

УДК 615.47:616-074, 61:007

О.В. Дуболазов¹, Б.П. Олійниченко²

КОРЕЛЯЦІЙНО-ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-НЕОДНОРІДНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ПЛАЗМИ КРОВІ ПРИ ПАТОЛОГІЇ МОЛОЧНОЇ ЗАЛОЗИ

¹Чернівецький національний університет ім. Ю.Федьковича,²НВП ТОВ «Медвін», м. Вінниця

Резюме. Виявлено тенденційні зміни кореляційних та фрактальних параметрів двовимірних розподілів азимутів і еліптичностей поляризації змодельованого лазерного зображення плазми крові людини. Оцінювання здійснено за умов припущення, що малий та підвищений рівень значення показника двопронезаломлення відповідають станам плазми крові «здорової людини» та «з патологією молочних залоз».

Ключові слова: показник двопронезаломлення, азимут поляризації, еліптичність поляризації, кореляційний аналіз, фрактальний аналіз.

Вступ. В основу методів лазерної поляриметрії [1-3] покладено наступні модельні уявлення про анізотропію протеїнових мереж біологічних тканин:

- біологічна тканина розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури;
- кристалічна компонента сформована сукупністю (мережею) протеїнів, які володіють властивостями оптично одноосних двопронезаломлюючих кристалів.

Мета дослідження. Дана робота спрямована на комп'ютерне моделювання процесів формування поляризаційних зображень полікристалічних мереж і виявлення можливостей кореляційної і фрактальної діагностики зміни їх двопронезаломлення.

Матеріал і методи. Найбільш повно поляризаційні властивості оптично одноосного двопронезаломлюючого кристала характеризуються матричним оператором Мюллера наступного вигляду [4-6]:

$$\{Z\}_j = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ 0 & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ 0 & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де

$$z_{ik}(\rho, \delta) = \begin{cases} z_{22} = \cos^2 2\rho + \sin^2 2\rho \cos \delta; \\ z_{23;32} = \cos 2\rho \sin 2\rho (1 - \cos \delta); \\ z_{33} = \sin^2 2\rho + \cos^2 2\rho \cos \delta; \\ z_{34;43} = \pm \cos 2\rho \sin \delta; \\ z_{24;42} = \pm \sin 2\rho \sin \delta; \\ z_{44} = \cos \delta. \end{cases} \quad (2)$$

Тут ρ – напрямку оптичної осі кристала амінокислоти; $\delta = 2\pi/\lambda \Delta nd$ – фазовий зсув, який вноситься між ортогональними складовими амплітуди лазерної хвилі довжиною λ , що проходить крізь білок із розміром d та показником двопронезаломлення Δn .

Класичне визначення матриці Мюллера $\{Z\}$ полягає в тому, що такий математичний оператор

визначає процеси трансформації вектора Стокса оптико-анізотропними біологічними шарами [3, 7]:

$$S^* = \{Z\} S_0, \quad (3)$$

Тут S_0, S^* – вектора Стокса опромінюючого і об'єктного пучків.

З урахуванням (3) можна записати вектор Стокса S^* у розгорнутому вигляді:

$$S^* = \begin{pmatrix} 1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ z_{22}S_2^0 + z_{23}S_3^0 + z_{24}S_4^0 \\ z_{32}S_2^0 + z_{33}S_3^0 + z_{34}S_4^0 \\ z_{42}S_2^0 + z_{43}S_3^0 + z_{44}S_4^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \cos 2\beta \\ \sin 2\alpha \cos 2\beta \\ \sin 2\beta \end{pmatrix} \quad (4)$$

На основі (4) одержимо вирази для визначення азимута α і еліптичності β поляризації об'єктної електромагнітної хвилі:

$$\alpha = 0,5 \arctg \left(\frac{S_3}{S_2} \right) \equiv u[z_{ik}(\rho, \delta)]; \quad (5)$$

$$\beta = 0,5 \arcsin(S_4) \equiv p[z_{ik}(\rho, \delta)]. \quad (6)$$

З аналізу співвідношень (5) і (6) випливає, що стан поляризації (α, β) перетвореного лазерного випромінювання визначається відповідними локальними орієнтаційно-фазовими (ρ, δ) параметрами полікристалічної сітки протеїнів біологічної тканини.

