

Міністерство охорони здоров'я України
Буковинський державний медичний університет

БУКОВИНСЬКИЙ МЕДИЧНИЙ ВІСНИК

DOI: 10.24061/2413-0737.29.1

Український науково-практичний журнал

Заснований у лютому 1997 року

Видається 4 рази на рік

Включений до Ulrichsweb™ Global Serials Directory, наукометричних і спеціалізованих баз даних Google Scholar (США), Index Copernicus International (Польща), Scientific Indexing Services (США), Infobase Index (Індія), Ukrainian research & Academy Network (URAN), НБУ ім. Вернадського, “Джерело”

ТОМ 29, № 1 (113)

2025

Редакційна колегія:

головний редактор Геруш І.В.,
Беліков О.Б., Боднар О.Б., Бойчук Т.М., Ванчуляк О.Я.,
Гринчук Ф.В., Давиденко І.С., Іващук О.І., Ілащук Т.О.,
Коваль Г.Д., Колоскова О.К.,
Кривецький В.В. (заступник головного редактора),
Максим'юк В.В., Пашковська Н.В.,
Проняєв Д.В. (відповідальний секретар), Сидорчук Л.П.,
Сокольник С.В., Ташук В.К., Ткачук С.С.,
Федів О.І., Цигикало О.В., Шкварковський І.В.

Чернівці: БДМУ, 2025

Редакційна рада:

К.М. Амосова (Київ), В.В. Бойко (Харків),
А.І. Гоженко (Одеса), В.М. Запорожан (Одеса),
В.М. Коваленко (Київ), З.М. Митник (Київ),
В.І. Паньків (Київ), В.П. Черних (Харків),
Герхард Дамман (Швейцарія),
Збігнев Копанські (Польща),
Дірк Брутцерт (Бельгія),
Раду Крістіан Дабіша (Румунія),
Віктор Ботнару (Молдова), І.М. Катеренюк (Молдова),
Наталія Мельник (Чехія)

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет рішенням вченої ради
Буковинського державного медичного університету
(протокол № 7 від 27.03.2025 року)

Буковинський медичний вісник
(Бук. мед. вісник)
Bukovinian Medical Herald
(Buk. Med. Herald) – науково-практичний
журнал, що рецензується, заснований у лютому
1997 р. Видається 4 рази на рік.
Мова видання: українська, англійська.
Сфера розповсюдження загальнодержавна,
зарубіжна. Свідectво про державну
реєстрацію: серія КВ №15684-4156 ПР
від 21.09.2009. Наказом Міністерства освіти і
науки України від 17 березня 2020 року № 409
журнал “Буковинський медичний вісник”
включено до категорії "Б" (медичні
спеціальності – 222) переліку наукових
фахових видань України

Витяг з реєстру суб'єктів у сфері медіа –
реєстрантів, виданий Буковинському
державному медичному університету,
м. Чернівці, код ЕДРОПУ 02010971.
Ідентифікатор медіа R30-03255. Назва
медіа «Буковинський медичний вісник»
«Bukovinian Medical Herald». Рішення
Національної ради України з питань
телебачення і радіомовлення про
реєстрацію від 28.03.2024 № 1037.
Адреса редакції: 58002, м. Чернівці,
пл. Театральна, 2
Тел.: (0372) 55-37-54, 52-39-63
Факс: (0372) 55-37-54
e-mail: bmh@bsmu.edu.ua
Адреса електронної версії журналу в
Internet: <http://e-bmv.bsmu.edu.ua/>

ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ПАТОЛОГІЇ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ МЕТОДОМ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ МАП ЕЛІПТИЧНОСТІ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НАТИВНИХ ГІСТОЛОГІЧНИХ ЗРІЗІВ

О.В. Білоокий¹, О.Г. Ушенко², В.В. Білоокий¹, О.В. Дуболазов², В.М. Склярчук², Д.В. Проняєв¹

¹Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

²Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці, Україна

Ключові слова: Мюллер-матрична поляриметрія, вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит, папілярний рак, щитоподібна залоза, хірургія.

Буковинський медичний вісник. 2025. Т. 29, № 1 (113). С. 3-9.

DOI: 10.24061/2413-0737.29.1.113.2025.1

E-mail: proniaiev@bsmu.edu.ua



Резюме. Мета роботи – дослідження доцільності використання методу мультифрактального аналізу мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози з метою визначення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) цифрової лазерної гістологічної диференціальної діагностики її патології.

