

УДК 535.361; 535.555

В.Т. БАЧИНСЬКИЙ, О.Ф. СКЛЯРЧУК, М.С. ГАВРИЛЯК, М.В. КОЖОКАР

ЦИФРОВА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНА МЮЛЛЕР-МАТРИЧНА МІКРОСКОПІЯ ПЛІВОК КРОВІ ПОМЕРЛИХ І ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ВІДДАЛЕНИХ НАСЛІДКІВ COVID-19

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Україна, 58002, Чернівецька обл., м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 2.*

Анотація. Наведено результати експериментальної апробації методу азимутально-інваріантної Мюллер-матричної мікроскопії полікристалічних плівок крові померлих з алгоритмічним відтворенням координатних розподілів циркулярного двопронезаломлення (оптичної активності) надмолекулярних мереж. У рамках статистичного аналізу виявлено сукупність діагностичних маркерів (асиметрія і ексцес координатних розподілів циркулярного двопронезаломлення), чутливих до змін полікристалічної структури надмолекулярних мереж плівок крові померлих з різною давністю COVID-19. Установлено діагностичну силу методу азимутально-інваріантної Мюллер-матричної мікроскопії полікристалічних плівок крові померлих на рівні 91%.

Abstract. The results of experimental testing of the azimuthally invariant Mueller-matrix microscopy method for polycrystalline blood films of deceased persons with algorithmic reconstruction of the coordinate distributions of circular birefringence (optical activity) of supramolecular networks are presented. Within the framework of statistical analysis, a set of diagnostic markers (asymmetry and kurtosis of the coordinate distributions of circular birefringence) sensitive to changes in the polycrystalline structure of supramolecular networks of blood films of the deceased with different durations since COVID-19 was identified. The diagnostic power of the azimuthally invariant Mueller-matrix microscopy method for polycrystalline blood films of the deceased was established at the level of 91%.

Ключові слова: полікристалічні плівки, асиметрія, ексцес, Мюллер-матрична мікроскопія, COVID-19

DOI: 10.31649/1681-7893-2026-51-1-181-188

ВСТУП

За останні роки у різноманітних галузях медицини широкого та ефективного розповсюдження набули сучасні неруйнівні та неінвазивні методи оптичної діагностики препаратів біологічних тканин і рідин [1,2].

Серед широкого спектру оптичних методів виокремився один з найбільш ефективних – лазерна поляриметрична діагностика полікристалічної структури біологічних шарів [3,4]. Зокрема було продемонстровано можливість лазерної поляриметричної високоточної та експресної диференціальної діагностики доброякісних і злоякісних новоутворень шкіри [5,6].

Методологічним узагальненням та розвитком лазерної поляриметрії стали методи і системи багатопараметричної Мюллер-матричної поляриметрії, які забезпечують одержання вичерпної повної інформації про оптично анізотропну складову препаратів біологічних тканин і рідин [7 – 12].

Найбільш ефективним на даний час є застосування таких методів у складних завданнях судової медицини, які пов'язані із визначенням причини і давності смерті, травматичних ушкоджень тощо [13-17].

Новими горизонтами у плані розширення функціональних можливостей та покращення чутливості диференціальної діагностики різноманітних патологічних і некротичних станів для Мюллер-матричної поляриметрії стала розробка новітніх технік 3D сканування об'єму біологічних зразків [18-23].

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Слід зазначити, що переважним чином весь арсенал методів і систем Мюллер-матричної поляриметрії спрямований на визначення критеріїв та практичне застосування таких маркерів у диференціальній діагностиці та динаміці патологічних і некротичних змін тканин і рідин органів людини на короткотривалих проміжках часу. При цьому практично невивченими і актуальними на сьогодні є питання, пов'язані із установленням критеріїв детектування віддалених змін морфологічної структури органів людини внаслідок перенесеного COVID-19.

Наша робота присвячена експериментальній апробації і визначенні сукупності маркерів диференціальної діагностики померлих з різною давністю COVID-19 шляхом використання методу Мюллер-матричного картографування оптичної активності надмолекулярних мереж дегідратованих плівок крові.