В основу комп'ютерного моделювання процесів формування поляризаційно-неоднорідних зображень оптико-анізотропних мереж біологічних кристалів покладено такі положення:

- Кристалічна сітка представлялася у вигляді впорядкованих за напрямками оптичних осей двопронезаломлюючих циліндрів (кількість $N=100$, діаметр $\otimes = 50 \mu m$, показник двопронезаломлення $\Delta n = 1,5 \times 10^{-3}$ (рис. 1).
- Процес формування поляризаційно-неоднорідних зображень полікристалічної мережі за умов багаторазового розсіяння моделювався за допомогою подвійного дифракційно-го інтеграла Релея-Зомерфельда [3].

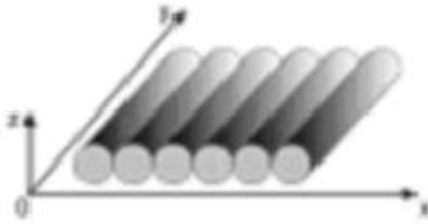


Рис. 1. Просторово впорядкована сітка циліндричних кристалів

- Розглядалися два типи полікристалічних мереж із різним показником двоприменезаломлення $\Delta n = 1,5 \times 10^{-3}$ – група 1; $\Delta n^* = 1,5 \times 10^{-2}$ – група 2.
- Припускаємо, що малий рівень ($\Delta n = 1,5 \times 10^{-3}$) двоприменезаломлення відповідає моделі мережі кристалів плазми крові здорової людини, підвищеному рівню ($\Delta n^* = 1,5 \times 10^{-2}$) відповідає стан патологічних змін у молочних залозах.

Найбільш об'єктивно особливості координатної структури розподілів азимута α і еліптичності β поляризації характеризує метод автокореляції з використанням автокореляційної функції $K_{\alpha;\beta}(\Delta x)$ [3, 7], явний вигляд якої обчислювався за допомогою прикладного програмного пакета “MATLAB6”, де (Δx) “крок”, з яким змінюються координати (m, n) розподілу поляризаційних α ($m \times n$); β ($m \times n$) параметрів лазерного зображення.

Як кореляційні залежності, які характеризують лазерні зображення біологічних тканин, обрано наступні параметри:

кореляційна площа S , величина якої визначається площею під кривою автокореляційної залежності $K(\Delta m, \Delta n)$:

$$S = \int_0^m \int_0^n K(m, n) dm dn ; \quad (7)$$

кореляційний момент Q , який визначає ексцес автокореляційної функції:

$$Q = \frac{1}{Z_2^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (K_i)^4 \quad (8)$$

Фрактальний аналіз [3, 6, 7] сукупності випадкових величин $q(\alpha, \beta)$, що характеризують поле розсіяного випромінювання, проводився у такій послідовності дій:

- розраховувалися автокореляційні функції розподілів випадкових величин q і знаходилися відповідні спектри потужності $J(\alpha)$, $J(\beta)$ розподілів азимутів α , еліптичності β поляризації лазерного зображення;
- обчислювалися log-log залежності спектрів потужності $\log J(q) - \log(d^{-1})$, де d^{-1} просторові частоти, що визначаються геометричними розмірами (d) структурних елементів полікристалічної мережі;
- залежності $\log J(q) - \log(d^{-1})$ апроксимувалися методом найменших квадратів у криві $\Phi(\eta)$, для прямих ділянок яких визначалися кути нахилу η_i і обчислювалися величини фрактальних розмірностей множин величин q за співвідношенням:

$$F_i(q) = 3 - \text{tg} \eta_i. \quad (9)$$

Для характеристики логарифмічних залежностей $J(q) - \log(d^{-1})$ використовувалася дисперсія таких розподілів:

$$D = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log J(Q) - \log(d^{-1}))_i^2} \quad (10)$$