Результати дослідження. Розглянуто біофізичні модельні уявлення про формування структурної оптичної анізотропії масштабно - самоподібних полікристалічних мереж нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози. Представлено дизайн схеми методу поляризаційно-інтерференційного картографування мікроскопічних зображень експериментальних зразків. Проведено мультифрактальний аналіз мап еліптичності поляризації дослідних зразків біоптатів щитоподібної залози донорів та хворих на вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак. Визначено спектри фрактальних розмірностей поляризаційних мап мікроскопічних зображень нативних препаратів. У рамках статистичного аналізу мультифрактальних спектрів виявлено об'єктивні маркери для диференціальної діагностики патології щитоподібної залози. Продемонстровано відмінний рівень (~98% – 100%) збалансованої точності диференціації патологічних станів.

Висновки. 1. Представлені та проаналізовані в рамках статистичного підходу експериментальні результати поляризаційного картографування мап еліптичності цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози. Установлено хороший рівень (87,3%-89,2%) збалансованої точності диференціальної діагностики донорів і хворих на вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак.

2. Представлені і проаналізовані в межах статистичного підходу до мультифрактальних спектрів результати масштабно-самоподібного аналізу топографічної структури мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень біоптатів щитоподібної залози. Продемонстровано відмінний рівень (98%-100%) збалансованої точності диференціальної діагностики патології щитоподібної залози.

DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF THYROID PATHOLOGY BY THE METHOD OF MULTIFRACTAL ANALYSIS OF POLARIZATION-INTERFERENCE MAPS OF ELLIPTICITY OF MICROSCOPIC IMAGES OF NATIVE HISTOLOGICAL SECTIONS

O. Bilookyi, O. Ushenko, V. Bilookyi, V. Dubolazov, V. Sklyarchuk, D. Proniaiev

Key words: Mueller-matrix polarimetry, nodular goiter, autoimmune thyroiditis, papillary cancer, thyroid gland, surgery.

Bukovinian Medical Herald. 2025. V. 29, № 1 (113). P. 3-9.

Resume. The purpose of the work is to study the feasibility of using the method of multifractal analysis of polarization ellipticity maps of microscopic images of native histological sections of thyroid biopsy in order to determine new objective criteria (markers) of digital laser histological differential diagnosis of its pathology.

Research results. Biophysical model concepts of the formation of structural optical anisotropy of large-scale self-similar polycrystalline networks of native histological sections of thyroid biopsy are considered. The design of the scheme of the method of polarization-interference mapping of microscopic images of experimental samples is presented. A multifractal analysis of polarization ellipticity maps of experimental samples of thyroid biopsy specimens from donors and patients with nodular goiter, autoimmune thyroiditis and papillary cancer is carried out. The spectra of fractal

Оригінальні дослідження

dimensions of polarization maps of microscopic images of native preparations are determined. Within the framework of the statistical analysis of multifractal spectra, objective markers for differential diagnosis of thyroid pathology are identified. An excellent level (~98%-100%) of balanced accuracy of differentiation of pathological conditions is demonstrated.

Conclusions. 1. The experimental results of polarization mapping of ellipticity maps of digital microscopic images of native histological sections of thyroid biopsy are presented and analyzed within the framework of a statistical approach. A good level (87.3%-89.2%) of balanced accuracy of differential diagnosis of donors and patients with nodular goiter, autoimmune thyroiditis and papillary cancer is established.

2. The results of scale-self-similar analysis of the topographic structure of polarization ellipticity maps of digital microscopic images of thyroid biopsy specimens are presented and analyzed within the framework of a statistical approach to multifractal spectra. An excellent level (98%-100%) of balanced accuracy of differential diagnosis of thyroid pathology is demonstrated.

Вступ. Серед численних біомедичних діагностичних застосувань структури м'якої речовини важливе місце посідає Мюллер-матрична поляриметрія (ММП) оптичної анізотропії біологічних тканин. Для реалізації поставлених діагностичних завдань розроблено різноманітні системи ММП [1]. Основні характеристики та досягнення ММП у діагностиці патологічних змін оптичної анізотропії мікроструктури біологічних тканин і рідин представлені в серії статей [2]. У той же час діагностичні можливості ММП обмежені значною деполяризацією світлорозсіювання в об'ємних біологічних об'єктах. Основним рішенням цієї проблеми було узагальнення техніки ММП шляхом синтезу багатоканальної поляризаційної інтерферометрії та цифрової голографічної реконструкції рельєфних карт деполяризації [3].

