

УДК 681.7: 616-71

Н.І. ЗАБОЛОТНА, В.В. ШОЛОТА, Г.Г. ОКАРСЬКИЙ

ЗОБРАЖАЛЬНА СИСТЕМА ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ВІДТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗУ ОРІЄНТАЦІЙНО-ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ ДВОШАРОВИХ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН

Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

Анотація. Розроблено архітектуру та алгоритм зображальної системи лазерної поляриметрії для відтворення та аналізу орієнтаційно-фазових параметрів двошарових біологічних тканин. Визначено достовірність методу диференціації зразків двошарової біологічної тканини на основі відтворення мюллер-матричних зображень внутрішнього та зовнішнього шарів двошарової біологічної тканини.

Ключові слова: біологічний шар, двошарова біологічна тканина, відтворення та аналіз орієнтаційно-фазових параметрів, лазерна поляриметрія, зображальна система.

Аннотация. Разработана архитектура и алгоритм изобразительной системы лазерной поляриметрии для воспроизведения и анализа ориентационно-фазовых параметров двухслойных биологических тканей. Определены достоверность метода дифференциации образцов двухслойной биологической ткани на основе воспроизведения мюллер-матричных изображений внутреннего и внешнего слоев двухслойной биологической ткани.

Ключевые слова: биологический слой, двухслойная биологическая ткань, воспроизведение и анализ ориентационно-фазовых параметров, лазерная поляриметрия, изобразительная система.

Abstract. The architecture and algorithm of the laser system of polarimetry for the reproduction and analysis of the orientational-phase parameters of two-layer biological tissues have been developed. The validity of the method of differentiation of samples of a two-layer biological tissue on the basis of reproduction of the mueller-matrix images of the inner and outer layers of two-layer biological tissue is determined.

Key words: biological layer, two-layer biological tissue, reproduction and analysis of orientational-phase parameters, laser polarimetry, imaging system.

DOI: 10.31649/1681-7893-2019-37-1-39-49

ВСТУП

Лазерну поляриметрію біологічних тканин та рідин сьогодні визначають як інноваційну технологію медичного діагностування, яка має значні перспективи виявлення патологічних станів на ранніх етапах їх розвитку. Зокрема, оцінювання параметрів структурної анізотропії біологічних шарів при їх взаємодії з поляризованим лазерним випромінюванням дозволяє фіксувати патологічні зміни в гістологічних зрізах біологічних тканин та плівках біологічних рідин на рівні мікрометрів [], що є недоступним для інших засобів медичної діагностики.

В роботах Pierangelo A. [1, 2], S. Alali, A. Vitkin [3], Ghosh N. [4] та ін. [5–11] розглянуто теоретичні засади зображувальної поляриметрії біологічних моношарів як інструментарію для ранньої діагностики захворювань. Основне обмеження зазначених методів пов'язане із відсутністю об'єктивного аналізу вимірних поляризаційних параметрів лазерних зображень біологічних моношарів. В роботах чернівецької наукової школи [12–19] автоматизований аналіз на основі статистичного, кореляційного та фрактального підходів застосовується до розподілів, які одержані у результаті розв'язання лише прямої задачі лазерної поляриметрії БТ, не розповсюджуючи його на розподіли відтворених параметрів анізотропії БШ. Крім того, в зазначених роботах не враховується той факт, що реальні структури гістологічних зрізів біологічних тканин, як правило, є багатошаровими.

Теоретичні засади мюллер-матричного відтворення та багатопараметричного аналізу координатних розподілів орієнтаційних і фазових параметрів структури «екранованих» зовні шарів двошарових оптично тонких БТ розроблено в роботах [20-22]. Разом з тим, реалізація запропонованого методу на відомій системі лазерної поляриметрії з одним каналом поляризаційного аналізу зображень БШ [20-22] потребує вдосконалення для визначення можливості покращення достовірності оцінювання патологічних змін двошарових БШ.

Мета роботи – підвищення достовірності оцінювання патологічних змін двошарових оптично тонких БТ шляхом вдосконалення архітектури зображальної системи поляризаційного відтворення та аналізу розподілів орієнтаційних і фазових параметрів структури «екранованих» зовні шарів.

АРХІТЕКТУРА ТА АЛГОРИТМ РОБОТИ СИСТЕМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ВІДТВОРЕННЯ ТА АНАЛІЗУ РОЗПОДІЛІВ ОРІЄНТАЦІЙНО-ФАЗОВИХ ПАРАМЕТРІВ «ЕКРАНОВАНИХ» ШАРІВ ГІСТОЛОГІЧНИХ ЗРІЗІВ

Метод поляризаційного відтворення координатних розподілів орієнтаційно-фазових параметрів анізотропії двошарової біологічної тканин [20], що складається із зовнішнього шару $\mathbf{A}(\rho_A, \delta_A)$ та внутрішнього шару $\mathbf{B}(\rho_B, \delta_B)$, було реалізовано за допомогою системи зображальної поляриметрії з використанням одноканального вимірювального каналу [21]. Останній забезпечував одноканальне поляризаційне опромінення БШ на довжині хвилі 0,638 мкм серією різнополяризованих пучків та одноканальну різнополяризовану фільтрацію.

Застосовуючи на цій же довжині хвилі багатоканальний поляризаційний аналізатор та розкриваючи особливості архітектури спеціалізованого програмного забезпечення, отримано архітектурну організацію удосконаленої зображальної системи поляризаційного відтворення та аналізу розподілів параметрів анізотропії «екранованих» шарів двошарової біологічної структури, наведену на рис. 1. Відповідний алгоритм вимірювань та аналізу наведено на рис. 2.

