

UDC: 340.66:616.831-001.31-005.1/4-005.8
DOI: 10.24061/2413-4260. XV.1.55.2025.19

**М. С. Гараздюк¹, О. Г. Ушенко²,
О. В. Дуболазов²**

Буковинський державний медичний університет¹,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича²
(Чернівці, Україна)

ПОЛЯРИЗАЦІЙНЕ ВІДТВОРЕННЯ МАП СТРУКТУРНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПРЕПАРАТІВ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ДЛЯ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ КРОВОВИЛИВІВ ТРАВМАТИЧНОГО ТА НЕТРАВМАТИЧНОГО ГЕНЕЗУ

Резюме

За останні роки у різноманітних галузях медицини широкого та ефективного розповсюдження набули сучасні неруйнівні та неінвазивні методи оптичної діагностики препаратів біологічних тканин і рідин. Серед широкого спектру оптичних методів виокремився один з найбільш ефективних – лазерна поляриметрична діагностика полікристалічної структури біологічних шарів.

Мета і завдання дослідження: експериментально апробувати і визначити сукупність маркерів диференціальної діагностики причини смерті внаслідок утворення крововиливів травматичного та нетравматичного генезу в речовину головного мозку людини шляхом використання методу Мюллер-матричного картографування з алгоритмічним відтворенням лінійного двоприменезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку.

Матеріали та методи дослідження. У якості дослідного матеріалу використовувалися нативні гістологічні зрізи речовини 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 ($n=40$). Вилучені зразки речовини головного мозку людини заморожували при температурі -70°C та надалі виготовлялися гістологічні зрізи за допомогою заморожувального мікротому. Надалі були проведені дослідження отриманих зразків за допомогою Стокс-поляриметра методом азимутально-інваріантного експериментального вимірювання координатних розподілів величини елементів матриці Мюллера нативних гістологічних зрізів мозку померлих.

Результати дослідження. У процесі наростання дегенерації та некрозу знижується рівень макроструктурного лінійного двоприменезаломлення, а також трансформації топографічної ієрархії полікристалічної архітектури мозку. У результаті зменшуються відповідні випадкові значення і їх флуктуації у координатних розподілах лінійного двоприменезаломлення структурних елементів полікристалічної архітектури дослідних зразків мозку. Топографічна структура алгоритмічно відтворених мап стає менш однорідною, дрібномасштабною та статистичною за рахунок дегенерації та некрозу нейронних сіток. Виходячи з цього було обґрунтовано прогностичні сценарії зміни сукупності цифрових статистичних, кореляційних, фрактальних і вейвлет маркерів, які визначають патологічну трансформацію лінійного двоприменезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку.

Висновки. Установлено діагностичну силу методу азимутально-інваріантної Мюллер-матричної мікроскопії нативних гістологічних зрізів мозку померлих внаслідок крововиливів травматичного та нетравматичного генезу на відмінному рівні (до 97,5%).

Ключові слова: черепно-мозкова травма; судова медицина; час утворення крововиливу; лазерна поляриметрія, двоприменезаломлення; гістологічні зрізи.

Вступ

За останні роки у різноманітних галузях медицини широкого та ефективного розповсюдження набули сучасні неруйнівні та неінвазивні методи оптичної діагностики препаратів біологічних тканин і рідин [1, 2]. Серед широкого спектру оптичних методів виокремився один з найбільш ефективних – лазерна поляриметрична діагностика полікристалічної структури біологічних шарів [3, 4]. Зокрема було продемонстровано можливість лазерної поляриметричної високоточної та експресної диференціальної діагностики патологічних і некротичних станів [4-6]. 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 [2-11].

Найбільш ефективним на даний час є застосування таких методів у складних завданнях судової меди-

цини, які пов'язані із визначенням причини і давності смерті, травматичних ушкоджень тощо [8-11].

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 із установленням критеріїв діагностики генезу крововиливів у речовину головного мозку людини.

Мета і завдання дослідження: експериментально апробувати і визначити сукупність маркерів диференціальної діагностики причини смерті внаслідок утворення крововиливів травматичного та нетравматичного генезу в речовину головного мозку людини шляхом використання методу Мюллер-матричного картографу-

вання з алгоритмічним відтворенням лінійного двопротоменезаломлення нативних гістологічних зрізів мозку.