Практично всі згадані нами публікації в галузі ММП зроблені в наближенні статистичної структури розподілів параметрів оптичної анізотропії архітекtonіки біологічних тканин. Існує невелика кількість публікацій, в яких успішно використовується інший аналітичний підхід для діагностики патологічних станів – дослідження кореляційних властивостей шарової топографічної структури зображень матриці Мюллера (ММ) біологічних тканин [4]. Тому актуальним є подальше розширення арсеналу нових алгоритмів обробки експериментальних даних із використанням інших аналітичних принципів, заснованих на використанні масштабно-селективного вейвлету та нового для ММП мультифрактального аналізу [5].

Наша робота спрямована на використання методу мультифрактального аналізу мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози з метою визначення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) цифрової лазерної гістологічної диференціальної діагностики її патології.

В основу модельного аналізу оптичних властивостей нативних гістологічних зрізів щитоподібної залози нами покладено результати лазерних поляриметричних досліджень біологічних тканин вітчизняних і закордонних дослідників [6, 7].

Дизайн оптичної моделі морфологічної структури нативних гістологічних зрізів щитоподібної залози складається з блоків:

1. Морфологічна структура тканини щитоподібної залози являє собою двокомпонентну аморфно-анізотропну матрицю.

2. Аморфна компонента (паренхіма, що сформована епітеліальною тканиною) є поляризаційно неактивною та не змінює стану поляризації лазерного опромінюючого пучка.

3. Полікристалічна компонента (прошарки (сітки) сполучної тканин у паренхімі – надмолекулярні фібрилярні протеїнові мережі сполучної тканини) володіє структурною оптичною анізотропією або двопронезаломленням і формує координатно розподілені ($m \times n$ – сукупність пікселів цифрової камери) еліпси поляризації β або мапи еліптичності поляризації $\beta(m, n)$, (рис. 2.1, фрагмент (г)).

4. Статистична структура мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ визначається концентрацією просторово-кутовою організацією надмолекулярних білкових фібрилярних мереж і залежить від їхнього координатного розподілу в об'ємі зразка тканини щитоподібної залози.

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

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

- аутоімунний тиреоїдит – за рахунок плоскоклітинної метapлазії фолікулярних клітин, збільшення їх розмірів формуються співрозмірні прояви оптичної активності хіральних

теріоглобулінових білкових молекулярних комплексів та зростання рівня полікристалічного структурного двоприменезаломлення внаслідок формування мережі фіброзних тяжів;

- папілярний рак – переважний вплив структурного двоприменезаломлення за рахунок гіперплазії у вигляді довгастих папілярних утворень на тлі певного зменшення оптичної активності внаслідок руйнації хіральної теріоглобулінових білкових молекулярних комплексів.

В основу реалізації ідеї дослідження нами покладено два аналітичних підходи – статистичний і топографічний (фрактальний).

Статистичний підхід. Забезпечує можливість об'єктивного оцінювання розподілів випадкових значень величини еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень препаратів тканин і рідин щитоподібної залози без урахування їх координатної (топографічної) структурності.

Слід очікувати: для вузлового зоба зростання середнього та діапазону розкиду випадкових значень величини еліптичності поляризації; для аутоімунного тиреоїдиту подальше збільшення середнього та діапазону розкиду випадкових значень величини еліптичності поляризації в точках цифрових мікроскопічних зображень; для папілярного раку переважний прояв розподілів еліптично поляризованих станів.

Мультифрактальний підхід. Забезпечує можливість об'єктивного оцінювання координатної (топографічної) структурності розподілів випадкових значень величини еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень препаратів тканин щитоподібної залози. Слід очікувати: для вузлового зоба - незначна кількість фрактальних розмірностей – зростання діапазону значень фрактальних розмірностей відповідного мультифрактального спектра мап еліптичності поляризації; для аутоімунного тиреоїдиту - подальше збільшення діапазону фрактальних розмірностей відповідного мультифрактального спектра мап еліптичності поляризації; для папілярного раку – часткове руйнування масштабно-самоподібної структури мап еліптичності поляризації зі значним збільшенням діапазону зміни величини фрактальних розмірностей відповідних мультифрактальних спектрів.

Матеріал і методи. Для дослідження обрали три групи по 51 хворому: I – пацієнти з вузовим зобом; II – пацієнти з аутоімунним тиреоїдитом; III – пацієнти з папілярним раком. Контрольна група – 51 людина без діагностованих патологій.

Матеріалом дослідження слугували нативні гістологічні зрізи біопсії тканини щитоподібної залози.

Мета використання поляризаційного методу полягає в експериментальному виявленні із класичного світлового цифрового мікроскопічного зображення $I(m, n)$ фації крові координатних (m, n) розподілів (мап) еліптичності $\beta(m, n)$ поляризації.

Таблиця 1 ілюструє структурно-логічну схему даного методу.