Особливість функціонування зазначеної системи полягає в організації роботи блоку поляризаційного сканування. Він здійснює повне обертання площини поляризації лазерного пучка (α_0, β_0) напівпровідникового лазера на довжині хвилі 0,638 мкм шляхом покрокового змінювання азимуту поляризації $\alpha_0 = \theta_i = \theta_{i-1} + \Delta\theta$ поляризаційного лінійного фільтра ПФ (θ_i) на кожному i -му кроці вимірювань ($\Delta\theta$ - величина кроку; $0 \leq \alpha_0 \leq \pi$; i – номер кроку). Керування блоком поляризаційного сканування здійснює кроковий двигун 1.

На кожному i -му кроці багатоканальний поляризаційний аналізатор, який складається із чотирьох лінійних поляризаційних фільтрів ПФ 0° , ПФ 90° , ПФ 45° , ПФ 135° , фільтра «права циркуляція» ПФ \otimes і фільтра «ліва циркуляція» ПФ \oplus , формує відповідні шість координатних розподілів поляризаційно відфільтрованих інтенсивностей лазерних зображень досліджуваної двошарової біологічної структури (вершини 3 – 12, рис. 2). Вони реєструються цифровою камерою з роздільною здатністю $(M \times N)$ пікселів і зберігаються в персональному комп'ютері, де на їх основі відповідним програмним блоком формують двовимірні розподіли елементів вектора Стокса (вершини 13 – 15, рис. 2).

Введений в систему шестиканальний поляризаційний аналізатор за рахунок спеціального конструктивного виконання дозволяє зменшити кількість та види поворотів в поворотних пристроях у порівнянні із відомими технічними рішеннями, використовуючи для управління поворотом лише один кроковий двигун 2. Для цього конструкція блоку передбачає нерухоме, попередньо відкаліброване розміщення шести поляризаційних фільтрів на круговій основі, яка здатна повертатись на кути кратні 60° .

Моніторинг значень елементів вектора Стокса в кожному (m, n) пікселі фотоматриці камери, здійснюється блоком формування оптимального стану поляризаційного скануючого пучка на основі умови, описаної вершинами 16–17, рис. 2. В результаті виконання зазначеної умови за допомогою програмного блоку, описаного вершинами 18-22 на рис. 2, знаходяться відповідні значення напряму оптичної осі $\rho_A(X, Y), \rho_B(X, Y)$ та фазового зсуву $\delta_A(X, Y), \delta_B(X, Y)$ для зовнішнього та «екранованого» внутрішнього біологічного шару двошарової біологічної структури.

На основі відтворених орієнтаційних та фазових мап шарів двошарової БТ можна визначити матриці Мюллера зовнішнього $\mathbf{A}(X, Y)$ та внутрішнього $\mathbf{B}(X, Y)$ шарів за допомогою відповідного блоку архітектури системи, який реалізує функцію **MUL** (див. рис. 2, вершини 21-28).

Крім того, розглянута система, яка містить в своїй архітектурі блок аналізу для визначення інформативних ознак досліджуваних масивів даних, дозволяє одержати сукупність об'єктивних параметрів відтворених орієнтаційних, фазових мап та координатних розподілів елементів матриці

Мюллера внутрішнього та зовнішнього шарів двошарової біологічної структури $\rho_A(X, Y), \rho_B(X, Y), \delta_A(X, Y), \delta_B(X, Y), \mathbf{A}(X, Y), \mathbf{B}(X, Y)$.

Таким чином, запропонована архітектура системи забезпечує можливість відтворення та аналізу орієнтаційних та фазових параметрів структурної анізотропії оптично тонких двошарових біологічних структур, які є об'єктами гістопатологічних досліджень із покращеною точністю. Це слугуватиме одним із чинників підвищення достовірності оцінювання патологічних змін двошарових БТ при її застосуванні.

