

УДК 611.778.018: [535.361+535.51

Т. М. Бойчук
О. Г. Ушенко*
О. Ю. Новаковська
П. М. Григоришин

ЛАЗЕРНА ПОЛЯРИМЕТРИЧНА ОЦІНКА СТРУКТУРИ МЕРЕЖІ КОЛАГЕНОВИХ ФІБРИЛ ДЕРМИ ШКІРИ

Буковинський державний медичний
університет, м. Чернівці
*Чернівецький національний
університет імені Юрія Федьковича,
м. Чернівці

Ключові слова: лазерна поляриметрія, дерма шкіри.

Резюме. Установлено кореляційний зв'язок між топографією мюллер-матричних зображень полікристалічних мереж і топографічними компонентами характеристичних значень розподілів орієнтаційних, орієнтаційно-фазових і фазових елементів матриці Мюллера для мережі колагенових фібрил дерми шкіри в нормі та при патології.

Вступ

Поляризаційно-кореляційний підхід успішно використовують до аналізу просторово-координатних розподілів полів когерентного випромінювання кореляційних взаємозв'язків між фазовими зсувами та поляризаційно-сингулярними станами різних точок лазерних зображень. Існує можливість використання таких параметрів в описанні оптичної анізотропії двоприменезаломлюючих мереж біологічних тканин на основі кореляційного аналізу координатних розподілів елементів матриці Мюллера – мюллер-матричних зображень гістологічних зрізів біологічних тканин різної морфологічної будови та фізіологічного стану [1-3]. Разом із тим, поляризаційна корелометрія потребує подальшого розвитку. У першу чергу, для розширення функціональних можливостей діагностики оптичної анізотропії біологічних шарів потрібний синтез як статистичного (одноточкового), так і кореляційного (двоточкового) напрямків аналізу топографічної структури мюллер-матричних зображень і полів лазерного випромінювання, перетвореного мережами біологічних кристалітів. Серед найбільш розповсюджених методів дослідження таких об'єктів можна виділити – “скалярний” (фотометрія та спектрофотометрія) та “векторний” (Мюллер-матрична оптика). Для розширення функціональних можливостей діагностики оптичної анізотропії біологічних шарів потрібний синтез як статистичного (одноточкового), так і кореляційного (двоточкового) напрямків аналізу топографічної структури мюллер-матричних зображень і полів лазерного випромінювання, перетвореного мережами біологічних кристалітів [4-6].

Матеріал і методи

Для дослідження обрано дерму шкіри пацюка. Методика виготовлення гістологічних зрізів була стандартною: конкретні експериментальні зразки виготовлялися на заморожувальному мікромомі при азотних температурах. Така методика дозволяє у «чистому» вигляді одержати і проаналізувати поляризовані прояви оптико-анізотропних властивостей двоприменезаломлюючих колагенових кристалітів. Геометрична товщина гістологічних зрізів становить $d = 15$ мкм. Такий вибір геометричної товщини забезпечував умови одноразового розсіювання лазерного випромінювання в об'ємі гістологічних зрізів. Це твердження базується на величині експериментально виміряного показника ослаблення $\tau = 0,085$. В основу моделювання властивостей біологічних тканин покладено такий універсальний підхід: морфологічна будова будь-якого типу біологічної тканини розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури; кристалічна компонента або позаклітинна матриця є архітектонічна сітка, що складається з коаксіальних циліндричних (колаген, міозин, еластин та ін.) фібрил. З оптичного погляду колагенові фібрили володіють властивостями одноосних кристалів; основними механізмами перетворення параметрів лазерного випромінювання такими біологічними кристалами є дихроїзм і двоприменезаломлення. Для визначення ступеня взаємної кореляції матриці Мюллера при певних фізично допустимих величин елементів m_{ik} , які набувають сингулярного значення при $m_{ik} = 0$, $m_{ik} = \pm 1$. Поляризаційно-сингулярним станам точок лазерного зображення відповідають певні екстремальні або характери-