Таблиця 1

Структурно-логічна схема поляризаційного методу

Блок формування світлового мікроскопічного зображення фації крові $I(m, n)$
Блок поляризаційного аналізу світлового мікроскопічного зображення фації крові, який включає поляризатор, площина пропускання якого обертається у межах від 0 до π .
Блок цифрової реєстрації “максимумів” $I(\theta, m, n) = \max$ і “мінімумів” координатного розподілу інтенсивності $I(\theta, m, n) = \min$
Блок комп'ютерної обробки масивів $I(\theta, m, n) = \max$ та $I(\theta, m, n) = \min$
Координатний розподіл значень величини еліптичності поляризації $\beta(m, n)$

Методологія поляризаційного методу полягає в опромінюванні зразків біопатів лазерним випромінюванням. За рахунок різного поглинання формується координатний (m, n) розподіл величини інтенсивності $I(m, n)$ пропущеного випромінювання або класичне світлове зображення. Таке зображення за допомогою мікроскопічного об'єктива збільшується і проєктується в площину світлочутливих пікселів цифрової CCD камери, яка його реєструє у вигляді сукупності координатного цифрового розподілу значень інтенсивності. Далі з метою видалення з одержаного цифрового мікроскопічного зображення поляризаційних мап еліптичності $\beta(m, n)$ перед CCD камерою розміщують лінійний поляризатор-аналізатор. Обертають вісь пропускання поляризатора-аналізатора на кут θ у межах від 0 до π . Комп'ютерно реєструють у межах кожного окремого пікселя цифрової CCD камери екстремальні значення інтенсивності і відповідні до них кути повороту осі пропускання поляризатора-аналізатора. На цій основі визначається мапа еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ шляхом алгоритмічної обробки координатних розподілів “максимумів” $I(\theta, m, n) = \max$ і “мінімумів” інтенсивності $I(\theta, m, n) = \min$ у точках цифрових мікроскопічних зображень біопатів.

У таблиці 2 представлені оптико-геометричні параметри об'єктів дослідження.

Таблиця 2

Оптико-геометричні параметри біологічних препаратів

Геометрична товщина, $d, \mu m$	$40 \pm 0,4$
Коефіцієнт ослаблення, τ	$0,26 \pm 0,08$
Ступінь деполаризації, $\Delta, \%$	37-44

Результати дослідження та їх обговорення. На рис. 1 представлені мапи (фрагменти (1)) і гістограми (фрагменти (2)) розподілів (m, n) величини еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ донорів і хворих пацієнтів.

Одержані результати продемонстрували наявність статистичної структурності координатних розподілів

Оригінальні дослідження

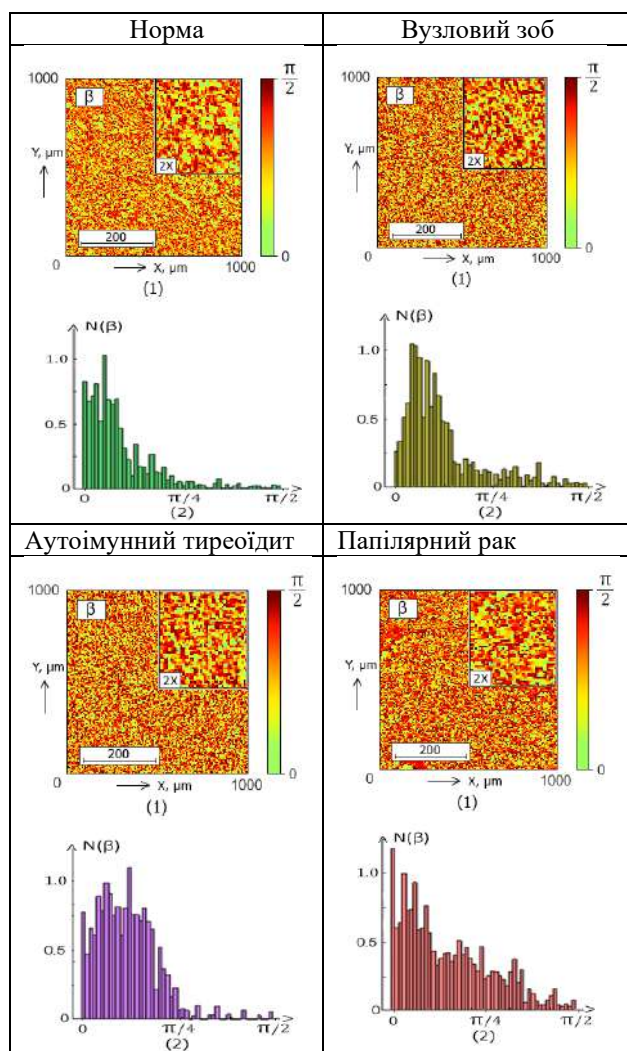


Рис. 1. Поляризаційні мапи (фрагменти (1)) і гістограми (фрагменти (2)) розподілів еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози

величини еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень зразків нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози всіх досліджених груп (рис. 1, фрагменти (1)). Порівняльне зіставлення гістограм (рис. 1, фрагменти (2)) виявило тенденцію зростання структурної анізотропії фібрилярних протеїнових мереж сполучної тканини паренхіми щитоподібної залози від контрольної до дослідних груп - вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак. На даний факт вказує послідовне “зміщення”, а також розширення діапазону зміни, в бік більших значень основних екстремумів гістограм розподілів величини еліптичності поляризації (рис. 1, фрагменти (2)).

Кількісно виявлений сценарій ілюструють результати статистичного аналізу мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень гістологічних зрізів, які представлені в таблиці 3.

Установлено:

- Статистично достовірну ($p_{ik} \leq 0,05$) зміну величини всіх центральних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують мапи еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ біоптатів щитоподібної залози.
- Величина середнього SM_1 незначно зростає у межах 1,5 раза - від 0,23 до 0,37.
- Величина дисперсії SM_2 зростає у незначних межах 1,75 раза - від 0,14 до 0,22.
- Асиметрія SM_3 є статистично достовірною ($p_{ik} \leq 0,05$) і змінюється у широких межах від 0,91 до 0,42.
- Екссес SM_4 координатних розподілів $\beta(m, n)$ також статистично достовірною ($p_{ik} \leq 0,05$) змінюється у широких межах від 1,33 до 0,61.

Експериментально визначені значні динамічні діапазони зміни статистичних маркерів вищих порядків (SM_3, SM_4) мап еліптичності поляризації зумовили наступні параметри точності диференціальної діагностики патологій щитоподібної залози (табл. 4).

Таблиця 3

Статистичні параметри мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози

Група	Група 1 (51 зразок)	Група 2 (51 зразок)	Група 3 (51 зразок)	Група 4 (51 зразок)
Середнє, SM_1	$0,23 \pm 0,013$	$0,28 \pm 0,016$	$0,31 \pm 0,018$	$0,37 \pm 0,021$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			
Дисперсія, SM_2	$0,14 \pm 0,006$	$0,16 \pm 0,008$	$0,19 \pm 0,009$	$0,22 \pm 0,012$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			
Асиметрія, SM_3	$0,91 \pm 0,039$	$0,78 \pm 0,035$	$0,63 \pm 0,028$	$0,42 \pm 0,025$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			
Екссес, SM_4	$1,33 \pm 0,061$	$1,04 \pm 0,047$	$0,82 \pm 0,039$	$0,61 \pm 0,034$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			

Установлено наступні рівні збалансованої точності диференціальної діагностики патологій щитоподібної залози:

1. Діагностика патології щитоподібної залози:

- “норма - вузловий зоб” $Ac_{12}(SM_3; SM_4) \sim 87\%$ – “хороший” рівень;
- “норма - аутоімунний тиреоїдит” $Ac_{13}(SM_3; SM_4) \sim 88\%$ - “відмінний” рівень;

Таблиця 4

Збалансована точність за даними статистичного аналізу мап еліптичності поляризації біопатів щитоподібної залози

Асиметрія, SM_3		
$a = 93$	$a = 94$	$a = 95$
$b = 9$	$b = 8$	$b = 7$
$Ac_{12} = 91,2\%$	$Ac_{13} = 92,1\%$	$Ac_{14} = 93,1\%$
$a = 89$	$a = 90$	$a = 91$
$b = 13$	$b = 12$	$b = 11$
$Ac_{23} = 87,3\%$	$Ac_{24} = 88,2\%$	$Ac_{34} = 89,2\%$
Експес, SM_4		
$a = 93$	$a = 94$	$a = 95$
$b = 9$	$b = 8$	$b = 7$
$Ac_{12} = 91,2\%$	$Ac_{13} = 92,1\%$	$Ac_{14} = 93,1\%$
$a = 89$	$a = 90$	$a = 91$
$b = 13$	$b = 12$	$b = 11$
$Ac_{23} = 87,3\%$	$Ac_{24} = 88,2\%$	$Ac_{34} = 89,2\%$

- “норма – папілярний рак”
 $Ac_{14}(SM_3; SM_4) \sim 89\%$ – “хороший” рівень.
- 2. Диференціальна діагностика:
 - “вузловий зоб – аутоімунний тиреоїдит”
 $Ac_{23}(SM_3; SM_4) \sim 87\%$ – “хороший” рівень;
 - “вузловий зоб – папілярний рак”
 $Ac_{24}(SM_3; SM_4) \sim 88\%$ – “хороший” рівень;
 - “аутоімунний тиреоїдит – папілярний рак”
 $Ac_{34}(SM_3; SM_4) \sim 89\%$ – “хороший” рівень.

