

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ПАТОЛОГІЇ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО КАРТОГРАФУВАННЯ ТА СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ МАП АЗИМУТА ПОЛЯРИЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФАЦІЙ КРОВІ

О.В. Білоокій¹, О.Г. Ушенко², В.В. Білоокій¹, Ю.Я. Томка², В.М. Склярчук

¹ Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

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

Ключові слова: щитоподібна залоза, вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит, папілярний рак, поляриметрія.

Буковинський медичний вісник. 2024. Т. 28, № 3 (111). С. 3-8.

DOI: 10.24061/2413-0737.28.3.111.2024.1

E-mail:

slava.bilookyi@bsmu.edu.ua

Резюме. Вступ. Значним прогресом у галузі біомедичної поляриметричної діагностики стала розробка методів матриці Мюллера, що призвело до створення окремої галузі Мюллерової матричної мікроскопії. Створення нових, добре відтворюваних і більш точних методів лазерної поляриметрії залишається дуже актуальним.

Мета дослідження - встановлення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) малоінвазивної диференціальної діагностики патології щитоподібної залози за допомогою поляризаційно-інтерференційного картографування.

Матеріал і методи. Досліджувалися чотири групи донорів і хворих пацієнтів: 1. Контрольна група 1 – здорові донори (51 пацієнт). 2. Дослідна група 2 – пацієнти з вузловим зобом (51 пацієнт). 3. Дослідна група 3 – пацієнти з аутоімунним тиреоїдитом (51 пацієнт). 4. Дослідна група 4 – пацієнти з папілярним раком (51 пацієнт). Об'єктами дослідження слугували дегідратовані півки (фації) крові.

Результати дослідження. Аналіз результатів статистичного аналізу інтегральних мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові контрольної та сукупності дослідних груп виявив: послідовне зростання середньостатистичної в межах окремих репрезентативних вибірок величини середнього $\langle SM \rangle_1$ розподілів $\alpha(m,n)$ від 0,73 до 1,14; міжгрупові відмінності $\langle SM \rangle_1$ (α) виявилися статистично достовірними на рівні $p_{ik} \leq 0,05$; величина дисперсії $\langle SM \rangle_2$ розподілів $\alpha(m,n)$ коливається в межах від 0,43 до 0,61 і є статистично достовірною лише для виявлення патології [$p_{(12;13;14)} \leq 0,05$], а не її диференціації [$p_{(23;24;34)} > 0,05$]. Максимальну чутливість до міжгрупових змін статистичної структури мап азимута поляризації статистичних моментів вищих порядків, які характеризують асиметрію та ексцес розподілів випадкових значень кута повороту площини поляризації лазерного випромінювання в точках цифрових мікроскопічних зображень. Асиметрія $\langle SM \rangle_3$ (α) статистично достовірно [$p_{(12;13;14)} \leq 0,001$; $p_{(23;24;34)} \leq 0,05$] змінюється в межах від 0,39 до 0,67. Ексцес $\langle SM \rangle_4$ (α) статистично достовірно ($p_{ik} \leq 0,001$) змінюється в межах від 0,53 до 0,89.

Висновок. Результати інформаційного аналізу даних методу поляризаційно-інтерференційного картографування з цифровим голографічним відтворенням поширових мап азимутів поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові виявили підвищення чутливості даного методу до значимого рівня (~91%-93%).

DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF THYROID GLAND PATHOLOGY USING POLARIZATION MAPPING AND STATISTICAL ANALYSIS OF POLARIZATION AZIMUTH MAPS OF DIGITAL MICROSCOPIC IMAGES OF BLOOD FACES

O. Bilookyi, O. Ushenko, V. Bilookyi, Yu. Tomka, V. Sklyarchuk

Key words: thyroid gland, nodular goiter, autoimmune thyroiditis, papillary cancer, polarimetry.

Resume. Introduction. The development of Mueller matrix method was a significant advance in biomedical polarimetric diagnostics, leading to the creation of a separate field of Mueller matrix microscopy. The creation of new, well-reproducible, and more accurate methods of laser polarimetry remains very relevant.

Оригінальні дослідження

Bukovinian Medical Herald.

2024. V. 28, № 3 (111). P. 3-8.

Aim. This study aims to establish new objective criteria (markers) for minimally invasive differential diagnosis of thyroid pathology using polarization-interference mapping.

