3,4)” – відмінна якість $Ac(A, E) = 93.6\% - 94.8\%$;
- легкий – середній ступень “2-3”- відмінна якість $Ac(A, E) = 9.6\% - 94.8\%$;
- легкий – важкий ступень “2-4”- відмінна якість $Ac(A, E) = 94.8\% - 96\%$;
- середній – важкий ступень “3-4” - дуже хороша якість $Ac(A, E) = 88.5\% - 89.7\%$;
- внутрішньо груповий легкий ступень “2.1 – 2.2” - відмінна якість $Ac(A, E) = 91\% - 93.6\%$;
- внутрішньо груповий середній ступень “3.1 – 3.2” - відмінна якість $Ac(A) = 91\%$;
- внутрішньо груповий важкий ступень “4.1 – 4.2” – незадовільна якість $Ac < 70\%$.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 3 – Збалансована точність диференціальної діагностики ступеня важкості сепсису за фазовими мапами мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові

Параметри	Збалансована точність, Ас, %			
Групи	“1 – (2,3,4)”	“2-3”	“2-4”	“3-4”
Середнє, <i>S</i>	$\begin{cases} a = 32; b = 7; \\ c = 31; d = 8 \end{cases}$ 80,8	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 30; d = 9 \end{cases}$ 78,2	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 30; d = 9 \end{cases}$ 78,2	$\begin{cases} a = 29; b = 10; \\ c = 28; d = 11 \end{cases}$ 73
Дисперсія, <i>D</i>	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 31; d = 8 \end{cases}$ 79.5	$\begin{cases} a = 30; b = 9; \\ c = 29; d = 10 \end{cases}$ 75.6	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 30; d = 9 \end{cases}$ 78.2	$\begin{cases} a = 28; b = 11; \\ c = 28; d = 11 \end{cases}$ 70.5
Асиметрія, <i>A</i>	$\begin{cases} a = 38; b = 1; \\ c = 36; d = 3 \end{cases}$ 94.8	$\begin{cases} a = 37; b = 2; \\ c = 37; d = 2 \end{cases}$ 94.8	$\begin{cases} a = 38; b = 1; \\ c = 37; d = 2 \end{cases}$ 96	$\begin{cases} a = 36; b = 3; \\ c = 34; d = 5 \end{cases}$ 89,7
Ексцес, <i>E</i>	$\begin{cases} a = 37; b = 2; \\ c = 36; d = 3 \end{cases}$ 93.6	$\begin{cases} a = 37; b = 2; \\ c = 35; d = 4 \end{cases}$ 92.3	$\begin{cases} a = 37; b = 2; \\ c = 37; d = 2 \end{cases}$ 94.8	$\begin{cases} a = 35; b = 4; \\ c = 34; d = 5 \end{cases}$ 88.5
Параметри	Збалансована точність, Ас, %			
Групи	“2.1 – 2.2”	“3.1-3.2”	“4.1-4.2”	
Середнє, <i>S</i>	$\begin{cases} a = 33; b = 6; \\ c = 32; d = 7 \end{cases}$ 83.3	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 30; d = 9 \end{cases}$ 78.2	$\begin{cases} a = 21; b = 18; \\ c = 22; d = 17 \end{cases}$ 55.1	
Дисперсія, <i>D</i>	$\begin{cases} a = 31; b = 8; \\ c = 30; d = 9 \end{cases}$ 78.2	$\begin{cases} a = 29; b = 10; \\ c = 28; d = 11 \end{cases}$ 73	$\begin{cases} a = 23; b = 16; \\ c = 22; d = 17 \end{cases}$ 57.7	
Асиметрія, <i>A</i>	$\begin{cases} a = 37; b = 2; \\ c = 36; d = 3 \end{cases}$ 93.6	$\begin{cases} a = 37; b = 3; \\ c = 36; d = 4 \end{cases}$ 91	$\begin{cases} a = 25; b = 14; \\ c = 23; d = 16 \end{cases}$ 61.5	
Ексцес, <i>E</i>	$\begin{cases} a = 36; b = 3; \\ c = 35; d = 4 \end{cases}$ 91	$\begin{cases} a = 34; b = 5; \\ c = 33; d = 6 \end{cases}$ 85.9	$\begin{cases} a = 24; b = 15; \\ c = 22; d = 17 \end{cases}$ 58.9	

ВИСНОВКИ

У статті виконано дослідження методу поляризаційно-фазового картографування мікроскопічних зображень полікристалічних плівок крові лабораторних щурів для задачі диференціальної діагностики ступеня важкості септичного процесу. Розглянуто повний цикл обробки даних, що включає формування поляризаційно-оптичного зонда, отримання цифрових мікроскопічних зображень, фазове картографування та статистичний аналіз розподілів фазових зсувів.