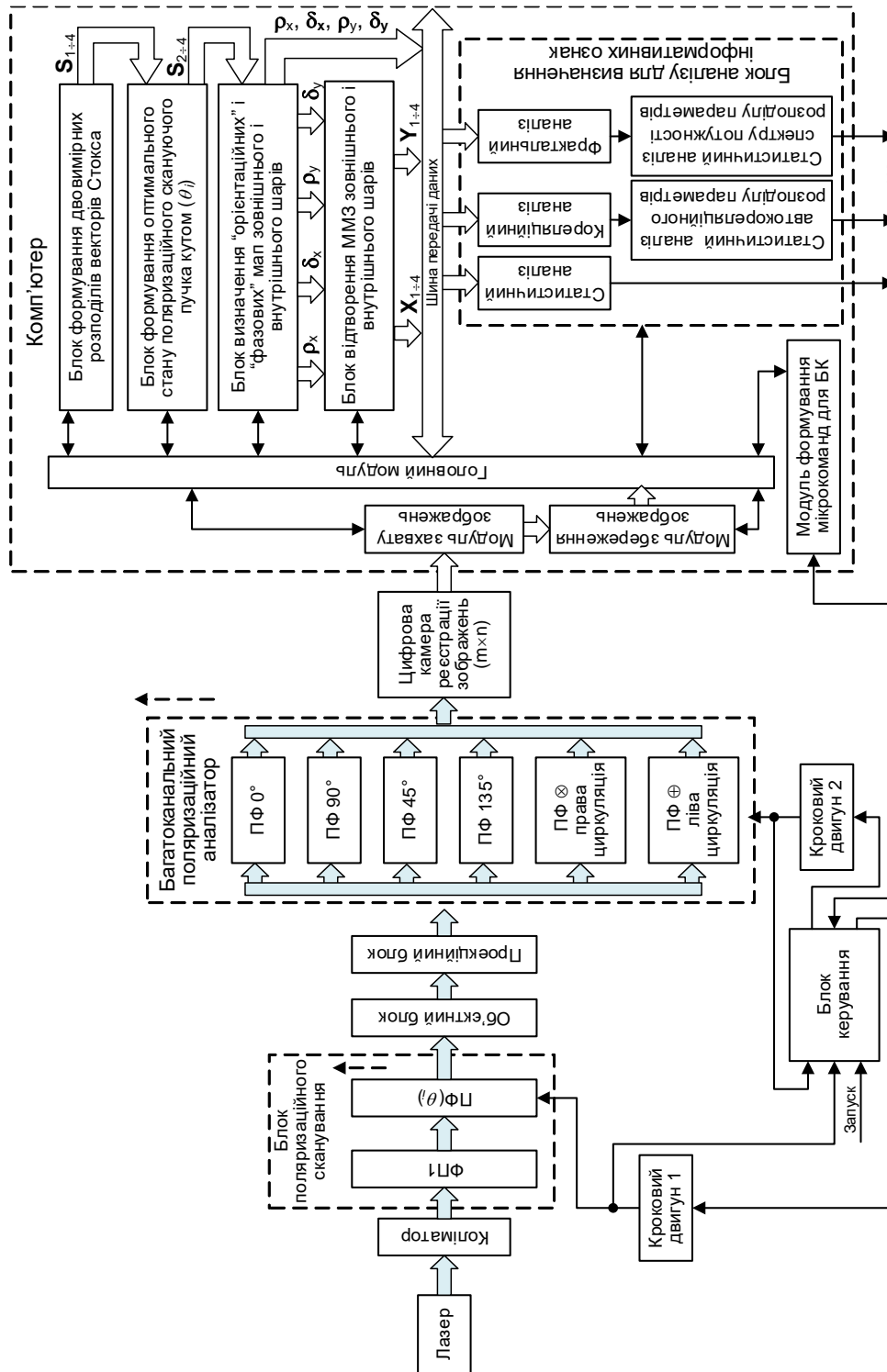


Рис. 1. Архітектура зображальної системи поляризаційного відтворення координатних розподілів елементів матриці Мюллера, орієнтаційних і фазових мап двошарових біологічних тканин

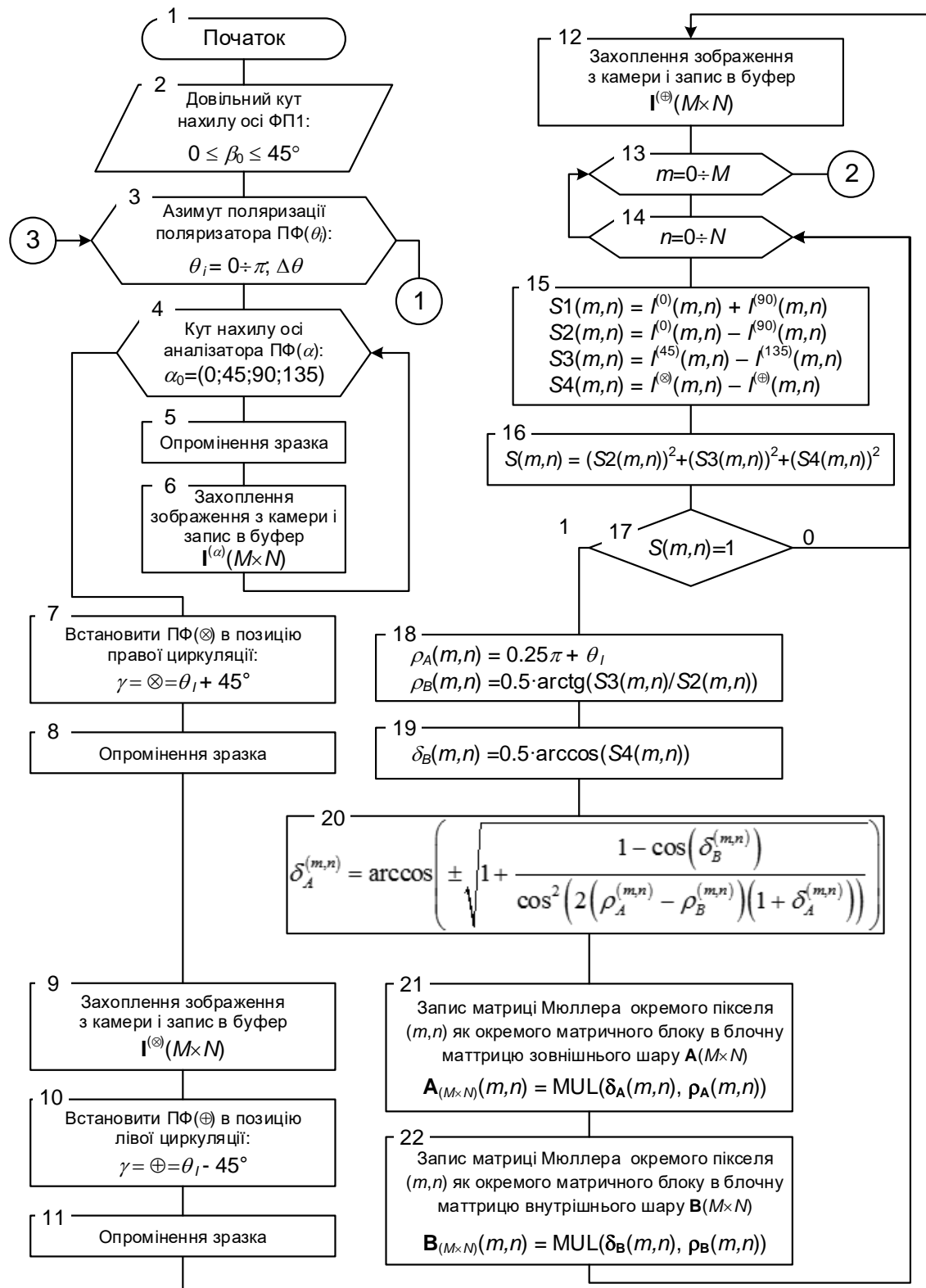


Рис. 2. Алгоритм вимірювань та аналізу

відтворених розподілів параметрів анізотропії парціальних «екранованих» шарів двошарової біологічної структури