Матеріали та методи дослідження

У якості дослідного матеріалу використовувалися нативні гістологічні зрізи речовини 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 ($n=40$). Вилучені під час проведення судово-медичних розтинів в ДСУ «Чернівецьке обласне бюро судово-медичної експертизи» зразки речовини головного мозку людини заморожували при температурі -70°C та надалі виготовлялися гістологічні зрізи за допомогою заморожувального мікроскопа.

У лабораторії Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук ім. Юрія Федьковича були проведені дослідження отриманих зразків за допомогою Стокс-поляриметра методом азимутально-інваріантного експериментального вимірювання координатних розподілів величини елементів матриці Мюллера нативних гістологічних зрізів мозку померлих, який полягає у наступній сукупності дій:

1. Зразок мозку розміщують на предметному механічному столику лазерного Мюллер-матричного поляриметра (детальна конструкція та опис параметрів його оптичних і оптико-електронних елементів наведені у численних публікаціях [3-11] і нами не приводиться).

2. За допомогою багатоканального поляризаційного фільтра послідовно формують чотири поляризаційні стани опромінюючого зразок мозку паралельного пучка He-Ne лазера з довжиною хвилі $0,6328\text{ мкм}$:

- 1-й канал – лінійно поляризований з азимутом 0° ;
- 2-й канал – лінійно поляризований з азимутом 90° ;
- 3-й канал – лінійно поляризований з азимутом 45° ;
- 4-й канал – право ($\otimes$) циркулярно поляризований.

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

4. Перед цифровою камерою розміщений багатоканальний поляризатор-аналізатор з шістьма фільтрами:

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

5. Пропущене кожним парціальним поляризаційним фільтром мікроскопічне зображення зразка мозку 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 ($0^\circ; 90^\circ; 45^\circ; \otimes$) опромінення паралельним лазерним пучком здійснюється обчислення чотирьох параметрів ($St_{i=1,2,3,4}$) вектора Стокса St за відомими співвідношеннями [2-10]

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

Координатні розподіли величини парціальних матричних елементів, обчислених у межах сукупності всіх пікселів світлочутливої площадки цифрової ка-

мери, формують Мюллер-матричні зображення (ММЗ) оптично анізотропної полікристалічної архітектури зразків мозку померлих з різним генезом крововиливу:

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

Сукупність ММЗ є базисом для алгоритмічного відтворення мап лінійного двопротоменезаломлення (LB) нейронних мереж мозку

$$LB = 0,5 \arcsin \left(\frac{(m_{24} - m_{42})}{(m_{34} - m_{43})} \right). \quad (3)$$

Одержані розподіли випадкових значень величини LB алгоритмічно обробляються у межах наступних аналітичних підходів

Статистичний підхід у програмному продукті MATLAB обчислюються центральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків

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

де $Q_{i=1,2,3,4}$ – середнє $Q_{i=1}$, дисперсія $Q_{i=2}$, асиметрія $Q_{i=3}$ та ексцес $Q_{i=4}$; $m \times n$ – кількість пікселів цифрової камери.

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

Кожне власне значення АКФ характеризує ступень подібності розподілів випадкових значень величини LB . Кількісно таку подібність характеризують ексцес K_4 (ступень «гостроти» піку АКФ) і кореляційна площа SK , яка визначається інтегруванням під обчислену кореляційною функцією.

Фрактальний підхід

Суть фрактального аналізу, який виконувався у програмному продукті MATLAB, полягає в обчисленні логарифмічних залежностей густини спектрів потужності (PSD) розподілів LB . Оцінка фрактальності розподілів LB 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 спектру потужності PSD , який характеризує розподіл за розмірами структурних елементів LB .

Вейвлет підхід

Вейвлет аналіз у загальному являє собою аналог математичного мікроскопу для розподілів LB препаратів мозку померлих. В обчисленнях вейвлет перетворення використовували програму MATLAB і вейвлет-функцію «мексиканський капелюх» – MHAТ із змінною півшириною або масштабом a . Така функція аналітично переміщується (координата лінійного переміщення b) вздовж розподілів LB . У кожній точці (b) визначається ступень кореляційної узгодженості між LB і півшириною (a) вейвлет функції.

Результати дослідження

Досліджено чотири групи репрезентативних вибірок зразків нативних гістологічних зрізів мозку померлих на основі наступних теоретичних положень багатofункціональної Мюллер-матричної поляриметрії препаратів біологічних тканин органів людини [2-9]:

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

Аморфна компонента препарату 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.

