

## ЗАСТОСУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ДВОШАРОВИХ БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ОДНОГО З ПАРЦІАЛЬНИХ ШАРІВ

Заболотна Н.І., Павлов С.В., Івасюк І.Д.

Вінницький національний технічний університет  
Україна, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
тел.: +38(0432)598-337, e-mail: Natalia.Zabolotna@gmail.com

*Експериментально підтверджена можливість застосування поляризаційного картографування двошарових біологічних тканин для діагностики структури одного із шарів, який екранується шаром іншої тканини. Дослідження проведено за допомогою системи лазерної двовимірної поляриметрії, яка вимірює двовимірні мапи азимутів поляризації лазерних зображень зрізів біологічних тканин. Для аналізу розподілів їх значень використовуються набори статистичних, кореляційних та спектральних моментів. Виявлено критерії диференціації оптичних властивостей двошарових біологічних тканин, зокрема м'язової тканини міокарда, що екранується шаром дерми шкіри, та тканин шийки матки, що закриті шаром сполучної тканини.*

**Ключові слова:** двошарова біологічна тканина, поляризаційне картографування, мапа азимутів поляризації, лазерне зображення; статистичні, кореляційні, фрактальні параметри.

### Вступ

Використання сучасних технік оптичної когерентної томографії у діагностиці фізіологічного стану тканин людини об'єктивно пов'язане із аналізом структури поляризаційно-неоднорідних зображень. Це стимулює розробку метрологічних засобів і аналітичних методів обробки двовимірної поляриметричної інформації [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. У циклі робіт [4, 5, 6, 7] наведені основи методу лазерної поляриметрії, що спрямований на комплексний статистичний, кореляційний і фрактальний аналіз двовимірних розподілів азимутів і еліптичності поляризації оптично тонких шарів різних типів біологічних тканин.

Проте, залишається відкритим запитання стосовно діагностичних можливостей поляризаційного картографування більш загального типу біологічних об'єктів – органів людини, які являють собою багатошарові структури, сформовані основними типами біологічних тканин – сполучної, м'язової та епітеліальної. У роботі [1] викладені аналітичні основи поляризаційного картографування багатошарових двопротозаломлюючих полікристалічних мереж із проведенням аналітичного комп'ютерного моделювання багатошарового об'єкта та аналізу координатних розподілів азимутів і еліптичностей поляризації його

парціальних шарів; встановлені статистичні, кореляційні і фрактальні критерії поляриметричної диференціації оптичних властивостей розглянутої моделі багатошарової структури. Але ця теорія потребує підтвердження у дослідках.

**Метою роботи** є експериментальне дослідження можливостей застосування системи прямого поляриметрування розподілів азимутів поляризації лазерних зображень двошарових біологічних тканин для діагностики виникнення патологічних змін у внутрішньому парціальному шарі, який екранується зовнішнім шаром іншої тканини.

### Матеріали та методи

В якості об'єктів експериментального дослідження використовувалися оптично-тонкі (коефіцієнт ослаблення  $\tau=0,1$ ) парціальні шари (гістологічні зрізи) м'язової тканини, дерми шкіри і сполучної тканини; геометрична товщина кожного шару становила 30 мкм. За їх комбінацією досліджувались два типи структури двошарових біологічних тканин:

- парціальний шар здорової (рис. 1, а) і дистрофічно зміненої (рис. 1, б) м'язової тканини міокарду, що екранується шаром дерми шкіри;
- парціальний шар здорової (рис. 1, в) і патологічно зміненої (злоякісна пухлина, рис. 1, г)

м'язової тканини шийки матки, закритий шаром сполучної тканини.

Основними «оптичними» сценаріями патологічних змін структури сіток зазначених біологічних тканин можуть бути:

- «орієнтаційний» – розупорядкування напрямів оптичних осей сітки міозинових кристалів у шарі дистрофічно зміненої м'язової тканини;

- «фазовий» – зростання двопронезаломлення речовини новоутворених (патологічних) протеїнових колагенових структур за рахунок збільшення концентрації оптико - анізотропних амінокислот.

Експериментальні дослідження проведено за допомогою багатифункціональної системи лазерної двовимірної поляриметрії, зображеної і детально описаної в попередніх роботах [2, 3], згідно такої методики.

Значення азимута  $\alpha_{jk}$  поляризації у точці з координатами  $(jk)$  лазерного зображення двоша-

новання, виміряних для різних кутів повороту  $(0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ)$  площини пропускання поляризатора-аналізатора.

Визначивши локальне значення азимута поляризації у кожній точці лазерного зображення двошарової біологічної тканини, одержуємо поляризаційну мапу азимутів  $\alpha(m \times n)$  її полікристалічної сітки, яку аналізуємо в межах статистичного, кореляційного і фрактального підходів.