Класифікація координатних розподілів q проводилася згідно з такими критеріями, запропонованими в [8]:

- координатні розподіли q – фрактальні при постійному значенні кута нахилу $\eta = \text{const}$ залежності $\Phi(\eta)$ для 2-3 декад зміни розмірів d структурних елементів полікристалічної сітки;
- множини q – стохастичні за умови наявності декількох постійних кутів нахилу $\Phi(\eta)$;
- множини q – випадкові за умови відсутності стабільних кутів нахилу $\Phi(\eta)$ у всьому інтервалі зміни розмірів d .

Результати дослідження та їх обговорення.

У результаті комп'ютерного моделювання кореляційної та самоподібної структури поляризаційних мап модельних зразків полікристалічної мережі груп 1 та 2 отримано серії три- і двовимірних автокореляційних функцій $K(\alpha)$; $K(\beta)$ та логарифмічних залежностей $\text{PSD}(\alpha)$; $\text{PSD}(\beta)$ спектрів потужності координатних розподілів азимутів і еліптичності поляризації (рис. 2, 3).

Аналіз даних таблиці 1 показав, що кореляційними ознаками “онкологічних змін” полікрис-

Таблиця 1

Кореляційні S; Q і фрактальні параметри D координатних розподілів азимутів α і еліптичності β поляризації зображення модельної двоприменезаломлюючої сітки групи 1 та групи 2

| Параметри | $\alpha(m^*n)$ | | $\beta(m^*n)$ | |
|-----------|----------------|---------|---------------|---------|
| | Група 1 | Група 2 | Група 1 | Група 2 |
| S | 0,16 | 0,11 | 0,19 | 0,085 |
| Q | 0,38 | 0,83 | 0,47 | 1,32 |
| D | 0,055 | 0,126 | 0,048 | 0,141 |