Мультифрактальний аналіз поляризаційних мап еліптичності цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози.

На рис. 2 представлені результати (скелетони – фрагменти (1) і алгоритмічно відтворені мультифрактальні спектри – фрагменти (2)) масштабно-самоподібного фрактального аналізу мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії паренхіми донорів і хворих з різною патологією щитоподібної залози.

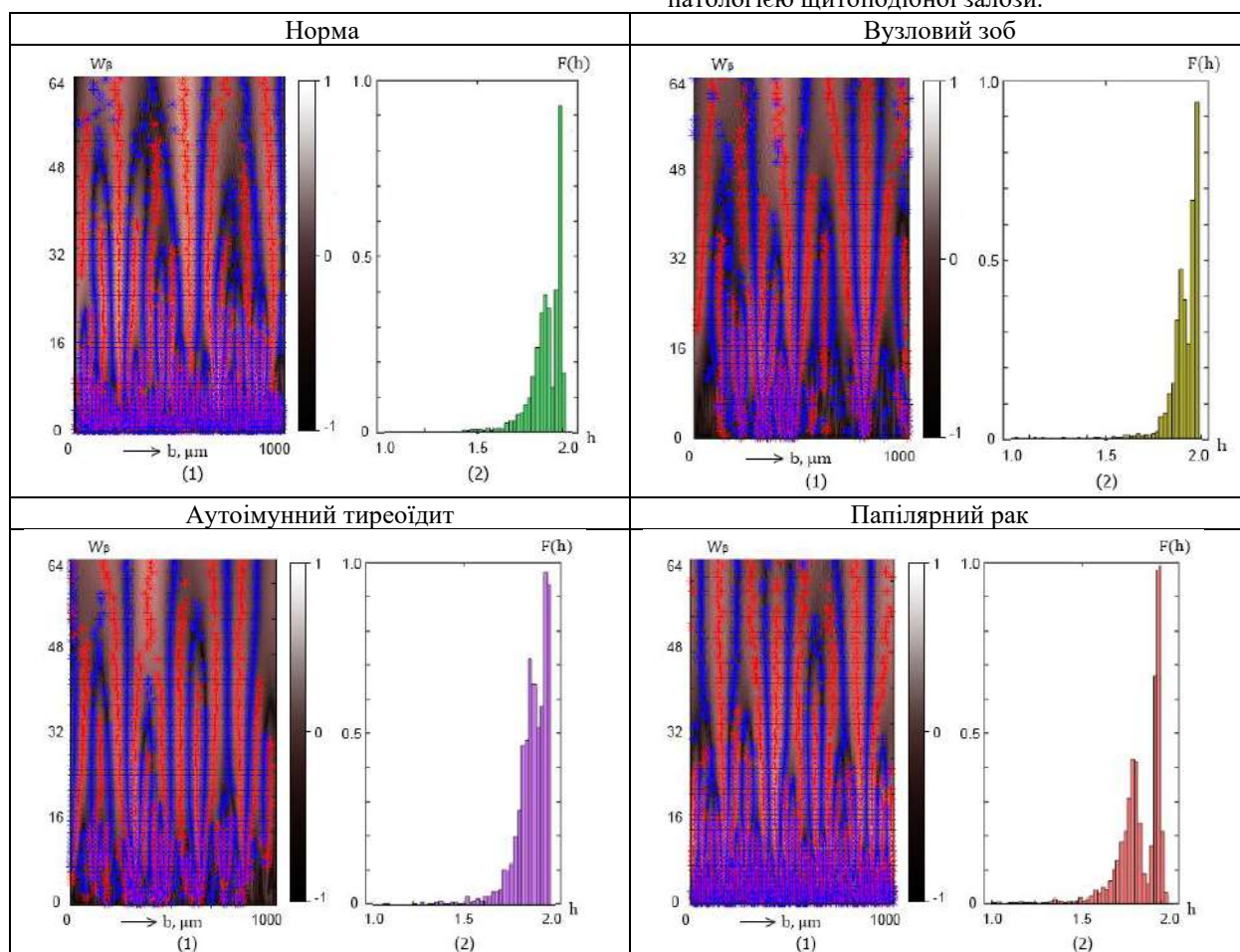


Рис. 2. Скелетони амплітуд вейвлет-коефіцієнтів (фрагменти (1)) і мультифрактальні спектри розподілів величини еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень біопатів щитоподібної залози

