

УДК 535.361; 535.555

А.В. КАРАЧЕВЦЕВ, О.В. ДУБОЛАЗОВ, О.В. ОЛАР, Ю.О. УШЕНКО, Л.Й. ПІДКАМІНЬ,  
Ю.Я. ТОМКА

## ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-СИНГУЛЯРНОГО ТА ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-КОРЕЛЯЦІЙНОГО ПІДХОДІВ ДО АНАЛІЗУ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БІОЛОГІЧНИХ ПОЛІКРИСТАЛІТНИХ МЕРЕЖ

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
Вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна*

**Анотація.** У даній статті обґрунтовано та виявлено діагностичні можливості взаємозв'язку між сингулярним і кореляційним підходами до аналізу поляризаційно-неожнорідних об'єктних полів біологічних шарів.

**Аннотация.** В данной статье обоснованы и выявлены диагностические возможности взаимосвязи между сингулярным и корреляционным подходами к анализу поляризационно-неожноридных объектных полей биологических слоев.

**Abstract.** In this article the diagnostic possibilities of the relationship between the singular and the correlation approaches to the analysis of the polarization-non-rash object fields of biological layers are well founded and revealed.

**Ключові слова:** вектор Стокса, комплексний ступінь взаємної поляризації (КСВП), сингулярність, кореляція, діагностика.  
DOI: 10.31649/1681-7893-2018-36-2-43-52

### ВСТУП

У межах сингулярного підходу [1-4] до стокс-параметричних зображень [5-7] полікристалітних мереж проведено детальний аналіз координатних розподілів екстремальних значень  $\beta(r) = 0$  та  $\beta(r) = \pi/4$  еліптичності поляризації відповідних зображень. З фізичного погляду формування топографічних контурів адекватно описується в [1-3]. Якщо підійти до аналізу координатного розподілу поляризофот з точки зору двоточкового підходу [8,9], то необхідно послідовно розглянути кореляційні взаємозв'язки всіх станів поляризації в межах зображення наших біологічних зразків. Таку інформацію несе комплексний ступінь взаємної поляризації (КСВП) зображення досліджуваних біологічних об'єктів [10].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Обґрунтування та виявлення діагностичних можливостей взаємозв'язку між сингулярним і кореляційним підходами до аналізу поляризаційно-неожнорідних об'єктних полів біологічних шарів.

#### 1. КОРОТКА ТЕОРІЯ

Показано [10], що поперечному розміру S-контур (відстань від точки циркулярної поляризації до лінії, утвореної точками лінійної поляризації,  $-\Delta r_s$ ) відповідає значення  $|W^2|(\Delta r_s) = 0,5$  [5]. Виходячи з цього, можна вважати, що величина  $\Delta r_s$  є середньостатистичним геометричним розміром сукупності S-контурів у зображенні біологічного об'єкта. Отже, визначивши координатний розподіл КСВП у площині стокс-параметричного зображення гістологічного зрізу біологічної тканини та розрахувавши його автокореляційну функцію  $J(|W^2|)$ , можна встановити середньо статистичну відстань від S-точок до L-ліній, що їх розділяють. Такий параметр можна вважати середньостатистичним поперечним розміром S-контурів  $\Delta r_s$ .

У межах сингулярно-параметричного підходу до мюллер-матричних зображень фазово-неоднорідних біологічних шарів запропоновано інший параметр – комплексний ступінь взаємної анізотропії (КСВА), який безпосередньо характеризує кореляційну узгодженість параметрів анізотропії різних точок полікристалітної мереж (таблиця 1).

Таблиця 1 Характеристичні значення КСВА  $\tilde{W}(r_1, r_2)$  мюллер-матричного зображення та КСВП  $W(r_1, r_2)$  стокс-параметричного зображення полікристалітної мережі

$\gamma(r_1), \gamma(r_2)$ ( $0 \div \pi$ )	$\varphi(r_1) = \varphi(r_2)$ ( $0 \div \pi$ )	$\tilde{W}(r_1, r_2)$	$\tilde{V}(r_1, r_2)$
$\gamma(r_1) = \gamma(r_2),$ $\gamma(r_2) = 0,5\pi + \gamma(r_2)$	0	1,0	1,0
	$0,5\pi$	1,0	1,0
	$\pi$	1,0	1,0
$\gamma(r_1) = \gamma(r_2),$ $\gamma(r_2) = 0,5\pi + \gamma(r_2)$	$\varphi_2(r_1)$ $= 0,5\pi + \varphi_1(r_2)$	$\tilde{W}(r_1, r_2)$	$W(r_1, r_2)$
	$0,5\pi$	0,5	0,5
	$\pi$	0,5	0,5
	$1,5\pi$	0,5	0,5
$\gamma(r_1) = \gamma(r_2),$ $\gamma(r_2) = 0,5\pi + \gamma(r_2)$	$\varphi_2(r_1) = \pi + \varphi_1(r_2)$	$\tilde{W}(r_1, r_2)$	$W(r_1, r_2)$
	$\pi$	0	0
	$1,5\pi$	0	0
	0	0	0

На основі визначення закономірностей формування координатних розподілів КСВА відкриваються нові можливості в аналізі структури полікристалітних мереж біологічних тканин і рідин і постає актуальна завдання розробки методики кореляційного оцінювання координатної структури характеристичних значень серії відповідних Мюллер-матричних зображень.