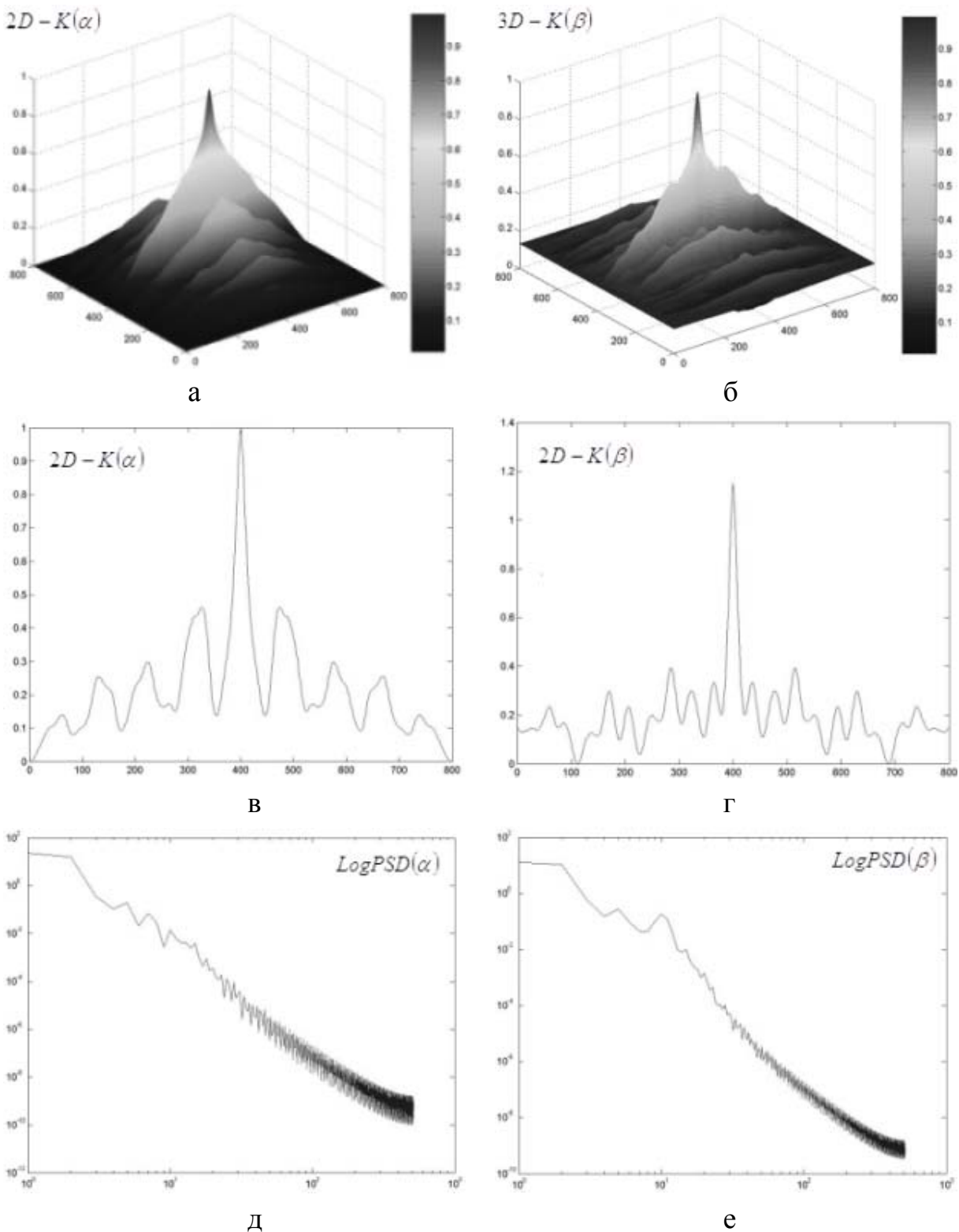


Рис. 2. Тривимірні (а, б) і двовимірні (в, г) автокореляційні функції $K(\alpha); K(\beta)$ та логарифмічні залежності $Log PSD(\alpha; \beta)$ спектрів потужності (д, е) розподілів азимутів α і еліптичності β поляризації зображення модельної двопроменезаломлюючої сітки групи 1

талічної мережі з підвищеним рівнем двопроменезаломлення (група 2), є зменшення кореляційної площі (в 1,75-2,2 рази) на тлі зростання (в 3-4рази) кореляційного моменту порівняно з аналогічними кореляційними параметрами розподілів $\alpha(m*n)$ і $\beta(m*n)$ зображення мережі групи 1.

Величина дисперсії розподілів екстремумів логарифмічних залежностей відповідних спектрів потужності поляризаційних мап $\alpha(m*n)$ і $\beta(m*n)$ для групи 2 збільшується у 2,6 – 2,9 рази порівняно зі зразком групи 1.