Результати мультифрактального аналізу топографічної структури мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ виявили:

- Індивідуальні для кожної групи нативних

біопатів координатно неоднорідні скелетони – топографічні лінії (геометричне місце синіх точок) екстремумів амплітуд вейвлет-коефіцієнтів (рис. 2, фрагменти (1)), які вказують на наявність різної

Оригінальні дослідження

масштабно-самоподібної топографічної будови мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ донорів і хворих з різною патологією.

• Мультифрактальну структуру мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень двопротинезаломлюючих структур паренхіми щитоподібної залози (рис. 2, фрагменти (2)) – наявність розподілу різних величин фрактальних розмірностей h_i або мультифрактальних спектрів $F(h)$.

Порівняльний аналіз структури мультифрактальних спектрів $F(h)$ виявив тенденцію збільшення діапазону зміни величин дискретного набору фрактальних розмірностей h_i з поглибленням тяжкості патології – від вузлового зоба, аутоімунного тиреоїдиту і до папілярного раку.

Кількісно виявлену закономірність ілюструють результати статистичного аналізу мультифрактальних спектрів топографічної структури мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$, які представлені в таблиці 5.

Таблиця 5

Статистичні параметри мультифрактальних спектрів мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози

Група	Група 1 (51 зразок)	Група 2 (51 зразок)	Група 3 (51 зразок)	Група 4 (51 зразок)
Середнє, SM_1	$1,88 \pm 0,04$	$1,82 \pm 0,03$	$1,77 \pm 0,02$	$1,73 \pm 0,01$
p_{ik}	$p_{12;13;14} > 0,05; p_{23;24;34} > 0,05$			
Дисперсія, SM_1	$0,103 \pm 0,056$	$0,132 \pm 0,074$	$0,154 \pm 0,088$	$0,172 \pm 0,091$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			
Асиметрія, SM_1	$1,99 \pm 0,12$	$1,41 \pm 0,083$	$1,11 \pm 0,072$	$0,82 \pm 0,051$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24;34} \leq 0,001$			
Ексцес, SM_1	$2,52 \pm 0,14$	$2,05 \pm 0,13$	$1,54 \pm 0,092$	$1,12 \pm 0,07$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24;34} \leq 0,001$			

Установлено максимальну чутливість до змін топографічної структури мап еліптичності поляризації статистичних моментів вищих порядків, які характеризують асиметрію (SM_3) та ексцес (SM_4) розподілів значень мультифрактальних спектрів $F(h)$.

Статистично достовірний для діагностики ($p_{12;13;14} \leq 0,001$) і диференціації ($p_{23;24;34} \leq 0,001$) вузлового зоба, аутоімунного тиреоїдиту і папілярного раку діапазон зміни значень мультифрактальних маркерів поляризаційних мап еліптичності складає:

- $SM_3(F(h))$ - 2,3 раза від 1,99 до 0,82;
- $SM_4(F(h))$ - 2,4 раза від 2,52 до 1,12.

Визначені діагностичні маркери ($SM_3(F(h))$ і $SM_4(F(h))$) забезпечили максимальне (до відмінного рівня) підвищення точності диференціальної діагностики вузлового зоба, аутоімунного тиреоїдиту і папілярного раку, - таблиця 6.

Продемонстровано наступні рівні збалансованої точності диференціальної діагностики різної патології:

1. Діагностика патології щитоподібної залози :

- “норма - вузловий зоб”
 $Ac_{12}(SM_3; SM_4) \sim 98\% - 100\%$ - “відмінний” рівень;
- “норма - аутоімунний тиреоїдит”
 $Ac_{13}(SM_3; SM_4) \sim 98\% - 100\%$ - “відмінний” рівень;
- “норма - папілярний рак”
 $Ac_{14}(SM_3; SM_4) \sim 99\% - 100\%$ - “відмінний” рівень.

2. Диференціальна діагностика:

- “вузловий зоб - аутоімунний тиреоїдит”
 $Ac_{23}(SM_3; SM_4) \sim 97\% - 99\%$ - “відмінний” рівень;
- “вузловий зоб - папілярний рак”
 $Ac_{24}(SM_3; SM_4) \sim 98\% - 99\%$ - “відмінний” рівень;
- “аутоімунний тиреоїдит - папілярний рак”

$Ac_{34}(SM_3; SM_4) \sim 99\%$ - “відмінний” рівень.