## 2. МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ КОНТУРІВ МЕРЕЖ БІОЛОГІЧНИХ КРИСТАЛІТІВ

В основу методу визначення структури такого контуру покладено крос-кореляційний аналіз, який базується на визначенні:

- двовимірної автокореляційної функції  $J(x, y)$  мюллер-матричного зображення  $m_{\text{к}}(x, y)$  з наступним визначенням її перерізу на рівні  $J(\tilde{W}) = 0,5$ , який і визначає геометричне місце точок кореляційного контура;
- серії автокореляційних залежностей розподілу елементів матриці Мюллера у двох взаємно ортогональних напрямках –  $0x$  і  $0y$ :

$$J(X, y) \Rightarrow \left( J_1(\Delta x); \Delta x=1, \dots, m \right)_{y=n(\Delta x); \Delta y=1, \dots, n} \Rightarrow \bar{J}(\Delta x) = \sum_{i=1}^n J_i(\Delta x); \quad (1)$$

$$J(x, Y) \Rightarrow \left( J_1(\Delta y); \Delta y=1, \dots, n \right)_{x=m(\Delta y); \Delta x=1, \dots, m} \Rightarrow \bar{J}(\Delta y) = \sum_{j=1}^m J_j(\Delta y).$$

- де  $J_i(\Delta x), J_j(\Delta y)$  – автокореляційні функції обчислені у взаємно перпендикулярних напрямках площини біологічного шару.
- логарифмічних залежностей спектрів потужності розподілів значень мюллер-матричного зображення двоприменезаломлюючої кристалітної мережі у двох взаємно ортогональних напрямках –  $0x$  і  $0y$ ;
- на основі співвідношень (1) коефіцієнта асиметрії кореляційного контуру мюллер-матричного зображення біологічного шару у двох взаємно перпендикулярних напрямках

$$\chi = \frac{L_x}{L_y} = \frac{J(\Delta x)=0,5}{J(\Delta y)=0,5}. \quad (2)$$

## 3. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУВАННЯ КОРЕЛЯЦІЙНИХ КОНТУРІВ ДВОПРОМЕНЕЗАЛОМЛЮЮЧИХ МЕРЕЖ

На серії рис. 1 – рис. 4 наведено результати, що ілюструють можливості крос-кореляційного

аналізу координатного розподілу параметру КСВА сітки криволінійних циліндрів із синусоїдальним законом фазової модуляції.

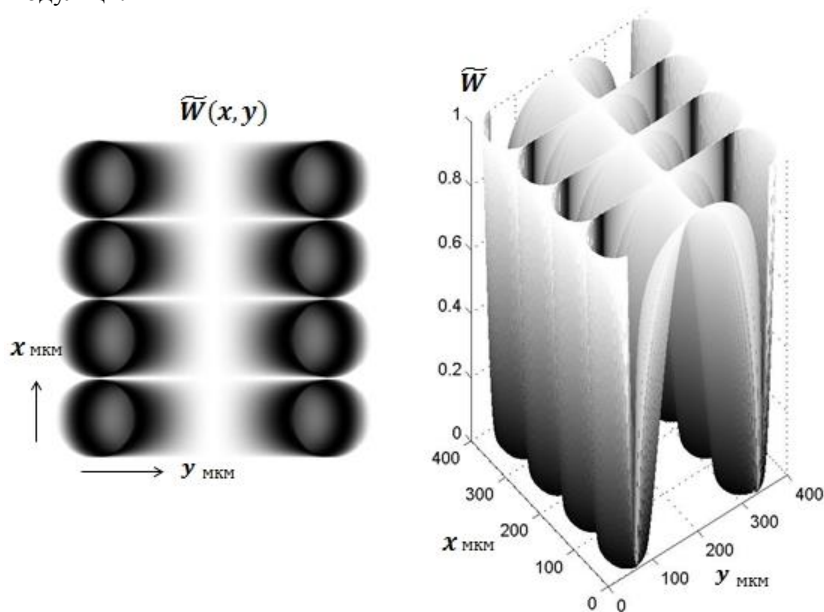


Рис. 1. Розподіли параметра КСВА мережі криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