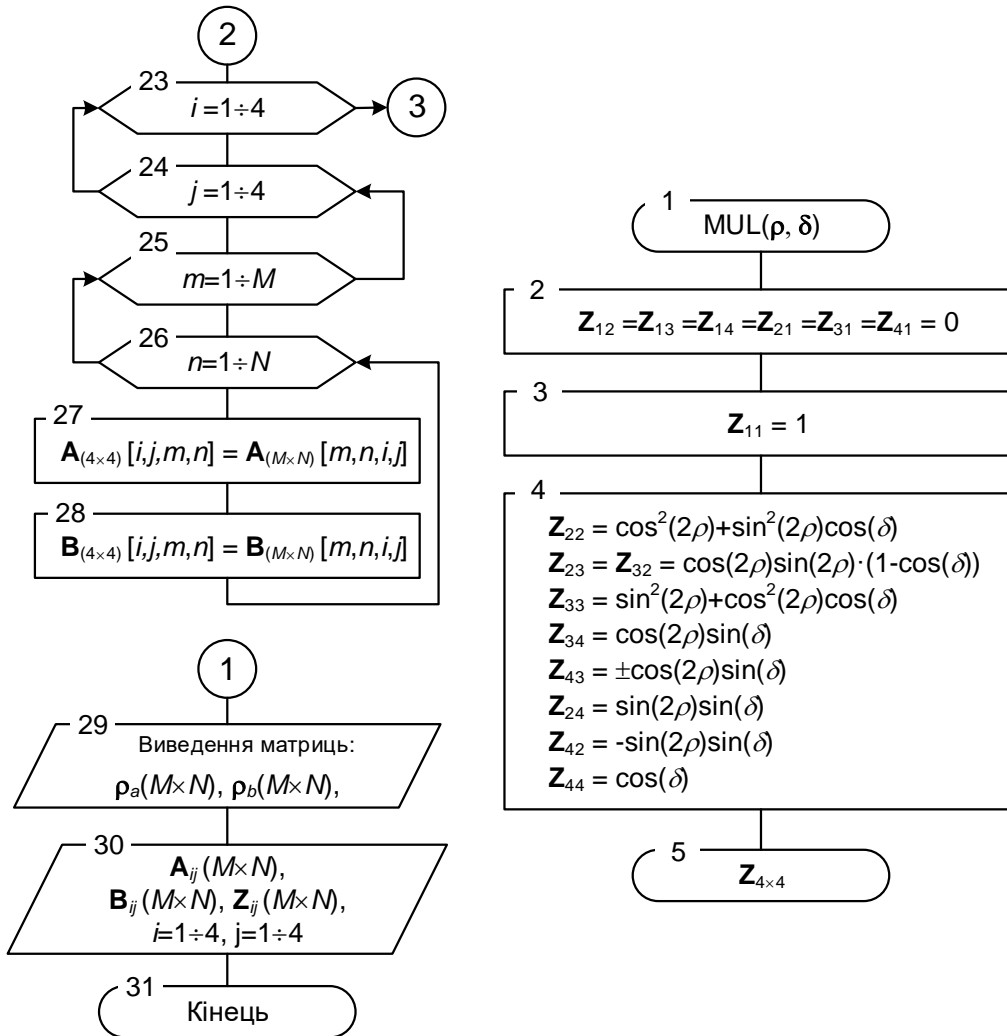


Рис. 2. Продовження.

Тенденції змінювання величин оцінок початкового моменту 1-го порядку та оцінок центральних моментів 2-го – 4-го порядків координатних, кореляційного розподілів та логарифмічних залежностей спектрів потужності розподілів значень елементів відтворених орієнтаційних, фазових мап та координатних розподілів елементів матриці Мюллера двошарової біологічної структури, обумовлені патологічними змінами органів людини, дозволили визначити за допомогою даної системи інформативні ознаки для подальшої діагностики патологій.

ОЦІНЮВАННЯ ДОСТОВІРНОСТІ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОГО ВІДТВОРЕННЯ СТРУКТУРИ «ЕКРАНОВАНОГО» ЗОВНІ ШАРУ ДВОШАРОВОЇ БТ

Порівняємо діагностичну достовірність методу мюллер-матричного відтворення фазової структури «екранованого» зовні БШ двошарової БТ, реалізованого на вищеописаній системі, та аналогів у диференціації станів «норма» – «гепатит» гістологічних зрізів печінки пацюків двох груп. Вибірка двошарових оптично тонких зразків гістологічних зрізів з відсутністю захворювання утворює групу 1 (43 зразки), вибірка зразків з діагнозом «хворі на гепатит» утворює групу 2 (43 зразки).

На серії рис. 3 і рис. 4 наведено двовимірні поляризаційно відтворені фазові мюллер-матричні зображення (ММЗ) $Z_{44}(X, Y)$ «екранованого» гістологічного зрізу печінки пацюків. Окрім цього, кожен з рисунків містить гістограми $N(Z_{44})$ розподілів значень матричного елемента, автокореляційні функції (АКФ) $K(Z_{44})$ і логарифмічні $\log(PSD(Z_{44})) - \log(v)$ залежності спектрів потужності таких розподілів фазових елементів, обчислених для гістологічних зрізів печінки пацюків з групи 1 і групи 2.