1. ТЕОРІЯ, ОПИС МЕТОДУ

Застосовано такі теоретичні положення багатофункціональної Мюллер-матричної поляриметрії препаратів тканин і рідин органів людини [20]:

1. Дегідратована плівка біологічної рідини являє собою двокомпонентну структуру, яка складається з аморфної (оптично-ізотропної) та оптично анізотропної полікристалічної компонент.
2. Аморфна компонента біологічних препаратів ослаблює за рахунок різного за координатами поглинання лазерне випромінювання – у результаті формується координатний розподіл інтенсивності або класичне мікроскопічне зображення, яке є об'єктом традиційних гістологічних досліджень.
3. Полікристалічна архітектоніка біологічних препаратів на відміну від аморфної складової володіє лінійним та циркулярним двоприменезаломленням, яке змінює поляризаційні параметри лазерного випромінювання.
4. Найбільш інформативно повним методом експериментального детектування поляризаційних проявів оптично анізотропної архітектоніки біологічних препаратів є Мюллер-матричне картографування з виділенням Мюллер-матричних інваріантів оптичної активності (ММІ ОА), які є придатними для серійних експериментальних вимірювань і незалежними від обертання зразків біологічних препаратів відносно напряму лазерного опромінення.

2. МЕТОДИКА АЗИМУТАЛЬНО-ІНВАРІАНТНОГО МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ І ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ВІДТВОРЕННЯ МАП ОПТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПЛІВОК КРОВІ ПОМЕРЛИХ

Методика азимутально-інваріантного експериментального вимірювання координатних розподілів величини елементів матриці Мюллера полікристалічних плівок крові і нативних гістологічних зрізів міокарда та нирки померлих полягає у наступній сукупності дій:

1. Біологічний препарат розміщують на предметному механічному столику лазерного Мюллер-матричного поляриметра (детальна конструкція та опис параметрів його оптичних і оптико-електронних елементів наведені у численних публікаціях [3-10] і нами не приводиться).

2. За допомогою багатоканального поляризаційного фільтра послідовно формують чотири поляризаційні стани опромінюючого біологічний препарат паралельного пучка He-Ne лазера з довжиною хвилі 0,6328 мкм:

- 1-й канал - лінійно поляризований з азимутом 0° ;
- 2-й канал - лінійно поляризований з азимутом 90° ;
- 3-й канал - лінійно поляризований з азимутом 45° ;
- 4-й канал - право (\otimes) циркулярно поляризований.

3. Мікрооб'єктив (збільшення $\times 4$) проєктує зображення біологічного препарату в площину світлочутливої площадки цифрової камери, яка складається з 1120×960 пікселів.

4. Перед цифровою камерою розміщений багатоканальний поляризатор-аналізатор з шістьма фільтрами:

- 1-й фільтр – лінійно поляризований з азимутом 0° ;
- 2-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом 90° ;
- 3-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом 45° ;
- 4-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом 135° ;
- 5-й фільтр - право (\otimes) циркулярно поляризований;
- 6-й фільтр - ліво (\oplus) циркулярно поляризований.

5. Пропущене кожним парціальним поляризаційним фільтром мікроскопічне зображення біологічного препарату дискретизується сукупністю координатно розподілених пікселів цифрової камери і потрапляє у вигляді двовимірного цифрового масиву в інтерфейс обчислювального пристрою.

6. На цій основі для кожного каналу поляризаційного $(0^0; 90^0; 45^0; \otimes)$ опромінення паралельним лазерним пучком здійснюється обчислення чотирьох параметрів $(St_{i=1;2;3;4})$ вектора Стокса St за відомими співвідношеннями [10,21]

$$St = \begin{pmatrix} St_1^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_0^{0^0;90^0;45^0;\otimes} + R_{90}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_2^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_0^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{90}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_3^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_{45}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{135}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_4^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_{\otimes}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{\oplus}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

7. Координатні розподіли величини парціальних матричних елементів, обчислених у межах сукупності всіх пікселів світлочутливої площадки цифрової камери, формують Мюллер-матричні зображення (ММЗ) оптично анізотропної полікристалічної архітектури біологічних препаратів – дегідратованих плівок крові і померлих з різною давністю COVID-19.

