

МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ МАП ЕЛІПТИЧНОСТІ МІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ФАЦІЙ КРОВІ ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА ДІАГНОСТИКА ПАТОЛОГІЇ ЩИТОПОДІБНОЇ ЗАЛОЗИ

О. В. Білокий, В. В. Білокий, Д. В. Проняєв

Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

Серед численних біомедичних діагностичних застосувань структури м'якої речовини важливе місце посідає Мюллер-матрична поляриметрия оптичної анізотропії біологічних тканин. Для реалізації поставлених діагностичних завдань розроблено різноманітні системи Мюллер-матричної поляриметрії.

Мета дослідження – здійснити порівняльний аналіз ефективності методу мультифрактальної обробки мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень надмолекулярних білкових мереж полікристалічних фацій крові з метою визначення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) цифрової лазерної гістологічної диференціальної діагностики патології щитовидної залози.

Матеріал і методи. Сформовано чотири групи спостереження: 1. Контрольна група – здорові донори (51 особа). 2. Пацієнти з вузловим зобом (51 пацієнт). 3. Пацієнти з аутоімунним тиреоїдитом (51 пацієнт). 4. Пацієнти з папілярним раком (51 пацієнт). Проведено порівняльний аналіз ефективності методів мультифрактальної обробки мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень надмолекулярних білкових мереж полікристалічних фацій крові.

Результати. Проведено комплексний статистичний і мультифрактальний аналіз мап еліптичності поляризації дослідних зразків крові донорів та хворих на вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак. Визначено об'єктивні статистичні і мультифрактальні маркери для диференціальної діагностики патології щитовидної залози. Продемонстровано відмінний рівень (~96%-98%) збалансованої точності методу мультифрактального аналізу поляризаційних мап фацій крові для малоінвазивної диференціації патологічних станів.

Висновки. 1. Виявлено найбільш оптимальні статистичні маркери методу картографування мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові і встановлено хорошу діагностичну спроможність методу (~87.3 %-88.3 %) та задовільний рівень (~78.4 %-81.4 %) диференціації патології щитовидної залози. 2. Виявлено найбільш оптимальні мультифрактальні маркери методу картографування мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові і встановлено відмінний рівень (~96 %-98 %) збалансованої точності диференціальної діагностики патології щитовидної залози.

Ключові слова:

Мюллер-матрична поляриметрия, фації крові, вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит, папілярний рак.

Клінічна та експериментальна патологія 2024. Т.23, №2 (88). С. 3-8.

DOI 10.24061/1727-4338.XXIII.2.88.2024.01

E-mail: Bilookyis@gmail.com

MULTIFRACTAL ANALYSIS OF POLARIZATION MAPS OF ELLIPTICITY OF MICROSCOPIC IMAGES OF BLOOD SMEARS AND DIFFERENTIAL DIAGNOSIS OF THYROID GLAND PATHOLOGY

O. V. Bilookyi, V. V. Bilookyi, D. V. Proniaiev

Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine

Among the numerous biomedical diagnostic applications of the soft matter structure, Mueller-matrix polarimetry of the optical anisotropy of biological tissues occupies an important place. Various Mueller-matrix polarimetry systems have been developed to implement the diagnostic tasks.

The aim of the study – to conduct a comparative analysis of the effectiveness of the multifractal processing method of polarization ellipticity maps of digital microscopic images of supramolecular protein networks of polycrystalline blood smears in order to determine new objective criteria (markers) of digital laser histological differential diagnosis of the thyroid gland pathology.

Material and methods. Four observation groups were formed: 1. Control group – healthy donors (51 people). 2. Patients with nodular goiter (51 patients). 3. Patients with autoimmune thyroiditis (51 patients). 4. Patients with papillary cancer (51 patients). A comparative analysis of the effectiveness of the statistical and multifractal processing methods of polarization ellipticity maps of digital microscopic images of supramolecular protein networks of polycrystalline blood smears was carried out in order to determine new objective criteria (markers) of digital laser histological differential diagnosis of the thyroid pathology

Клінічна та експериментальна патологія. 2024. Т.23, № 2 (88)

Key words:

Muller-matrix polarimetry, blood smears, nodular goiter, autoimmune thyroiditis, papillary cancer.

