

## **МЕТОД МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЇ МІКРОСКОПІЇ НЕКРОТИЧНИХ ЗМІН СТРУКТУРНОЇ АНІЗОТРОПІЇ РЕЧОВИНИ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЛЮДИНИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ПРИЧИНИ СМЕРТІ ВІД КРОВОВИЛИВІВ ТРАВМАТИЧНОГО ТА НЕТРАВМАТИЧНОГО ГЕНЕЗІВ**

**М.С. Гараздюк<sup>1</sup>, О.Г. Ушенко<sup>2</sup>, О.В. Дуболазов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Буковинський державний медичний університет, м. Чернівці, Україна

<sup>2</sup>Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, м. Чернівці, Україна

**Ключові слова:** черепно-мозкова травма, судова медицина, генез крововиливу, лазерна поляриметрія, гістологічні зрізи, інфаркт мозку, геморагічний інсульт, причина смерті, Мюллер-матрична мікроскопія.

Буковинський медичний вісник. 2025. Т. 29, № 1 (113). С. 15-24.

**DOI:** 10.24061/2413-0737.29.1.113.2025.3

**E-mail:**

[m.garazdiuk@gmail.com](mailto:m.garazdiuk@gmail.com)

[o.ushenko@chnu.edu.ua](mailto:o.ushenko@chnu.edu.ua)

[a.dubolazov@chnu.edu.ua](mailto:a.dubolazov@chnu.edu.ua)



**Резюме.** Останніми роками в різноманітних галузях медицини широкого та ефективного розповсюдження набули сучасні неруйнівні та неінвазивні методи оптичної діагностики препаратів біологічних тканин і рідин. Серед широкого спектра оптичних методів виокремився один із найбільш ефективних – лазерна поляриметрична діагностика полікристалічної структури біологічних шарів.

**Мета роботи** - визначити сукупність маркерів диференціальної діагностики причини смерті від крововиливів травматичного та нетравматичного генезів у речовину головного мозку померлих осіб шляхом використання методу Мюллер-матричного картографування з алгоритмічним відтворенням лінійного двопроменезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку.

**Матеріал і методи.** Для дослідження відбиралися зразки у вигляді нативних зрізів головного мозку людини з тім'яної ділянки від померлих, причиною смерті яких були крововиливи травматичного генезу - II група (загальна кількість  $n=100$ ), інфаркт мозку ішемічного генезу - III група ( $n=100$ ), крововилив нетравматичного генезу - IV група ( $n=100$ ), гостра коронарна недостатність - I група – контроль ( $n=40$ ). Дослідний матеріал заморожували при температурі  $-70^{\circ}\text{C}$  та опісля виготовлялися гістологічні зрізи за допомогою заморожуючого мікромтома. У лабораторії Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук ім. Юрія Федьковича були проведені дослідження отриманих зразків за допомогою Стокс- поляриметра методом багатофункціональної Мюллер-матричної поляриметрії препаратів речовини мозку людини.

**Результати дослідження.** У рамках комплексного алгоритмічного аналізу виявлено сукупність статистичних (асиметрія і ексцес розподілів Мюллер-матричного інваріанта лінійного двопроменезаломлення – ММІ ЛД), кореляційних (ексцес і кореляційна площа автокореляційних функцій розподілів ММІ ЛД) і фрактальних (ексцес густини спектрів потужності автокореляційних функцій розподілів ММІ ЛД) діагностичних маркерів чутливих до некротичних змін полікристалічної структури нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих внаслідок крововиливів у речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів.

**Висновки.** Установлено високий (92%-93%) рівень диференціальної діагностики некротичних змін структурної анізотропії нейронних мереж мозку померлих внаслідок крововиливів у речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів.

## **METHOD OF MUELLER-MATRIX MICROSCOPY OF NECROTIC CHANGES OF STRUCTURAL ANISOTROPY OF HUMAN BRAIN SUBSTANCE FOR DIAGNOSTIC OF CAUSE OF DEATH FROM HEMORRHAGE OF TRAUMATIC AND NON-TRAUMATIC GENESIS**

**M.S. Garazdiuk, O.G. Ushenko, O.V. Dubolazov**

**Key words:** traumatic brain injury, forensic medicine, genesis of hemorrhage, laser polarimetry, histological

**Resume.** In recent years, modern non-destructive and non-invasive methods of optical diagnostics of biological tissue and fluid preparations have become widely and effectively used in various branches of medicine. Among the wide range of optical methods, one of the most effective has been distinguished - laser polarimetric

## Оригінальні дослідження

sections, cerebral infarction, hemorrhagic stroke, cause of death, Mueller matrix microscopy.

*Bukovinian Medical Herald.* 2025. V. 29, № 1 (113). P. 15-24.

diagnostics of the polycrystalline structure of biological layers.

**Purpose of the work:** to determine the set of markers for differential diagnosis of the cause of death from hemorrhages of traumatic and non-traumatic genesis into the substance of the brain of deceased persons by using the Mueller matrix mapping method with algorithmic reproduction of linear birefringence of native histological brain sections.

**Material and methods of the research.** For the study, samples were selected in the form of native slices of the human brain from the parietal region of the deceased, the cause of death of which was hemorrhage of traumatic genesis - group II (total number  $n = 100$ ), cerebral infarction of ischemic genesis - group III ( $n = 100$ ), hemorrhage of non-traumatic genesis - group IV ( $n = 100$ ), acute coronary insufficiency - group I - control ( $n = 40$ ). The study material was frozen at a temperature of  $-70^{\circ}\text{C}$  and then histological sections were made using a freezing microtome. In the laboratory of the Institute of Physical, Technical and Computer Sciences named after Yuri Fedkovych, studies of the obtained samples were carried out using a Stokes polarimeter using the method of multifunctional Mueller-matrix polarimetry of human brain substance preparations.