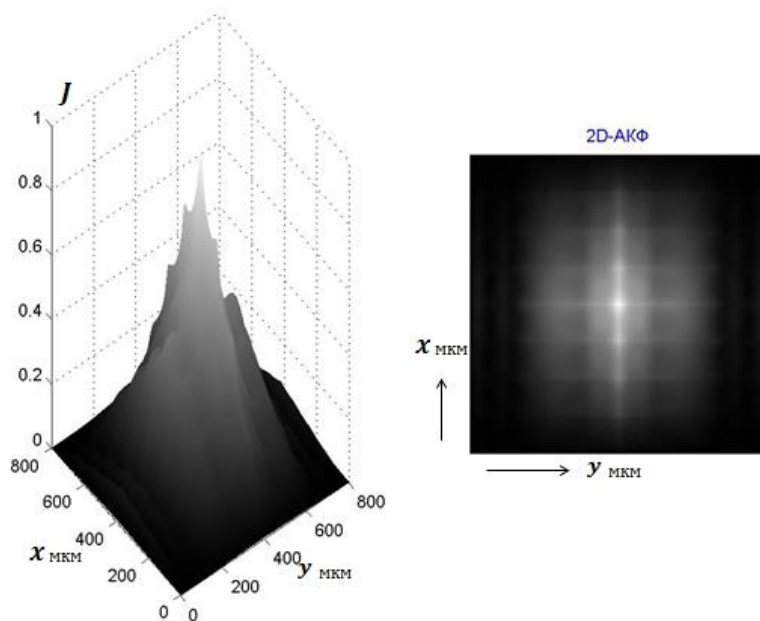


Рис. 2. Двовимірна автокореляційна функція координатного розподілу параметра КСВА мережі криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

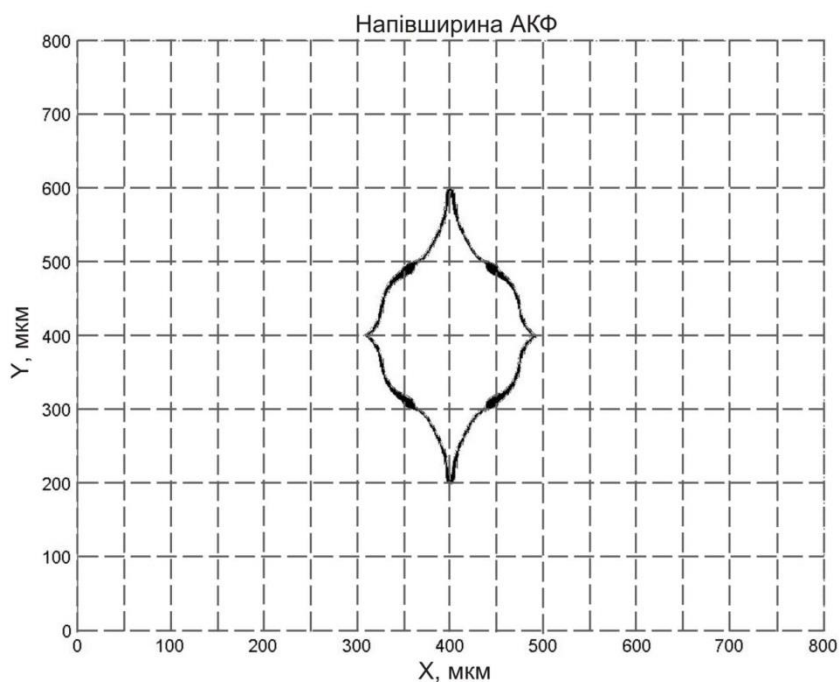


Рис. 3. Кореляційний контур координатного розподілу параметра КСВА мережі криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

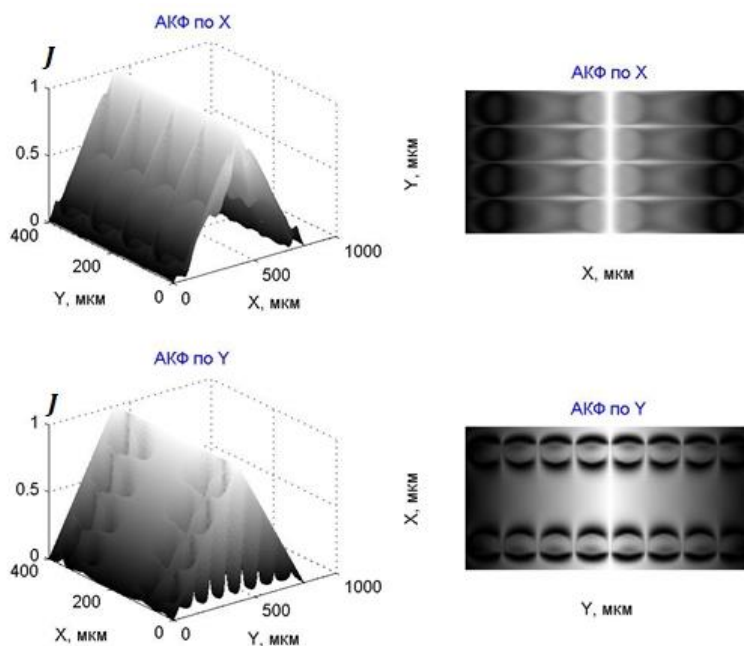


Рис. 4. Крос-кореляційні функції координатного розподілу координатного розподілу параметра КСВА мережі криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