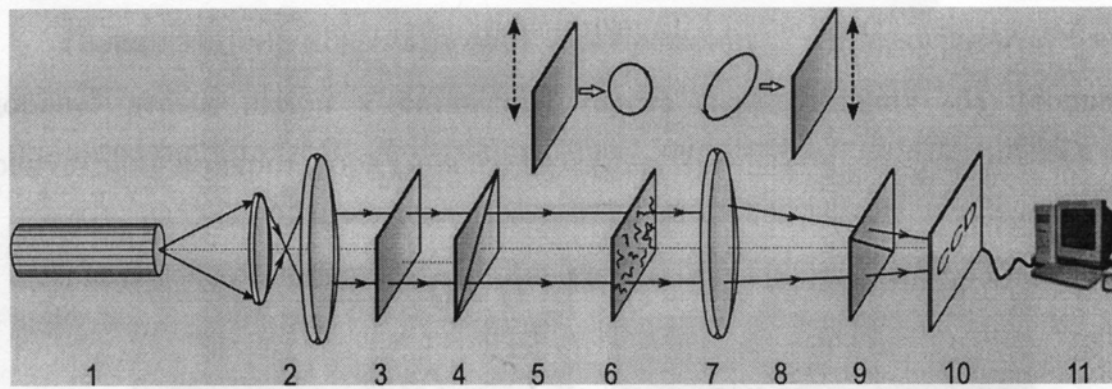


Рис. 1. Схема поляриметра:

1 – He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова пластинка; 5, 8 – механічно рухомі чвертьхвильові пластинки; 4, 9 – поляризатор і аналізатор відповідно; 6 – об'єкт дослідження; 7 – мікрооб'єктив; 10 – ССО камера; 11 – персональний комп'ютер

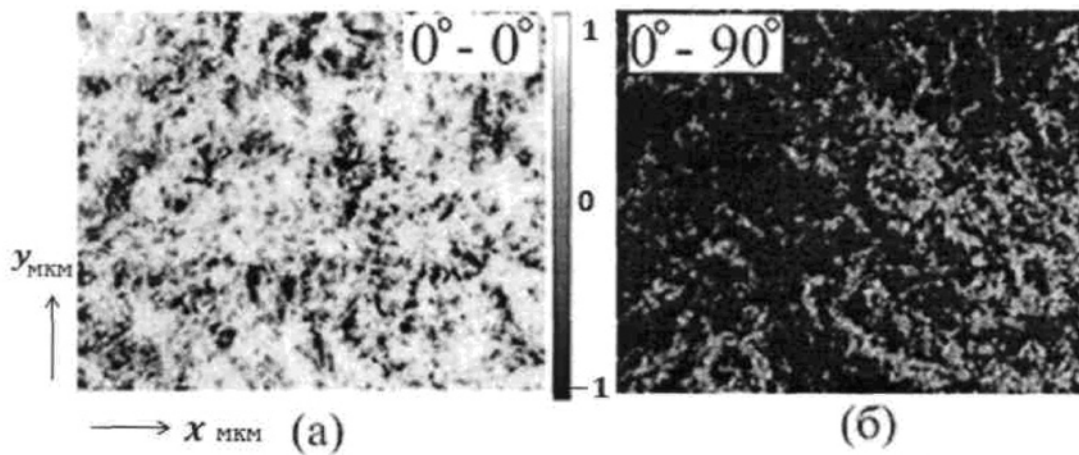


Рис. 2. Поляризаційно-відфільтровані зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри

