

УДК 616.12-005.4-073.55

О.Я. Ванчуляк

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО ОРІЄНТАЦІЙНО-ФАЗОВОГО АНАЛІЗУ (СТАТИСТИЧНИЙ І ФРАКТАЛЬНИЙ ПІДХІД) ДЛЯ ВИВЧЕННЯ МІОЗИНОВИХ МЕРЕЖ МІОКАРДА

Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці

Резюме. У статті висвітлено дані про будову позаклітинної матриці міокарда, виявлено початкові структурні перебудови серцевого м'яза людини, що відповідають раннім стадіям ішемічного пошкодження. Встановлено статистично вірогідні критерії для діагностики гострої коронарної недостатності із використанням

методу Мюллер-матричного орієнтаційно-фазового аналізу лазерних поляризаційних зображень міокарда людини.

Ключові слова: Мюллер-матричний аналіз, міозин, міокард, гостра коронарна недостатність.

Вступ. Ішемічні пошкодження в тканині серцевого м'яза первинно пов'язані зі значним зниженням концентрації макроергічних сполук, що призводить до дискординації всіх ендотермічних процесів у кардіоміоциті. Структурні перебудови, що мають місце при функціонуванні саркомерів у кардіоміоцитах, відбуваються тільки за наявності АТФ, тому за умов ішемії припускається наявність специфічних змін актиноміозинового комплексу. Згідно з даними літератури, такі зміни можна виявити при застосуванні методу електронної мікроскопії за умови тривалості ішемії понад шість годин. Разом з тим у практиці судово-медичного експерта необхідним є встановлення гострої коронарної недостатності (ГКН) при будь-якому терміні від початку ішемії. Це зумовлює пошук нових методів вивчення структурних змін міокарда при ГКН.

Мета дослідження. Встановити зміни, що виникають у міозинових мережах міокарда людини та пошук методу їх виявлення. Для досягнення мети поставлені наступні завдання: встановлення можливостей методу Мюллер – матричного орієнтаційно-фазового аналізу (статистичний і фрактальний підхід) для вивчення будови поляризаційно неоднорідних структур міокарда людини; встановлення змін міозинових волокон за умов ГКН.

Матеріал і методи. Дослідження структури лазерних зображень тканини міокарда проводилося в традиційному розташуванні поляриметра [3].

Опромінювання проводилося паралельним пучком ($\emptyset=10^4$ мкм) He-Ne лазера ($\lambda=0,6328$ мкм). За допомогою обертання осі пропускання аналізатора 9 на кути $\pm 45^\circ$ відносно напрямку осі найбільшої швидкості чверть хвильової пластинки 8 визначалися інтенсивності право – (I_{\odot}) і вліво – (I_{\ominus}) циркулярно поляризованих компонент для кожного окремого пікселя CCD – камери 10. На цій основі розраховуються координатні ($m \times n$) розподіли елементів Z_{ik} матриці Мюллера міокарда [2]

$$\begin{aligned} Z_{i1} &= 0,5 \left[S_i^{(1)} + S_i^{(1)} \right], \\ Z_{i2} &= 0,5 \left[S_i^{(1)} - S_i^{(1)} \right], \\ Z_{i3} &= S_i^{(3)} - Z_{i1}, \\ Z_{i4} &= S_i^{(4)} - Z_{i1}, i=1,2,3,4. \end{aligned} \quad (3)$$

Індекси 1 – 4 відповідають наступним станам поляризації зонduючого шар міокарда лазерного пучка: 1 – 0° ; 2 – 90° ; 3 – $+45^\circ$; 4 – Å (права циркуляція).

Двовимірний масив “орієнтаційно-фазового” Мюллер-матричного елемента $Z_{34}(m \times n)$ сканувався в горизонтальному напрямку $x=1, \dots, m$ з кроком $\Delta x=1 \text{ pix}$. У межах кожної локальної вибірки $(1 \text{ pix} \times n \text{ pix})^{(k=1,2,\dots,m)}$ обчислювалася кількість (N) характеристичних значень $Z_{34}(k)=0, - (N_0^{(k)})$ і $Z_{34}(k)=1, - (N_1^{(k)})$.