Material and methods. Four groups of donors and sick patients were studied: 1. Control group 1 - healthy donors (51 patients). 2. Research group 2 – patients with nodular goiter (51 patients). 3. Research group 3 – patients with autoimmune thyroiditis (51 patients). 4. Research group 4 – patients with papillary cancer (51 patients). Dehydrated films (facies) of blood served as the objects of the study.

Research results. The analysis of the results of the statistical analysis of the integral maps of the polarization azimuth of the digital microscopic images of the blood facies of the control and the totality of the experimental groups revealed:

Consistent growth of the statistical average within individual representative samples of the average $\langle SM \rangle_1$ distribution $\alpha(m,n)$ from 0.73 to 1.14.

Intergroup differences $\langle SM \rangle_1$ (α) were statistically significant at the $p_{ik} \leq 0.05$ level.

The value of variance $\langle SM \rangle_2$ of distributions $\alpha(m,n)$ ranges from 0.43 to 0.61 and is statistically significant only for detecting pathology [$p_{(12;13;14)} \leq 0.05$], not its differentiation [$p_{(23;24;34)} > 0.05$].

The maximum sensitivity to intergroup changes in the statistical structure of azimuth polarization maps of statistical moments of higher orders, which characterize the asymmetry and excess of distributions of random values of the angle of rotation of the polarization plane of laser radiation in the points of digital microscopic images. Asymmetry $\langle SM \rangle_3$ (α) varies statistically significantly [$p_{(12;13;14)} \leq 0.001$; $p_{(23;24;34)} \leq 0.05$] from 0.39 to 0.67.

The kurtosis $\langle SM \rangle_4$ (α) varies statistically significantly ($p_{ik} \leq 0.001$) from 0.53 to 0.89.

Conclusion. The results of information analysis of the data of the method of polarization-interference mapping with digital holographic reproduction of layer-by-layer maps of polarization azimuths of digital microscopic images of blood facies revealed an increase in the sensitivity of this method to a significant level (~91%-93%).

Вступ. Поляриметричні дослідження виокремилися як окремий напрям у галузі оптичного аналізу біологічних тканин. Аналіз поляризаційних характеристик розсіяного випромінювання дозволяє отримати якісно нове уявлення про морфологічний та фізіологічний стан біологічних тканин [1,2,3].

Значним прогресом у галузі біомедичної поляриметричної діагностики стала розробка методів матриці Мюллера, що призвело до створення окремої галузі Мюллерової матричної мікроскопії (МММ) [4-6].

Разом з тим, основним інформаційним обмеженням поляриметричного картування є залежність експериментальних даних від ступеня деполаризації лазерного випромінювання, яка спотворює зв'язки між мікроскопічними зображеннями і морфологічними параметрами біологічних шарів [7-9]. Тому створення нових, добре відтворюваних і більш точних методів лазерної поляриметрії залишається дуже актуальним.

В основу модельного аналізу оптичних властивостей полікристалічних плівок крові щитоподібної залози нами покладено результати групи професора Олександра Ушенка [2]. Головна ідея цих досліджень полягає в тому, що процес зневоднення (дегідратації) плівок крові призводить шляхом природньої молекулярної самозборки протеїнових молекул до формування полікристалічних

надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж оптично анізотропної фації.

Наведені модельні уявлення про оптичні властивості фації крові щитоподібної залози складають фундаментальні підвалини нашого дослідження. В його основу покладено ідею пошуку і діагностичного використання сукупності взаємозв'язків між структурою мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові та наступними патологічними станами:

- вузловий зоб – зростання оптичної активності хіральных молекулярних теріоглобулінових білкових комплексів за рахунок збільшення фолікул та формування полікристалічного структурного двопронезаломлення за рахунок вузлового розростання сполучної тканини;

- аутоімунний тиреоїдит – за рахунок плоскоклітинної метаплазії фолікулярних клітин, збільшення їх розмірів формуються співрозмірні прояви оптичної активності хіральных теріоглобулінових білкових молекулярних комплексів та зростання рівня полікристалічного структурного двопронезаломлення внаслідок формування мережі фіброзних тяжів;

- папілярний рак – переважний вплив структурного двопронезаломлення за рахунок гіперплазії у вигляді довгастих папілярних утворень на тлі певного

зменшення оптичної активності внаслідок руйнації хіральных теріоглобулінових білкових молекулярних комплексів [10].