$$\begin{aligned} m_{22} &= 0.5(St_2^0 - St_2^{90}); m_{23} = St_2^{45} - m_{21}; \\ m_{24} &= St_2^{\otimes} - m_{21}; m_{31} = 0.5(St_3^0 + St_3^{90}); \\ m_{32} &= 0.5(St_3^0 - St_3^{90}); m_{33} = St_3^{45} - m_{31}; \\ m_{34} &= St_3^{\otimes} - m_{31}; m_{41} = 0.5(St_4^0 + St_4^{90}); \\ m_{42} &= 0.5(St_4^0 - St_4^{90}); m_{43} = St_4^{45} - m_{41}; \\ & m_{44} = St_4^{\otimes} - m_{41}. \end{aligned} \quad (2)$$

3. МЕТОД СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ

Статистичний підхід базується на обчисленні сукупності центральних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків $Q_{i=1;2;3;4}$, які характеризують середнє $Q_{i=1}$, дисперсію $Q_{i=2}$, асиметрію $Q_{i=3}$ та ексцес $Q_{i=4}$ експериментально визначених координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ОА.

Обчислення центральних статистичних моментів $Q_{i=1;2;3;4}$ здійснювалося у програмному продукті MATLAB з використанням наступних алгоритмів

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} MMIOA_j; \\ Q_2 &= \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (MMIOA^2)_j}; \\ Q_3 &= \frac{1}{Q_2^3} \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (MMIOA^3)_j; \\ Q_4 &= \frac{1}{Q_2^4} \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (MMIOA^4)_j, \end{aligned} \quad (3)$$

де $m \times n$ – кількість пікселів цифрової камери.

Кількісно патологічні і некротичні зміни ієрархії оптично анізотропної архітектури плівок крові померлих, які обумовлені віддаленими наслідками COVID-19, можуть бути оцінені наступними змінами сукупності об'єктивних статистичних маркерів, які характеризують координатні розподіли ММІ ОА.

Середнє Q_1 і дисперсія Q_2 – послідовне зростання (за рахунок збільшення рівня циркулярного двопронезаломлення прозапальних глобулінових білків) величини.

Асиметрія Q_3 і ексцес Q_4 – послідовне зменшення величин, які обернено пропорційні центральним статистичним моментам 1-го і 2-го порядків (співвідношення (1)) із зростанням давності перенесеного COVID-19.

4. АНАЛІЗ І ОБГОВОРЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Наведені результати Мюллер-матричного картографування дегідратованих плівок крові померлих з алгоритмічним відтворенням Мюллер-матричного інваріанта оптичної активності (ММІ АО), співвідношення (1),(2).

Розглянуто чотири групи зразків полікристалічних плівок крові померлих:

- Контрольна група 1 (25 зразків) – померлі від інфаркту міокарда.
- Дослідна група 2 (50 зразків) – давність COVID-19 один рік.
- Дослідна група 3 (50 зразків) – давність COVID-19 два роки.
- Дослідна група 4 (50 зразків) – давність COVID-19 три роки.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

На серії рис. 1 (група 1), рис. 2 (група 2), рис. 3 (група 3) і рис. 4 (група 4) представлені координатні (фрагменти (1)) розподіли випадкових значень величини ММІ ОА та їх 3D (фрагменти (2)) реконструкція.

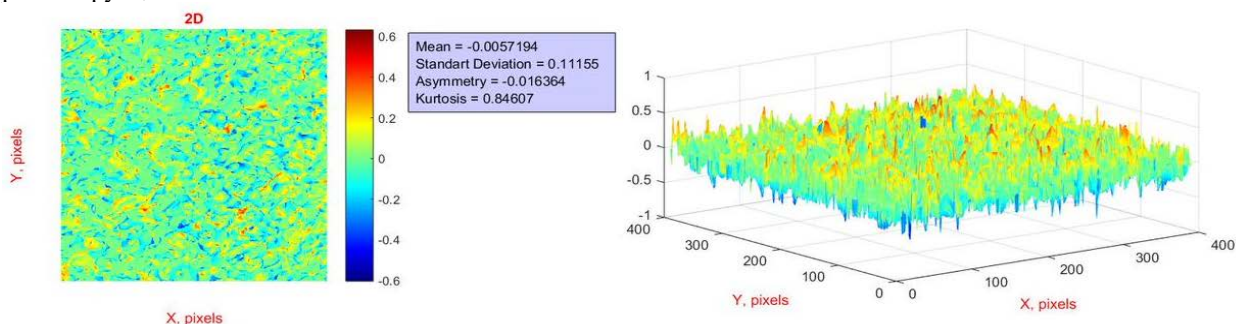


Рис. 1. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення циркулярного двопронезаломлення надмолекулярних мереж полікристалічних плівок крові померлого з контрольної групи 1.