Таким чином, визначалися залежності $N_0(x) = (N_0^{(1)}, N_0^{(2)}, \dots, N_0^{(m)})$ і $N_1(x) = (N_1^{(1)}, N_1^{(2)}, \dots, N_1^{(m)})$ кількості екстремальних значень “орієнтаційно-фазового” матричного елемента Z_{34} у межах його координатного розподілу ($m \times n$).

У основу аналізу координатної структури розподілів $Z_{34}(m \times n)$ та залежностей їх екстремальних значень $N_0(x)$ і $N_1(x)$ покладено метод автокореляції з використанням функції [4]

$$K \left(W \equiv \begin{pmatrix} F_{44} \\ N_0 \\ N_1 \end{pmatrix} \right) = \lim_{m \rightarrow 0} \frac{1}{m} \int_1^m [W(m)] [W(m - \Delta m)] dm \quad (4)$$

Тут ($\Delta m=1 \text{ pix}$) – “крок”, з яким змінюються координати ($x=1 \div m$) сукупності розподілів $W(m)$.

Як кількісні параметри, які характеризують автокореляційні залежності $K(W)$, обрано: кореляційну площу $S(W)$

$$S(W) = \int_1^m K(W) dm \quad ; \quad (5)$$

кореляційні моменти Q_2 і Q_4 , які визначають дисперсію та ексцес автокореляційної функції $K(W)$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K(W)^2} \quad ;$$

$$Q_4 = \frac{1}{(Q_2)^2} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m K(W)^4 \quad . \quad (6)$$

Фрактальний аналіз розподілів W проводився шляхом розрахунку логарифмічних залежностей $\log J(W) - \log d^{-1}$ спектрів потужності $J(W)$ [3]

$$J(W) = \int_{-\infty}^{+\infty} W \cos 2\pi \nu d\nu \quad , \quad (7)$$

де $\nu = d^{-1}$ просторові частоти, що визначаються геометричними розмірами (d) структурних елементів лазерного зображення міокарда людини.

Залежності $\log J(W) - \log d^{-1}$ апроксимуються методом найменших квадратів у криві $V(\eta)$, для прямих ділянок яких визначаються кути нахилу η і обчислюються фрактальні F розмірності за співвідношенням [5]

$$F = 3 - \text{tg} \eta. \quad (8)$$

Для оцінки розподілів $\log J(W) - \log d^{-1}$ обчислювалися статистичні моменти 1-4-го порядків $M_{k=1,2,3,4}(W)$ за наступними алгоритмами [1]

$$M_1(W) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |J|, \quad M_2(W) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J^2},$$

$$M_3(W) = \frac{1}{(M_2)^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J^3,$$

$$M_4(W) = \frac{1}{(M_2)^4} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N J^4. \quad (9)$$

Результати дослідження та їх обговорення.
Встановлено координату, статистичну, кореля-

ційну і фрактальну структури “орієнтаційно-фазових” елементів Z_{34} матриці Мюллера міокардів досліджуваних груп (рис. 1).

З одержаних даних видно, що координатні розподіли (рис. 1а та рис. 1б) тканини міокарда з ІХС чи ГКН є самоподібними. На даний факт вказує монотонне спадання автокореляційних функцій $K(Z_{34})$ (рис. 1в та рис. 1г) та наявність двох стабільних нахилів апроксимуючих кривих до залежностей $\log J(Z_{34}) - \log d^{-1}$ (рис. 1г та рис. 1д).

Кількісно кореляційну і фрактальну структуру розподілів “орієнтаційних” матричних елементів $Z_{34}(m \times n)$, визначених для двох груп зразків (ІХС – $q=29$ і ГКН – $q=21$) міокарда, ілюструють величини і діапазони зміни значень кореляційної площі $S(Z_{34})$ (співвідношення (5)); дисперсії $Q_2(Z_{34})$ та ексцесу $Q_4(Z_{34})$ (співвідношення (6)) і статистичних моментів $M_{j=1,2,3,4}(Z_{34})$ (співвідношення (9)), – таблиця 1.