**Results of the research.** Within the framework of complex algorithmic analysis, a set of statistical (asymmetry and kurtosis of the distributions of the Muller matrix invariant of linear birefringence – MMI LD), correlation (kurtosis and correlation area of the autocorrelation functions of the MMI LD distributions) and fractal (kurtosis of the power spectral density of the autocorrelation functions of the MMI LD distributions) diagnostic markers sensitive to necrotic changes in the polycrystalline structure of neural networks of native histological sections of the brain of deceased persons due to hemorrhages into the brain substance of traumatic and non-traumatic genesis was identified.

**Conclusions.** A high (92%-93%) level of differential diagnosis of necrotic changes in the structural anisotropy of neural networks of the brain of deceased persons due to hemorrhages into the brain substance of traumatic and non-traumatic genesis was established.

**Вступ.** Останніми роками в різноманітних галузях медицини широкого та ефективного розповсюдження набули сучасні неруйнівні та неінвазивні методи оптичної діагностики препаратів біологічних тканин і рідин [1,2]. Серед широкого спектра оптичних методів виокремився один із найбільш ефективних – лазерна поляриметрична діагностика полікристалічної структури біологічних шарів [3,4]. Зокрема, продемонстровано можливість лазерної поляриметричної високоточної та експресної диференціальної діагностики патологічних і некротичних станів [5,6]. Методологічним узагальненням та розвитком лазерної поляриметрії стали методи і системи багатопараметричної Мюллер-матричної поляриметрії, які забезпечують одержання вичерпної повної інформації про оптично анізотропну складову препаратів біологічних тканин і рідин [7 – 11].

Найбільш ефективним на даний час є застосуваннями таких методів у складних завданнях судової медицини, які пов'язані з визначенням причини і давності смерті, травматичних ушкоджень тощо [6-11].

Слід зазначити, що переважним чином весь арсенал методів і систем Мюллер-матричної поляриметрії спрямований на визначення критеріїв та практичне застосування таких маркерів у диференціальній діагностиці та динаміці патологічних і некротичних змін тканин і рідин органів людини на

короткотривалих проміжках часу. При цьому практично невивченими і актуальними на сьогодні є питання, пов'язані з установленням критеріїв діагностики крововиливів у речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів.

**Мета роботи** - експериментально апробувати та визначити сукупність маркерів диференціальної діагностики причини смерті від крововиливів травматичного та нетравматичного генезів у речовину головного мозку померлих осіб шляхом використання методу Мюллер-матричного картографування з алгоритмічним відтворенням лінійного двоприменезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку.

**Матеріал і методи дослідження.** Для дослідження відбиралися зразки у вигляді нативних зрізів головного мозку людини з тім'яної ділянки від померлих, причиною смерті яких були крововиливи травматичного генезу - II група (загальна кількість  $n=100$ ), інфаркт мозку ішемічного генезу - III група ( $n=100$ ), крововилив нетравматичного генезу - IV група ( $n=100$ ), гостра коронарна недостатність - I група – контроль ( $n=40$ ). Дослідний матеріал було вилучено під час проведення судово-медичних розтинів у ДСУ «Чернівецьке обласне бюро судово-медичної експертизи», надалі вони заморожувалися при температурі  $-70^{\circ}\text{C}$  та опісля виготовлялися гістологічні зрізи за допомогою заморожуючого мікроскопа.

У лабораторії Інституту фізико-технічних та

комп'ютерних наук ім. Юрія Федьковича були проведені дослідження отриманих зразків за допомогою Стокс-поляриметра методом багатофункціональної Мюллер-матричної поляриметрії препаратів речовини мозку людини на основі таких даних [1-5]:

1. Нативний гістологічний зріз мозку являє собою двокомпонентну структуру, яка складається з аморфної (оптично-ізотропної) та оптично-анізотропної полікристалічної компоненти.

2. Аморфна компонента препаратів мозку ослаблює за рахунок різного за координатами поглинання лазерне випромінювання – у результаті формується координатний розподіл інтенсивності або класичне мікроскопічне зображення, яке є об'єктом традиційних гістологічних досліджень.

3. Полікристалічна архітектура нейронних мереж препаратів мозку володіє структурною анізотропією або лінійним двопронезаломленням, яке змінює поляризаційні параметри лазерного випромінювання.

4. Найбільш інформаційно повним методом експериментального детектування поляризаційних проявів оптично анізотропної архітектури біологічних препаратів є Мюллер-матричне картографування з виділенням Мюллер-матричних інваріантів лінійного двопронезаломлення (ММІ ЛД), які є придатними для серійних експериментальних вимірювань і незалежними від обертання зразків мозку відносно напрямку лазерного опромінення.

Методика азимутально-інваріантного експериментального вимірювання координатних розподілів величини елементів матриці Мюллера нативних гістологічних зрізів мозку померлих полягає у сукупності дій:

1. Біологічний препарат розміщують на предметному механічному столику лазерного Мюллер-матричного поляриметра (детальна конструкція та опис параметрів його оптичних і оптико-електронних елементів наведені у численних публікаціях і нами не приводиться) [5-11].

2. За допомогою багатоканального поляризаційного фільтра послідовно формують чотири поляризаційні стани опромінюючого біологічного препарату паралельного пучка He-Ne лазера з довжиною хвилі 0,6328 мкм - 1-й канал - лінійно поляризований з азимутом  $0^0$ ; 2-й канал - лінійно поляризований з азимутом  $90^0$ ; 3-й канал - лінійно поляризований з азимутом  $45^0$ ; 4-й канал - право ( $\otimes$ ) циркулярно поляризований.

3. Мікрооб'єкти (збільшення  $\times 4$ ) проєктують зображення зразка мозку в площину світлочутливої площадки цифрової камери, яка складається з  $1120 \times 960$  пікселів.

4. Перед цифровою камерою розміщений багатоканальний поляризатор-аналізатор з шістьма фільтрами - 1-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом  $0^0$ ; 2-й фільтр - лінійно поляризований з

азимутом  $90^0$ ; 3-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом  $45^0$ ; 4-й фільтр - лінійно поляризований з азимутом  $135^0$ ; 5-й фільтр - право ( $\otimes$ ) циркулярно поляризований; 6-й фільтр - ліво ( $\oplus$ ) циркулярно поляризований.