Полікристалічна архітектоніка нервової тканини мозку утворена просторово-структурованими сітками нейронів і володіє переважно лінійним двоприменезаломленням.

Наслідки травмизації нервової тканини виявляються у набряку та інфільтрації нейронів. У результаті нарастають ознаки їх дегенерації та некрозу, що виявляється у зниженні рівня структурного лінійного двоприменезаломлення, а також трансформації топографічної ієрархії полікристалічної архітектоніки мозку.

Найбільш інформаційно повним методом експериментального детектування оптично анізотропної архі-

тектоніки зрізів мозку є Мюллер-матричне картографування з алгоритмічним відтворенням мап лінійного двоприменезаломлення.

На фрагментах рис. 1 (контрольна група 1), рис. 3 (група 2), рис. 5 (група 3) і рис. 7 (група 4) наведено серію алгоритмічно відтворених координатних (1) розподілів випадкових значень величини лінійного двоприменезаломлення та тривимірні (2) реконструкції мап структурної анізотропії нейронних мереж експериментальних зразків нативних гістологічних зрізів мозку.

Сукупність рис. 2 (група 1), рис. 4 (група 2), рис. 6 (група 3) і рис. 8 (група 4) ілюструє результати вейвлет (координатні (1), лінійні залежності амплітуд вейвлет коефіцієнтів (3)) і фрактального (густина спектрів потужності PSD (2), логарифмічні залежності PSD (4)) алгоритмічного перетворення мап LB .

Для всіх чотирьох груп зразків мозку закономірності виявлено загальні шляхом порівняльного аналізу координатних розподілів величини параметру структурної анізотропії та даних статистичного оброблення масштабно-селективного (вейвлет), кореляційного і масштабно-самоподібного (фрактального) перетворення поляризаційно відтворених мап лінійного двоприменезаломлення просторово-структурованих нейронних сіток.

1. Мапи LB експериментальних зразків мозку є координатно-неоднорідними з випадковими локальними значеннями лінійного двоприменезаломлення. Кількісно це виявляється у різній півширині і гостроті піку автокореляційних функцій розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення ансамблю значень параметру структурної анізотропії.

2. Мапи LB сформовані великомасштабними ансамблями локальних ділянок (оптично анізотропних доменів). Кількісно це виявляється у різній величині амплітуди і періоду модуляції вейвлет коефіцієнтів на різних масштабах структурних оптично анізотропних доменів просторово-структурованих нейронних мереж.

3. Фрактальний аналіз розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення топографічної структури мап LB виявив індивідуальну кількість і геометричну довжину лінійних ділянок логарифмічних залежностей густини спектрів потужності розподілів параметру структурної анізотропії у межах всіх репрезентативних вибірок зразків мозку для різних груп померлих.

Для різних груп дослідження, в залежності від генезу смерті, спостерігаються наступні патологічні трансформації статистичної і топографічної структури мап LB :

- зменшення середнього рівня та глибини флуктуацій випадкових значень величини лінійного двоприменезаломлення, – рис. 1, рис. 3, рис. 5 і рис. 7 (фрагменти (1),(2));
- зростання періоду модуляції величини амплітуд вейвлет коефіцієнтів алгоритмічного масштабно-селективного перетворення координатних розподілів величини лінійного двоприменезаломлення, – рис. 2, рис. 4, рис. 6 і рис. 8 (фрагменти (1),(2));
- зростання гостроти піку автокореляційних функцій розподілу величини амплітуд вейвлет-коефіцієнтів алгоритмічного перетворення ансамблю випадкових значень величини структурної анізотропії, – рис. 2, рис. 4, рис. 6 і рис. 8 (фрагменти (3));