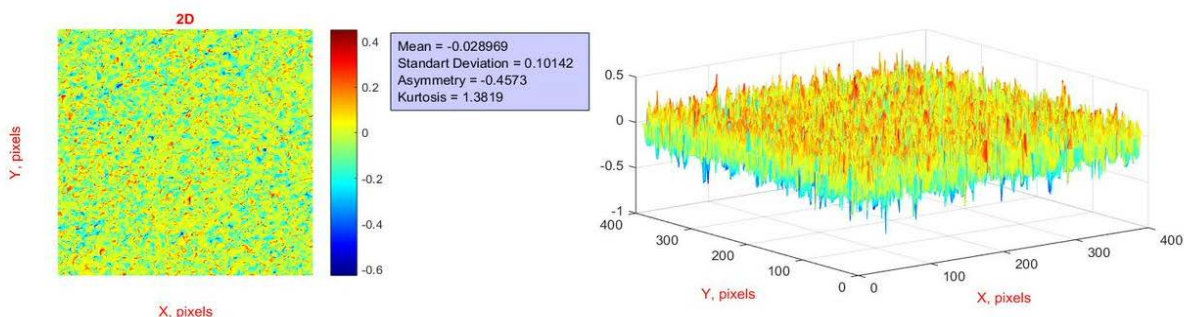


Рис. 2. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення циркулярного двопронезаломлення надмолекулярних мереж полікристалічних плівок крові померлого з давністю COVID-19 один рік – дослідна група 2.

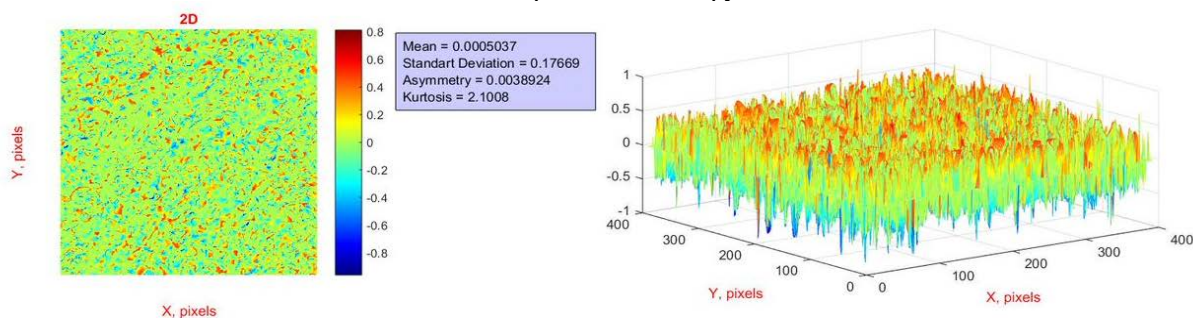


Рис. 3. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення циркулярного двопронезаломлення надмолекулярних мереж полікристалічних плівок крові померлого з давністю COVID-19 два роки – дослідна група 3.