5. Пропущене кожним парціальним поляризаційним фільтром мікроскопічне зображення біологічного препарату дискретизується сукупністю координатно розподілених пікселів цифрової камери і потрапляє у вигляді двомірного цифрового масиву в інтерфейс обчислювального пристрою.

6. На цій основі для кожного каналу поляризаційного ( $0^0; 90^0; 45^0; \otimes$ ) опромінення паралельним лазерним пучком здійснюється обчислення чотирьох параметрів ( $St_{i=1;2;3;4}$ ) вектора Стокса  $St$  за відомими співвідношеннями [1].

$$St = \begin{pmatrix} St_1^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_0^{0^0;90^0;45^0;\otimes} + R_{90}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_2^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_0^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{90}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_3^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_{45}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{135}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \\ St_4^{0^0;90^0;45^0;\otimes} = R_{\otimes}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} - R_{\oplus}^{0^0;90^0;45^0;\otimes} \end{pmatrix} \quad (1)$$

7. Координатні розподіли величини парціальних матричних елементів, обчислених у межах сукупності всіх пікселів світлочутливої площадки цифрової камери, формують Мюллер-матричні зображення (ММЗ) оптично анізотропних нейронних мереж зразків мозку померлих внаслідок крововиливів у речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів.

$$\begin{aligned} m_{22} &= 0.5(St_2^0 - St_2^{90}); m_{23} = St_2^{45} - m_{21}; \\ m_{24} &= St_2^{\otimes} - m_{21}; m_{31} = 0.5(St_3^0 + St_3^{90}); \\ m_{32} &= 0.5(St_3^0 - St_3^{90}); m_{33} = St_3^{45} - m_{31}; \\ m_{34} &= St_3^{\otimes} - m_{31}; m_{41} = 0.5(St_4^0 + St_4^{90}); \\ m_{42} &= 0.5(St_4^0 - St_4^{90}); m_{43} = St_4^{45} - m_{41}; \\ m_{44} &= St_4^{\otimes} - m_{41}. \end{aligned} \quad (2)$$

Окрім безпосереднього дослідження речовини головного мозку методом Мюллер-матричної мікроскопії, для опрацювання отриманих результатів використовувалися методи алгоритмічного аналізу експериментальних даних, які базуються на наступних підходах:

**Статистичний підхід** базується на обчисленні сукупності центральних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків  $Q_{i=1;2;3;4}$ , які характеризують середнє  $Q_{i=1}$ , дисперсію  $Q_{i=2}$ , асиметрію  $Q_{i=3}$  та ексцес  $Q_{i=4}$  експериментально визначених координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ЛД.

Обчислення центральних статистичних моментів  $Q_{i=1;2;3;4}$  здійснювалося у програмному продукті MATLAB з використанням наступних алгоритмів:

## Оригінальні дослідження

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} \text{ММІЛД}_j; \\
 Q_2 &= \sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (\text{ММІЛД}^2)_j}; \\
 Q_3 &= \frac{1}{Q_2^3} \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (\text{ММІЛД}^3)_j; \\
 Q_4 &= \frac{1}{Q_2^4} \frac{1}{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} (\text{ММІЛД}^4)_j,
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

де  $m \times n$  – кількість пікселів цифрової камери.

Кількісно некротичні зміни ієрархії оптично анізотропних нейронних мереж зразків мозку померлих, які зумовлені крововиливами в речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів, можуть бути оцінені змінами сукупності об'єктивних статистичних маркерів, які характеризують координатні розподіли ММІ ЛД.

Середнє  $Q_1$  і дисперсія  $Q_2$  – послідовне зменшення зростання за рахунок зниження рівня лінійного двопронезаломлення внаслідок некротичної деструктуризації нейронних мереж.

Асиметрія  $Q_3$  і ексцес  $Q_4$  – послідовне зростання величин, які обернено пропорційні центральним статистичним моментам 1-го і 2-го порядків (співвідношення (3)).

**Автокореляційний підхід** забезпечує опис кореляційної однорідності координатних розподілів випадкових величин ММІ ЛД. Основним аналітичним інструментарієм методу є обчислення у програмному продукті MATLAB двовимірних і одномірних автокореляційних функцій (АКФ) координатних розподілів ММІ ЛД.

Кожне власне значення АКФ характеризує ступінь подібності розподілів випадкових значень величини ММІ ЛД. Кількісно таку подібність характеризують ексцес  $K_4$  (ступінь “гостроти” піку АКФ) і кореляційна площа  $SK$ , яка визначається інтегруванням під обчисленою кореляційною функцією.

**Фрактальний підхід**

Суть фрактального аналізу, який виконувався у програмному продукті MATLAB, полягає в обчисленні логарифмічних залежностей густини спектрів потужності  $PSD$  розподілів ММІ ЛД. Оцінка фрактальності розподілів ММІ ЛД здійснюється за наявністю і геометричною протяжністю лінійних ділянок нахилу логарифмічних залежностей густини

спектрів потужності  $PSD$ .

Додатковим кількісним параметром ми обрали “гостроту” піку або ексцес густини спектра потужності  $PSD$ , який характеризує розподіл за розмірами структурних елементів ММІ ЛД.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Результати експериментальних досліджень представлені на рис. 1 (контрольна група 1), рис. 3 (дослідна група 2), рис. 5 (дослідна група 3) і рис. 7 (дослідна група 4) наведено серію координатних (фрагменти (1)) розподілів випадкових значень величини матричного параметра структурної анізотропії ММІ ЛД та його тривимірні (фрагменти (2)) мапи.

Серія рис. 2 (група 1), рис. 4 (група 2), рис. 6 (група 3) і рис. 8 (група 4) ілюструє результати кореляційного (фрагменти (1),(3)) і фрактального (фрагменти (2),(4)) перетворення топографічної мапи ММІ ЛД просторово-структурованих нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих внаслідок крововиливів у речовину головного мозку травматичного та нетравматичного генезів.