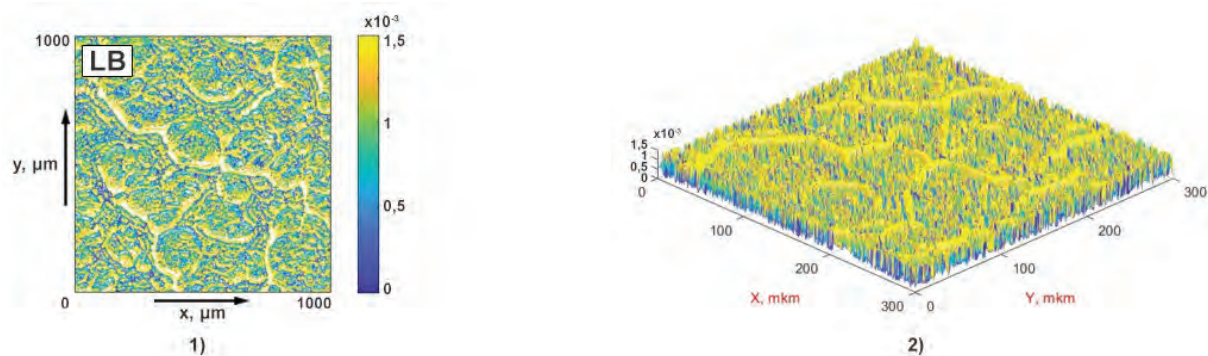


Рис. 1. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) мапи *LB* нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з контрольної групи 1.

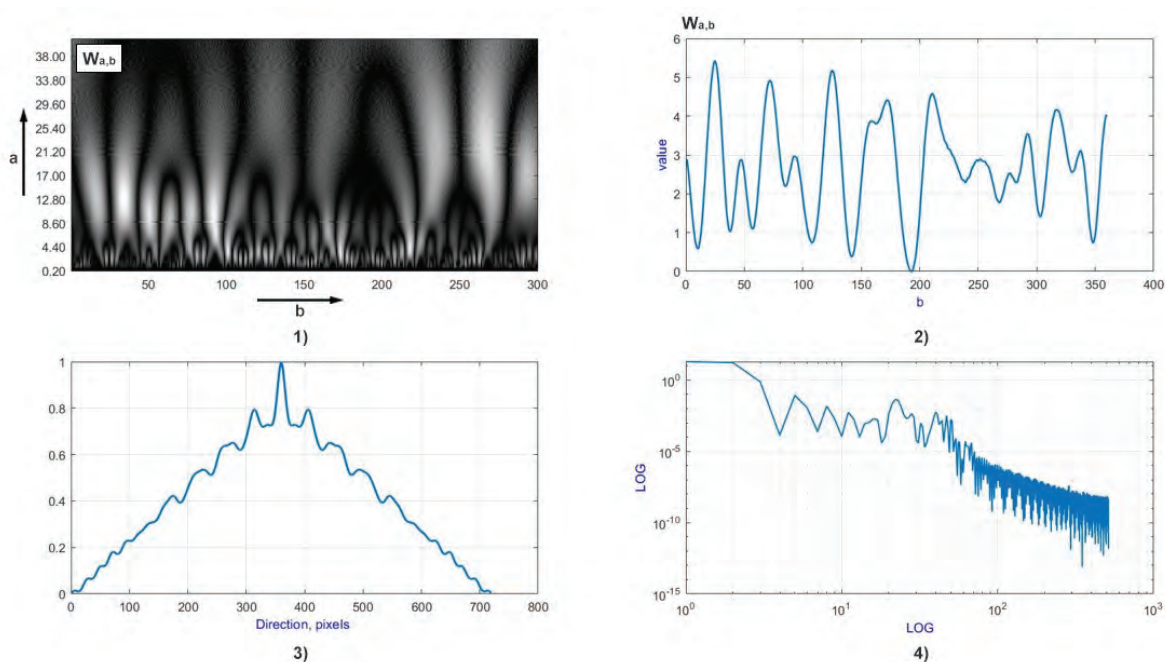


Рис. 2. Координатні (фрагмент (1)), лінійні (фрагмент (2)), автокореляційні (фрагмент (3)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики вейвлет перетворення мапи *LB* нативного гістологічного зрізу мозку померлого з контрольної групи 1.