Порівняльний аналіз величин і діапазонів зміни значень кореляційних параметрів $S(Z_{34})$, $Q_2(Z_{34})$, $Q_4(Z_{34})$ і статистичних моментів 1 – 4-го порядків $M_{j=1,2,3,4}(Z_{34})$, які характеризують логарифмічні залежності спектрів потужності розподілів “орієнтаційно-фазових” елементів Z_{34} матриці Мюллера міокарда у межах двох груп ІХС і ГКН не виявив об’єктивної можливості диференціації таких випадків настання смерті. Діапазони

Таблиця 1

Статистичні моменти 1-4 –го порядків координатних розподілів матричних елементів тканини міокарда для випадків ішемічної хвороби серця і гострої коронарної недостатності

Параметри	Ішемічна хвороба серця	Гостра коронарна недостатність
$S(Z_{34})$	0,26±0,025	0,28±0,021
$Q_2(Z_{34})$	0,31±0,034	0,34±0,036
$Q_4(Z_{34})$	0,84±0,095	0,91±0,099
$M_1(Z_{34})$	0,14±0,016	0,17±0,023
$M_2(Z_{34})$	0,27±0,035	0,23±0,029
$M_3(Z_{34})$	1,16±0,17	1,27±0,18
$M_4(Z_{34})$	3,41±0,44	3,97±0,46

Таблиця 2

Кореляційні і фрактальні параметри залежностей кількості екстремальних значень $N(Z_{34}=0)$ координатних розподілів $Z_{34}(m \times n)$ тканини міокарда досліджуваних груп

Параметри	Ішемічна хвороба серця	Гостра коронарна недостатність
$S(N_0)$	0,25±0,027	0,28±0,015
$Q_2(N_0)$	0,21±0,022	0,25±0,026
$Q_4(N_0)$	0,41±0,054	0,39±0,051
$M_1(N_0)$	0,55±0,061	0,51±0,057
$M_2(N_0)$	0,23±0,034	0,26±0,031
$M_3(N_0)$	0,31±0,046	0,35±0,048
$M_4(N_0)$	0,24±0,032	0,21±0,026