З порівняльного аналізу сукупності експериментально визначених координатних розподілів випадкових значень величини матричного параметра структурної анізотропії та даних алгоритмічного кореляційного і масштабно-самоподібного перетворення встановлено, що координатна, статистична, кореляційна і масштабно-самоподібна структура аналітично відтворених мап ММІ ЛД нейронних сіток зразків нативних гістологічних зрізів мозку померлих з усіх репрезентативних контрольної та дослідної груп померлих є індивідуальною.

Установлено зменшення:

- величини середнього та флуктуацій випадкових значень координатних розподілів матричного параметра лінійного двопронезаломлення ММІ ЛД, - рис. 1, рис. 3, рис. 5 і рис. 7 (фрагменти (1),(2));
- півширини автокореляційних функцій, які характеризують координатну узгодженість розподілів ММІ ЛД просторово-структурованих оптично анізотропних нейронних мереж, - рис. 2, рис. 4, рис. 6 і рис. 8 (фрагменти (1),(2));

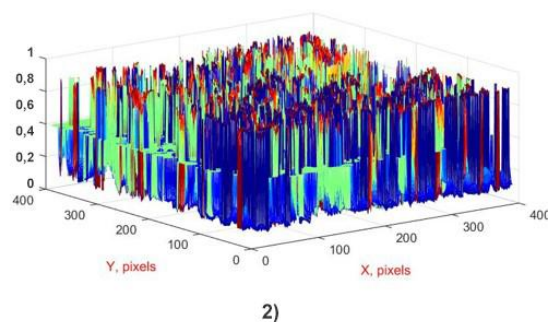
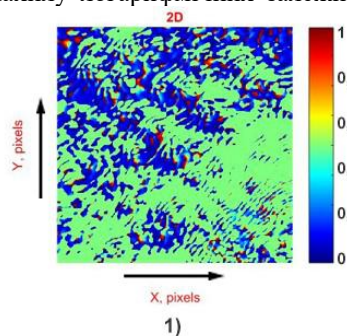


Рис. 1. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення лінійного двопронезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з контрольної групи 1

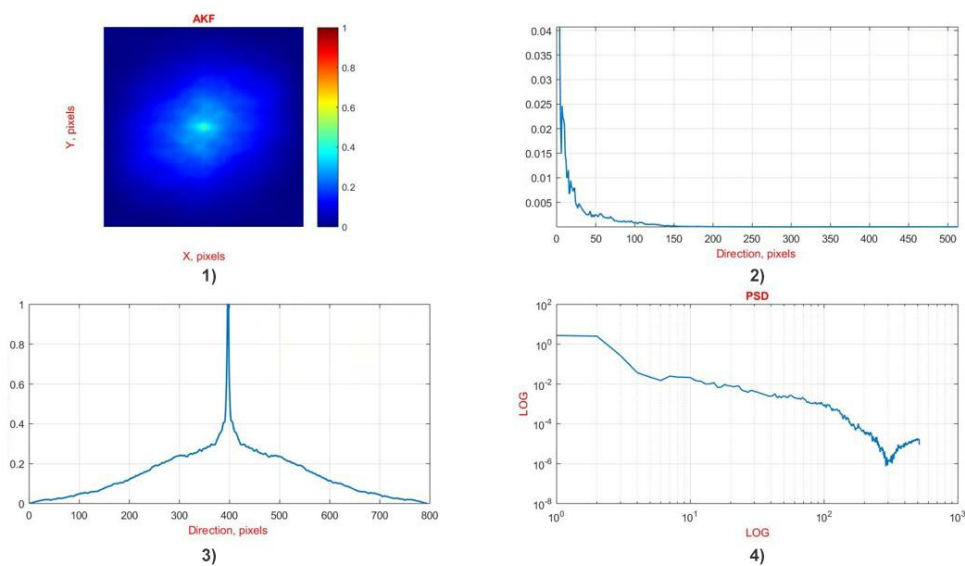


Рис. 2. Автокореляційні (фрагменти (1),(3)), просторово-частотні (фрагмент (2)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики Мюллер-матричного зображення лінійного двоприменезаломлення нативного гістологічного зрізу мозку померлого з контрольної групи 1

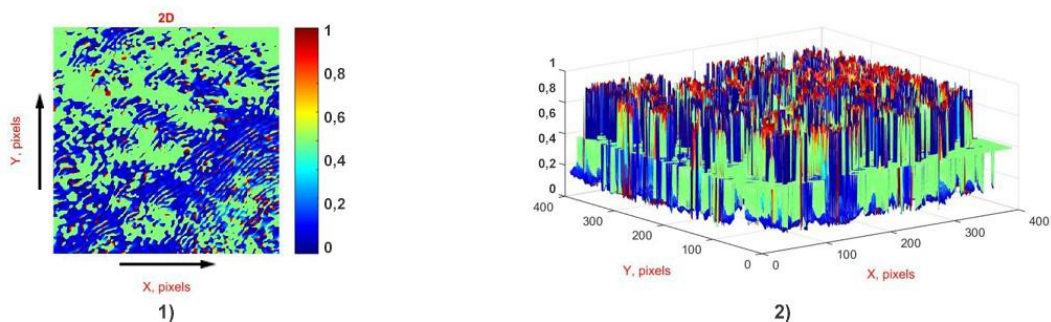


Рис. 3. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення лінійного двоприменезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з дослідної групи 2