Мета дослідження – встановлення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) малоінвазивної диференціальної діагностики патології щитоподібної залози за допомогою поляризаційно-інтерференційного картографування.

Матеріал і методи Методологія поляризаційно-інтерференційного методу полягає у використанні платформи оптичного лазерного поляризаційно-модифікованого інтерферометра. Тут за допомогою 50% світлоподільника розділяють лазерний промінь на два пучки – опромінюючий і опорний. За допомогою систем “лінійний поляризатор-чвертьхвильова пластинка” формують циркулярно поляризовані стани опромінюючого і опорного когерентних лазерних пучків. Обертальним дзеркалом спрямовують циркулярно поляризований опромінюючий пучок на досліджуваній препарат щитоподібної залози.

Поляризаційно промодульоване зображення препарату мікрооб'єктивом проєктується в площину світлочутливих пікселів цифрової камери. Другим обертаючим дзеркалом спрямовують циркулярно поляризовану опорну когерентну хвилю в площину мікроскопічного зображення досліджуваного препарату. У результаті формується поляризаційно-інтерференційна картина мікроскопічного зображення. Така картина поляризаційно фільтрується лінійним аналізатором, вісь пропускання якого послідовно орієнтується відносно площини падіння на кути 0 і $\pi/2$. Одержані поляризаційно відфільтровані інтерференційні картини реєструється сукупністю пікселів цифрової CCD камери. Цифрові поляризаційно-інтерференційні розподіли накопичується в інтерфейсі блоку комп'ютерного аналізу. На цій основі обчислюються пошарові мапи азимута поляризації мікроскопічного зображення фації крові.

Коротка характеристика груп хворих і об'єктів дослідження. Досліджувалися чотири групи донорів і хворих пацієнтів:

Контрольна група 1 – здорові донори (51 пацієнт).

Дослідна група 2 – пацієнти з вузловим зобом (51 пацієнт).

Дослідна група 3 – пацієнти з аутоімунним тиреоїдитом (51 пацієнт).

Дослідна група 4 – пацієнти з папілярним раком (51 пацієнт).

Об'єктами дослідження слугували дегідратовані плівки (фації) крові.

У таблиці 1 представлені оптико-геометричні параметри об'єктів дослідження.

Таблиця 1

Оптико-геометричні параметри фації крові

Фації крові	
Геометрична товщина, $d, \mu m$	$25 \pm 0,33$
Коефіцієнт ослаблення, τ	$0,18 \pm 0,04$
Ступінь деполіризації, $\Delta, \%$	25-32

Результати дослідження та їх обговорення. На серії фрагментів рис. 1 представлені результати експериментального вимірювання методом поляризаційного картографування інтегральних мап (фрагменти (1)) і гістограм (фрагменти (2)) координатних розподілів $((m, n))$ випадкових значень величини азимута поляризації $\alpha(m, n)$ сукупності пікселів цифрових мікроскопічних зображень експериментальних зразків фацій крові донорів (контрольна група 1) і пацієнтів з різною патологією щитоподібної залози (дослідні групи 2-4).

З аналізу одержаних даних виявлено наявність поляризаційної структурності азимутів поляризації цифрових мікроскопічних зображень зразків фацій крові всіх досліджених груп здорових донорів і хворих пацієнтів (рис. 1, фрагменти (1)).

Усі поляризаційні мапи $\alpha(m, n)$ являють собою координатно-неоднорідні розподіли величини азимута лазерних електромагнітних коливань і топографічно сформовані поляризаційними доменами різної форми та геометричного масштабу.

Кількісно даний результат ілюструють гістограми (рис. 1, фрагменти (2)) розподілів випадкових значень величини азимута α поляризації у точках (m, n) цифрових мікроскопічних зображень.

Для кожного типу зразків фацій крові гістограми володіють значним діапазоном зміни випадкових значень величини азимута α поляризації ($0 \leq \alpha \leq \pi$) та індивідуально локалізованими екстремумами α_{max} .