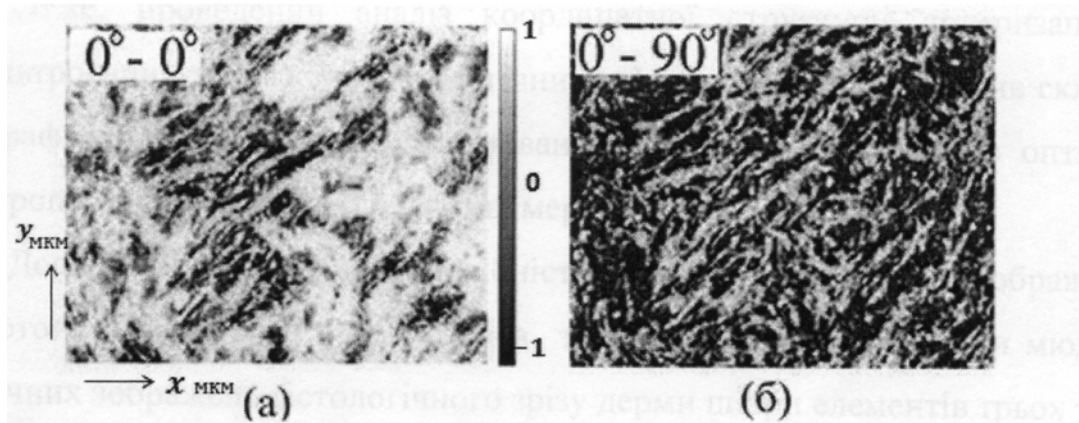


Рис. 3. Поляризаційно-відфільтровані зображення гістологічного зрізу онкологічно зміненої дерми шкіри

стичні значення четвертого параметра вектора Стокса S_4 , які пов'язані із відповідними значеннями елементів матриці Мюллера. Існує взаємозв'язок між оптично-анізотропними властивостями органічних кристалітів, що описуються характеристичними значеннями елементів матриці Мюллера, і безпосередньо вимірюваними сингулярни-

ми станами у точках поляризаційно неоднорідного зображення біологічного шару.

Оптична схема вимірювання координатного розподілу доточкових кореляційних параметрів об'єктних полів і параметрів оптичної анізотропії полікристалітних мереж шару біологічної тканини зображено на рис. 1.

Опромінювання проводиться колімованим пучком (радіус $r = 10^4$ мкм) He-Ne лазера $\lambda = 0,6328$ мкм. За допомогою поляризаційного освітлювача (чвертьхвильові пластини 3, 5 і поляризатор 4) формувалися відповідні стани поляризації освітлюючого пучка: 1 – 0° ; 2 – 90° ; 3 – 45° ; 4 – (права циркуляція). Поляризаційні зображення гістологічного зрізу зразка формувались у площині світлочутливої площини (800x600) CCD камери 10 за допомогою мікрооб'єктива 7. Аналіз зображень гістологічних зрізів біологічних тканин проводився системою чвертьхвильова пластинка 8, поляризатор 9.

Обговорення результатів дослідження

Дерма шкіри собою двокомпонентну аморфно-кристалічну морфологічну структуру. Аморфна компонента, до складу якої входять оптично неактивні жири, ліпіди, – не змінює стану поляризації лазерної хвилі, а лише ослаблює інтенсивність. Оптично-анізотропну компоненту формує мережа двоприменезаломлюючих колагенових фібрил.

З оптичного погляду, така мережа, або позаклітинна матриця, є сукупність лінійно-двоприменезаломлюючих кристалітів ($\Delta n = 1.5 \times 10^{-2}$), напрямком оптичної осі яких, у кожній точці площини гістологічного зрізу, збігається з напрямком укладання колагенового волокна.

Поляризаційно-відфільтровані зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри у співвісних (а) та перехрещених (б) площинах пропускання поляризатора і аналізатора (рис. 2).

Поляризаційно відфільтровані зображення гістологічного зрізу онкологічно зміненої дерми шкіри у співвісних (а) та перехрещених (б) площинах пропускання поляризатора й аналізатора (рис. 3).

З аналізу о держаних даних видно.

1. Експериментальним зразкам обох типів (фрагменти (а)) притаманна складна геометрична побудова, як за розмірами, так і за напрямками колагенових фібрил позаклітинної матриці. При цьому (рис. 3, (а)) для зразку патологічно зміненої тканини спостерігається більш упорядкована за геометричними напрямками укладання колагенових фібрил полікристалітна мережа у площині гістологічного зрізу. Виявлена особливість морфологічної побудови двоприменезаломлюючої позаклітинної матриці може бути пов'язана зі сформованими у товщі дерми шкіри колагеновими паростками онкологічної пухлини.

2. Наявність оптичної анізотропії позаклітинної матриці яскраво ілюструють зображення

зразків обох типів, одержані у перехрещених площинах пропускання поляризатора і аналізатора (фрагменти (б)). Як видно, мережа колагенових фібрил володіє значним рівнем оптичної анізотропії. З фізичного погляду головним оптичним проявом такої анізотропії є формування фазового зсуву φ ($m \times n$) міжортогонально-поляризованими компонентними амплітуди лазерної хвилі. Після проходження крізь ту чи іншу парціальну двоприменезаломлюючу фібрилу такі когерентні складові додаються і формують еліптично-поляризоване коливання.