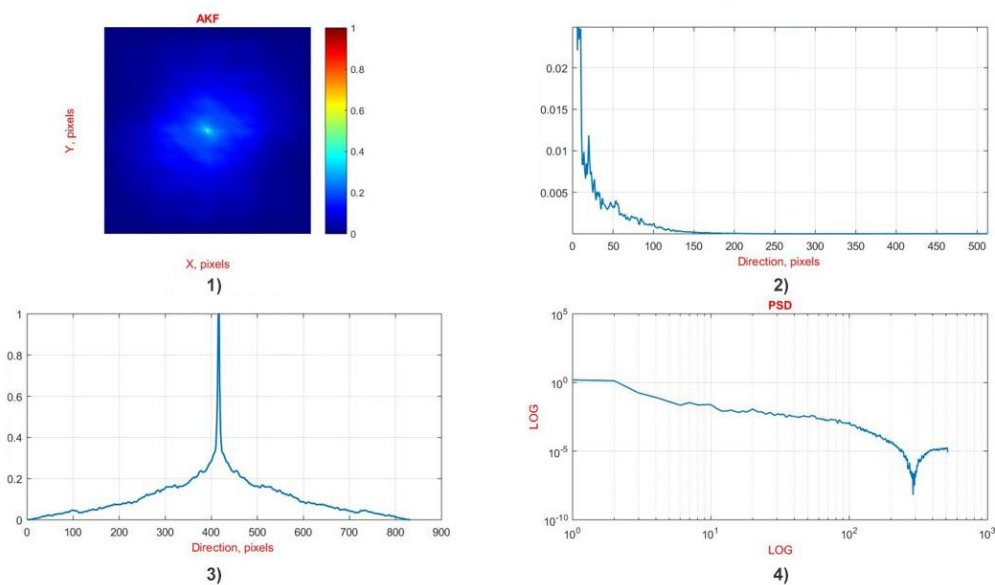


Рис. 4. Автокореляційні (фрагменти (1),(3)), просторово-частотні (фрагмент (2)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики Мюллер-матричного зображення лінійного двоприменезаломлення нативного гістологічного зрізу мозку померлого з дослідної групи 2

Оригінальні дослідження

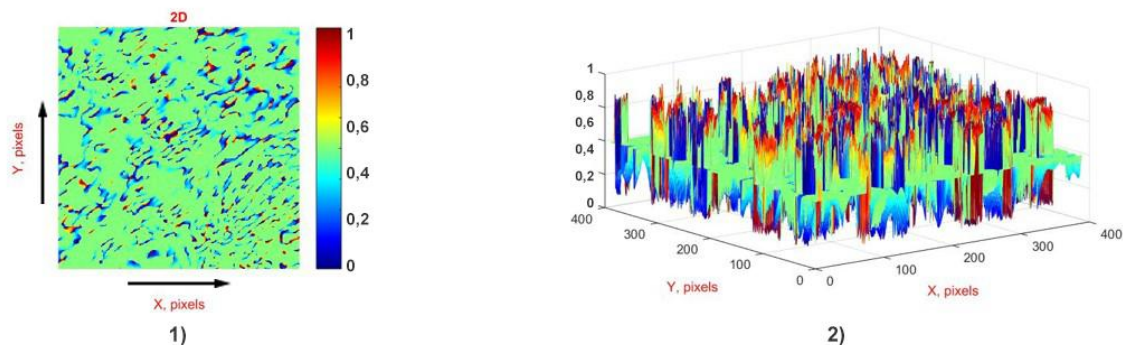


Рис. 5. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення лінійного двопротенезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з дослідної групи 3

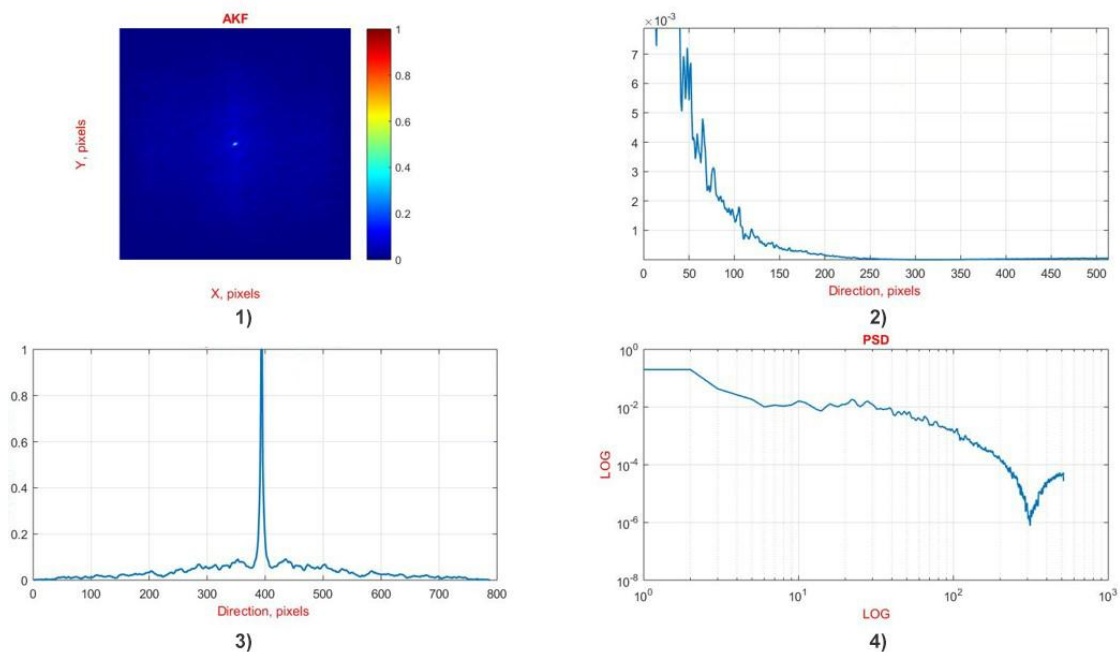


Рис. 6. Автокореляційні (фрагменти (1),(3)), просторово-частотні (фрагмент (2)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики Мюллер-матричного зображення лінійного двопротенезаломлення нативного гістологічного зрізу мозку померлого з дослідної групи 3