Clinical and experimental pathology 2024. Vol.23, № 2 (88). P. 3-8.

Results. A comprehensive statistical and multifractal analysis of polarization ellipticity maps of experimental blood samples of donors and patients with nodular goiter, autoimmune thyroiditis, and papillary cancer was performed. Objective statistical and multifractal markers for differential diagnosis of the thyroid gland pathology were determined. An excellent level (~96 %-98 %) of the balanced accuracy of the multifractal analysis method of polarization maps of blood for minimally invasive differentiation of pathological conditions has been demonstrated.

Conclusions. 1. The most optimal statistical markers of the method of mapping ellipticity maps of polarization of digital microscopic images of blood smears were found to be the most optimal, and a good diagnostic capacity of diagnosis (~87.3 %-88.3 %) and a satisfactory level (~78.4 %-81.4 %) of differentiation of thyroid pathology were established. 2. Multifractal markers of the mapping ellipticity maps method of polarization of digital microscopic images of blood smears were found to be the most optimal and an excellent level (~96 %-98 %) of the balanced accuracy of differential diagnosis of the thyroid gland pathologies was established.

Вступ

Серед численних біомедичних діагностичних застосувань структури м'якої речовини важливе місце посідає Мюллер-матрична поляриметрия (ММП) оптичної анізотропії біологічних тканин [1-4]. Для реалізації поставлених діагностичних завдань розроблено різноманітні системи ММП [5-8].

Практично всі наведені нами публікації в галузі ММП [9-11] зроблені в наближенні статистичної структури розподілів параметрів оптичної анізотропії архітектоники 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 біологічних тканин [12]. Тому актуальним є подальше розширення арсеналу нових алгоритмів обробки експериментальних даних із застосуванням інших аналітичних принципів, заснованих на використанні масштабно-селективного вейвлету та нового для ММП мультифрактального аналізу [7, 9, 10].

В основу модельного аналізу оптичних властивостей полікристалічних плівок крові нами покладено результати групи дослідників під керівництвом професора Олександра Ушенка [11-13]. Головна ідея цих досліджень полягає у тому, що процес зневоднення (дегідратації) плівок крові призводить шляхом природньої молекулярної самозборки протеїнових молекул до формування масштабно самоподібних (мультифрактальних) полікристалічних надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж оптично анізотропної фації.

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

- вузловий зоб – зростання оптичної активності хіральных молекулярних тиреоглобулінових білкових комплексів за рахунок збільшення розмірів фолікулів та формування полікристалічного структурного

двопроменезаломлення за рахунок вузлового розростання сполучної тканини;

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

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

Мультифрактальний підхід забезпечує можливість об'єктивного оцінювання координатної (топографічної) структурності розподілів випадкових значень величини еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові. Слід очікувати:

- для вузлового зобу незначне зростання діапазону значень фрактальних розмірностей відповідного мультифрактального спектру мап еліптичності поляризації;

- для аутоімунного тиреоїдиту – подальше збільшення діапазону фрактальних розмірностей відповідного мультифрактального спектру 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.

Мета дослідження

Здійснити порівняльний аналіз ефективності методу мультифрактальної обробки мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень надмолекулярних білкових мереж полікристалічних фацій крові з метою визначення нових об'єктивних критеріїв (маркерів) цифрової лазерної гістологічної диференціальної діагностики патології щитовидної залози.

Матеріали і методи дослідження

Методологія поляризаційного методу полягає в опромінюванні зразків фацій крові 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'єктиву збільшується і проєктується у площину світлочутливих пікселів цифрової CCD камери, яка його реєструє у вигляді сукупності координатного цифрового розподілу значень інтенсивності. Далі з метою вилучення з одержаного цифрового мікроскопічного зображення фації крові поляризаційних мап еліптичності $\beta(m, n)$ поляризації 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 фацій крові.