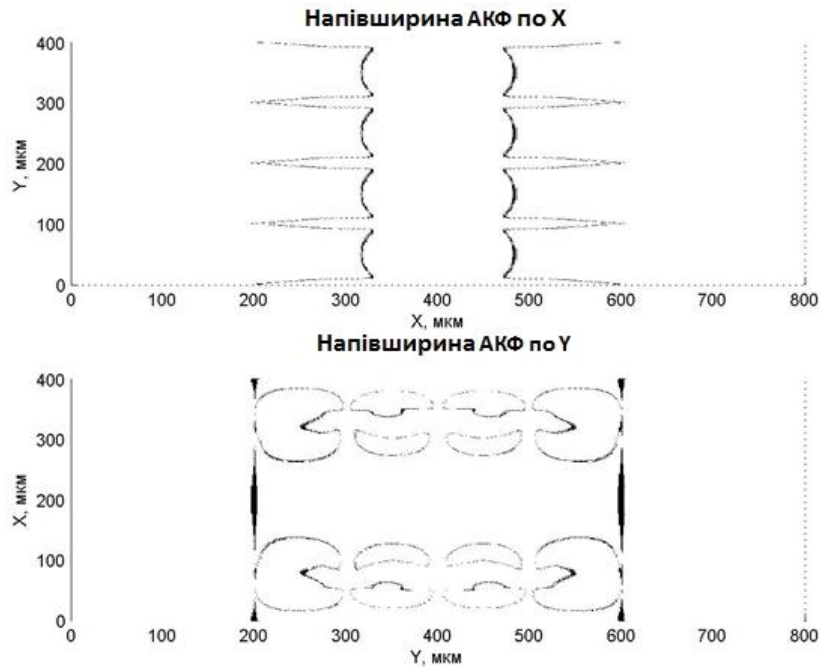


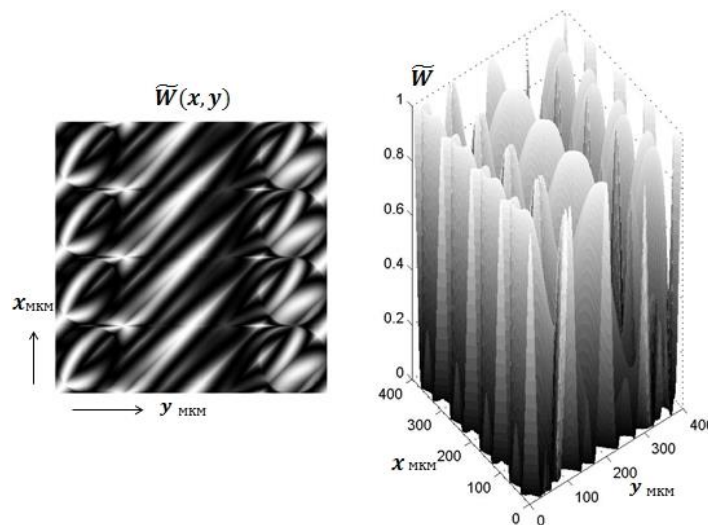
Рис. 5. Ортогональні розміри кореляційного контуру координатного розподілу параметра КСВА мережі криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

Порівняльний аналіз одержаних даних виявив суттєві відмінності між крос-кореляційними структурами конфігураційно різних, але з однаковим законом двопронезаломлення, модельних оптично-анізотропних сіток:

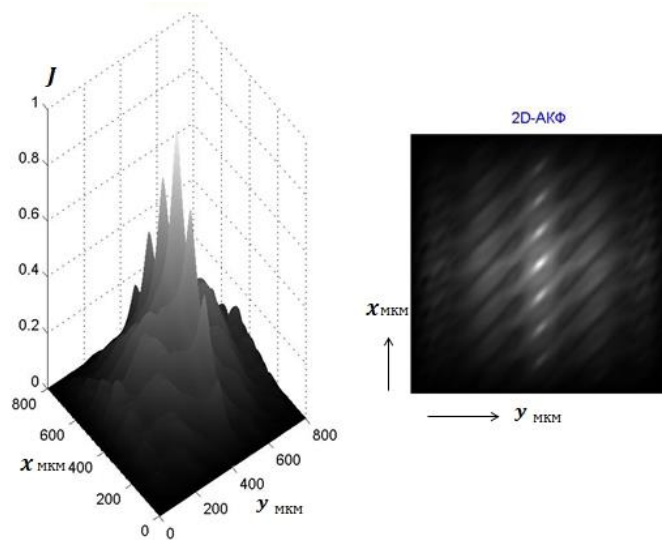
- конфігураційно-кореляційні відмітні контури;
- індивідуальна структура автокореляційних функцій, визначених у ортогональних напрямках сканування для сітки криволінійних циліндрів, більш складна, ніж для аналогічних залежностей КСВА сітки прямолінійних двопронезаломлюючих циліндрів;
- параметр асиметрії кореляційного контуру сітки криволінійних циліндрів практично у 2 рази більший, ніж для впорядкованої за напрямками оптичних осей мережі.