Отже, проведений аналіз координатної структури поляризаційно-відфільтрованих зображень гістологічних зрізів дерми шкіри виявив складну топографічну побудову, що сформована розподілами параметрів оптичної анізотропії колагенових фібрилярних мереж.

Досліджено кореляційну подібність стокс-параметричного зображення четвертого параметру вектора Стокса та топографічної структури мюллер-матричних зображень гістологічного зрізу дерми шкіри елементів трьох типів – “орієнтаційні” ($m_{22, 33, 32, 23}$), “фазові” (m_{44}) та “орієнтаційно-фазові” ($m_{24, 42, 34, 43}$).

На рис. 4-9 наведені результати експериментального вимірювання координатних розподілів серії орієнтаційних (рис. 4, 7), орієнтаційно-фазового (рис. 5, 8), фазових (рис. 6, 9) елементів матриці Мюллера гістологічних зрізів дерми шкіри та розподілів четвертого параметра вектора Стокса S_4 .

Кожна фігура (рис. 4-9) складається з двох дрібно- і крупномаштабних фрагментів, що характеризують координатні розподіли елементів матриці Мюллера (фрагменти (а)) та координатні розподіли елементів параметра вектора Стокса зображень гістологічних зрізів дерми шкіри (фрагменти (б)).

Порівняльний аналіз з одержаних даних виявив у всіх випадках наявність складної топографічної побудови орієнтаційних, орієнтаційно-фазових і фазових елементів матриці Мюллера, які характеризують прояви оптичної анізотропії двоприменезаломлюючої колагенової мережі дерми шкіри.

Зміни фізіологічного стану дерми шкіри, з оптичного погляду, виявляються у зміні параметрів анізотропії двоприменезаломлюючої колагенової мережі. А саме: за рахунок формування напрямків зростання онкологічної пухлини впорядковується орієнтація оптичних осей колагенових фібрил з одночасним підвищенням їхнього двоприменезаломлення. За рахунок цього суттєво змінюється побудова відповідних топографічних контурів характеристичних значень орієнта-