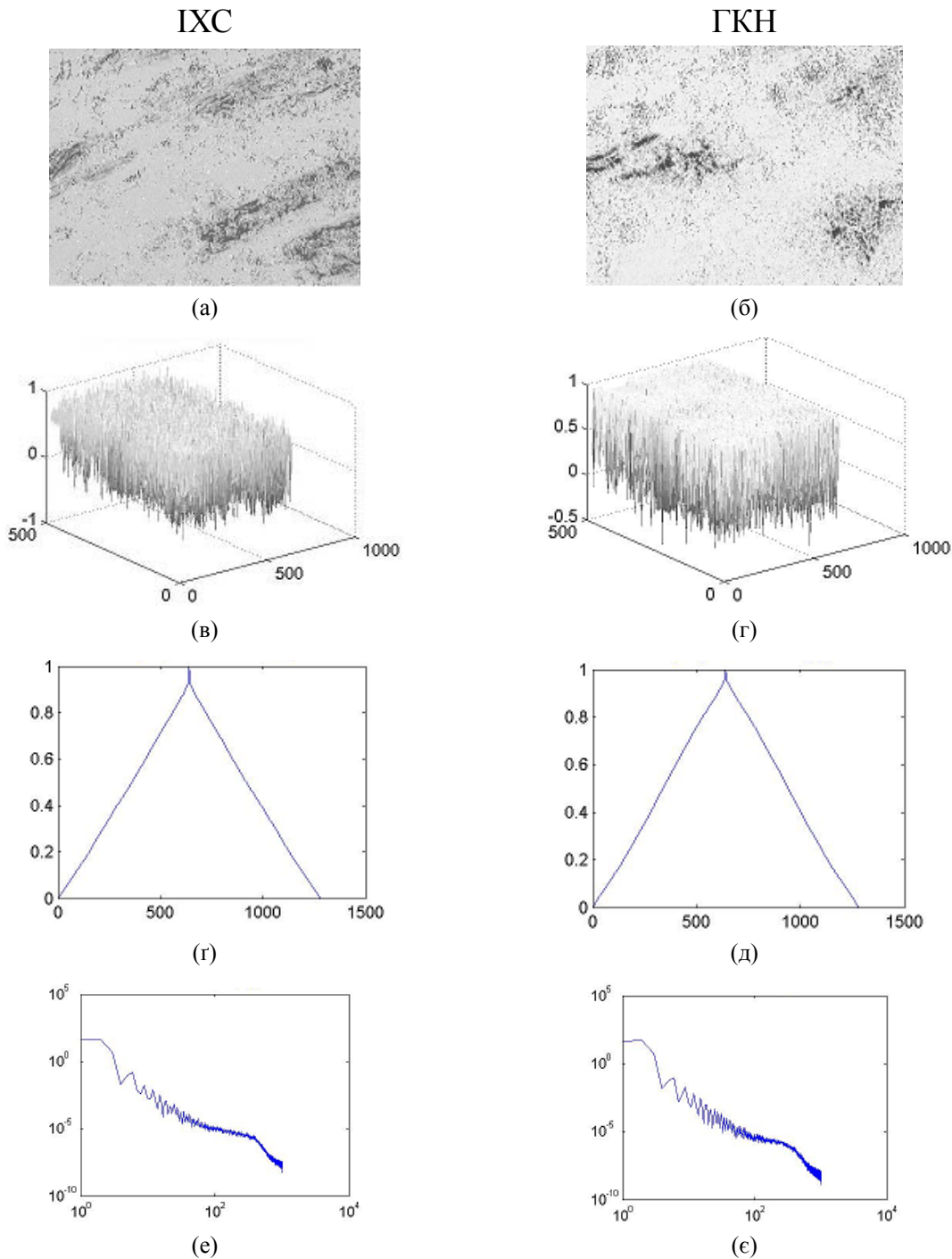


Рис. 1. Параметри «орієнтаційно-фазового» елемента Z_{34} лазерних поляризаційних зображень міокарда: а – координатна структура зрізів міокарда при ІХС; б – координатна структура зрізів міокарда при ГКН; в – статистична структура зрізів міокарда при ІХС; г – статистична структура зрізів міокарда при ГКН; г – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ІХС; д – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ГКН; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ІХС; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ГКН

зміни значень кореляційних і фрактальних параметрів для різних груп міокарда з ІХС і ГКН перекриваються.

З метою пошуку більш чутливих діагностичних критеріїв досліджувалася статистична структура залежностей $N(Z_{34}=1) \equiv N_1$ (рис. 3) і $N(Z_{34}=0) \equiv N_0$ (рис. 2).

Даний підхід дозволяє окремо вивчити статистичні прояви двопронезаломлення міозинових фібрил міокарда на двох його екстремальних рівнях – максимальному, оптично анізотропному

($N(Z_{34}=1) \equiv N_1$) (рис. 2) і мінімальному, оптично ізотропному ($N(Z_{34}=0) \equiv N_0$) (рис. 3).

Результати порівняльного дослідження величин (співвідношення (2) – (9)) і діапазонів зміни кореляційної площі $S(N_0)$, $S(N_1)$; дисперсії $Q_2(N_0)$, $Q_2(N_1)$; ексцесу $Q_4(N_0)$, $Q_4(N_1)$ та статистичних моментів 1– 4-го порядків $M_{j=1;2;3;4}(N_0)$, $M_{j=1;2;3;4}(N_1)$ логарифмічних залежностей $\log J(N_0) - \log d^1$ і $\log J(N_1) - \log d^1$ спектрів потужності $J(N_0)$, $J(N_1)$ розподілів $N(Z_{34}=0) \equiv N_0$, $N(Z_{34}=0) \equiv N_0$ кількості екстремальних значень $Z_{34}=0$ і $Z_{34}=1$