#### 4. ДВОШАРОВА СІТКА ПРЯМОЛІНІЙНО-КРИВОЛІНІЙНИХ ЦИЛІНДРІВ

Найбільш складну кореляційну структуру розподілів КСВА виявили дослідження двошарової сітки прямолінійно-криволінійних циліндрів, які наведені на серії рис. 6 – рис. 9.



(a)



(б)

Рис.6. Розподіл параметра КСВА (а) та його двовимірної автокореляційної функції (б) двошарової мережі прямолінійно-криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

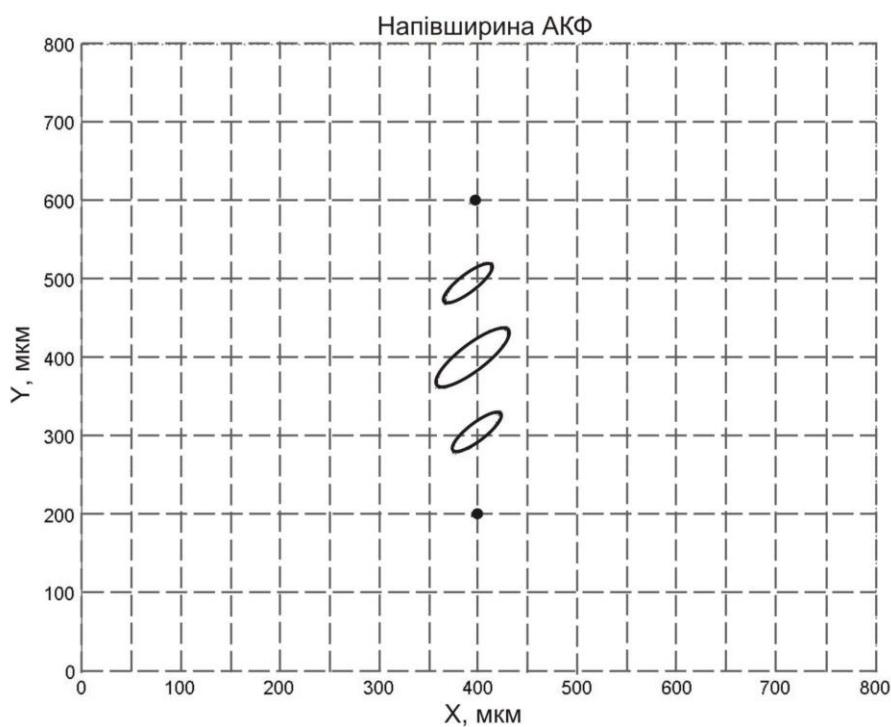


Рис. 7. Кореляційний контур розподілу параметра КСВА двошарової мережі прямолінійно-криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

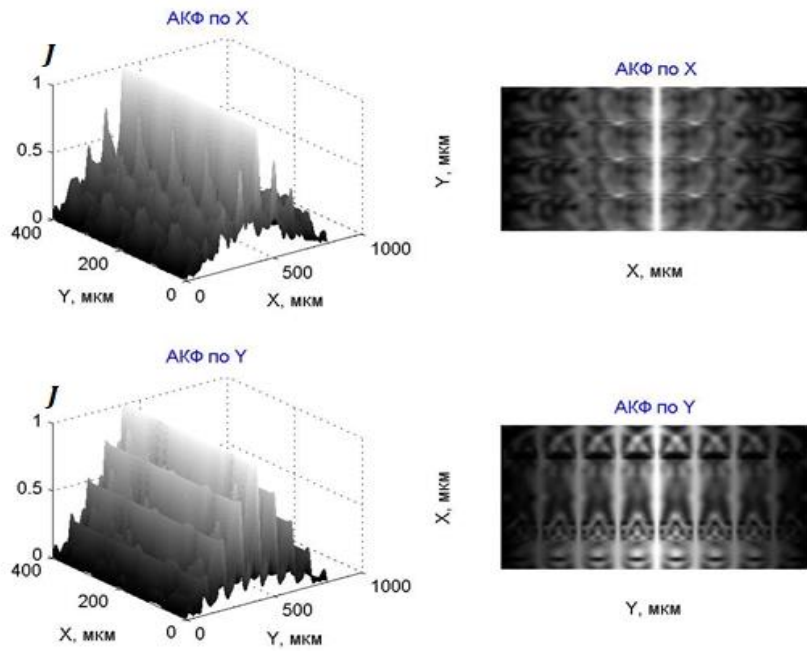


Рис. 8. Ортогональні крос-кореляційні функції розподілу параметра КСВА двошарової мережі прямолінійно-криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