Так, для кількісної оцінки розподілів значень мапи азимутів  $\alpha(X, Y)$  пропонується визначення набору їх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків [2, 3]:

$$M_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\alpha_j); M_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\alpha_j^2)};$$

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

де  $N = m * n$  – кількість пікселів зображення.

Для кількісної характеристики автокореляційних залежностей  $K_\alpha(\Delta x)$  пропонується визначення кореляційних моментів, які характеризують півширину і ступінь «гостроти» функції автокореляції [2, 3]:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (K_{\alpha;\beta}^2(\Delta x))_j};$$

$$Q_4 = \frac{1}{Q_2^2} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (K_{\alpha;\beta}^4(\Delta x))_j.$$

Фрактальний аналіз розподілів станів поляризації  $\alpha(X, Y)$  зображень багатошарових двопронезаломлюючих сіток полягає у такій послідовності дій [2, 3]:

- розраховувалися автокореляційні функції і знаходилися відповідні спектри потужності  $PSD(\alpha)$  розподілів  $\alpha(X, Y)$  за формулою

$$PSD(K(\Delta X)) = \int_{-\infty}^{+\infty} K(\Delta X) \cos 2\pi\theta d\theta,$$

де  $\theta$  – просторові частоти, які визначаються оберненими геометричними розмірами  $d^{-1}$  структурних елементів біологічного шару;

- обчислювалися log-log залежності спектрів потужності  $\log PSD(\alpha) - \log(v)$  розподілів випадкових величин  $\alpha(X, Y)$ ;

Для кількісної оцінки розподілів логарифмічних залежностей  $\log PSD(\alpha) - \log(v)$  введена їх

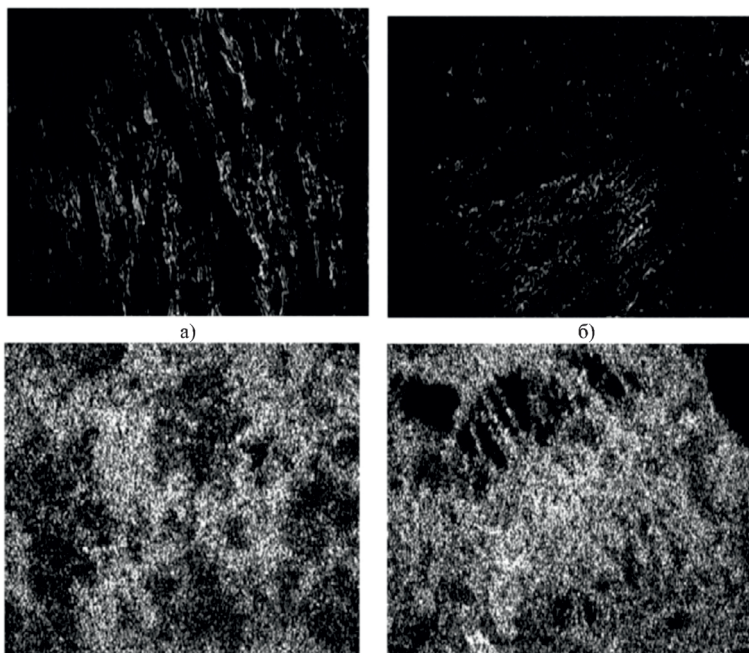


Рис. 1. Поляризаційно візуалізовані зображення парціального шару м'язової тканини: здорової (а) і дистрофічної (б) м'язової тканини міокарду у двошаровій структурі з дермою шкіри; здорової (в) та патологічно зміненої (г) м'язової тканини шийки матки у двошаровій структурі зі сполучною тканиною

рової структури визначалося за відомим алгоритмом [2, 3]:

$$\alpha_{jk} = 0,5 \arctg \left[ \frac{I_{jk}(45^\circ) - I_{jk}(-45^\circ)}{I_{jk}(0^\circ) - I_{jk}(90^\circ)} \right].$$

Тут  $I_{jk}(0^\circ, 90^\circ, +45^\circ, -45^\circ)$  - інтенсивності плоскополяризованих складових лазерного випромі-

статистична оцінка на основі визначення набору їх статистичних (в подальшому спектральних  $J_{k=1;2;3;4}$ ) моментів згідно співвідношень (1).

### Результати та їх обговорення

В табл. 1 приведені порівняльні значення сукупності статистичних моментів 1-го – 4-го порядків  $M_{i=1;2;3;4}$ , кореляційних моментів  $Q_{i=2;3;4}$  і спектральних моментів  $J_{i=1;2;3;4}$ , які характеризують координатні розподіли станів поляризації  $\alpha(X,Y)$  лазерних зображень здорової та дистрофічно зміненої двошарової оптично-тонкої (коефіцієнт ослаблення  $\tau = 0,1$ ) структури «м'язова тканина міокарду – дерма шкіри».