Сформовано чотири групи спостереження:
1. Контрольна група – здорові донори (51 особа).
2. Пацієнти з вузловим зобом (51 пацієнт).
3. Пацієнти з аутоімунним тиреоїдитом (51 пацієнт).
4. Пацієнти з папілярним раком (51 пацієнт).

Об'єктами дослідження слугували фації крові (табл. 1).

Таблиця 1

Оптико-геометричні параметри фацій крові

Геометрична товщина, $d, \mu\text{m}$	$25 \pm 0,33$
Коефіцієнт ослаблення, τ	$0,18 \pm 0,04$
Ступінь деполяризації, $\Delta, \%$	25-32

Результати та їх обговорення

На рис. 1 представлені скелетони – фрагменти (1) і мультифрактальні спектри – фрагменти (2)) масштабно-самоподібного фрактального аналізу мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень фацій крові донорів і хворих із різною патологією щитовидної залози.

Результати мультифрактального аналізу топографічної структури координатних розподілів випадкових значень величини еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень оптично анізотропних полікристалічних надмолекулярних мереж фацій крові виявили:

- Індивідуальні для кожної групи структурної анізотропії фацій крові скелетони мап еліптичності поляризації – топографічні лінії (геометричне місце синіх точок) екстремумів амплітуд вейвлет-коефіцієнтів (рис. 1 фрагменти (1)). Такий факт вказує на наявність різної масштабно-самоподібної топографічної будови мап еліптичності поляризації

$\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень фацій крові донорів і хворих із різною патологією щитовидної залози.

- Мультифрактальну структуру мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ цифрових мікроскопічних зображень фацій крові (рис. 1, фрагменти (2)), яка характеризується спектральними розподілами фрактальних розмірностей h_i або мультифрактальними спектрами $F(h)$.

Порівняльний аналіз мультифрактальних спектрів $F(h)$ мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ фацій крові виявив тенденцію до збільшення діапазону зміни фрактальних розмірностей h_i з поглибленням тяжкості патології від вузлового зобу до аутоімунного тиреоїдиту і папілярного раку.

Кількісно виявлену закономірність ілюструють результати статистичного аналізу мультифрактальних спектрів мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ фацій крові, які представлені у табл. 2.

Таблиця 2

Статистичні параметри мультифрактальних спектрів мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень фацій крові з усіх груп

Показник	Група 1 (51 зразок)	Група 2 (51 зразок)	Група 3 (51 зразок)	Група 4 (51 зразок)
Середнє, SM_1	$1,82 \pm 0,11$	$1,75 \pm 0,095$	$1,71 \pm 0,091$	$1,69 \pm 0,087$
p_{ik}	$p_{12;13;14} > 0,05; p_{23;24;34} > 0,05$			
Дисперсія, SM_1	$0,095 \pm 0,0057$	$0,122 \pm 0,073$	$0,143 \pm 0,086$	$0,161 \pm 0,092$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,05; p_{23;24;34} \leq 0,05$			
Асиметрія, SM_1	$2,12 \pm 0,12$	$1,53 \pm 0,098$	$1,17 \pm 0,067$	$0,89 \pm 0,055$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24;34} \leq 0,001$			
Експес, SM_1	$2,99 \pm 0,17$	$2,21 \pm 0,15$	$1,86 \pm 0,11$	$1,33 \pm 0,078$
p_{ik}	$p_{12;13;14} \leq 0,001; p_{23;24;34} \leq 0,001$			