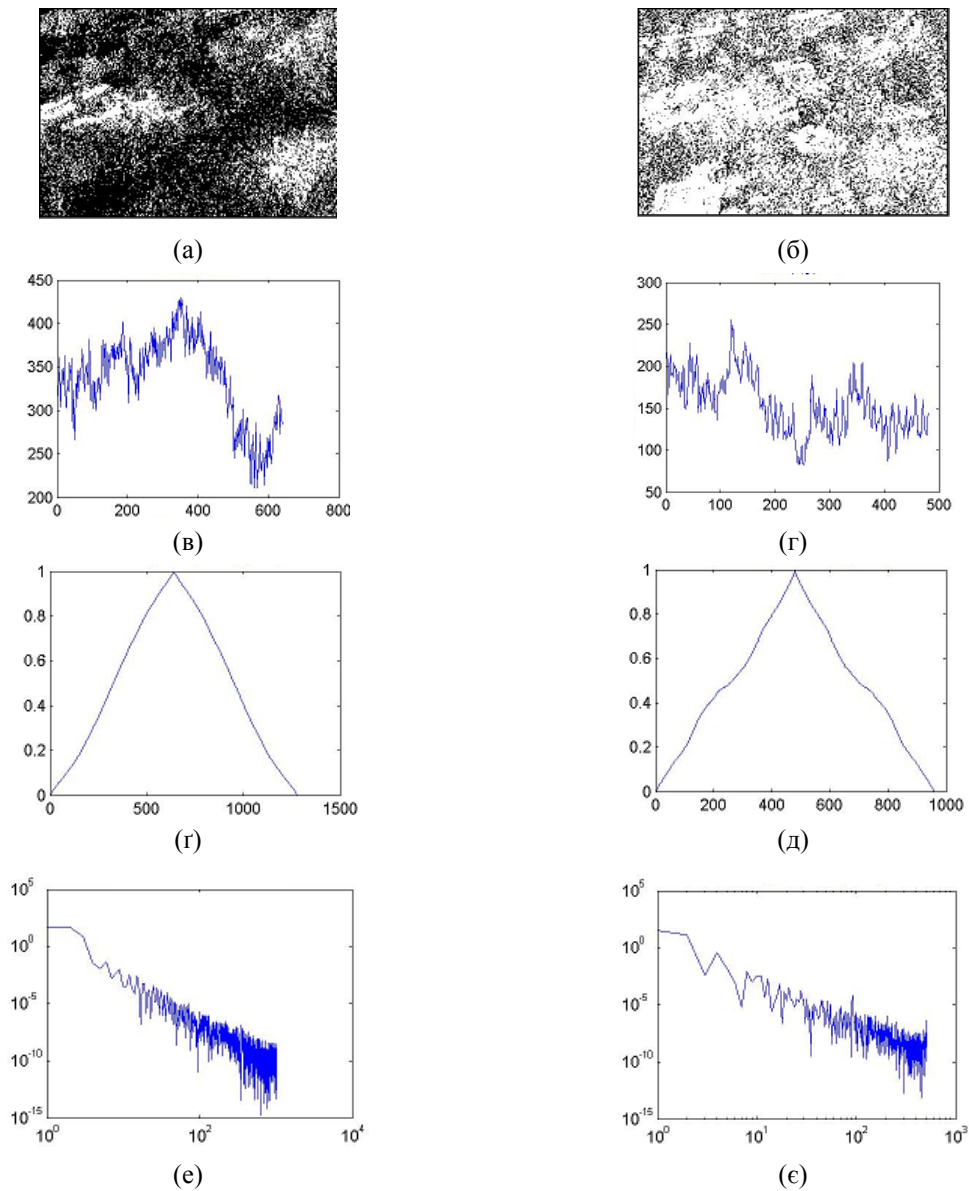


Рис. 2. Параметри «орієнтаційно-фазового» елемента $Z_{34}=0$ лазерних поляризаційних зображень міокарда: а – координатна структура зрізів міокарда при ІХС; б – координатна структура зрізів міокарда при ГКН; в – статистична структура зрізів міокарда при ІХС; г – статистична структура зрізів міокарда при ГКН; р – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ІХС; д – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ГКН; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ІХС; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ГКН

Таблиця 3

Кореляційні і фрактальні параметри залежностей кількості екстремальних значень $N_0(Z_{34}=1)$ координатних розподілів $Z_{34}(m \times n)$ тканини міокарда досліджуваних груп

Параметри	Ішемічна хвороба серця	Гостра коронарна недостатність
$S(N_1)$	0,18±0,014	0,23±0,018
$Q_2(N_1)$	0,14±0,018	0,19±0,02
$Q_4(N_1)$	2,34±0,35	1,33±0,14
$M_1(N_1)$	0,24±0,026	0,41±0,047
$M_2(N_1)$	0,42±0,046	0,18±0,043
$M_3(N_1)$	1,86±0,24	2,17±0,43
$M_4(N_1)$	1,54±0,25	4,88±0,56