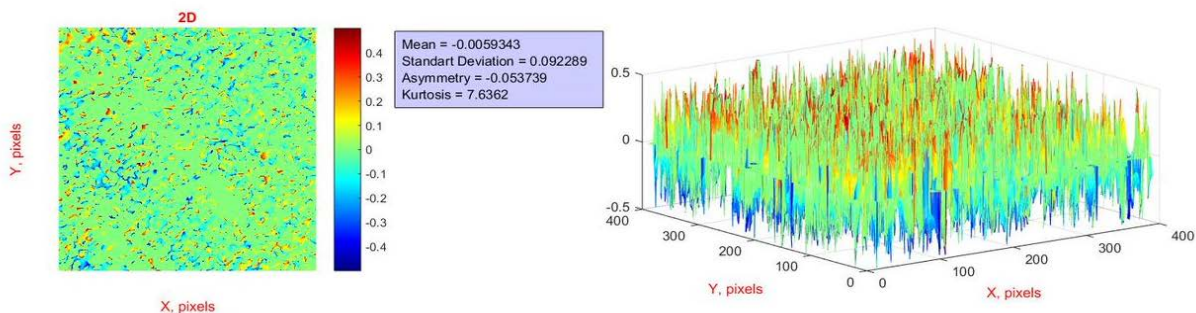


Рис. 4. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення циркулярного двопронезаломлення надмолекулярних мереж полікристалічних плівок крові померлого з давністю COVID-19 три роки – дослідна група 4.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Порівняльний аналіз координатних розподілів ММІ ОА надмолекулярних мереж дегідратованих плівок крові померлих з усіх груп виявив наступні загальні для всіх зразків закономірності.

Перше - всі координатні розподіли мап ММІ ОА сформовані випадковими локальними значеннями.

Друге - мапи ММІ ОА полікристалічної архітектури надмолекулярних мереж є координатно-неоднорідними.

Третє - для кожного типу зразку координатна і статистична структура індивідуальні.

Із збільшенням давності COVID-19 виявлено зростання величини середнього та флуктуацій випадкових значень параметра ММІ ОА, - рис. 1 - рис. 4 (фрагменти (1),(2)).

Виявлені закономірності можна пов'язати із запропонованими модельними уявленнями про патологічні зміни полікристалічної структури надмолекулярних мереж плівок крові померлих з дослідних груп 2 – 4.

ММІ ОА характеризує поляризаційні прояви циркулярного двопронезаломлення оптично активних білків надмолекулярних мереж і формених елементів дегідратованої плівки крові [20].

Ми констатували, що віддалені наслідки COVID-19 поетапно із ростом давності призводять до збільшення концентрації прозапальних білків глобулінів (з третиною та четвертиною структурою), що призводить до зростання циркулярного двопронезаломлення.

У результаті зростають і відповідні випадкові значення і їх флуктуації у координатних розподілах ММІ ОА, які характеризують поляризаційні прояви оптичної активності структурних елементів полікристалічної архітектури дослідних зразків дегідратованих плівок крові.

5. СТАТИСТИЧНІ МАРКЕРИ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВІДДАЛЕНИХ НАСЛІДКІВ COVID-19

Кількісно виявлені сценарії патологічної трансформації поляризаційних проявів оптичної активності надмолекулярних мереж плівок крові у рамках статистичного аналізу мап ММІ ОА ілюструють дані, які приведені у таблиці 1 і таблиці 2.

Таблиця 1 – Центральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків, які характеризують Мюллер-матричні зображення оптичної активності надмолекулярних мереж плівок крові померлих

Зразок	Фація крові			
	Група 1 (не хворіли на COVID-19)	Група 2 (COVID-19 – 1 рік)	Група 3 (COVID-19 – 2 роки)	Група 4 (COVID-19 – 3 роки)
Середнє, Q_1	0,34±0,015	0,41±0,019	0,49±0,022	0,56±0,026
p_{ik}	$p_1 < 0,001(t =); p_{2;3} < 0,05(t =); p_{2;4} < 0,05(t); p_{3;4} < 0,05(t =)$			
Дисперсія, Q_2	0,13±0,006	0,16±0,007	0,21±0,011	0,25±0,012
p_{ik}	$p_1 < 0,001(t =); p_{2;3} < 0,05(t =); p_{2;4} < 0,05(t); p_{3;4} < 0,05(t =)$			
Асиметрія, Q_3	0,64±0,031	0,52±0,024	0,44±0,021	0,38±0,017
p_{ik}	$p_1 < 0,001(t =); p_{2;3} < 0,001(t =); p_{2;4} < 0,001(t); p_{3;4} < 0,001(t =)$			
Ексцес, Q_4	0,81±0,039	0,69±0,033	0,58±0,027	0,47±0,022
p_{ik}	$p_1 < 0,001(t =); p_{2;3} < 0,001(t =); p_{2;4} < 0,001(t); p_{3;4} < 0,001(t =)$			

Аналіз діапазонів зміни величини центральних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків виявив найбільш чутливі до віддалених наслідків COVID-19 цифрові маркери:

- асиметрія Q_3 з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($< 0,001$) – прогнозоване зменшення (розділ 2, параграф 2.11.1) від 0,64 до 0,38;
- ексцес Q_4 з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($< 0,001$) – прогнозоване зменшення (розділ 2, параграф 2.11.1) від 0,81 до 0,47.