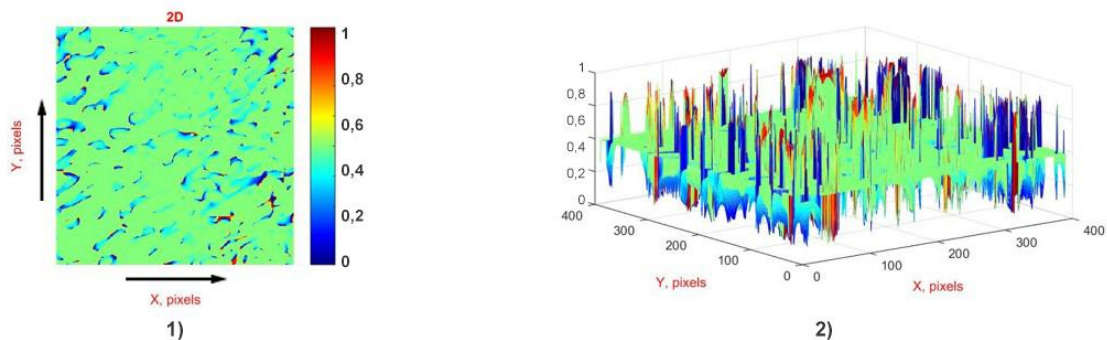


Рис. 7. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) Мюллер-матричні зображення лінійного двопротенезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з дослідної групи 4

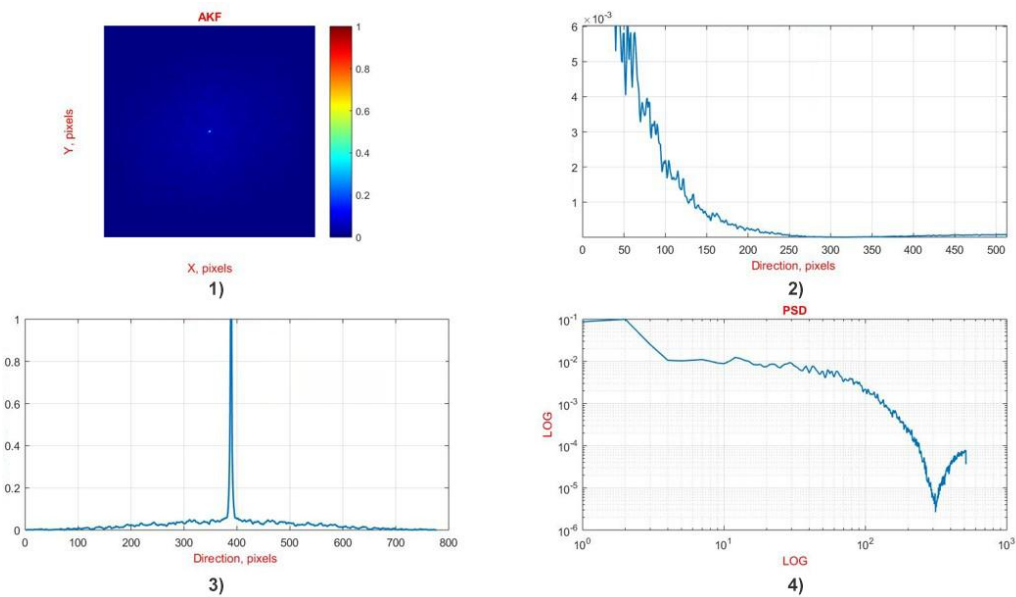


Рис. 8. Автокореляційні (фрагменти (1),(3)), просторово-частотні (фрагмент (2)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики Мюллер-матричного зображення лінійного двопронезаломлення нативного гістологічного зрізу мозку померлого з дослідної групи 4

- гостроти піку розподілів густини спектрів потужності PSD мап ММІ ЛД, який характеризує розподіл за геометричними масштабами структурних елементів - рис. 2, рис.4, рис. 6 і рис. 8 (фрагменти (3));
- геометричної довжини локальних лінійних ділянок нахилу логарифмічних залежностей спектрів потужності PSD автокореляційних функцій ММІ ЛД, - рис. 2, рис. 4, рис. 6 і рис. 8 (фрагменти (4)).

**Статистичні маркери диференціальної діагностики**

Установлено найбільш чутливі цифрові статистичні маркери:

- асиметрія  $Q_3$ , яка характеризує розподіл матричного параметра структурної анізотропії ММІ ЛД нейронних мереж експериментальних зразків нативних гістологічних зрізів мозку з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ( $< 0,001$ ) – прогнозоване зростання від 1,21 до 1,72;
- ексцес  $Q_4$ , який характеризує ступінь гостроти піку гістограми випадкових значень величини ММІ ЛД з діагностичним діапазоном статистично достовірної

зміни ( $< 0,001$ ) – прогнозоване зростання від 1,87 до 2,32.

Результати інформаційного аналізу з використанням статистичних маркерів  $Q_3; Q_4$  наведені у таблиці 2.

Установлено:

- Диференціація (групи “1 – 2+4”) – дуже хороший рівень точності  $A_c = 92\%$ ;
- Диференціація (групи “2 – 4”) – хороший рівень точності  $A_c = 90\%$ ;
- Диференціація (групи “2 – 3”) – задовільний рівень точності  $A_c = 86\%$ ;
- Диференціація (групи “3-4”) - незадовільний рівень точності  $A_c = 82\%$ ;

**Кореляційні і фрактальні маркери диференціальної діагностики крововиливів травматичного та нетравматичного генезів.**

У таблиці 3 представлені результати кореляційного і фрактального перетворення мап ММІ ЛД нейронних мереж зразків нативних гістологічних зрізів мозку.