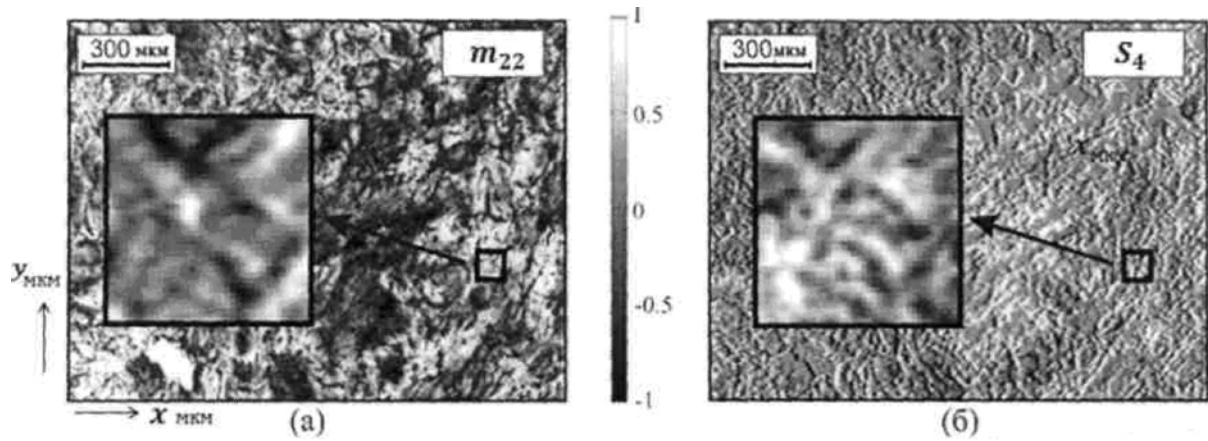


Рис. 4. “Орієнтаційне” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

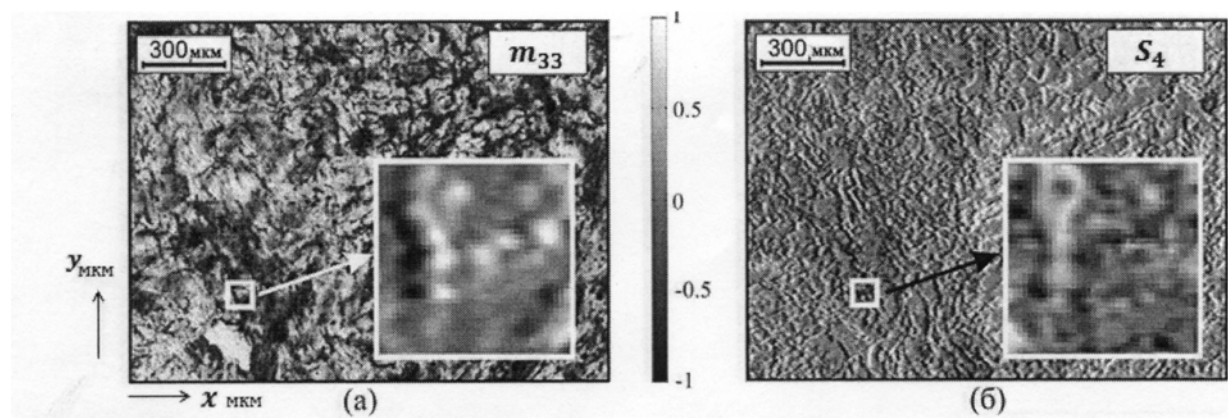


Рис. 5. “Орієнтаційно-фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

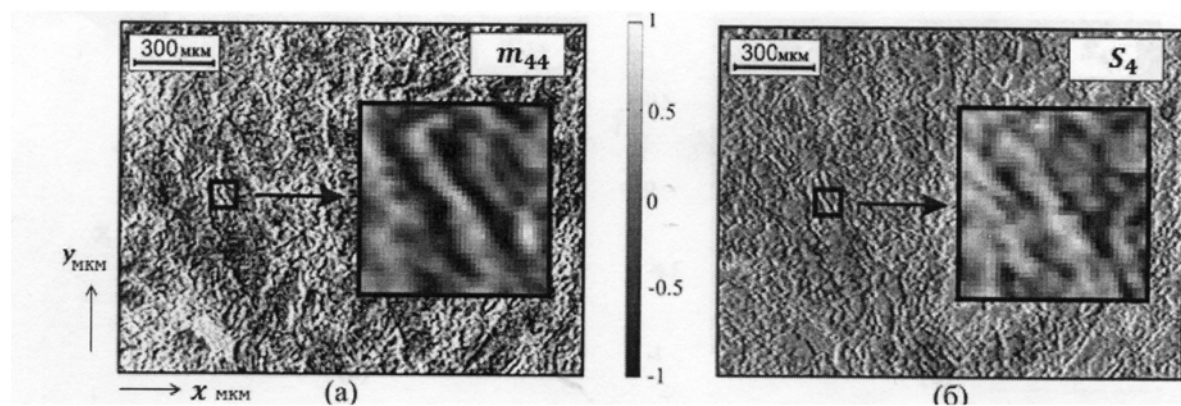


Рис. 6. “Фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

ційних (рис. 7), орієнтаційно-фазових (рис. 8), фазових (рис. 9) елементів матриці Мюллера гістологічних зрізів дерми шкіри з онкологічними змінами.

Таким чином, встановлена кореляція між топографією мюллер-матричних зображень пол-

ікристалітних мереж і топографічними компонентами характеристичних значень розподілів орієнтаційних, орієнтаційно-фазових і фазових елементів матриці Мюллера, що доповнить анатомічні дані і підвищить діагностику колагенових фібрил дерми шкіри при патології.