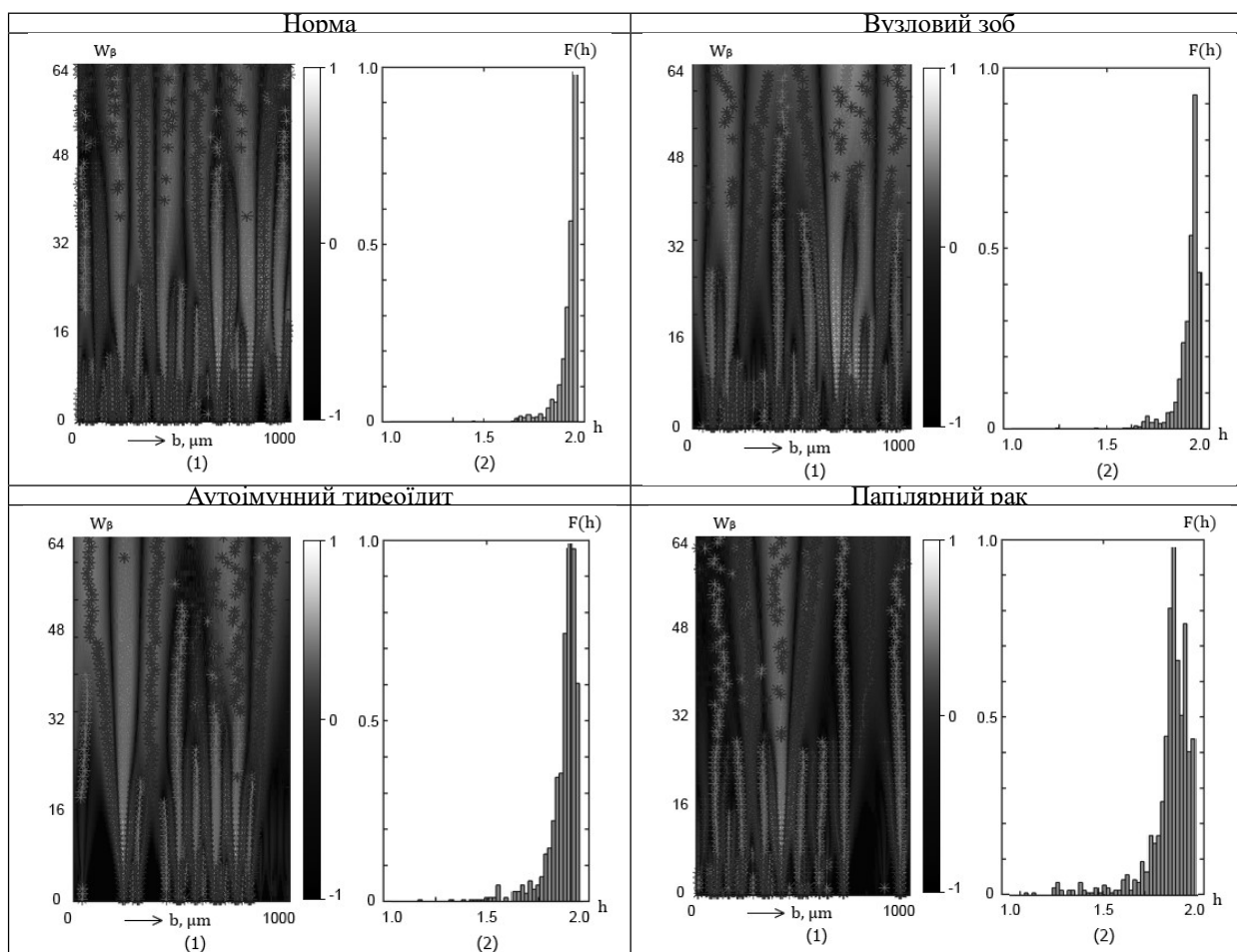


Рис. 1. Скелетон амплітуд вейвлет коефіцієнтів (фрагменти (1)) і мультифрактальний спектр розподілу величини еліптичності поляризації цифрового мікроскопічного зображення фаций крові донорів і хворих пацієнтів

Одержані дані виявили максимальну чутливість статистичних моментів 3-го і 4-го порядків, які характеризують асиметрію SM_3 і ексцес SM_4 розподілів значень мультифрактальних спектрів $F(h)$ мап еліптичності поляризації $\beta(m, n)$ фаций крові, до патологічної зміни архітеконики надмолекулярних альбумін-глобулінових мереж.