Таблиця 1

**Статистичні маркери, які характеризують Мюллер-матричні зображення лінійного двопронезаломлення нейронних мереж зразків мозку померлих**

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку			
	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
$Q_{i=1;2;3;4}$				
Середнє, $Q_1$	0,21±0,011	0,18±0,009	0,15±0,08	0,11±0,006
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,05; p_{2;4} < 0,05; p_{3;4} < 0,05$			
Дисперсія, $Q_2$	0,12±0,007	0,09±0,005	0,07±0,004	0,05±0,003
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,05; p_{2;4} < 0,05; p_{3;4} < 0,05$			
Асиметрія, $Q_3$	1,21±0,051	1,32±0,059	1,48±0,069	1,72±0,087
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,001; p_{2;4} < 0,001; p_{3;4} < 0,001$			
Ексцес, $Q_4$	1,87±0,093	2,09±0,099	2,21±0,13	2,32±0,14
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,001; p_{2;4} < 0,001; p_{3;4} < 0,001$			

Таблиця 2

## Збалансована точність статистичних маркерів диференціальної діагностики крововиливів травматичного та нетравматичного генезів

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку		
Групи	“1 – 2+4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Асиметрія, $Q_3$	$a = 94; b = 6;$	$c = 90; d = 10;$	92
Експес, $Q_4$	$a = 94; b = 6;$	$c = 90; d = 10;$	92
Групи	“2 – 4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Асиметрія, $Q_3$	$a = 92; b = 8;$	$c = 88; d = 12;$	90
Експес, $Q_4$	$a = 92; b = 8;$	$c = 88; d = 12;$	90
Групи	“2 – 3”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Асиметрія, $Q_3$	$a = 88; b = 12;$	$c = 84; d = 16;$	86
Експес, $Q_4$	$a = 88; b = 12;$	$c = 84; d = 16;$	86
Групи	“3 – 4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Асиметрія, $Q_3$	$a = 84; b = 16;$	$c = 80; d = 20;$	82
Експес, $Q_4$	$a = 84; b = 16;$	$c = 80; d = 20;$	82

Тут  $b$  - кількість хибно негативних заключень,  $d$  - кількість хибно позитивних заключень.

Таблиця 3

## Кореляційні і фрактальні маркери, які характеризують ММІ ЛД

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку			
Групи	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
Параметри	Автокореляційні			
Експес, $K_4$	$13,9 \pm 0,5$	$16,8 \pm 0,6$	$35,3 \pm 3$	$44,2 \pm 4$
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,001; p_{2;4} < 0,001; p_{3;4} < 0,001$			
Площа, $SK$	$0,19 \pm 0,008$	$0,16 \pm 0,007$	$0,12 \pm 0,006$	$0,092 \pm 0,005$
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,05; p_{2;4} < 0,05; p_{3;4} < 0,05$			
Параметри	Фрактальні			
Експес, $PSD_4$	$244,4 \pm 12$	$201,7 \pm 10$	$123,3 \pm 6$	$78,9 \pm 4$
$p_{ik}$	$p_1 < 0,001; p_{2;3} < 0,001; p_{2;4} < 0,001; p_{3;4} < 0,001$			

Таблиця 4

## Збалансована точність кореляційних і фрактальних маркерів диференціальної діагностики генезу крововиливів

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку		
Групи	“1 – 2+4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Експес, $PSD_4$	$a = 95; b = 5;$	$c = 93; d = 7;$	93
Експес, $K_4$	$a = 95; b = 5;$	$c = 93; d = 7;$	93
Площа АКФ, $SK$	$a = 92; b = 8;$	$c = 88; d = 12;$	90
Групи	“2 – 4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Експес, $PSD_4$	$a = 94; b = 6;$	$c = 90; d = 10;$	92
Експес, $K_4$	$a = 94; b = 6;$	$c = 90; d = 10;$	92
Площа АКФ, $SK$	$a = 90; b = 10;$	$c = 86; d = 14;$	88
Групи	“2 – 3”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Експес, $PSD_4$	$a = 92; b = 8;$	$c = 88; d = 12;$	90
Експес, $K_4$	$a = 90; b = 10;$	$c = 86; d = 14;$	88
Площа АКФ, $SK$	$a = 88; b = 12;$	$c = 84; d = 16;$	86
Групи	“3 – 4”		
$Q_{i=1;2;3;4}$	$Se, \%$	$Sp, \%$	$Ac, \%$
Експес, $PSD_4$	$a = 90; b = 10;$	$c = 86; d = 14;$	88
Експес, $K_4$	$a = 88; b = 12;$	$c = 84; d = 16;$	86
Площа АКФ, $SK$	$a = 86; b = 14;$	$c = 82; d = 18;$	84



Порівняльний аналіз прогностичних і експериментально виявлених результатів діагностичної ефективності з використанням алгоритмів кореляційного і фрактального перетворення координатних розподілів ММІ ЛД нейронних сіток мозку виявив найбільш чутливі до генезу крововиливів цифрові маркери:

- ексцес  $K_4$ , величина якого характеризує гостроту піку автокореляційних функцій ММІ ЛД з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ( $< 0,001$ ) – збільшення від 13,9 до 44,2;

- кореляційна площа  $SK$  автокореляційної функції ММІ ЛД з діапазоном статистично достовірної зміни ( $< 0,001$ ) – зменшення від 0,19 до 0,092;

- ексцес  $PSD_4$  густини спектра потужності автокореляційного розподілу ММІ ЛД з діапазоном зміни ( $< 0,001$ ) зменшення від 244,4 до 78,9.

Результати інформаційного аналізу з визначенням у рамках доказової медицини операційних характеристик діагностичної сили методу ММІ ЛД репрезентативних вибірок зразків мозку померлих продемонстрували наступні рівні діагностичної ефективності диференціації генезу крововиливів.

Кореляційні маркери  $K_4$ ;  $SK$

- Диференціація (групи “1 – 2+4”) – хороший ( $Ac = 90\%$ ) і дуже хороший рівень точності  $Ac = 93\%$ ;

- Диференціація (групи “2 – 4”) – хороший ( $Ac = 88\%$ ) і дуже хороший рівень точності  $Ac = 92\%$ ;

- Диференціація (групи “2 – 3”) – хороший рівень точності  $Ac = 86\% – 88\%$ ;

- Диференціація (групи “3-4”) – задовільний ( $Ac = 84\%$ ) і хороший ( $Ac = 86\%$ ) рівень точності;

Фрактальні маркери  $PSD_4$

- Диференціація (групи “1 – 2+4”) – дуже хороший рівень точності  $Ac = 93\%$ ;

- Диференціація (групи “2 – 4”) – дуже хороший рівень точності  $Ac = 92\%$ ;

- Диференціація (групи “2 – 3”) – хороший рівень точності  $Ac = 90\%$ ;

- Диференціація (групи “3-4”) – хороший рівень точності  $Ac = 88\%$ ;

### Висновки

1. Експериментально апробовано метод азимутально-інваріантної Мюллер-матричної мікроскопії з алгоритмічним відтворенням Мюллер-

матричного інваріанта лінійного двопротенезаломлення полікристалічної архітекtonіки нативних гістологічних зрізів мозку померлих внаслідок крововиливів травматичного та нетравматичного генезів.