Запропоновано та реалізовано підхід, що базується на аналізі статистичних моментів 1–4 порядків (середнє значення, дисперсія, асиметрія та ексцес) фазових мап. Проведений кількісний аналіз показав, що зі зростанням ступеня важкості сепсису відбувається систематичне зменшення середнього значення фазових зсувів (від 1.53 до 0.32) та дисперсії (від 0.81 до 0.17), тоді як асиметрія розподілів зростає (до 1,91), що свідчить про зміну структури фазових розподілів і деградацію оптично анізотропних компонентів крові.

Якісний аналіз фазових мап та відповідних гістограм продемонстрував наявність індивідуальної топографічної структури для кожної досліджуваної групи, а також координатну і статистичну неоднорідність розподілів фазових зсувів. Встановлено, що зі збільшенням ступеня важкості септичного процесу спостерігається звуження діапазону фазових значень та зменшення фазозсувної здатності полікристалічної складової плівок крові.

Оцінка ефективності методу показала високий рівень диференціації між групами. Зокрема, для

параметрів асиметрії та ексцесу досягнуто відмінної якості діагностики (понад 90 % збалансованої точності), тоді як для середнього значення та дисперсії отримано хороші та задовільні показники залежно від порівнюваних груп. Це підтверджує високу інформативність статистичних параметрів фазових мап як діагностичних критеріїв.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування методу поляризаційно-фазового картографування для об'єктивної диференціальної діагностики ступеня важкості сепсису та демонструють його чутливість до структурних змін у біологічних середовищах.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України №2023.03/0174.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghosh N. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *J Biomed Opt.* 2011;16(11):110801. <https://doi.org/10.1117/1.3652896>
2. Jacques SL. Polarized light imaging of biological tissues. In: Boas D, Pitris C, Ramanujam N, editors. *Handbook of Biomedical Optics*. 2nd ed. CRC Press; 2011. p. 649–669. <https://doi.org/10.1201/b10951-34>
3. Layden D, Ghosh N, Vitkin IA. Quantitative polarimetry for tissue characterization and diagnosis. In: Wang RK, Tuchin VV, editors. *Advanced Biophotonics*. CRC Press; 2013. p. 73–108. <https://doi.org/10.1201/b15256-6>
4. Vitkin A, Ghosh N, de Martino A. Tissue polarimetry. In: Andrews DL, editor. *Photonics*. John Wiley & Sons; 2015. p. 239–321. <https://doi.org/10.1002/9781119011804.ch7>
5. Pishak VP, Ushenko AG, Gryhoryshyn P, Yermolenko SB, Rudeychuk VM, Pishak OV. Study of polarization structure of biospeckle fields in crosslinked tissues. *Proc SPIE*. 1997;418:418–424. <https://doi.org/10.1117/12.295715>
6. Ushenko AG. Depolarization of a laser emission field. *Proc SPIE*. 1997;3317:331–339. <https://doi.org/10.1117/12.295701>
7. Ushenko AG, Burkovets DN, Yermolenko SB, Arkheliuk AD, Pishak VP, Yuzko AM, et al. Stokes polarimetry of biotissues. *Proc SPIE*. 1999;3904:527–533. <https://doi.org/10.1117/12.370448>
8. Józwicki R, Patorski K, Angelsky OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Ushenko YA. Automatic polarimetric system for early diagnosis. *Opt Appl*. 2002;32(4):603–612.
9. Ushenko AG, Pishak VP. Coherent-domain optical methods. In: *Laser Polarimetry of Biological Tissue*. Kluwer; 2004. p. 67–93. https://doi.org/10.1007/0-387-29989-0_3