Статистично достовірний для діагностики ($p_{12;13;14} \leq 0,001$) і диференціації ($p_{23;24;34} \leq 0,001$) вузлового зобу (група 2), аутоімунного тиреоїдиту (група 3) і папілярного раку (група 4) діапазон зміни значень мультифрактальних маркерів становить $SM_3(F(h))$ – 2,4 рази від 2,12 до 0,89; $SM_4(F(h))$ – 2,2 рази від 2,89 до 1,33. Це забезпечило значне підвищення точності диференціальної діагностики (табл. 3).

Таблиця 3

Збалансована точність мультифрактальної диференціальної діагностики патології щитоподібної залози

Асиметрія, SM_3		
$a = 98$	$a = 99$	$a = 99$
$b = 4$	$b = 3$	$b = 3$
$Ac_{12} = 96,1\%$	$Ac_{13} = 97,1\%$	$Ac_{14} = 97,1\%$
$a = 98$	$a = 98$	$a = 99$
$b = 4$	$b = 4$	$b = 3$
$Ac_{23} = 96,1\%$	$Ac_{24} = 96,1\%$	$Ac_{34} = 97,1\%$
Ексцес, SM_4		
$a = 99$	$a = 100$	$a = 100$
$b = 3$	$b = 2$	$b = 2$
$Ac_{12} = 97,1\%$	$Ac_{13} = 98\%$	$Ac_{14} = 98\%$
$a = 98$	$a = 99$	$a = 99$
$b = 4$	$b = 3$	$b = 3$
$Ac_{23} = 96,1\%$	$Ac_{24} = 97,1\%$	$Ac_{34} = 97,1\%$

Результати інформаційного аналізу виявили такі рівні збалансованої точності диференціальної діагностики патологій щитовидної залози:

1. Діагностика патології щитовидної залози:

• «норма – вузловий зоб» $Ac_{12}(SM_3; SM_4) \sim 97\%$ – «відмінний» рівень;

• «норма – аутоімунний тиреоїдит» $Ac_{13}(SM_3; SM_4) \sim 98\%$ – «відмінний» рівень;

• «норма – папілярний рак» $Ac_{14}(SM_3; SM_4) \sim 98\%$ – «відмінний» рівень.

2. Диференціальна діагностика:

• «вузловий зоб – аутоімунний тиреоїдит» $Ac_{23}(SM_3; SM_4) \sim 96\%$ – «відмінний» рівень;

• «вузловий зоб – папілярний рак» $Ac_{24}(SM_3; SM_4) \sim 96\%$ – «відмінний» рівень;

• «аутоімунний тиреоїдит – папілярний рак» $Ac_{34}(SM_3; SM_4) \sim 97\%$ – «відмінний» рівень.

Висновки

1. Представлені і проаналізовані у межах мультифрактального підходу результати аналізу спектрів фрактальних розмірностей мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові донорів і хворих на вузловий зоб, аутоімунний тиреоїдит і папілярний рак.

2. Виявлено найбільш оптимальні мультифрактальні маркери методу картографування мап еліптичності поляризації цифрових мікроскопічних зображень фацій крові і встановлено відмінний рівень (96% – 98%) збалансованої точності диференціальної діагностики патологій щитовидної залози.