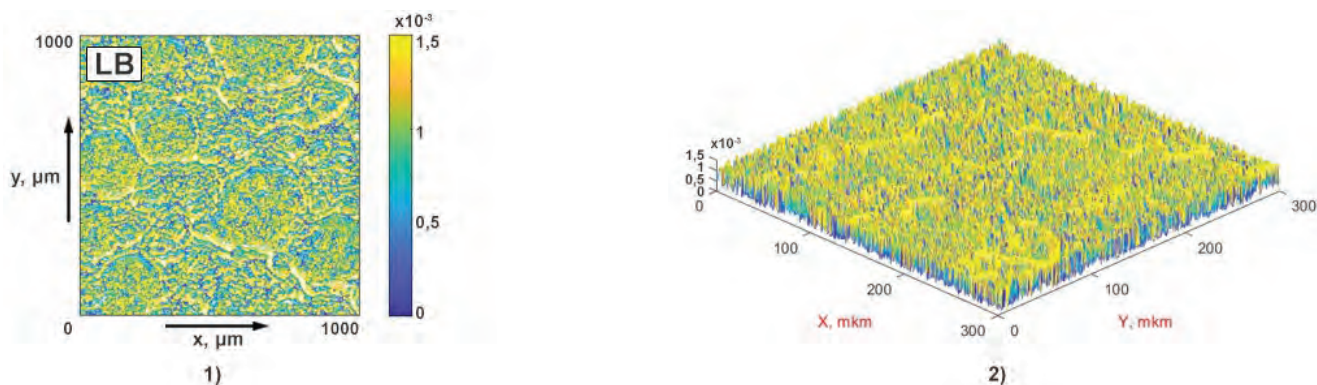


Рис. 3. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) мапи лінійного двопронезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з групи 2.

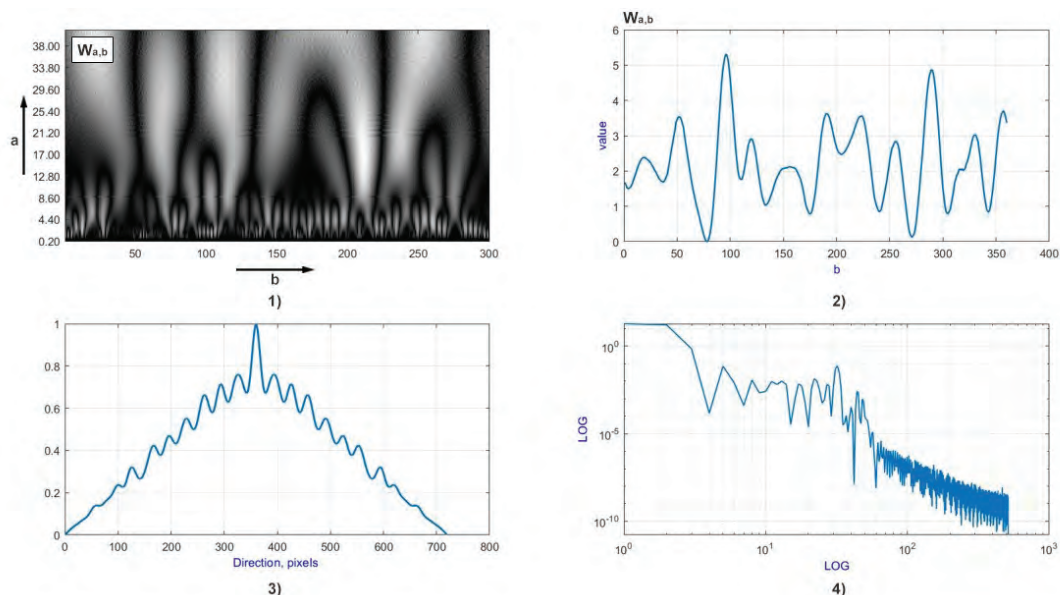


Рис. 4. Координатні (фрагмент (1)), лінійні (фрагмент (2)), автокореляційні (фрагмент (3)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики вейвлет перетворення мапи лінійного двопроектного зрізу істологічного зрізу мозку померлого з групи 2.