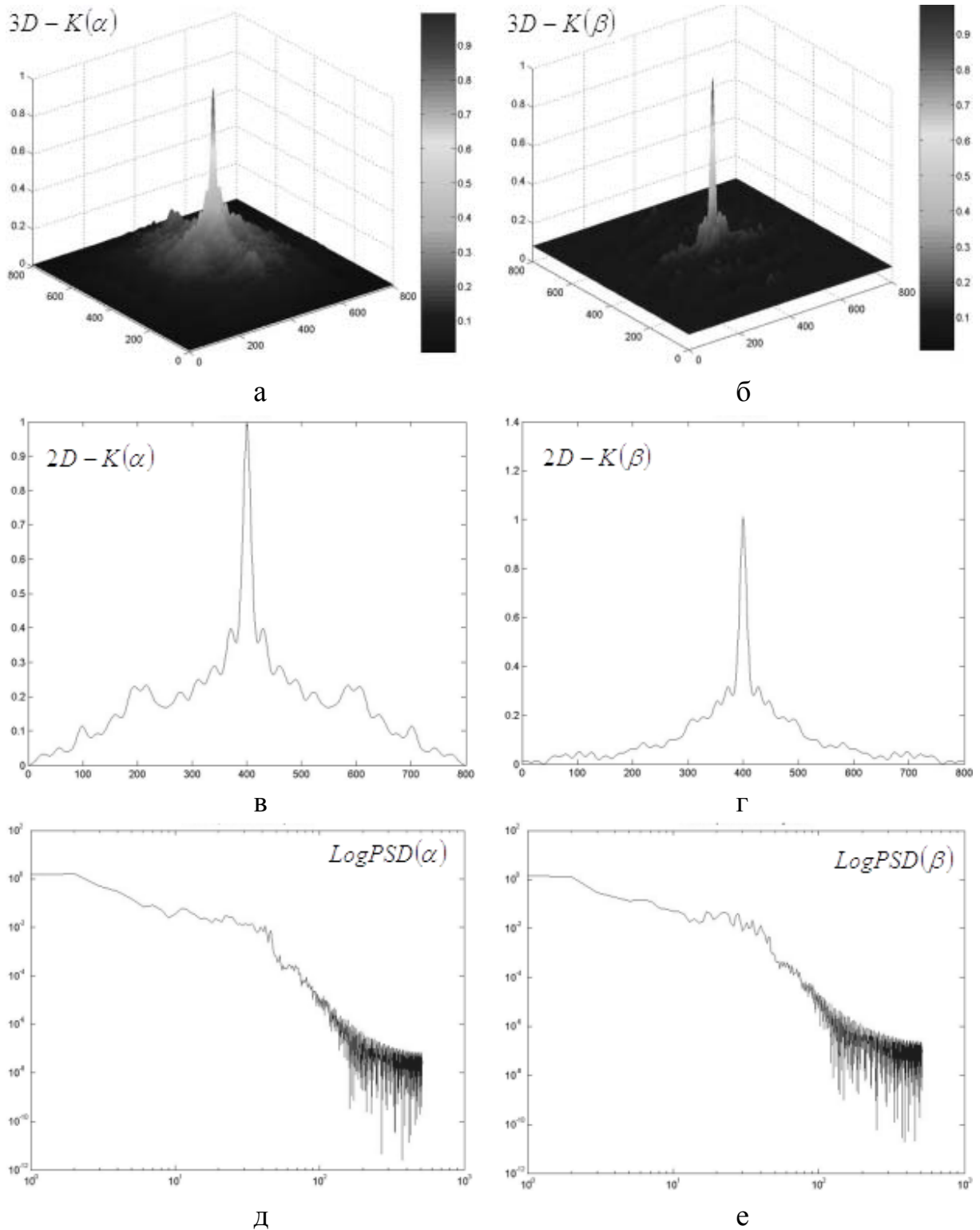


Рис. 3. Тривимірні(а, б) і двовимірні (в, г) автокореляційні функції $K(\alpha); K(\beta)$ та логарифмічні залежності $Log PSD(\alpha; \beta)$ спектрів потужності (д, е) розподілів азимутів α і еліптичності β поляризації зображення модельної двоприменезаломлюючої сітки групи 2

Висновок

Шляхом комп'ютерного моделювання координатних розподілів азимутів і еліптичностей поляризації лазерного випромінювання, перетвореного полікристалічними мережами, нами виявлені тенденції та встановлена чутливість змін їх кореляційних і фрактальних параметрів, до зміни величини показника двоприменезаломлення.

Одержані результати будуть використані при аналізі експериментальних даних лазерної поляриметрії зображень реальних зразків плазми крові в людей із різними патологічними процесами в молочних залозах для діагностичних цілей [9].