Список літератури

- Park J, Brady DJ, Zheng G, Tian L, Gao L. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product. *Adv Photonics* [Internet]. 2021[cited 2024 Jun 10];3(4):044001. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8849623/pdf/nihms-1771666.pdf> doi: 10.1117/1.ap.3.4.044001
- Ahmad I, Ahmad M, Khan K, Ashraf S, Ahmad S, Ikrama M. Ex vivo characterization of normal and adenocarcinoma colon samples by Mueller matrix polarimetry. *J Biomed Opt.* 2015;20(5):056012. doi: 10.1117/1.jbo.20.5.056012
- Qi J, Elson DS. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review. *J Biophoton.* 2017;10(8):950-82. doi: 10.1002/jbio.201600152
- Wang Y, He H, Chang J, He C, Liu S, Li M, et al. Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues. *J Biomed Opt* [Internet]. 2016[cited 2024 Jun 10];(21):071112. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27087003/> doi: 10.1117/1.jbo.21.7.071112
- Ramella-Roman JC, Novikova T, editors. *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. Clinical and Preclinical Applications.* Springer; 2023. Chapter 11, Ma H, He H, Ramella-Roman JC. Mueller matrix microscopy; p. 281-321.
- He H, Liao R, Zeng N, Li P, Chen Z, Liu X, et al. Mueller matrix polarimetry – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *J Lightwave Technol.* 2019;37(11):2534-48. doi: 10.1109/JLT.2018.2868845
- Wang Y, He H, Chang J, Zeng N, Liu S, Li M, et al. Differentiating characteristic microstructural features of cancerous tissues using Mueller matrix microscope. *Micron.* 2015;79:8-15. doi: 10.1016/j.micron.2015.07.014

Клінічна та експериментальна патологія. 2024. Т.23, № 2 (88)

- Abbasian V, Moradi AR. Microsphere-assisted super-resolved Mueller matrix microscopy. *Opt Lett.* 2020;45(15):4336-9. doi: 10.1364/ol.395735
- Zhang Y, Lee SYC, Zhang Yu, Furst D, Fitzgerald J, Ozcan A. Wide-field imaging of birefringent synovial fluid crystals using lens-free polarized microscopy for gout diagnosis. *Sci Rep* [Internet]. 2016[cited 2024 Jun 07];(6):28793. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep28793.pdf> doi: 10.1038/srep28793
- Peyvasteh M, Tryfonyuk L, Ushenko V, Syvokorovskaya AV, Dubolazov A, Vanchulyak O, et al. 3D Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours. *Laser Phys Lett* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 10];17(11):115606. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-202X/abbee0/pdf> doi: 10.1088/1612-202X/abbee0
- Ushenko VA, Hogan BT, Dubolazov A, Grechina AV, Boronikhina TV, Gorsky M, et al. Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures. *Scientific Reports* [Internet]. 2021[cited 2024 Jun 10];11(1):3871. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-83017-2.pdf> doi: 10.1038/s41598-021-83017-2
- Ushenko AG, Dubolazov AV, Litvinenko OYu, Bachinskiy VT, Bin L, Bin G, et al. 3D polarization correlometry of object fields of networks of biological crystals. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 10];11369:113691M. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SPIE11369E..1MU/abstract> doi: 10.1117/12.2553942
- Bodnar A, Dubolazov A, Pavlyukovich A, Pavlyukovich N, Ushenko A, Votrich A, et al. 3D Stokes correlometry of the polycrystalline structure of biological tissues. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 07];11509:115090V. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SPIE11509E..0VB/abstract> doi: 10.1117/12.2568451

References

- Park J, Brady DJ, Zheng G, Tian L, Gao L. Review of bio-optical imaging systems with a high space-bandwidth product. *Adv Photonics* [Internet]. 2021[cited 2024 Jun 10];3(4):044001. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8849623/pdf/nihms-1771666.pdf> doi: 10.1117/1.ap.3.4.044001
- Ahmad I, Ahmad M, Khan K, Ashraf S, Ahmad S, Ikrama M. Ex vivo characterization of normal and adenocarcinoma colon samples by Mueller matrix polarimetry. *J Biomed Opt.* 2015;20(5):056012. doi: 10.1117/1.jbo.20.5.056012
- Qi J, Elson DS. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review. *J Biophoton.* 2017;10(8):950-82. doi: 10.1002/jbio.201600152
- Wang Y, He H, Chang J, He C, Liu S, Li M, et al. Mueller matrix microscope: a quantitative tool to facilitate detections and fibrosis scorings of liver cirrhosis and cancer tissues. *J Biomed Opt* [Internet]. 2016[cited 2024 Jun 10];(21):071112. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27087003/> doi: 10.1117/1.jbo.21.7.071112
- Ramella-Roman JC, Novikova T, editors. *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. Clinical and Preclinical Applications.* Springer; 2023. Chapter 11, Ma H, He H, Ramella-Roman JC. Mueller matrix microscopy; p. 281-321.
- He H, Liao R, Zeng N, Li P, Chen Z, Liu X, et al. Mueller matrix polarimetry – an emerging new tool for characterizing the microstructural feature of complex biological specimen. *J Lightwave Technol.* 2019;37(11):2534-48. doi: 10.1109/JLT.2018.2868845
- Wang Y, He H, Chang J, Zeng N, Liu S, Li M, et al. Differentiating characteristic microstructural features of cancerous tissues using Mueller matrix microscope. *Micron.* 2015;79:8-15. doi: 10.1016/j.micron.2015.07.014