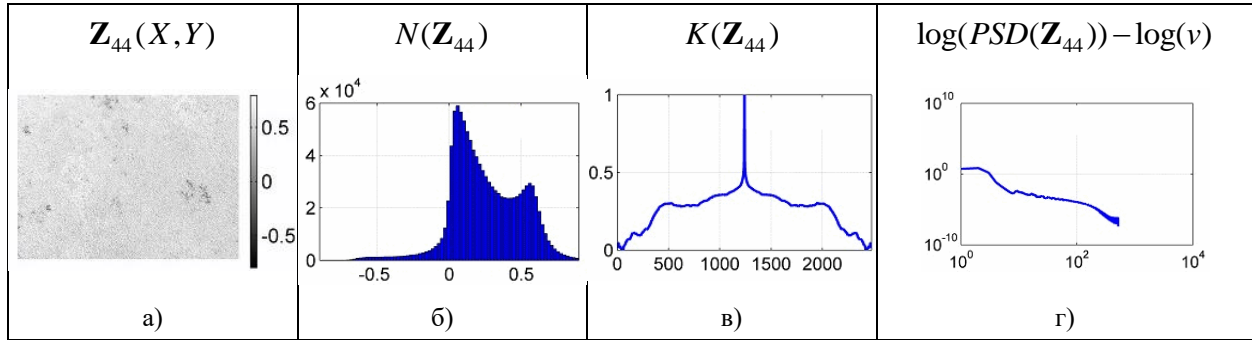


Рис. 3. Характеристики поляризаційно-відтвореного фазового ММЗ «екранованого» зовні БШ печінки пацюка з групи 1: а) координатний розподіл; б) гістограма; в) АКФ розподілу; г) спектр потужності розподілу

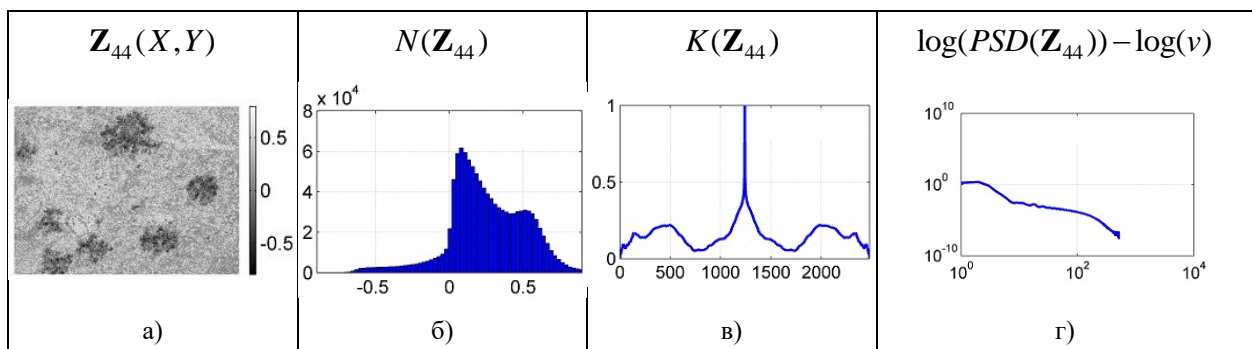


Рис. 4. Характеристики поляризаційно-відтвореного фазового ММЗ «екранованого» зовні БШ печінки пацюка з групи 2: а) координатний розподіл; б) гістограма; в) АКФ розподілу; г) спектр потужності розподілу

Порівняльний аналіз у межах статистичного, кореляційного та фрактального підходів отриманих фазових томограм, які характеризують прояви анізотропії полікристалічної побудови гістологічних зрізів тканини печінки обох типів, виявив певні особливості.

Результати статистичного аналізу діагностичних можливостей методу мюллер-матричного відтворення структури «екранованого» зовні шару двошарової БТ при диференціюванні різних фізіологічних станів печінки двох репрезентативних вибірок пацюків наведені у табл. 1.

Зазначимо, що в таблиці 1 наведено такі позначення: оцінки початкового моменту 1-го порядку (M_1) та оцінки центральних моментів від 2-го до 4-го порядків ($M_2 - M_4$) відтвореного координатного розподілу фазового ММЗ; оцінки початкового моменту 1-го порядку (Q_1) та оцінки центральних моментів від 2-го до 4-го порядків ($Q_2 - Q_4$) розподілу АКФ елементів відтвореного ММЗ [21, 23]; оцінки початкового моменту 1-го порядку (W_1) та оцінки центральних моментів від 2-го до 4-го порядків ($W_2 - W_4$) розподілів значень логарифмічних залежностей спектрів потужностей відтвореного ММЗ [21, 23].

Таблиця 1

Статистичні характеристики координатних розподілів, АКФ та спектрів потужності розподілів елементів поляризаційно відтворених фазових ММЗ «екранованих» зразків тканини печінки пацюків обох груп

g	Група 1	Група 2	g	Група 1	Група 2
M_1	$0,29 \pm 0,021$	$0,33 \pm 0,027$	W_1	$0,68 \pm 0,062$	$0,73 \pm 0,069$
M_2	$0,21 \pm 0,017$	$0,32 \pm 0,025$	W_2	$0,17 \pm 0,011$	$0,21 \pm 0,017$
M_3	$0,92 \pm 0,087$	$1,42 \pm 0,12$	W_3	$0,016 \pm 0,0013$	$0,021 \pm 0,0014$
M_4	$0,78 \pm 0,069$	$0,57 \pm 0,048$	W_4	$0,23 \pm 0,021$	$0,32 \pm 0,029$
Q_2	$0,19 \pm 0,015$	$0,48 \pm 0,031$			
Q_3	$0,53 \pm 0,049$	$1,14 \pm 0,12$			
Q_4	$0,89 \pm 0,085$	$1,27 \pm 0,11$			

Виділені в табл. 1 значення статистичних характеристик координатного розподілу, АКФ і спектру потужності розподілу елементів поляризаційно відтворених фазових ММЗ «екранованих» БШ зразків печінки пацюків групи 1 та групи 2 мають статистично достовірні відмінності.