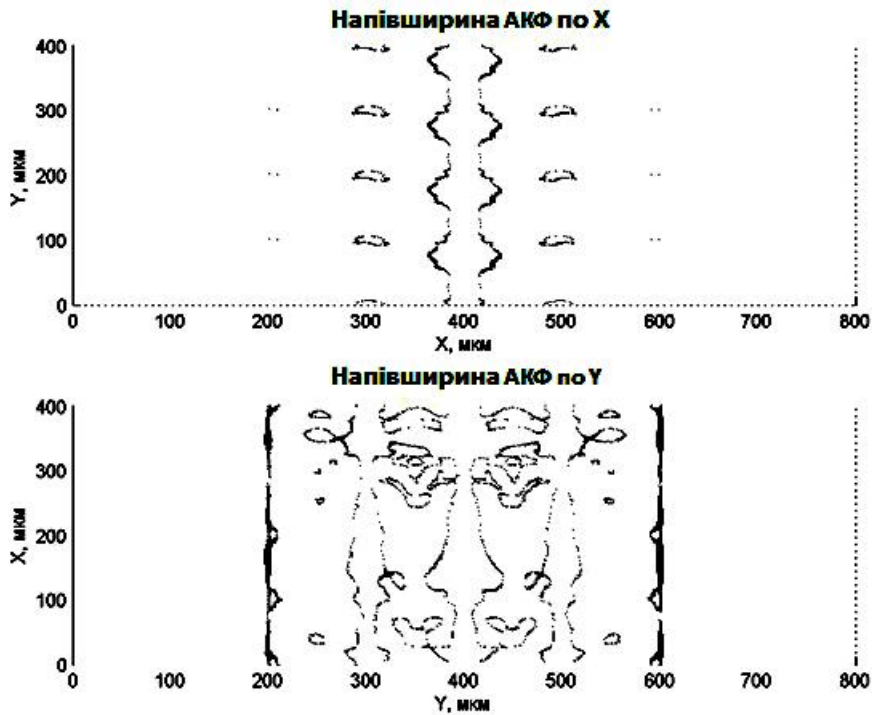


Рис. 9. Ортогональні розміри кореляційного контуру розподілу параметра КСВА двошарової мережі прямолінійно-криволінійних циліндрів з гармонічною фазовою модуляцією

Установлено, що для всіх координатних, автокореляційних, крос-кореляційних розподілів КСВА складної двошарової оптично-анізотропної сітки характерна яскрава азимутальна анізотропія. Для такого об'єкта замкнений кореляційний контур трансформується у систему локальних кореляційних контурів). При цьому показник асиметрії зростає у 3,4 і 2,5 разу у порівнянні з аналогічними показниками, визначеними для прямолінійних і криволінійних двопронезаломлюючих циліндрів. Отже, ми продемонстрували чутливість нового крос-кореляційного підходу, заснованого на взаємозв'язку одноточкових характеристикних параметрів мюллер-матричного зображення та двоточкового КСВА підходу, до орієнтаційної та фазової структури мереж двопронезаломлюючих кристалітів.



Об'єктами експериментального дослідження обрано три групи оптично-тонких гістологічних зрізів біологічних тканин різної морфологічної побудови:

- тканина гомілкової кістки – система впорядкованих за напрямками оптичних осей колагенових фібрил з украленнями кристалітів гідроксилапатиту – група 1;
- тканина нирки – система розупорядкованих за напрямками оптичних осей колагенових фібрил – група 2;
- легенева тканина – багатощарова система розупорядкованих за напрямками оптичних осей колагенових фібрил – група 3.