10. Olar EI, Ushenko AG, Ushenko YA. Correlation microstructure of Jones matrices. *Laser Phys*. 2004;14(7):1012–1018.
11. Ushenko AG, Dubolazov OV, Ushenko VA, Novakovskaya OY, Olar OV. Fourier polarimetry of human skin. *Appl Opt*. 2016;55(12):B56–B60. <https://doi.org/10.1364/AO.55.000B56>
12. Trifonyuk L, Sdobnov A, Baranowski W, Ushenko V, Olar O, Dubolazov A, et al. Differential Mueller matrix imaging. *Lasers Med Sci*. 2020;35:877–891. <https://doi.org/10.1007/s10103-019-02878-2>
13. Lee HR, Lotz C, Groeber-Becker FK, Dembski S, Novikova T. Digital histology with Mueller polarimetry. *Appl Opt*. 2022;61(32):9616–9624. <https://doi.org/10.1364/AO.461732>
14. Kim M, Lee HR, Ossikovski R, Malfait-Jobart A, Lamarque D, Novikova T. Optical diagnosis of gastric tissue. *J Eur Opt Soc*. 2022;18(2):10. <https://doi.org/10.1051/jeos/2022011>
15. Ma H, He H, Ramella-Roman JC. Mueller matrix microscopy. In: *Polarized Light in Biomedical Imaging*. Springer; 2023. p. 281–320.
16. Ushenko A, Dubolazov A, Zheng J, Litvinenko A, Gorsky M, Ushenko Y, et al. 3D polarization-interference holographic histology. *J Biomed Opt*. 2024;29(5):052920. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.29.5.052920>
17. Ushenko A, Zheng J, Litvinenko A, Gorsky M, Wanchuliak O, Dubolazov A, et al. 3D digital polarization-holographic histology. *J Biophotonics*. 2024;17(3):e202300372. <https://doi.org/10.1002/jbio.202300372>
18. Ushenko A, Pavlyukovich N, Khukhlina O, Pavlyukovich O, Soltys I, Dubolazov A, et al. Blood plasma film multifractal scanning. *J Biophotonics*. 2024;17(11):e202400356. <https://doi.org/10.1002/jbio.202400356>
19. Ushenko A, Dubolazov A, Zheng J, Bakun O, Gorsky M, Ushenko Y, et al. Mueller matrix polarization interferometry. *Front Phys*. 2024;11:1302254. <https://doi.org/10.3389/fphy.2023.1302254>
20. Ushenko O, Bilookyi O, Zheng J, Dubolazov A, Olar O, Ushenko Y, et al. 3D digital holographic polarimetry. *Front Phys*. 2024;12:1426469. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1426469>

Дата надходження: 10.02.2026

Дата прийняття до друку після рецензування: 25.03.2026

Дата публікації: 18.06.2026

*Ця робота ліцензується відповідно до
[Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)*

УШЕНКО ОЛЕКСАНДР ГРИГОРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна, *e-mail: o.ushenko@chnu.edu.ua*,
<https://orcid.org/0000-0001-7015-7423>

ДУБОЛАЗОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна, *e-mail: a.dubolazov@chnu.edu.ua*,
<https://orcid.org/0000-0003-1051-2811>

КУРЕК ІГОР ГЕНАДІЙОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, молодший науковий співробітник кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна, *e-mail: i.kurek@chnu.edu.ua*, <https://orcid.org/0009-0009-5905-4074>

ОЛАР ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІЙОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна, *e-mail: o.v.olar@chnu.edu.ua*, <https://orcid.org/0000-0002-3625-8439>

ВОЛОВИК АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, *e-mail: voland@vntu.edu.ua*, <https://orcid.org/0000-0002-8772-9843>

O.G. USHENKO, O.V. DUBOLAZOV, I.G. KUREK, O.V. OLAR, A.Yu. VOLOVYK

**DESIGN AND METHODOLOGY OF MULTIPARAMETRIC PHASE MAPPING OF
MICROSCOPIC IMAGES OF RAT BLOOD FILMS IN THE DIFFERENTIAL DIAGNOSIS
OF SEPSIS SEVERITY**

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University