Установлені наступні значення відношень інформативних діагностичних ознак при диференціації проявів двопронезаломлення БШ печінки пацюків групи 1 та групи 2 за розглянутим методом:

$$\Delta M_2 = \frac{M_2^{sp.2}}{M_2^{sp.1}} = 1,52; \quad \Delta M_3 = \frac{M_3^{sp.2}}{M_3^{sp.1}} = 1,54; \quad \Delta M_4 = \frac{M_4^{sp.2}}{M_4^{sp.1}} = 1,37;$$

$$\Delta Q_2 = \frac{Q_2^{sp.2}}{Q_2^{sp.1}} = 2,53; \quad \Delta Q_3 = \frac{Q_3^{sp.2}}{Q_3^{sp.1}} = 2,15; \quad \Delta Q_4 = \frac{Q_4^{sp.2}}{Q_4^{sp.1}} = 1,43; \quad (1)$$

$$\Delta W_4 = \frac{W_4^{sp.2}}{W_4^{sp.1}} = 1,38.$$

На основі виявлених інформативних ознак було проведено процедуру так званого «сліпого» тестування змішаних зразків обох вибірок, загальна кількість яких склала 86 зразків гістологічних зрізів печінки пацюків.

При ідентифікації досліджуваного стану БШ можливо розглянути 4 типи результатів: «істинно позитивний результат» (TP) – ідентифікація наявності патологічного стану у представників групи «хворі»; «істинно негативний результат» (TN) – ідентифікація відсутності патологічного стану у представників групи «здорові»; «хибно позитивний результат» (FP) – ідентифікація наявності патологічного стану у представників групи «здорові»; «хибно негативний результат» (FN) – ідентифікація відсутності патологічного стану у представників групи «хворі».

Зазначимо, що діагностичним тестом (методом), який застосовується як еталон для порівнюваних з ним методів оцінювання патологічних станів зразків на основі поляризаційно-фазового відтворення та аналізу полікристалічної структури БШ, є метод гістопатологічних досліджень, прийнятий на сьогодні за «золотий стандарт» для будь-яких існуючих діагностичних технологій БТ.

Помилки, які виникають при ідентифікації патологічного стану за допомогою запропонованих нами методів, подаватимемо за допомогою оцінок α – помилок (помилки першого роду, імовірність хибної відмови) β – помилок (помилки другого роду, імовірність невиявленої відмови або пропуск) [24, 25], показників чутливості Se (відношення числа істинно позитивних результатів тестування до числа результатів із патологією), специфічності Sp (відношення числа істинно негативних результатів до числа результатів без патології) та достовірності методу діагностування Ac .

В нашому випадку достовірність або валідність методу оцінювання патологічних станів на основі поляризаційно-фазового відтворення та аналізу полікристалічної структури двошарової БТ показує, в якій мірі отримані статистичні характеристики координатних, кореляційних розподілів та логарифмічних залежностей спектрів потужності розподілів параметрів анізотропії структури двошарової БТ відповідають конкретному стану біологічного об'єкта, який визначається апіорі за допомогою «золотого стандарту».

В результаті було отримано показники достовірності методу мюллер-матричного відтворення структури «екранованого» зовні шару двошарової БТ, реалізованого на архітектурі запропонованої зображальної системи, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Показники достовірності методу мюллер-матричного відтворення фазової структури «екранованого» зовні БШ печінки пацюків у диференціації її станів «норма» – «гепатит»

— Параметр	Розподіл за результ., (зраз.)				Показники достовірності, (%)				
	<i>TP</i>	<i>FN</i>	<i>TN</i>	<i>FP</i>	α	β	<i>Se</i>	<i>Sp</i>	<i>Ac</i>
<i>g</i>									
<i>M</i> ₂	38	5	39	4	9,0	11,6	88,4	91	89,5
<i>M</i> ₃	39	4	37	6	14,0	9,3	90,7	86	88,4
<i>M</i> ₄	37	6	36	7	16,3	14,0	86	83,7	84,9
<i>Q</i> ₂	41	2	41	2	4,7	4,7	95,3	95,3	95,3
<i>Q</i> ₃	39	4	41	2	4,7	9,3	90,7	95,3	93,0
<i>Q</i> ₄	36	7	37	6	14,0	16,3	83,7	86	84,9
<i>W</i> ₄	36	7	37	6	14,0	16,3	83,7	86	84,9

Одержані результати (табл. 2) демонструють оцінку максимального відмінного рівня достовірності 95,3% диференціації структури гістологічних зрізів тканини здорової та хворої на гепатит печінки пацюків, який досягається із реалізацією методу поляризаційного відтворення фазових ММЗ «екранованого» зовні БШ гістологічного зрізу на запропонованій архітектурі системи.

ВИСНОВКИ

Удосконалено архітектуру зображальної системи поляризаційного відтворення та аналізу орієнтаційно-фазових параметрів двошарових біологічних тканин шляхом запровадження шестиканального поляризаційного аналізатора, що дозволило зменшити кількість та номенклатуру видів поворотів в поворотних пристроях системи, та автоматичного комплексного аналізу отриманих розподілів.

Оцінено верхнє значення достовірності 95,3% диференціації станів «норма» – «гепатит» за методом мюллер-матричного відтворення фазової структури «екранованого» зовні БШ двошарової біологічної тканини, реалізованим на удосконалені системі. Виявлено зростання верхньої оцінки достовірності (на $\approx 5\%$) у порівнянні із оцінюванням патологічних змін гістологічних зрізів за методом поляризаційного картографування та аналізу «фазових» мюллер-матричних зображень БШ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Angelo Pierangelo A. Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging / Angelo Pierangelo, Abdelali Benali, Maria-Rosaria Antonelli, [et al.] // Optics Express. – 2011. – Vol. 19. – № 2. – P. 1582–1593.
2. Multispectral Mueller polarimetric imaging detecting residual cancer and cancer regression after neoadjuvant treatment for colorectal carcinomas/ A. Pierangelo, S. Manhas S, A. Benali [et al.] // Journal of Biomedical Optics. – 2013. – Vol.18 (4). – 046014.
3. Alalia S. Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment / Sanaz Alalia, Alex Vitkin // Journal of Biomedical Optics. – 2015. – Vol. 20(6). – 061104.