За результатами, наведеними в табл. 1, встановлено, що найбільш діагностично чутливими є 3-й і 4-й статистичні моменти розподілів азимутів, адже відмінності між відповідними значеннями «норми» і «патології» лежать у межах 2-3 разів. Діагностично чутливим є 4-й кореляційний момент  $Q_4$  - для патологічного стану його величина зростає до 2 разів. Кількісні зміни самоподібної структури координатних розподілів станів поляризації оптично-тонкої двошарової біологічної тканини «м'язова тканина міокарду – дерма шкіри» супроводжуються практично двократним зростанням дисперсії  $J_2$  розподілу значень логарифмічної залежності спектру потужності поляризаційної мапи азимутів.

В таблиці 2 приведені порівняльні значення сукупності статистичних моментів 1-го – 4-го порядків  $M_{i=1;2;3;4}$ , кореляційних моментів  $Q_{i=2;3;4}$  і спектральних моментів  $J_{i=1;2;3;4}$ , які характе-

ризують координатні розподіли азимутів поляризації  $\alpha(X,Y)$  лазерних зображень здорової та онкологічно зміненої двошарової оптично-тонкої тканини «м'язова тканина шийки матки - сполучна тканина».

Порівняльний аналіз одержаних даних виявив наступне: асиметрія онкологічно зміненої тканини шийки матки ( $M^{(3)}$ ) координатних розподілів азимутів поляризації  $\alpha(X,Y)$  зростає в 1,95-2,4 рази, а ексцес ( $M^{(4)}$ ) - у 1,7–2,7 рази. Діагностично чутливими до змін кореляційної узгодженості та ступеня самоподібності поляризаційних мап тканин шийки матки виявилися 4-й кореляційний момент  $Q_3$  - для патологічного стану його величина зростає до 3 разів, а також 2-й спектральний момент  $J_2$ , який збільшується у 1,5–1,65 разів.

### Висновки

На основі запропонованої нами моделі багатошарових полікристалічних мереж протеїнових кристалів та використання принципу суперпозиції поляризаційних властивостей експериментально (на прикладі комбінації гістологічних зрізів реальних біологічних тканин – дерми шкіри та м'язової тканини, тканини шийки матки та сполучної тканини) продемонстрована можливість діагностики орієнтаційно-фазової побудови оптико-анізотропної сітки одного з парціальних шарів. Методика експериментальної двовимірної поляризаційної томографії узагальнена на випадок діагностики шарів біологічних тканин різної морфологічної побудови, що маскуються (екрануються) зовнішніми шарами.

Таблиця 1

**Статистичні, кореляційні і спектральні моменти розподілів азимутів поляризаційних мап здорової та патологічно зміненої оптично-тонкої двошарової тканини «м'язова тканина міокарду – дерма шкіри»**

Параметри	Норма $\alpha$	Патологія $\alpha^*$
$M_1$	0,76	0,69
$M_2$	0,19	0,21
$M_3$	0,11	0,31
$M_4$	0,15	0,45
$Q_2$	0,25	0,23
$Q_3$	0,04	0,06
$Q_4$	0,32	0,59
$J_1$	0,63	0,69
$J_2$	0,22	0,41
$J_3$	0,07	0,09
$J_4$	0,09	0,11

Таблиця 2

**Статистичні, кореляційні і спектральні моменти розподілів азимутів поляризаційних мап здорової та патологічно зміненої оптично-тонкої тканини «м'язова тканина шийки матки - сполучна тканина»**

Параметри	Норма $\alpha$	Патологія $\alpha^*$
$M_1$	0,72	0,77
$M_2$	0,15	0,19
$M_3$	0,57	1,39
$M_4$	0,71	1,87
$Q_2$	0,24	0,21
$Q_3$	0,07	0,09
$Q_4$	0,18	0,55
$J_1$	0,63	0,69
$J_2$	0,28	0,44
$J_3$	0,11	0,13
$J_4$	0,23	0,28

На основі комплексного статистичного, кореляційного і фрактального підходу до аналізу поляризаційно-неоднорідних зображень багат шарових біологічних тканин виявлено взаємозв'язки між тенденціями зміни величин набору статистичних, кореляційних і фрактальних параметрів, які характеризують розподіли азимутів поляризації, і особливостями побудови двоприменезаломлюючих сіток.

Виявлено статистичні критерії поляриметричної диференціації оптичних властивостей багато-

шарових структурованих і неструктурованих біологічних тканин.

Таким чином, можна констатувати, що методи прямого поляриметричного оптично-тонких двошарових біологічних тканин або тканин організму людини різної морфологічної будови і фізіологічного стану можуть бути використані для диференціації здорового і патологічного (на клінічно діагностованому етапі змін) станів.