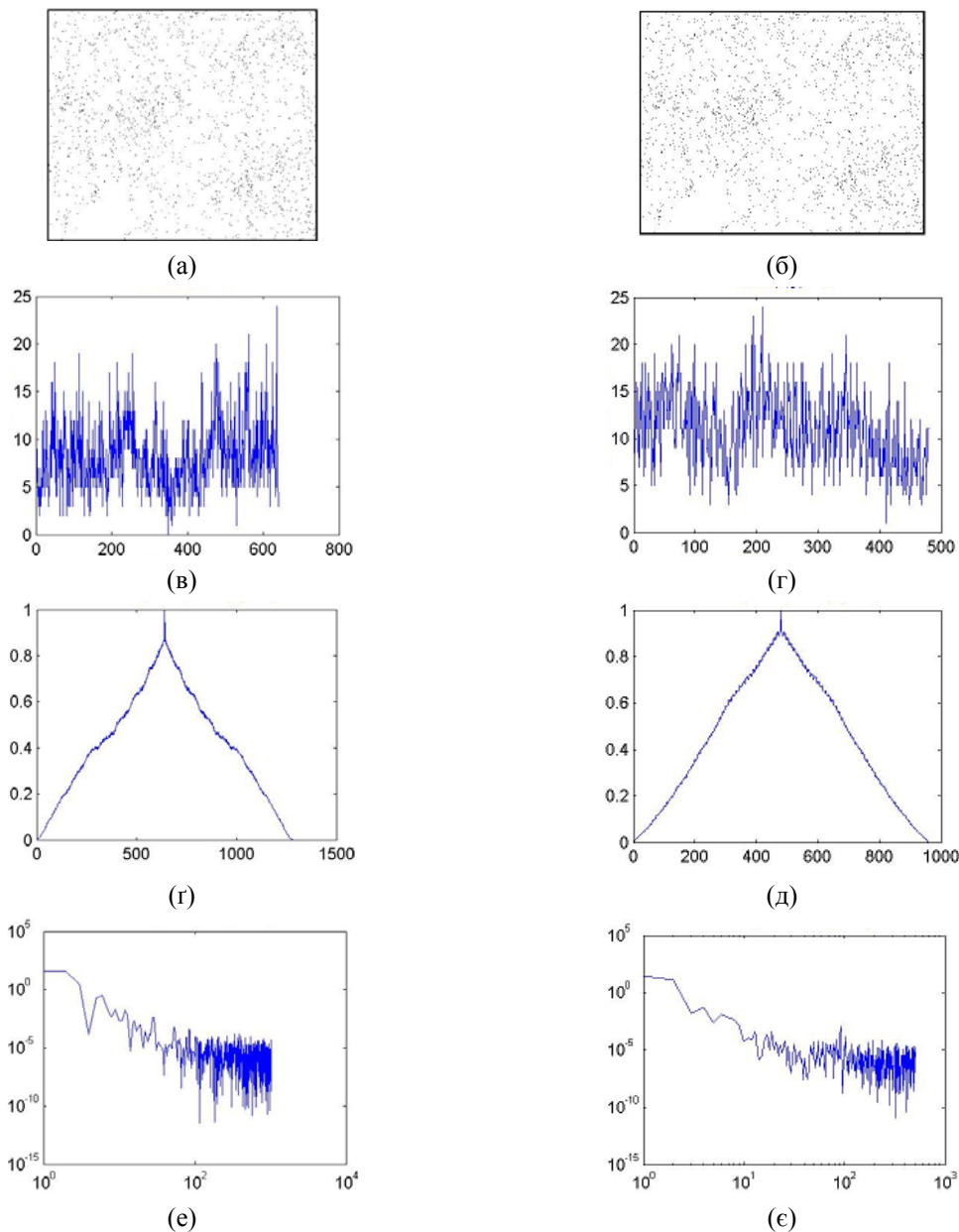


Рис. 3. Параметри «орієнтаційно-фазового» елемента $Z_{34}=1$ лазерних поляризаційних зображень міокарда: а – координатна структура зрізів міокарда при ІХС; б – координатна структура зрізів міокарда при ГКН; в – статистична структура зрізів міокарда при ІХС; г – статистична структура зрізів міокарда при ГКН; р – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ІХС; д – апроксимуючі криві «орієнтаційно-фазового» елемента зрізів міокарда при ГКН; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ІХС; е – фрактальна структура зрізів міокарда при ГКН

«орієнтаційно-фазового» елемента $Z_{34}(m \times n)$ матриці Мюллера тканини міокарда з ІХС та ГКН представлені в таблиці 2 ($N(Z_{34}=1) \equiv N_1$) і таблиці 3 ($N(Z_{34}=0) \equiv N_0$).

Висновки

1. Зміни структури міокарда за умов ішемії розпочинаються з розупорядкованості за напрямом полікристалічних міозинових волокон.