ISSN 1727-4338 <https://www.bsmu.edu.ua>

8. Abbasian V, Moradi AR. Microsphere-assisted super-resolved Mueller matrix microscopy. *Opt Lett.* 2020;45(15):4336-9. doi: 10.1364/ol.395735
9. Zhang Y, Lee SYC, Zhang Yu, Furst D, Fitzgerald J, Ozcan A. Wide-field imaging of birefringent synovial fluid crystals using lens-free polarized microscopy for gout diagnosis. *Sci Rep* [Internet]. 2016[cited 2024 Jun 07];(6):28793. Available from: <https://www.nature.com/articles/srep28793.pdf> doi: 10.1038/srep28793
10. Peyvasteh M, Tryfonyuk L, Ushenko V, Syvokorovskaya AV, Dubolazov A, Vanchulyak O, et al. 3D Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours. *Laser Phys Lett* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 10];17(11):115606. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1612-202X/abbee0/pdf> doi: 10.1088/1612-202X/abbee0
11. Ushenko VA, Hogan BT, Dubolazov A, Grechina AV, Boronikhina TV, Gorsky M, et al. Embossed topographic depolarisation maps of biological tissues with different morphological structures. *Scientific Reports* [Internet]. 2021[cited 2024 Jun 10];11(1):3871. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-83017-2.pdf> doi: 10.1038/s41598-021-83017-2
12. Ushenko AG, Dubolazov AV, Litvinenko OYu, Bachinskiy VT, Bin L, Bin G, et al. 3D polarization correlometry of object fields of networks of biological crystals. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 10];11369:113691M. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SPIE11369E..1MU/abstract> doi: 10.1117/12.2553942
13. Bodnar A, Dubolazov A, Pavlyukovich A, Pavlyukovich N, Ushenko A, Votrich A, et al. 3D Stokes correlometry of the polycrystalline structure of biological tissues. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering* [Internet]. 2020[cited 2024 Jun 07];11509:115090V. Available from: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2020SPIE11509E..0VB/abstract> doi: 10.1117/12.2568451

Відомості про авторів:

Білокий О. В. – к.мед.н., доцент кафедри хірургії № 1 закладу вищої освіти Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна.

E-mail: Bilookyis@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4190-313X>

Білокий В. В. – д.мед.н., професор кафедри хірургії № 1 закладу вищої освіти Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна.

E-mail: slava.bilookyi@bsmu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9921-7178>

Проняєв Д. В. – д.мед.н., професор кафедри анатомії людини ім. М. Г. Туркевича закладу вищої освіти Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна.

E-mail: Proniaiev@bsmu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-4640>

Information about the authors:

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

E-mail: Bilookyis@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4190-313X>

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

E-mail: slava.bilookyi@bsmu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9921-7178>

Proniaiev Dmytro – Doctor of Medical Sciences, Professor of Department of M. H. Turkevych Human Anatomy of Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine.

E-mail: Proniaiev@bsmu.edu.ua

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8096-4640>

Стаття надійшла до редакції 6.06.2024
© О. В. Білокий, В. В. Білокий, Д. В. Проняєв