Міжгруповий порівняльний аналіз координатної та ймовірнісної структури мап азимута поляризації експериментальних зразків фацій крові виявив тенденцію послідовного від контрольної групи 1 до дослідних груп 2 (вузловий зоб), 3 (аутоімунний тиреоїдит) і 4 (папілярний рак) зростання оптичної активності надмолекулярних полікристалічних мереж.

На даний факт вказує послідовне “зміщення” в бік більших значень основних екстремумів гістограм розподілів випадкових величин азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові з усіх груп (рис.1, фрагменти (2)).

Кількісно виявлений сценарій патологічних змін полікристалічної структури надмолекулярних мереж фацій крові ілюструють результати статистичного аналізу, які представлені в таблиці 2.

Аналіз результатів статистичного аналізу інтегральних мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові контрольної та сукупності дослідних груп виявив:

- Послідовне зростання середньостатистичної в межах окремих репрезентативних вибірок величини середнього SM_1 розподілів $\alpha(m, n)$ від 0,73 до 1,14.
- Міжгрупові відмінності $SM_1(\alpha)$ виявилися статистично достовірними на рівні $p_{ik} \leq 0,05$.
- Величина дисперсії SM_2 розподілів $\alpha(m, n)$ коливається в межах від 0,43 до 0,61 і є статистично достовірною лише для виявлення патології ($p_{12;13;14} \leq 0,05$), а не її диференціації ($p_{23;24;34} > 0,05$).
- Максимальну чутливість до міжгрупових змін

Оригінальні дослідження

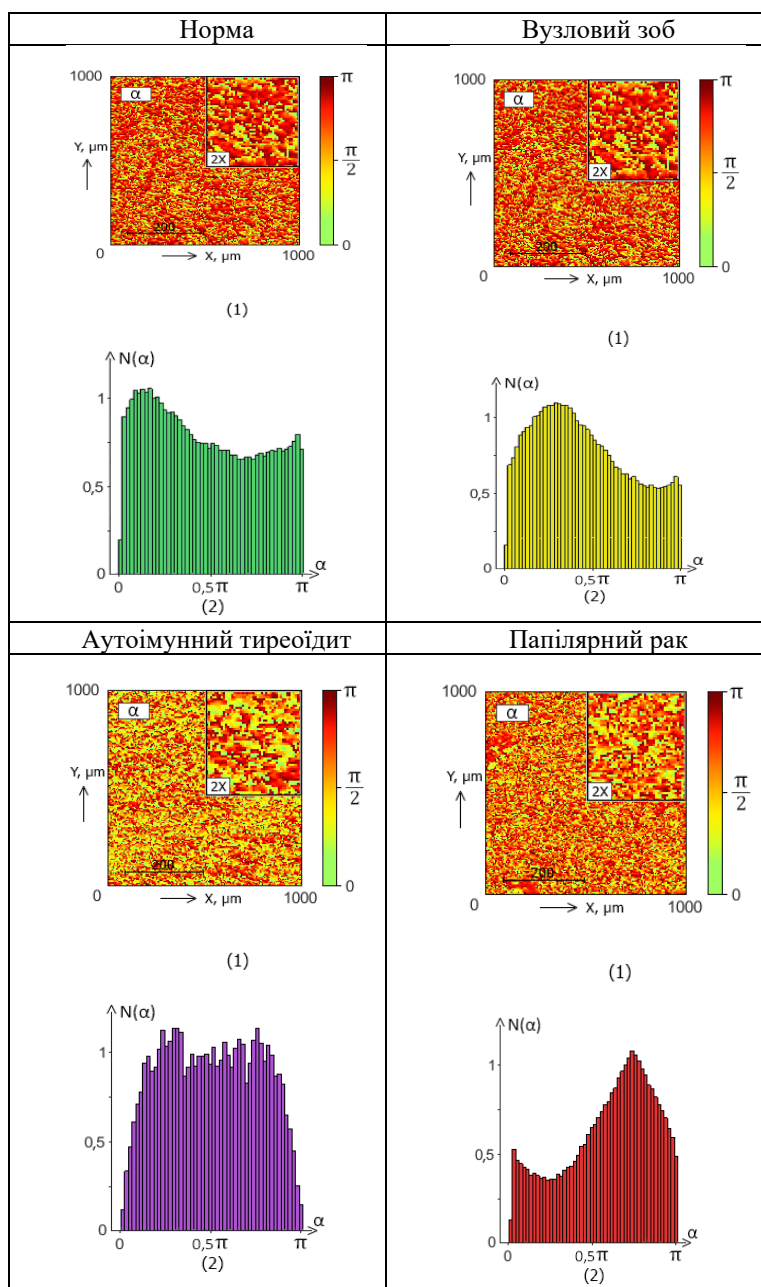


Рис. 1. Поляризаційні мапи $\alpha(t, n)$ (фрагменти (1)) і гістограми (фрагменти (2)) розподілів величини азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фації крові донорів і хворих пацієнтів з дослідних груп