Таблиця 6

Збалансована точність диференціальної діагностики патології щитоподібної залози за статистичним аналізом мультифрактальних спектрів мап еліптичності поляризації

Асиметрія, SM_3		
$a = 100$	$a = 100$	$a = 101$
$b = 2$	$b = 2$	$b = 1$
$Ac_{12} = 98\%$	$Ac_{13} = 98\%$	$Ac_{14} = 99\%$
$a = 99$	$a = 100$	$a = 101$
$b = 3$	$b = 2$	$b = 1$
$Ac_{23} = 97,1\%$	$Ac_{24} = 98\%$	$Ac_{34} = 99\%$
Ексцес, SM_4		
$a = 192$	$a = 192$	$a = 102$
$b = 0$	$b = 0$	$b = 0$
$Ac_{12} = 100\%$	$Ac_{13} = 100\%$	$Ac_{14} = 100\%$
$a = 101$	$a = 101$	$a = 101$
$b = 1$	$b = 1$	$b = 1$
$Ac_{23} = 99\%$	$Ac_{24} = 99\%$	$Ac_{34} = 99\%$

Висновки. 1. Представлені та проаналізовані в рамках статистичного підходу експериментальні результати поляризаційного картографування мап еліптичності цифрових мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біопсії щитоподібної залози. Установлено хороший рівень (87,3% – 89,2%) збалансованої точності диференціальної діагностики донорів і хворих на вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак.

2. Представлені і проаналізовані в межах статистичного підходу до мультифрактальних

спектрів результати масштабно-самоподібного аналізу топографічної структури мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень біоптатів щитоподібної залози. Продemonстровано відмінний

рівень (98% – 100%) збалансованої точності диференціальної діагностики патології щитоподібної залози.

References

1. Tuchin VV. Tissue Optics and Photonics: Light-Tissue Interaction II. J Biomed Photonics Eng. 2015;1:98-134.
2. David A Boas, Constantinos Pitris, Nimi Ramanujam. Handbook of Biomedical Optics. Boca Raton: CRC Press; 2011. 831 p.
3. Ghosh N, Vitkin IA. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. J Biomed Opt. 2011;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. Ushenko AG, Pishak VP. Laser Polarimetry of Biological Tissues: Principles and Applications. In: Tuchin VV. editor. Handbook of Coherent Domain Optical Methods. Springer US; 2004. p. 93-138.
6. Arteaga O, Baldris M, Antó J, Canillas A, Pascual E, Bertran E, et al. Mueller matrix microscope with a dual continuous rotating compensator setup and digital demodulation. Appl Opt. 2014;53(10):2236-45.
7. Ushenko O, Bilookyi O, Ushenko Yu, Dubolazov O, Soltys I, Litvinenko O, et al. Layer-by-layer phase scanning of polycrystalline blood facies laser induced images for determination thyroid gland cancer and tissues injury necrosis. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. 2024;1340008. DOI: 10.1117/12.3054870.
8. Ushenko O, Bilookyi O, Ushenko Yu, Dubolazov O, Soltys I, Litvinenko O, et al. 3D polarimetry of laser induced speckle fields for phase detection thyroid gland polycrystalline structure and traumatic necrosis of human internal organs. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments. 2024;1340006. DOI: 10.1117/12.3054868.

Відомості про авторів

Білокий 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>.

Білокий 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>.

Дуболазов Олександр Володимирович – д-р мед. наук, професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0003-1051-2811>.

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>.

Проняєв Дмитро Володимирович – д-р мед. наук, професор кафедри анатомії людини імені М.Г. Туркевича Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна. <https://orcid.org/0000-0001-8096-4640>.

Information about the authors

Bilookyi Oleksandr – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor at the Department of Surgery №1, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0002-4190-313X>

Ushenko Oleksandr – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuri Fedkovych Chernivtsi National University. <https://orcid.org/0000-0001-7015-7423>.

Bilookyi Viacheslav – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Surgery №1, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-9921-7178>

Dubolazov Oleksandr – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Optics, Publishing and Printing, Yuri Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0003-1051-2811>

Sklyarchuk Valeriy – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor at the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University. <https://orcid.org/0000-0001-8211-4391>

Proniaiev Dmytro Volodymyrovych – Doctor of Medical Sciences, Professor at the Department of Human Anatomy named after M. H. Turkevych, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine. <https://orcid.org/0000-0001-8096-4640>.

Надійшла до редакції 16.12.24

© О.В. Білокий, О.Г. Ушенко, В.В. Білокий,
О.В. Дуболазов, В.М. Склярчук, Д.В. Проняєв, 2025