2. Дослідження статистичної структури розподілів кількості екстремальних значень фазового елемента матриці Мюллера тканини міокарда дозволяє не тільки діагностувати гостру коронарну недостатність, але диференціювати з іншими патологічними станами.

3. Найбільш інформативним є використання статистичних моментів 1-4-го порядків $M_{j=2,3,4}(N_1)$ логарифмічних залежностей $\log J(N_1) - \log d^{-1}$ спектрів потужності $J(N_1)$ розподілів $N(Z_{34}=1) \equiv N_1$, кількості екстремальних значень $Z_{34}=1$ «орієнтаційно-фазового» елемента $Z_{34}(m \times n)$ матриці Мюллера лазерних поляризаційних зображень зрізів міокарда.

4. Найбільше діагностичне значення мають наступні діапазони відмінностей між статистичними параметрами розподілів $N(Z_{34}=1) \equiv N_1$, що характеризують оптично анізотропну складову міокарда з ГКН та ІХС: середнє $M_1(N_1)$ (зростання в 1,85 рази); дисперсія $M_2(N_1)$ (зменшення в 3,4 рази); асиметрія $M_3(N_1)$ (збільшення в 1,2 рази) і ексцес $M_4(N_1)$ (збільшення в 3 рази).

Перспективи подальшого дослідження лазерних поляриметричних зображень структури міокарда при ГКН остаточно визначити величину оптичних показників зображень за даної патології для вирішення питань судово-медичної практики.

Література

1. Statistical and Fractal Structure of Biological Tissue Mueller Matrix Images / O.V. Angelsky, A.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko, V.P. Pishak // in Optical Correlation Techniques and Applications, Oleg V. Angelsky, Ed. Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. – 2007. – P. 213-266.
2. 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 // in Handbook of Photonics for Biomedical Science, Valery V. Tuchin, Ed. USA: CRC Press. – 2010. – P. 21-67.
3. Ushenko A.G. Laser Polarimetry of Biological Tissue: Principles and Applications”, in Handbook of Coherent-Domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science / A.G. Ushenko, V.P. Pishak // edited by Valery V. Tuchin, Kluwer Academic Publishers. – 2004. – Vol. 1. – P. 93-138.
4. Ushenko A.G. Polarization structure of laser scattering fields / A.G. Ushenko // Optical Engineering. – 1995. – Vol. 34 (4). – P. 1088-1093.
5. Ushenko A.G. Laser diagnostics of biofractals / A.G. Ushenko // Quantum Electronics. – 1999. – Vol. 29 (12). – P. 1078-1084.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА МЮЛЛЕР - МАТРИЧНОГО ОРИЕНТАЦИОННО - ФАЗОВОГО АНАЛИЗА (СТАТИСТИЧЕСКИЙ И ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД) ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МИОЗИНОВЫХ СЕТЕЙ МИОКАРДА

О.Я. Ванчуляк

Резюме. В статье приведены данные о структуре внеклеточной матрицы миокарда, выявлены начальные структурные изменения сердечной мышцы человека, соответствующие начальным стадиям ишемического повреждения. Определены статистически достоверные критерии для диагностики острой коронарной недостаточности с использованием метода Мюллер-матричного ориентационно- фазового анализа лазерных изображений миокарда человека.

Ключевые слова: Мюллер-матричный анализ, миозин, миокард, острая коронарная недостаточность.

THE USE OF THE METHOD OF THE MULLER-MATRIX ORIENTATION-PHASE ANALYSIS (A STATISTICAL AND FRACTAL APPROACH) WITH A VIEW OF STUDYING MYOSIN NETWORKS OF THE MYOCARDIUM

O.Ya. Vanchuliak

Abstract. The paper deals with the findings of the structure of the extracellular matrix of the myocardium, initial structural changes of the human cardiac muscle, corresponding to early stages of an ischemic injury, have been revealed. The author has established statistically reliable criteria with a view of diagnosing acute coronary insufficiency by using the method of the Muller-matrix orientation-phase analysis of laser polarization images of the human myocardium.

Key words: Muller-matrix analysis, myosin, myocardium, acute coronary insufficiency.

Bukovinian State Medical University (Chernivtsi)

Рецензент – проф. М.В. Шаплавський

Buk. Med. Herald. – 2012. – Vol. 16, № 4 (64). – P. 230-235

Надійшла до редакції 07.03.2012 року