Таблиця 2

Статистичні параметри мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фації крові донорів і пацієнтів з різною патологією щитоподібної залози

Група	Група 1 (51 зразок)	Група 2 (51 зразок)	Група 3 (51 зразок)	Група 4 (51 зразок)
Середнє, SM_1	$0,73 \pm 0,019$	$0,88 \pm 0,042$	$0,94 \pm 0,065$	$1,14 \pm 0,088$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24} \leq 0,05; p_{34} \leq 0,05$			
Дисперсія, SM_2	$0,43 \pm 0,023$	$0,49 \pm 0,029$	$0,55 \pm 0,036$	$0,61 \pm 0,041$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24} > 0,05; p_{34} > 0,05$			
Асиметрія, SM_3	$0,67 \pm 0,038$	$0,58 \pm 0,033$	$0,49 \pm 0,024$	$0,39 \pm 0,018$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24} \leq 0,05; p_{34} \leq 0,05$			
Ексцес, SM_4	$0,89 \pm 0,052$	$0,71 \pm 0,038$	$0,62 \pm 0,029$	$0,53 \pm 0,021$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24} \leq 0,001; p_{34} \leq 0,001$			

статистичної структури мап азимута поляризації статистичних моментів вищих порядків, які характеризують асиметрію та ексцес розподілів випадкових значень кута повороту площини поляризації лазерного випромінювання в точках цифрових мікроскопічних зображень.

- Асиметрія $SM_3(\alpha)$ статистично достовірно ($p_{12;13;14} \leq 0,001$; $p_{23;24;34} \leq 0,05$) змінюється в межах від 0,39 до 0,67.

- Ексцес $SM_4(\alpha)$ статистично достовірно ($p_{ik} \leq 0,001$) змінюється в межах від 0,53 до 0,89.

З біофізичної точки зору одержані результати добре корелюють із наведеними модельними уявленнями і прогностичними сценаріями патологічних змін полікристалічної структури надмолекулярних мереж фацій крові донорів і пацієнтів з різних дослідних груп.

Відомим фактом є зростання концентрації глобулінових комплексів у крові за наявності патологічних станів. У свою чергу, оптично активні формени елементи та глобулінові білкові комплекси формують координатно розподілені ($m \times n$ – сукупність пікселів цифрової камери) повороти площини поляризації α або мапи азимута поляризації $\alpha(m, n)$. Тому, із наростанням концентрації хіральных оптично активних структур (“норма – вузловий зоб – аутоімунний тиреоїдит – папілярний рак”) зростає середнє і дисперсія розподілів азимута поляризації $\alpha(m, n)$. Проте динаміка зміни статистичних моментів 1-го і 2-го порядків виявилася незначною – міжгрупові відмінності між їх величинами не перевищують 45 - 55%. Значно більш чутливою виявилася динаміка змін статистичних моментів 3-го і 4-го порядків, міжгрупові відмінності між якими досягають 80 – 90%.

У таблиці 3 наведено величини збалансованої точності диференціальної діагностики патологій щитоподібної залози за статистичним аналізом мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові здорових донорів і пацієнтів з вузловим зобом, хворих на аутоімунний тиреоїдит і хворих на папілярний рак щитоподібної залози.

Тут a – загальна кількість правильних результатів ($A + B$) серед всіх зразків відповідно до контрольної групи 1 і послідовно до дослідних груп 2 (вузловий зоб), 3 (аутоімунний тиреоїдит) і 4 (папілярний рак);

b – загальна кількість хибних результатів ($N + H$) серед усіх зразків відповідно до контрольної групи 1 і послідовно до дослідних груп 2; 3 і 4.

Дані інформаційного аналізу виявили найбільш оптимальним маркери методу інтегрального картографування мап азимутів поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові і продемонстрували наступні рівні збалансованої точності диференціальної діагностики патологій щитоподібної залози.