Діагностичну ефективність методу Мюллер-матричного картографування поляризаційних проявів циркулярного двопронезаломлення характеризують операційні характеристики, які представлені у таблиці 2.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 2 - Збалансована точність статистичних маркерів диференціальної діагностики віддалених наслідків COVID-19 методом Мюллер-матричної мікроскопії оптичної активності надмолекулярних мереж плівок крові померлих

Зразок	Фація крові		
Групи	“1.1 – 1.2+1.4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Середнє, Q_1	$a = 14 ; b = 11 ;$	$c = 38 ; d = 12 ;$	69
Дисперсія, Q_2	$a = 17 ; b = 8 ;$	$c = 40 ; d = 10 ;$	76
Асиметрія, Q_3	$a = 23 ; b = 2 ;$	$c = 45 ; d = 5 ;$	91
Ексцес, Q_4	$a = 24 ; b = 1 ;$	$c = 44 ; d = 6 ;$	91
Групи	“1.2 – 1.4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Середнє, Q_1	$a = 33 ; b = 17 ;$	$c = 31 ; d = 19 ;$	64
Дисперсія, Q_2	$a = 40 ; b = 10 ;$	$c = 30 ; d = 20 ;$	70
Асиметрія, Q_3	$a = 43 ; b = 7 ;$	$c = 42 ; d = 8 ;$	85
Ексцес, Q_4	$a = 45 ; b = 5 ;$	$c = 42 ; d = 8 ;$	87
Групи	“1.2 – 1.3”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Середнє, Q_1	$a = 38 ; b = 12 ;$	$c = 34 ; d = 16 ;$	62
Дисперсія, Q_2	$a = 40 ; b = 10 ;$	$c = 36 ; d = 14 ;$	67
Асиметрія, Q_3	$a = 43 ; b = 7 ;$	$c = 41 ; d = 9 ;$	84
Ексцес, Q_4	$a = 44 ; b = 6 ;$	$c = 41 ; d = 9 ;$	85
Групи	“1.3 – 1.4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Середнє, Q_1	$a = 32 ; b = 18 ;$	$c = 29 ; d = 21 ;$	61
Дисперсія, Q_2	$a = 34 ; b = 16 ;$	$c = 31 ; d = 19 ;$	65
Асиметрія, Q_3	$a = 42 ; b = 8 ;$	$c = 39 ; d = 11 ;$	81
Ексцес, Q_4	$a = 44 ; b = 6 ;$	$c = 39 ; d = 11 ;$	83

Результати інформаційного аналізу з використанням статистичних маркерів $Q_3; Q_4$ методу азимутально-інваріантного картографування мап ММІ ОА дегідратованих плівок крові померлих продемонстрували наступні рівні діагностичної ефективності диференціації віддалених наслідків COVID-19:

- Діагностика (“контрольна група 1.1 – дослідні групи 1.2, 1.3, 1.4”) – $Ac = 91\%$
 - Диференціація (один рік – три роки) – $Ac = 85\% \div 87\%$;
 - Диференціація (один рік – два роки) – $Ac = 85\%$;
- Диференціація (два роки – три роки) – $Ac = 82\% \div 83\%$.

6. ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

З метою покращення чутливості і точності диференціальної діагностики віддалених наслідків COVID-19 будуть проведені дослідження кореляційних і масштабно-самоподібних (фрактальних) характеристик ММІ ОА полікристалічних плівок крові померлих.

Другим напрямком буде апробація наведеного методу Мюллер-матричного картографування для нативних гістологічних зрізів фібрилярного міокарда і паренхіматозної нирки померлих.