Література

1. de Boer J.F. Review of polarization sensitive optical coherence tomography and Stokes vector de-

- termination / J.F. de Boer, T.E. Milner // J. Biomed. Opt. – 2002. – Vol. 7. – P. 359-371.
2. Fiber-based polarization-sensitive Mueller matrix optical coherence tomography with continuous source polarization modulation / Shuliang Jiao, Milos Todorovic, George Stoica [et al.] // Appl. Optics. – 2005. – Vol. 44. – P. 5463-5467.
 3. Основи лазерної поляриметрії. – Част. 1: Біологічні тканини людини / [Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Томка Ю.Я. та ін.]; під ред. О.Г.Ушенко. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2010. – 588 с.
 4. Поляризаційна корелометрія біологічних тканин людини: [монографія] / [О.Г. Ушенко, В.П. Пішак, О.П. Пересунько, Ю.О. Ушенко]. – Чернівці: Рута, 2007. – 696 с.
 5. Ушенко О.Г. Мюллер-матрична двовимірна томографія багат шарових полікристалічних мереж біологічних тканин і рідин / О.Г. Ушенко, Н.І. Заболотна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2010. – № 2 (20). – С. 156-162.
 6. Заболотна Н.І. Аналітичні основи двовимірної Мюллер-матричної томографії оптично товстих багат шарових біологічних тканин. Кореляційний і фрактальний підходи // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах (м. Хмельницький). – 2010. – № 2. – С. 157-163.
 7. Заболотна Н.І. Принципи і методи поляризаційного картографування біологічних тканин / Н.І. Заболотна, Б.П. Олійниченко // Фотобіологія та фотомедицина (м. Харків). – 2010. – № 3, 4. – С. 84-90.
 8. Statistical and Fractal Structure of Biological Tissue Mueller Matrix Images / O.V. Angelsky, A.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko [et al.] // Optical Correlation Techniques and Applications; – edited Oleg V. Angelsky. – Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007. – P. 213-266.
 9. Олійниченко Б.П. Статистичний та кореляційний підхід до аналізу зображень плазми крові для діагностики патологічних змін у молочних залозах: зб. праць конф. з міжнародною участю [«Медична та біологічна інформатика і кібернетика: віхи розвитку»]. – К., 2011р. – С. 91.

КОРРЕЛЯЦИОННО-ФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-НЕОДНОРОДНИХ ІЗОБРАЖЕНЬ ПЛАЗМИ КРОВИ ПРИ ПАТОЛОГІЇ МОЛОЧНОЇ ЖЕЛЕЗЫ

А.В. Дуболазов, Б.П. Олійниченко

Резюме. Выявлены тенденционные изменения корреляционных и фрактальных параметров двумерных распределений азимутов и эллиптичностей поляризации смоделированного лазерного изображения плазмы крови человека. Оценивание осуществлено в условиях предположения, что малый и повышенный уровень значения показателя двулучепреломления соответствует состояниям плазмы крови «здорового человека» и «с патологией молочных желез».

Ключевые слова: показатель двулучепреломление, азимут поляризации, эллиптичность поляризации, корреляционный анализ, фрактальный анализ.

CORRELATION – FRACTAL ANALYSIS OF POLARIZABLY INHOMOGENEOUS BLOOD PLASMA IMAGES IN CASE OF PATHOLOGY OF THE MAMMARY GLAND

O.V. Dubolazov, B.P. Oliinychenko

Abstract. Tendentious changes of the correlation and fractal parameters of two-dimensional distributions of azimuths and ellipticities of a simulated laser image of the human blood plasma have been disclosed. An evaluation has been realized under the conditions of assuming that a low and high level of the value of the birefringence parameter correspond to the blood plasma conditions of a «healthy person» and those with «pathology of the mammary gland».

Key words: birefringence index, polarization azimuth, polarization ellipticity, correlation analysis, fractal analysis.

Yu. Fed'kovich National University (Chernivtsi)
“Medivin” (Vinnytsia)

Рецензент – проф. О.Г.Ушенко

Buk. Med. Herald. – 2012. – Vol. 16, № 1 (61). – P. 200-204

Надійшла до редакції 31.10.2011 року