4. Ghosh N. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook / N. Ghosh, I.A. Vitkin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2011. – V. 16, №11 – 110801.
5. Role of linear and circular polarization properties and effect of wavelength choice on differentiation between ex vivo normal and cancerous gastric samples / W. Wang W., L.G. Lim, S. Srivastava [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2014. – Vol. 19 (40). – 046020.
6. Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues / Ye Wang, Honghui He, Jintao Chang [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – Vol. 21(7). – 071112.
7. He H. Mapping local orientation of aligned fibrous scatterers for cancerous tissues using backscattering Mueller matrix imaging / H.He // *Journal of Biomedical Optics*. – 2014. – Vol. 19(10). – 106007.
8. Ex vivo characterization of normal and adenocarcinoma colon samples by Mueller matrix polarimetry / I. Ahmad, M. Ahmad; K. Khan [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2015. – Vol. 20 (5). – 056012.
9. Maria Rosaria Antonelli. Biomedical applications of polarimetric imaging contrast. Initial studies for scattering media and human tissues. Medical Physics [physics.med-ph]. Ecole Polytechnique X, 2011. English. – Режим доступу: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00652201>
10. Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues / V.V. Tuchin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – Vol. 21. – №7 □ 071114.
11. Savenkov S.N. Mueller-matrix characterization of biological tissues / S.N. Savenkov // *Polarimetric Detection, Characterization and Remote Sensing*. The Netherlands: Springer. – 2011. – P. 437-471.
12. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні тканини людини / [Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Томка Ю.Я. та ін.]; під ред. О.Г. Ушенка. – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2010. – 588 с.
13. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / [Ушенко О.Г., Бойчук Т.М., Дуболазов О.В. та ін.]; під ред. О.Г. Ушенка, Т.М. Бойчука – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2011. – 656 с.
14. Лазерна поляризаційна морфологія біологічних тканин: статистичний і фрактальний підходи / [Ушенко О.Г., Пішак В.П., Ангельський О.В., Ушенко Ю.О.]. – Чернівці: Колір – Друк, 2007. – 341 с.
15. A fractal and statistic analysis of Mueller-matrix images of phase inhomogeneous layers / Y.A. Ushenko, A.V. Dubolozov, A.O. Karachevtcev, N.I. Zabolotna // *Proc. SPIE*. – 2011. – Vol. 8134. – P. 81340P.
16. Evolution of statistic moments of 2D-distributions of biological liquid crystal net Mueller matrix elements in the process of their birefringent structure changes / A.G. Ushenko, I.Z. Misevich, V. Istratiy [et al.] // *Advances in Optical Technologies*. – 2010. – Vol. 2010. – 423145.
17. Ushenko Y.A. Phase maps of polycrystalline human biological fluids networks: statistical, correlation, and fractal analysis / Y.A. Ushenko // *Opto-electron. Rev.* – 2011. – № 19(3). – P. 333–339.
18. Diagnostics of structure and physiological state of birefringent biological tissues: statistical, correlation and topological approaches / Y.A. Ushenko, T.M. Boychuk, V.T. Bachynsky, O.P. Mincer // *Handbook of Coherent-Domain Optical Methods*. – New York: Springer Science+Business Media – 2013. – P. 107-148.
19. Пересунько А.П. Лазерная дифференциальная диагностика гладкомышечных опухолей матки. / А.П. Пересунько // *Клінічна та експериментальна патологія*. – 2013. – Т. 1. – №1(39). – С. 125–128.
20. Zabolotna N.I. Principals and methods of Mueller-matrix tomography of multilayer biological tissues / N.I. Zabolotna, I.V. Musiichuk // *Proc. SPIE*. – 2011. – Vol. 8338. – 833810; doi: 10.1117/12.920930.
21. Zabolotna N.I. A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues / N.I. Zabolotna, K.O. Radchenko // *Proc. SPIE*. – 2014. – Vol. 9205. – 92050V; doi: 10.1117/12.2062140.
22. Заболотна Н.І. Метод поляризаційного відтворення оптико-анізотропної структури підповерхневого шару двошарової біотканини та система для його реалізації / Н.І. Заболотна // *Оптоелектронні інформаційні технології «Фотоніка ОДС-12»: VI Міжнар. наук. – практ. конф., 1-4 жовтня 2012 р.:* зб. тез допов. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2012. – С. 114
23. Заболотна Н.І. Аналітичні основи двовимірної мюллер-матричної томографії оптично товстих багатшарових біологічних тканин. Кореляційний і фрактальний підходи / Н.І. Заболотна // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. – 2010. – №2. – С. 157–163.
24. Корольок И.П. Доказательная радиология: основные принципы и подходы к ее реализации / И.П. Корольок // *Радиология - практика*. – 2007. – №5. – С. 7–21.
25. Юнкеров В.И., Григорьев С.Г. Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований. – СПб.: ВМедА, 2002. – 266 с.