2. У рамках статистичного аналізу координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ЛД визначено сукупність цифрових маркерів (центральні статистичні моменти 3-го і 4-го порядків) диференціальної діагностики некротичних змін лінійного двопротенезаломлення нативних гістологічних зрізів фібрилярного мозку та установлено величини збалансованої точності міжгрупової диференціальної діагностики випадків крововиливів різного генезу.

3. У рамках кореляційного аналізу координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ЛД визначено сукупність цифрових маркерів (ексцес і кореляційна площа автокореляційного розподілу) диференціальної діагностики некротичних змін лінійного двопротенезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку та установлено величини збалансованої точності міжгрупової диференціальної діагностики генезу крововиливів.

4. У рамках фрактального аналізу координатних розподілів випадкових значень величини ММІ ЛД визначено сукупність цифрових маркерів (ексцес густини спектрів потужності) диференціальної діагностики некротичних змін лінійного двопротенезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку та установлено величини збалансованої точності міжгрупової диференціальної діагностики генезу крововиливів.

**Перспектива подальших досліджень.** Проведені дослідження свідчать про наявність змін у структурі речовини головного мозку людини, які чутливі для дослідження методами лазерної поляриметрії. Тому актуальним є продовження пошуку інших об'єктивних методів діагностики давності утворення крововиливу в речовину головного мозку людини, залежно від генезу крововиливу.

**Конфлікт інтересів: відсутній.**

**Джерело фінансування:** Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України №2023.03/0174.

### References

1. Ghosh N, Vitkin IA. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. J Biomed Opt. 2011;16(11):110801. DOI: 10.1117/1.3652896.
2. Jacques SL. Polarized light imaging of biological tissues. Handbook of Biomedical Optics. CRC Press; 2011. p. 649-69.
3. Layden D, Ghosh N, Vitkin IA. Quantitative polarimetry for tissue characterization and diagnosis. Advanced Biophotonics: Tissue Optical Sectioning. CRC Press; 2013. p. 73-108.
4. Vitkin A, Ghosh N, de Martino A. Tissue Polarimetry. Photonics: Scientific Foundations, Technology and Applications. John Wiley & Sons, Ltd. 2015. p. 239-321.
5. Olar E, Ushenko AG, Ushenko YA. Correlation microstructure of the Jones matrices for multifractal networks of biotissues. Laser Physics. 2004;14(7):1012-18.
6. Garazdyuk MS, Bachinskyi VT, Vanchulyak OY, Ushenko AG, Dubolazov OV, Gorsky MP. Polarization-phase images of liquor polycrystalline films in determining time of death. Appl Opt. 2016;55(12):67-71. DOI: 10.1364/AO.55.000B67.
7. Hu Z, Bachinsky VT, Vanchulyak OY, Soltys IV, Ushenko YA, Ushenko AG, et al. Spectral Phase Measurement of Laser Images of Sections of Biological Tissues of a Human Corpse for Death Time Detection. SpringerBriefs in Applied Sciences and

**Оригінальні дослідження**

---

Technology; 2023;697:53-70.

8. Ushenko YA, Bachinsky VT, Bezhenar IL, Vanchulyak OY, Litvinenko OY, Soltys IV, et al. Determination of the Lifetime and Post-mortal Nature and Temporal Dynamics of the Formation of Skin Abrasions. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 27-42.

9. Hu Z, Ushenko YA, Litvinenko OY, Gorsky M, Vanchulyak OY, Mikirin I, et al. Materials and Methods of Research in Laser Polarimetry Data Processing of Biological Tissues for Forensic Determining the Age of Injury. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 9-26.

10. Hu Z, Bachinsky VT, Vanchulyak OY, Soltys IV, Ushenko YA, Ushenko AG, et al. Novel Diagnosis Capabilities and Prospects for Determining Post-mortem Changes in Biological Tissues and the Time of Hematoma Formation in Forensic Medicine. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 1-10.

11. Ushenko YA, Hu Z, Soltys IV, Dubolazov OV, Olar OV, Gordey I, et al. Study of Two-Dimensional Polarization Maps of the Skin for Differentiation of Lifetime and Post-mortal Nature and Temporal Dynamics of Abrasions. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 43-75.

**Відомості про автора**

**Гараздюк М.С.** – канд. мед. наук, доцент кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету, м. Чернівці, Україна. ORCID: 0000-0002-7811-3211 ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/C-8134-2017>

**Ушенко О.Г.** – д-р фіз.-мат. наук, професор, Дійсний член Академії інженерних наук України; академік Академії наук вищої школи України, завідувач кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. ORCID : 0009-0002-5088-592X

**Дуболазов О.В.** – д-р фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, м. Чернівці, Україна. ORCID0000-0003-1051-2811, Scopus Author ID: 35318204300

**Information about the authors**

**Garazdiuk M.S.** – PhD, Associate Professor at Department of Forensic Medicine and Medical Law, Bukovinian State Medical University, Chernivtsi, Ukraine. ORCID: 0000-0002-7811-3211 ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/C-8134-2017>

**Ushenko O.G.** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Full Member of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine; Academician of the Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine, Head of the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivthsi, Ukraine. ORCID: 0009-0002-5088-592X

**Dubolazov O.V.** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Optics and Publishing and Printing, Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivthsi, Ukraine. ORCID: 0000-0003-1051-2811, Scopus Author ID: 35318204300

*Надійшла до редакції 05.01.25*

*© М.С. Гараздюк, О.Г. Ушенко, О.В. Дуболазов, 2025*