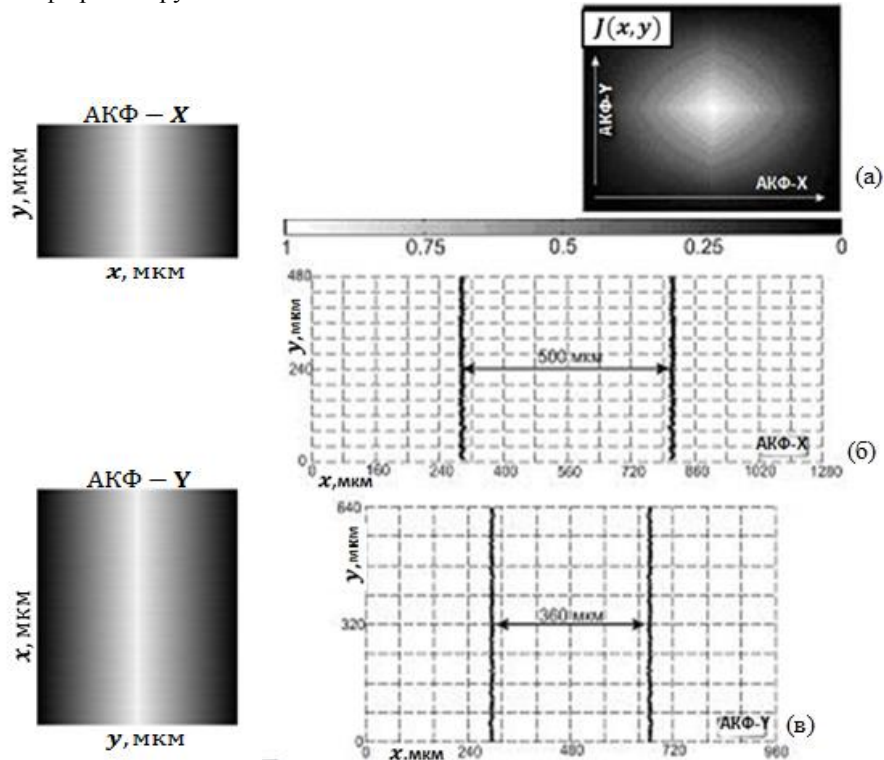


Рис. 10. Крос-кореляційні функції координатного розподілу КСВА гістологічного зрізу тканини гомілкової кістки. Координатний розподіл КСВА (а); двовимірна автокореляційна функція (б) розподілу (а); крос-кореляційні розміри кореляційного контура (в), (г) полікристалітної мережі гістологічного зрізу тканини кістки

З аналізу експериментально виміряних крос-кореляційних залежностей (рис. 10) двовимірного масиву значень КСВА (рис. 10, (а)) випливає, що:

- у порівнянні з теоретичними залежностями для прямолинійних оптично-анізотропних циліндрів (рис. 6.2) координатна структура експериментальних залежностей являє собою більш прості, статистично усереднені по великій кількості двопронезаломлюючих утворень, розподіли;
- асиметрія ортогональних розмірів кореляційного контура тканини гомілкової кістки досить велика  $\sim 1,5$ .

У випадку зміни або розупорядкування за напрямками оптичних осей орієнтаційної структури двопронезаломлюючої мережі колагенових фібрил тканини нирки крос-кореляційні функції координатного розподілу КСВА залишаються статистично усередненими. Проте відмінності між ортогональними розмірами кореляційного контуру зменшуються. Виявлений факт добре корелює з даними комп'ютерного моделювання розмірів кореляційних контурів віртуальних сіток прямолинійних (упорядкованих) і криволінійних (розупорядкованих) двопронезаломлюючих циліндрів.



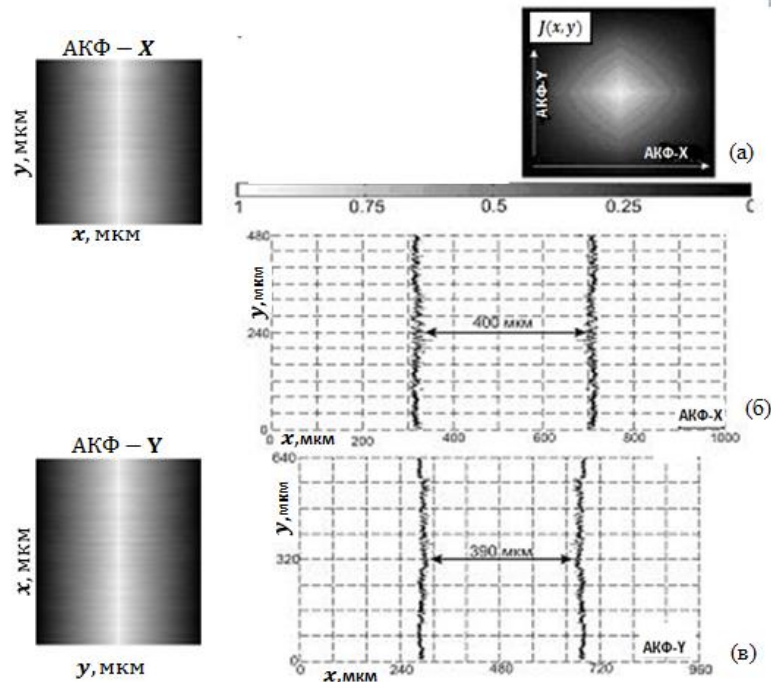


Рис. 11. Крос-кореляційні функції координатного розподілу КСВА гістологічного зрізу тканини нирки. Координатний розподіл КСВА (а); двовимірна автокореляційна функція (б) розподілу (а); крос-кореляційні розміри кореляційного контуру (в), (г) полікристалітної мережі гістологічного зрізу тканини нирки

Установлено, що асиметрія ортогональних розмірів кореляційного контуру тканини нирки зменшується у порівнянні з аналогічним параметром, визначеним для гомілкової кістки, у 1,85 раз.