Діагностика патологій щитоподібної залози:

- “норма - вузловий зоб” $Ac_{12}(SM_3; SM_4) \sim 84\%$ – “задовільний” рівень;

- “норма-аутоімунний тиреоїдит” $Ac_{13}(SM_3; SM_4) \sim 86\% - 87\%$ - “хороший” рівень;

- “норма – папілярний рак” $Ac_{14}(SM_3; SM_4) \sim 88\%$ - “хороший” рівень;

- диференціальна діагностика (дослідні групи “2 – 3”; “2 – 4”; “3 – 4”) - $Ac_{23;24;34}(SM_3; SM_4) \sim 80\%$ - “задовільний” рівень.

Одержані дані дозволяють дійти двох висновків –

Таблиця 3

Збалансована точність диференціальної діагностики патологій щитоподібної залози за статистичним аналізом мап азимута поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові

Середнє, SM_1		
$a = 86$	$a = 89$	$a = 90$
$b = 16$	$b = 13$	$b = 12$
$Ac_{12} = 85,3\%$	$Ac_{13} = 87,3\%$	$Ac_{14} = 88,2\%$
$a = 81$	$a = 83$	$a = 84$
$b = 21$	$b = 19$	$b = 18$
$Ac_{23} = 79,4\%$	$Ac_{24} = 81,4\%$	$Ac_{34} = 82,4\%$
Дисперсія, SM_2		
$a = 79$	$a = 80$	$a = 81$
$b = 23$	$b = 22$	$b = 21$
$Ac_{12} = 77,4\%$	$Ac_{13} = 78,4\%$	$Ac_{14} = 79,4\%$
$a = 75$	$a = 76$	$a = 78$
$b = 27$	$b = 26$	$b = 24$
$Ac_{23} = 73,5\%$	$Ac_{24} = 74,5\%$	$Ac_{34} = 76,4\%$
Асиметрія, SM_3		
$a = 85$	$a = 88$	$a = 89$
$b = 17$	$b = 14$	$b = 13$
$Ac_{12} = 84,3\%$	$Ac_{13} = 86,3\%$	$Ac_{14} = 87,3\%$
$a = 80$	$a = 82$	$a = 83$
$b = 22$	$b = 20$	$b = 19$
$Ac_{23} = 78,4\%$	$Ac_{24} = 80,4\%$	$Ac_{34} = 81,4\%$
Ексцес, SM_4		
$a = 86$	$a = 89$	$a = 90$
$b = 16$	$b = 13$	$b = 12$
$Ac_{12} = 85,3\%$	$Ac_{13} = 87,3\%$	$Ac_{14} = 88,2\%$
$a = 82$	$a = 83$	$a = 84$
$b = 20$	$b = 19$	$b = 18$
$Ac_{23} = 80,4\%$	$Ac_{24} = 81,4\%$	$Ac_{34} = 82,4\%$

“позитивний” і “негативний”.

“Позитивний” – метод поляризаційного картографування цифрових мікроскопічних зображень фацій крові виявився чутливим до патологічних станів щитоподібної залози і продемонстрував можливість їх диференціації.

“Негативний” – високий рівень деполаризованого фону розсіяного в об’ємі фацій лазерного випромінювання спотворює прямі взаємозв’язки між мапами азимутів поляризації та оптично анізотропною архітектонікою надмолекулярних мереж. Внаслідок цього збалансована точність диференціальної діагностики не перевищує задовільного рівня - $Ac_{23;24;34}(SM_3; SM_4) \sim 80\%$.

Наступним кроком стало дослідження можливостей покращення збалансованої точності з використанням методу поляризаційно-інтерференційного картографування фацій крові, який забезпечує можливість усунення спотворюючого деполаризованого розсіяного фону шляхом одержання поширових мап азимута поляризації надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж.

Висновки

1. Метод поляризаційного картографування цифрових мікроскопічних зображень фацій крові виявився чутливим до патологічних станів

Оригінальні дослідження

щитоподібної залози і продемонстрував можливість їх диференціації. Але в той же час високий рівень деполаризованого фону розсіяного в об'ємі фації лазерного випромінювання спотворює прямі взаємозв'язки між мапами азимутів поляризації та оптично анізотропною архітектонікою надмолекулярних мереж. Внаслідок цього збалансована точність диференціальної діагностики не перевищує задовільного рівня - $[\text{Ac}]_{(23;24;34)}([\text{SM}]_{-3;SM}_{-4}) \sim 80\%$.