REFERENCES

1. Angelo Pierangelo A. Ex-vivo characterization of human colon cancer by Mueller polarimetric imaging / Angelo Pierangelo, Abdelali Benali, Maria-Rosaria Antonelli, [et al.] // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – № 2. – P. 1582–1593.
2. Multispectral Mueller polarimetric imaging detecting residual cancer and cancer regression after neoadjuvant treatment for colorectal carcinomas/ A. Pierangelo, S. Manhas S, A. Benali [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2013. – Vol.18 (4). – 046014.
3. Alalia S. Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment / Sanaz Alalia, Alex Vitkin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2015. – Vol. 20(6). – 061104.
4. Ghosh N. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook / N. Ghosh, I.A. Vitkin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2011. – V. 16, №11 – 110801.
5. Role of linear and circular polarization properties and effect of wavelength choice on differentiation between ex vivo normal and cancerous gastric samples / W. Wang W., L.G. Lim, S. Srivastava [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2014. – Vol. 19 (40). – 046020.
6. Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues / Ye Wang, Honghui He, Jintao Chang [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – Vol. 21(7). – 071112.
7. He H. Mapping local orientation of aligned fibrous scatterers for cancerous tissues using backscattering Mueller matrix imaging / H.He // *Journal of Biomedical Optics*. – 2014. – Vol. 19(10). – 106007.
8. Ex vivo characterization of normal and adenocarcinoma colon samples by Mueller matrix polarimetry / I. Ahmad, M. Ahmad; K. Khan [et al.] // *Journal of Biomedical Optics*. – 2015. – Vol. 20 (5). – 056012.
9. Maria Rosaria Antonelli. Biomedical applications of polarimetric imaging contrast. Initial studies for scattering media and human tissues. Medical Physics [physics.med-ph]. Ecole Polytechnique X, 2011. English. – Режим доступу: <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00652201>
10. Tuchin V.V. Polarized light interaction with tissues / V.V. Tuchin // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – Vol. 21. – №7 □ 071114.
11. Savenkov S.N. Mueller-matrix characterization of biological tissues / S.N. Savenkov // *Polarimetric Detection, Characterization and Remote Sensing*. The Netherlands: Springer. – 2011. – P. 437 471.
12. Osnovy lazernoi poliarymetrii. Biologichni tkanyny liudyny / [Ushenko O.H., Ushenko Yu.O., Tomka Yu.Ia. ta in.]; pid red. O.H. Ushenka. – Chernivtsi: Chernivetskyi nats. un t, 2010. – 588 s.
13. Osnovy lazernoi poliarymetrii. Biologichni ridyny / [Ushenko O.H., Boichuk T.M., Dubolazov O.V. ta in.]; pid red. O.H. Ushenka, T.M. Boichuka – Chernivtsi: Chernivetskyi nats. un t, 2011. – 656 s.
14. Lazerna poliaryzatsiina morfolohiia biologichnykh tkanyn: statystychnyi i fraktalny pidkhody / [Ushenko O.H., Pishak V.P., Anhel'skyi O.V., Ushenko Yu.O.]. – Chernivtsi: Kolir – Druk, 2007. – 341 s.
15. A fractal and statistic analysis of Mueller-matrix images of phase inhomogeneous layers / Y.A. Ushenko, A.V. Dubolazov, A.O. Karachevtcev, N.I. Zabolotna // *Proc. SPIE*. – 2011. – Vol. 8134. – P. 81340P.
16. Evolution of statistic moments of 2D-distributions of biological liquid crystal net Mueller matrix elements in the process of their birefringent structure changes / A.G. Ushenko, I.Z. Misevich, V. Istratiy [et al.] // *Advances in Optical Technologies*. – 2010. – Vol. 2010. – 423145.
17. Ushenko Y.A. Phase maps of polycrystalline human biological fluids networks: statistical, correlation, and fractal analysis / Y.A. Ushenko // *Opto-electron. Rev.* – 2011. – № 19(3). – P. 333–339.
18. Diagnostics of structure and physiological state of birefringent biological tissues: statistical, correlation and topological approaches / Y.A. Ushenko, T.M. Boychuk, V.T. Bachynsky, O.P. Mincer // *Handbook of Coherent-Domain Optical Methods*. – New York: Springer Science+Business Media – 2013. – P. 107-148.
19. Peresunko A.P. Lazernaia dyfferentsyalnaia diahnostika hladkomyshechnykh opukholei matki. / A.P. Peresunko // *Klinichna ta eksperymentalna patolohiia*. – 2013. – T. 1. – №1(39). – S. 125-128.
20. Zabolotna N.I. Principals and methods of Mueller-matrix tomography of multilayer biological tissues / N.I. Zabolotna, I.V. Musiichuk // *Proc. SPIE*. – 2011. – Vol. 8338. – 833810; doi: 10.1117/12.920930.
21. Zabolotna N.I. A multifunctional automated system of 2D laser polarimetry of biological tissues / N.I. Zabolotna, K.O. Radchenko // *Proc. SPIE*. – 2014. – Vol. 9205. – 92050V; doi: 10.1117/12.2062140.
22. Zabolotna N.I. Metod poliaryzatsiinoho vidtvorennia optyko-anizotropnoi struktury pidpoverkhnevoho sharu dvosharvoi biotkanyny ta systema dlia yoho realizatsii / N.I. Zabolotna // *Optoelektronni informatsiini tekhnolohii «Fotonika ODS-12»: VI Mizhnar. nauk. – prakt. konf., 1-4 zhovtnia 2012 r.: zb. tez dopov.* – Vinnytsia: PP «TD «Edelveis i K», 2012. – S. 114

23. Zabolotna N.I. Analitichni osnovy dvovymirnoi miuller-matrychnoi tomografii optychno tovstyk bahatosharovykh biolohichnykh tkanyn. Koreliatsiinyi i fraktalniy pidkhody / N.I. Zabolotna // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2010. – №2. – S. 157-163.
24. Koroliuk Y.P. Dokazatelna radyolohyia: osnovnye pryntsypy y podkhody k ee realizatsyy / Y.P. Koroliuk // Radyolohyia - praktyka. – 2007. – №5. – S. 7-21.
25. Iunkerov V.Y., Hryhorev S.H. Matematiko-statisticheskaia obrabotka dannykh meditsynskikh issledovaniy. – SPb.: VMedA, 2002. – 266 s.

Надійшла до редакції: 23.04.2019

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА – д.т.н., професор, в.о. завідувача кафедри лазерної та оптикоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

ШОЛОТА ВЛАДИСЛАВА ВЛАДИСЛІВІВНА – студентка 3 курсу бакалаврату факультету комп'ютерних систем та автоматики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, E-mail: vladislava.sholota@gmail.com

ОКАРСЬКИЙ ГЕОРГІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ – студент 4 курсу бакалаврату факультету комп'ютерних систем та автоматики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, E-mail: georgiy.okarskiy@gmail.com