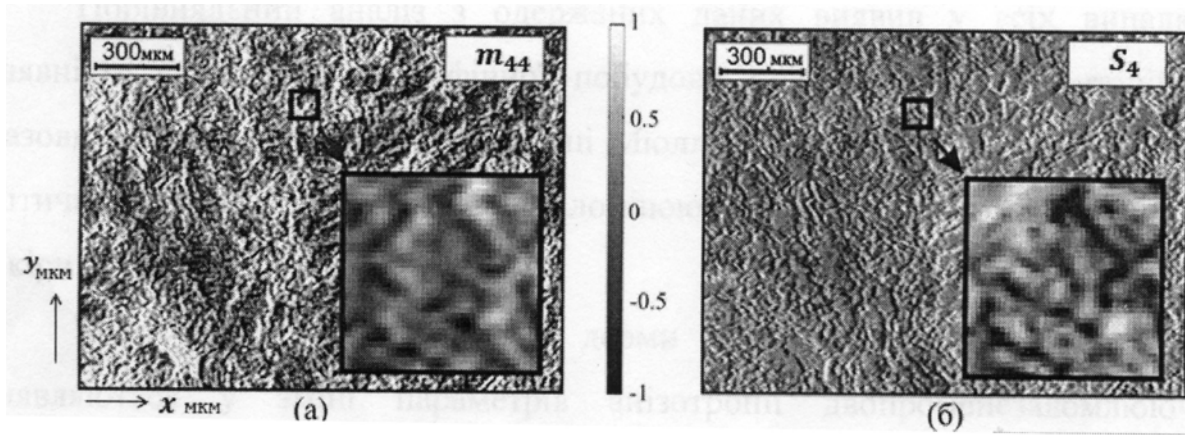


Рис. 7. “Орієнтаційне” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

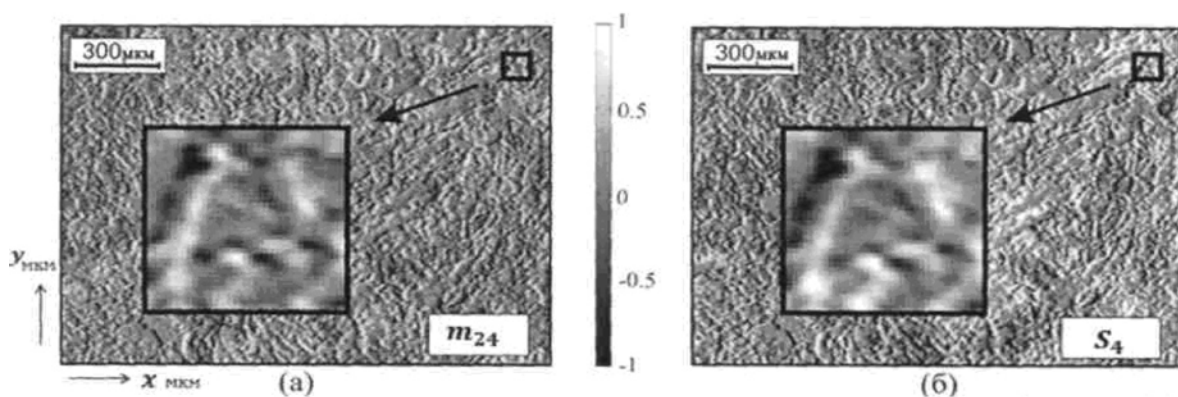


Рис. 8. “Орієнтаційно-фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

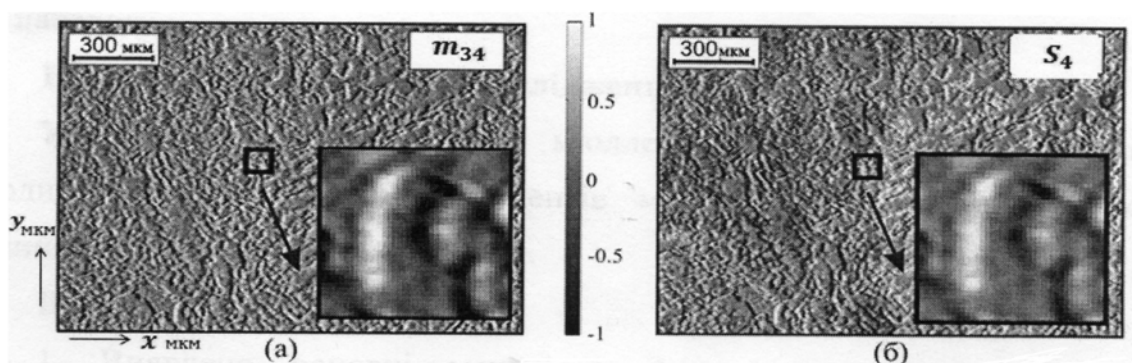


Рис. 9. “Фазове” мюллер-матричне зображення гістологічного зрізу здорової дерми шкіри (а) та відповідний координатний розподіл четвертого вектора Стокса S_4 зображення експериментального зразка (б)