ВИСНОВКИ

1. Експериментально апробовано метод азимутально-інваріантного Мюллер-матричної мікроскопії з алгоритмічним відтворенням Мюллер-матричного інваріанту оптичної активності полікристалічної архітекtonіки експериментальних зразків дегідратованих плівок крові померлих з різною давністю COVID-19.

2. В рамках статистичного аналізу координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ОА визначено сукупність цифрових маркерів (центральні статистичні моменти 3-го і 4-го порядків) диференціальної діагностики патологічних змін циркулярного двопронезаломлення дегідратованих плівок крові померлих та встановлено величини збалансованої точності міжгрупової диференціальної діагностики віддалених наслідків COVID-19.

ПОДЯКИ

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Angelsky, O.V., Ushenko, A.G., Zenkova, C.Y., Felde, C.V., et al. Optical measurements: polarization and coherence of light fields. IntechOpen, 2012.
2. Pishak, V.P., Ushenko, A.G., Gryhoryshyn, P., et al. Polarization structure of biospeckle fields in crosslinked tissues of a human organism: 1. Vector structure of skin biospeckles. Proc. SPIE 3317 (1997) 418–424.
3. Angelsky, O.V., Ushenko, A.G., Pishak, V.P., et al. Coherent introscopy of phase-inhomogeneous surfaces and layers. Proc. SPIE 4016 (1999) 413–418.
4. Angelsky, P.O., Ushenko, A.G., Dubolazov, A.V., et al. The singular approach for processing polarization-inhomogeneous laser images of blood plasma layers. J. Opt. 15 (4) (2013) 044030.
5. Ushenko, A.G., Dubolazov, A.V., Ushenko, V.A., Novakovskaya, O.Y. Statistical analysis of polarization-inhomogeneous Fourier spectra of laser radiation scattered by human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations. J. Biomed. Opt. 21 (7) (2016) 071110.
6. Yermolenko, S., Ushenko, A., Ivashko, P., et al. Spectropolarimetry of cancer change of biotissues. Proc. SPIE 7388 (2009) 404–410.
7. Olar, E.I., Ushenko, A.G., Ushenko, Y.A. Correlation microstructure of the Jones matrices for multifractal networks of biotissues. Laser Phys. 14 (7) (2004) 1012–1018.
8. Ushenko, A., Sdobnov, A., Dubolazov, A., Grytsiuk, M., Ushenko, Y., et al. Stokes-correlometry analysis of biological tissues with polycrystalline structure. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 25 (1) (2018) 1–12.
9. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L., Bakun, O., Garazdyuk, M., Soltys, I.V., Dubolazov, O., Ushenko, O.G., Ushenko, Y.A., Bykov, A., Meglinski, I. Mueller-matrix imaging polarimetry elevated by wavelet decomposition and polarization-singular processing for analysis of specific cancerous tissue pathology. J. Biomed. Opt. 28 (10) (2023) 102903.
10. Ushenko, Y.A., Uhryn, D.I., Lytvyn, V., Vasyuk, V.L., Protsyuk, V.V., Soltys, I.V. Differential diagnosis of the aseptic and septic loosening of the artificial hip joint endoprosthesis by methods of spectral-selective laser autofluorescence microscopy. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 85–100.
11. Ushenko, Y.A., Gorsky, M.P., Dubolazov, A.V., Ushenko, A.G., Zheng, J. Materials and optical-physical and fluorescent research methods. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 9–23.
12. Hu, Z., Bachinsky, V.T., Vanchulyak, O.Y., Soltys, I.V., Ushenko, Y.A., Ushenko, A.G., Meglinski, I. Computer modeling of the evolution of statistical parameters of the phase distributions of the laser radiation field converted by optically anisotropic layers. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 27–51.
13. Trifonyuk, L., Soltys, I.V., Ushenko, A.G., Ushenko, Y.A., Dubolazov, A.V., Zheng, J. Methods and systems of polarization Mueller-matrix microscopy of biological samples. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 13–24.
14. Hu, Z., Bachinsky, V.T., Vanchulyak, O.Y., Soltys, I.V., Ushenko, Y.A., Ushenko, A.G., Meglinski, I. Spectral phase measurement of laser images of sections of biological tissues of a human corpse for death time detection. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 53–70.
15. Ushenko, Y.A., Bachinsky, V.T., Bezhenar, I.L., Vanchulyak, O.Y., Litvinenko, O.Y., Soltys, I.V., Salega, O., Ushenko, A.G., Shylan, K.V. Determination of the lifetime and post-mortal nature and temporal dynamics of the formation of skin abrasions. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 27–42.
16. Hu, Z., Ushenko, Y.A., Litvinenko, O.Y., Gorsky, M.P., Vanchulyak, O.Y., Mikirin, I., Ushenko, A.G., Meglinski, I. Materials and methods of research in laser polarimetry data processing of biological tissues for forensic determining the age of injury. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 9–26.
17. Hu, Z., Bachinsky, V.T., Vanchulyak, O.Y., Soltys, I.V., Ushenko, Y.A., Ushenko, A.G., Meglinski, I. Novel diagnosis capabilities and prospects for determining post-mortem changes in biological tissues and the time of hematoma formation in forensic medicine. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 1–10.
18. Ushenko, Y.A., Hu, Z., Soltys, I.V., Dubolazov, O.V., Olar, O.V., Gordey, I., Ushenko, A.G., Garazdyuk, M.S., Pavlyukovych, O., Pavlyukovych, N. Study of two-dimensional polarization maps of