## Література

1. Заболотна Н.І. Аналітичні основи поляризаційного картографування багат шарових двоприменезаломлюючих полікристалічних мереж // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2011.- №2.- С.110-117.
2. Заболотна Н.І. Аналіз розподілів азимутів та еліптичностей поляризації лазерних зображень плазми крові для діагностики патологічних змін молочних залоз / Н.І.Заболотна, О.П.Мінцер, С.В.Павлов та ін. // Фотобіологія та фотомедицина.- 2011.- №1.- С.118-123.
3. Заболотна Н.І. Принципи і методи поляризаційного картографування біологічних тканин / Н.І.Заболотна, Б.П.Олійниченко // Фотобіологія та фотомедицина.- 2010.- №3-4.- С.84-90.
4. Ушенко О.Г. Лазерна поляризаційна морфологія біологічних тканин: статистичний і фрактальний підходи / О.Г.Ушенко, В.П.Пішак, О.В.Ангельський, Ю.О.Ушенко.- Чернівці: Колір-Друк, 2007.- 341 с.
5. Ушенко О.Г. Поляризаційна корелометрія біологічних тканин людини /О.Г.Ушенко, В.П.Пішак, О.П.Пересунько, Ю.О.Ушенко.- Чернівці: Рута, 2007.- 696 с.
6. Ушенко О.Г. Основи лазерної поляриметрії / О.Г.Ушенко, Ю.О.Ушенко, Ю.Я.Томка та ін.; під ред.
- О.Г.Ушенка.- Чернівці: Чернівецький нац. університет, 2010.- 588 с.
7. Angelsky O.V. Statistical, correlation, and topological approaches in diagnostics of the structure and physiological state of birefringent biological tissues / O.V.Angelsky, A.G.Ushenko, Yu.A.Ushenko et al. // Handbook of Photonics for Biomedical Science; ed. V.V.Tuchin.- USA: CRC Press, 2010.- P.21-67.
8. de Boer J.F. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector determination / J.F. de Boer, T.E.Milner // J. Biomed. Opt.- 2002.- Vol.7.- P.359-371.
9. Jiao Sh.L. Fiber-based polarization-sensitive Mueller matrix optical coherence tomography with continuous source polarization modulation / Sh.L.Jiao, M.Todorovic, G.Stoica, L.V.Wang // Appl. Optics.- 2005.- Vol.44.- P.5463-5467.
10. Pierce M.C. Birefringence measurements in human skin using polarization-sensitive optical coherence tomography / M.C.Pierce, J.Strasswimmer, B.H.Park et al. // J. Biomed. Opt.- 2004.- Vol.9.- P.287-291.

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ДВУХСЛОЙНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОДНОГО ИЗ ПАРЦИАЛЬНЫХ СЛОЕВ**

*Заболотная Н.И., Павлов С.В., Ивасюк И.Д.*

*Винницкий национальный технический университет*

*Экспериментально подтверждена возможность применения поляризационного картографирования двухслойных биологических тканей для диагностики структуры одного из слоев, который экранируется слоем другой ткани. Исследование проведено с помощью системы лазерной двумерной поляриметрии, которая измеряет двумерные карты азимутов поляризации лазерных изображений срезов биологических тканей. Для анализа распределений их значений используются наборы статистических, корреляционных и спектральных моментов. Выявлены критерии дифференциации оптических свойств двухслойных биологических тканей, в частности мышечной ткани миокарда, которая экранируется слоем дермы кожи, и тканей шейки матки, закрытых слоем соединительной ткани.*

**Ключевые слова:** *двухслойная биологическая ткань, поляризационное картографирование, карта азимутов поляризации, лазерное изображение; статистические, корреляционные, фрактальные параметры.*



***APPLICATION OF POLARIZATION MAPPING OF DOUBLE-LAYER BIOLOGICAL OBJECTS  
FOR DIAGNOSIS ONE OF PARTIAL LAYERS***

*Zabolotna N.I., Pavlov S.V., Ivasyuk I.D.*

*Vinnytsia National Technical University*

*The possibility of using the polarization mapping of the two-layer biological tissue for diagnosing structure of one of the layers which is shaded by the layer of the other tissue are experimentally proved. The research had been made by the system of laser two-dimensional polarimetry, which measures the two-dimensional maps of the polarization azimuths of laser images of biological tissues sections. The sets of statistical, correlation and spectral moments are used for the distribution analysis of their values. The results of the analysis determined the criteria for the differentiation of optical peculiarities of the two-layer biological tissue, myocardium muscular tissue in particular, which is shaded by the layer of the inner skin and the uterine cervix tissue.*

**Keywords:** *two-layer biological tissue, polarization mapping, maps of the polarization azimuths, laser image, statistic, correlation, fractal parameter.*