Результати дослідження структури кореляційних контурів для багат шарової двопронезаломлюючої мережі гістологічного зрізу легеневої тканини ілюструють рис. 12.

Неважко побачити, що для багат шарової тканини має місце симетризація кореляційного контуру. Такий результат можна пов'язати зі збільшенням кратності взаємодії лазерного випромінювання з окремими двопронезаломлюючими елементами оптично-анізотропної складової легеневої тканини. За рахунок такого ефекту значне місце посідає статистичне усереднення проявів оптичної анізотропії.

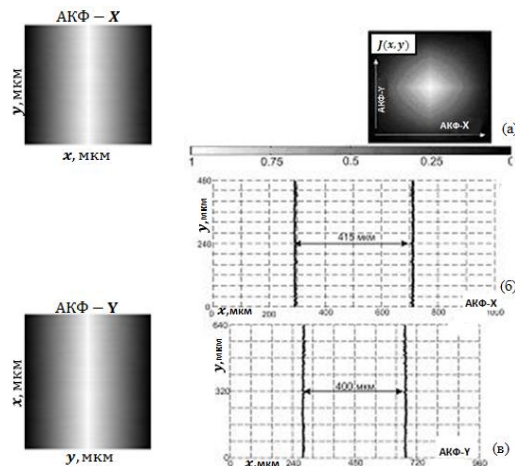


Рис. 12. Крос-кореляційні функції координатного розподілу КСВА гістологічного зрізу легеневої тканини. Координатний розподіл КСВА (а); двовимірна автокореляційна функція (б) розподілу (а); крос-кореляційні розміри кореляційного контура (в), (г) полікристалітної мережі гістологічного зрізу легеневої тканини

## ВИСНОВКИ

Установлено наявність індивідуальної структури кореляційних контурів координатних розподілів КСВА різних типів двопротенезаломлюючих мереж реальних біологічних тканин.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. J. F. Nye, M. Berry, (1974). Dislocations in wave trains. Proc. R. Soc. Lond, A 336, 165-190.
2. M. V. Berry, J. H. Hannay, (1977). Umbilic points on Gaussian random surfaces. J. Phys. A: Math. Gen, 10, 1809-1821.
3. M. Soskin, V. Denisenko, R. Egorov, (2004). Topological networks of paraxial ellipse speckle-fields. J. Opt. A: Pure Appl. Opt., 6, S281-S287.
4. F. Gori, M. Santarsiero, S. Vicalvi, R. Borghi, G. Guattari, (1998). Beam coherence-polarization matrix. Pure Appl. Opt., 7, 941-951.
5. X. Wang, L. - H. Wang, (2002). Propagation of polarized light in birefringent turbid media: a Monte Carlo study. J. Biomed. Opt, 7, 279-290.
6. Тучин В. В. (1998). Лазеры и волоконная техника в биомедицинских исследованиях – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та.
7. О. V. Angelsky, A. G. Ushenko, D. N. Burcovets, Yu. A. Ushenko, (2005). Polarization visualization and selection of biotissue image two-layer scattering medium. J. Biomed. Opt., 10, 1.
8. J. Tervo, T. Setälä, A. Friberg, (2003). Degree of coherence for electromagnetic fields. Opt. Express, 11, 1137-1143.
9. J. Ellis and A. Dogariu, (2004). Complex degree of mutual polarization. Opt. Lett, 29, 536-538.
10. Yu. A. Ushenko, Yu. Ya. Tomka and A. V. Dubolazov, (2011). Complex degree of mutual anisotropy of extracellular matrix of biological tissues. Optics and Spectroscopy, 110, 5, 814-819.

Надійшла до редакції 28.10.2018р.

**АРТЕМ ОЛЕГОВИЧ КАРАЧЕВЦЕВ** - к. ф.-м. н., асистент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

**ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ ДУБОЛАЗОВ** - к. ф.-м. н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

**ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІУВИЧ ОЛАР** - аспірант кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

**ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ УШЕНКО** - д. ф.-м. н., професор кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

**ЛЕОНІД ЙОСИПОВИЧ ПІДКАМІНЬ** - к. ф.-м. н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

**ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ ТОМКА** - к. ф.-м. н., доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.