2. Результати інформаційного аналізу даних методу

поляризаційно-інтерференційного картографування з цифровим голографічним відтворенням пошарових мап азимутів поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові виявили підвищення чутливості даного методу до дуже хорошого рівня ($\sim 91\% - 93\%$).

Подяки

Автори висловлюють подяку за підтримку Національного фонду досліджень України, Проект 2022.01/0034; Стипендія Верховної Ради України для молодих учених - докторів наук.

References

1. Wang LV, Wu H-I. Biomedical Optics. Biomedical Optics: Principles and Imaging. John Wiley & Sons, Inc; 2009. 376 p.
2. Ushenko AG, Pishak VP. Laser Polarimetry of Biological Tissues: Principles and Applications. In: Tuchin V. V. editor. Handbook of Coherent Domain Optical Methods. Springer US; 2004. p. 93-138.
3. Ghosh N, Vitkin IA. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. J Biomed Opt. 2011 Nov;16(11):110801. DOI: 10.1117/1.3652896.
4. Jacques SL. Polarized light imaging of biological tissues. In: Boas D., Pitris C. & Ramanujam N., editors. Handbook of Biomedical Optics 2. Boca Raton: CRC Press; 2011. p. 649-69.
5. Ghosh N, Wood M, Vitkin A. Polarized Light Assessment of Complex Turbid Media Such as Biological Tissues Using Mueller Matrix Decomposition. In: Tuchin VV, editor. Handbook of Photonics for Biomedical Science. Boca Raton: CRC Press; 2010. p. 253-82.
6. Layden D, Ghosh N, Vitkin I. A. Quantitative polarimetry for tissue characterization and diagnosis. In: Wang RK, Tuchin VV. editors. Advanced Biophotonics: Tissue Optical Sectioning. Boca Raton: CRC Press; 2013. p. 73-108.
7. Vitkin A, Ghosh N, de Martino A. Tissue Polarimetry. in Photonics: Scientific Foundations, Technology and Applications. In: ed. Andrews, D. L. editor. John Wiley & Sons, Ltd; 2015. p. 239-321.
8. Grygorij Tymchik, Kolobrodov VH, Mykytenko VI. Polarization model of thermal contrast observation objects. Thermotlectricity. 2020;1:36-49.
9. Kolobrodov VG, Nguyen QA, Tymchik GS. The problems of designing coherent spectrum analyzers. Proc. of SPIE. 2013;9066. Available from: https://pub.f.kpi.ua/en/docs/publications/KolobrodovTymchikNguyen_Problems_designing_coherent_spectrum_analyzers.pdf.
10. Tymchik G, Skytsyuk VI, Klotchko TR, Ławicki T, Demsova N. Distortion of geometric elements in the transition from the imaginary to the real coordinate system of technological equipment. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments. 2018; Proceedings Volume 108085C <https://doi.org/10.1117/12.2501624>.

Відомості про авторів

Білоокій Олександр В'ячеславович – канд. мед. наук, доцент кафедри хірургії №1 закладу вищої освіти Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-4190-313X>

Ушенко Олександр Григорович – д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-7015-7423>.

Білоокій В'ячеслав Васильович – д-р мед. наук, професор кафедри хірургії №1 закладу вищої освіти Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-9921-7178>

Томка Юрій Ярославович – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0002-0495-3090>.

Склярчук Валерій Михайлович – д-р фіз.-мат. наук, доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-8211-4391>

Information about the authors

Bilookyi Oleksandr – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of Department of Surgery №1, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine.

Oleksandr Ushenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuri Fedkovych Chernivtsi National University.

Bilookyi Viacheslav – Doctor of Medical Sciences, Professor of Department of Surgery №1, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine.

Yuriy Tomka - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Sciences, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University.

Valeriy Sklyarchuk - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

Надійшла до редакції 02.08.24

Рецензент – проф. Шкварковський І.В.

© О.В. Білоокій, О.Г. Ушенко, В.В. Білоокій,

Ю.Я. Томка, В.М. Склярчук, 2024