- the skin for differentiation of lifetime and post-mortal nature and temporal dynamics of abrasions. SpringerBriefs Appl. Sci. Technol. (2023) 43–75.
19. Ushenko, V.A., Hogan, B.T., Dubolazov, A., et al. Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures. Sci. Rep. 11 (1) (2021) 3871.
 20. Ushenko, A., Zheng, J., Gorsky, M., Dubolazov, A., Ushenko, Y., Soltys, I., Mikirin, I., Chen, Z., Wanchuliak, O., Gordey, I., Jingxian, C. 3D digital holographic polarimetry of diffuse optically anisotropic biological tissue object fields. Front. Phys. 11 (2023) 1288935.
 21. Ushenko, A.G., Sdobnov, A., Soltys, I.V., Ushenko, Y.A., Dubolazov, A.V., Sklyarchuk, V.M., Olar, A.V., Trifonyuk, L., Doronin, A., Yan, W., Bykov, A., Meglinski, I. Insights into polycrystalline microstructure of blood films with 3D Mueller matrix imaging approach. Sci. Rep. 14 (1) (2024) 13679.
 22. Ushenko, A., Zheng, J., Litvinenko, A., Gorsky, M., Wanchuliak, O., Dubolazov, A., Ushenko, Y., Soltys, I., Salega, O., Chen, Z. 3D digital polarization-holographic wavelet histology in determining the duration of mechanical damage to the myocardium. J. Biophotonics 17 (3) (2024) e202300372.
 23. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L., Dubolazov, O.V., Ushenko, Y.A., Ushenko, A.G., Soltys, I.V., Gantyuk, V.K., Bykov, A., Meglinski, I. Polarization-based optical interference approach for differential diagnosis of benign and malignant tumours. Opt. Laser. Eng. 171 (2023) 107806.

Дата надходження: 17.02.2026

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/)*

БАЧИНСЬКИЙ ВІКТОР ТЕОДОСОВИЧ – доктор медичних наук, професор, завідувач кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна, *e-mail:* bachynskiy.viktor@bsmu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6955-7507>

СКЛЯРЧУК ОЛЕНА ФЕДОРІВНА – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, *e-mail:* o.sklyarchuk@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0009-3252-3862>

ГАВРИЛЯК МИХАЙЛО СТЕПАНОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, *e-mail:* m.gavrylyak@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0005-1301-5150>

КОЖОКАР МАРИНА ВАСИЛІВНА – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри фізичного виховання Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна, *e-mail:* m.kozhokar@chnu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-1658-3549>

Viktor BACHYNSKYI, Olena SKLYARCHUK, Mykhailo GAVRYLIAK, Maryna KOZHOKAR

DIGITAL MULTIPARAMETER MUELLER-MATRIX MICROSCOPY OF CEDENT BLOOD FILM AND DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF LONG-TERM CONSEQUENCES OF COVID-19

Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University