Перспективи подальших досліджень

Установити кореляцію між мюллер-матричними зображеннями і координатними розподілами елементів матриці Мюллера для сфінктерів травної системи.

Висновки

1. Виявлено основні механізми формування мюллер-матричних зображень мережі криволіній-

їйних двоприменезаломлюючих кристалітів і визначено основні сценарії формування топографічної структури контурів характеристичних значень координатних розподілів трьох типів матричних елементів: орієнтаційного (m_{22}), орієнтаційно-фазового (m_{24}) і фазового (m_{44}), які характеризують різні механізми анізотропії.

2. Установлена кореляція між топографічною побудовою мюллерматричних зображень модель-

них полікристалітних мереж і координатними розподілами характеристичних значень орієнтаційних, орієнтаційно-фазових і фазових елементів матриці Мюллера мережі колагенових фібрил дерми шкіри.

Литература. 1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная техника в биомедицинских исследованиях / В.В. Тучин. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1998. – 384с. 2. Gori F. Beam coherence-polarization matrix / F. Gori, M. Santarsiero, S. Vicalvi, R. Borghi, G. Guattari // Pure Appl. Opt. – 1998. – Vol. 7. – P. 941-951. 3. Tervo J. Degree of coherence for electromagnetic fields / J. Tervo, T. Setälä, A. Friberg // Opt. Express. – 2003. – Vol. 11. – P. 1137-1143. 4. Wang L.-H. Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study / X. Wang, L.-H. Wang // J. Biomed. Opt. – 2002. – Vol. 7. – P. 279-290. 5. Soskin M. Topological networks of paraxial ellipse speckle-fields / M. Soskin, V. Denisenko, R. Egorov // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2004. - Vol. 6. – P. S281-S287. 6. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні тканини людини. Монографія / О.Г. Ушенко, Ю.О. Ушенко, Ю.Я. Томка та ін.; під ред. О.Г. Ушенко. – Ч. 1. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2010. – 588 с.

ЛАЗЕРНАЯ ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ СЕТИ КОЛЛАГЕНОВЫХ ФИБРИЛЛ ДЕРМЫ КОЖИ

Т.М. Бойчук, О.Г. Ушенко, О.Ю. Новаковская, П.М. Григорийшин

Резюме. Установлена корреляционная связь между топографией мюллер-матричных изображений поликристаллитных сетей и топографическими компонентами характеристических значений распределении ориентационных, ориентационно-фазовых и фазовых элементов матрицы Мюллера для сети коллагеновых фибрилл дермы кожи в норме и при патологии.

Ключевые слова: лазерная поляриметрия, дерма кожи.

LASER POLARIMETRIC ASSESSMENT OF THE STRUCTURE OF COLLAGEN FIBRILS NETWORK OF THE SKIN DERMA

T.M. Boichuk, A.G. Ushenko, O.Yu. Novakovska, P.M. Grygoryshyn

Abstract. Correlative connection between the topography of the Mueller-matrix images of polycrystalline networks and topographical components of the characteristic values of the distributions of orientation, orientation-phase and phase Mueller matrix elements for a network of collagen fibers of the skin derma in health and pathology has been stated.

Key words: laser polarimetry, skin derma.

Bukyna State Medical University (Chernivtsi)

Yu.Fedkoych National University (Chernivtsi)

Clin. and experim. pathol.- 2013.- Vol.12, №4 (46).-P.38-43.

Надійшла до редакції 01.12.2013

Рецензент – проф. В.Т.Бачинський

© Т.М. Бойчук, О.Г. Ушенко, О.Ю. Новаковська,

П.М. Григорийшин, 2013