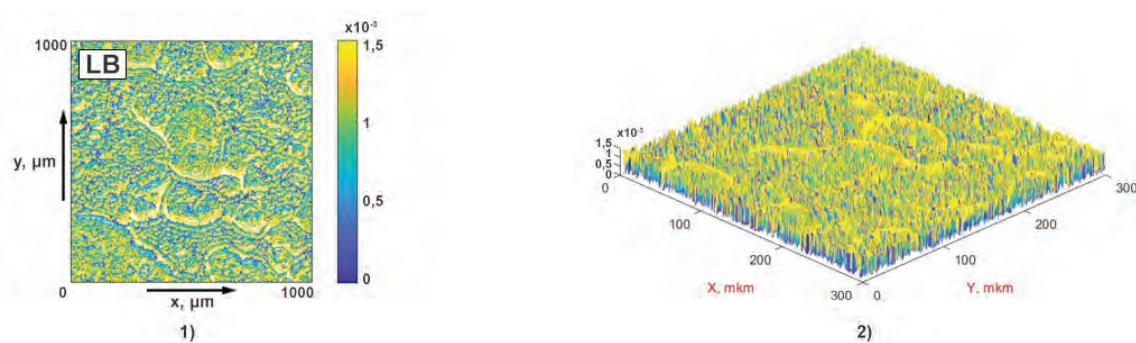


Рис. 5. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) мапи лінійного двопроектного зрізу істологічних зрізів мозку померлого з групи 3.

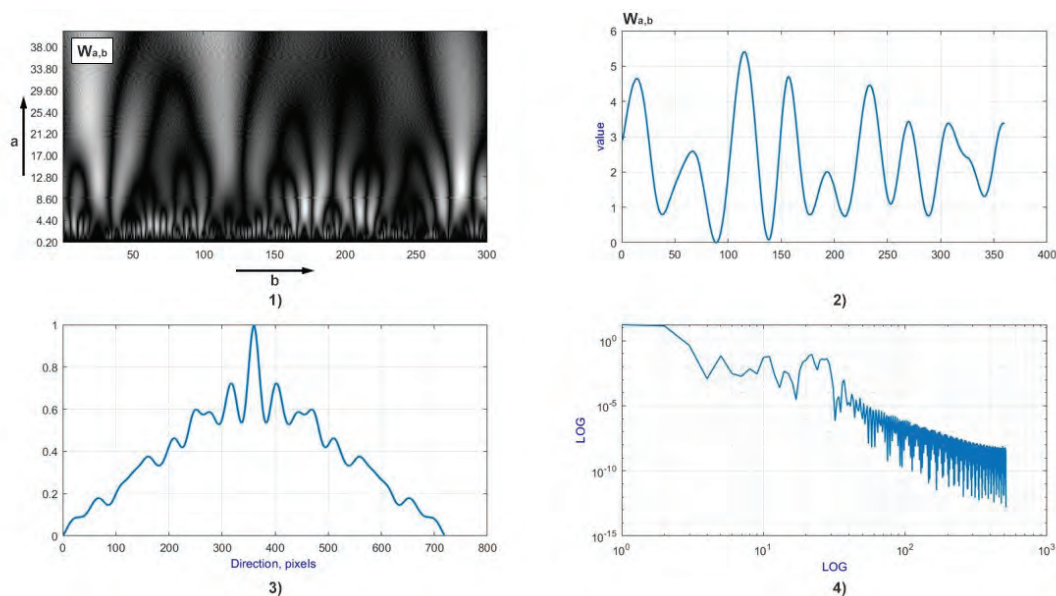


Рис. 6. Координатні (фрагмент (1)), лінійні (фрагмент (2)), автокореляційні (фрагмент (3)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики вейвлет перетворення мапи LB істологічного зрізу мозку померлого з групи 3.

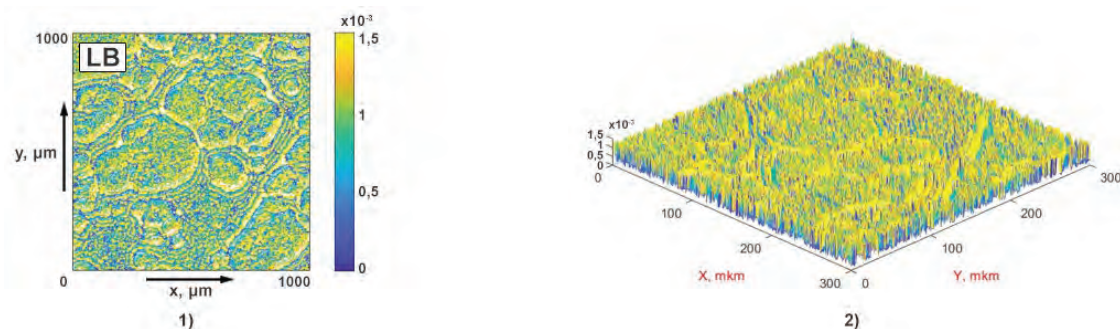


Рис. 7. 2D (фрагмент (1)) і 3D (фрагмент (2)) мапи *LB* нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлого з групи 4.

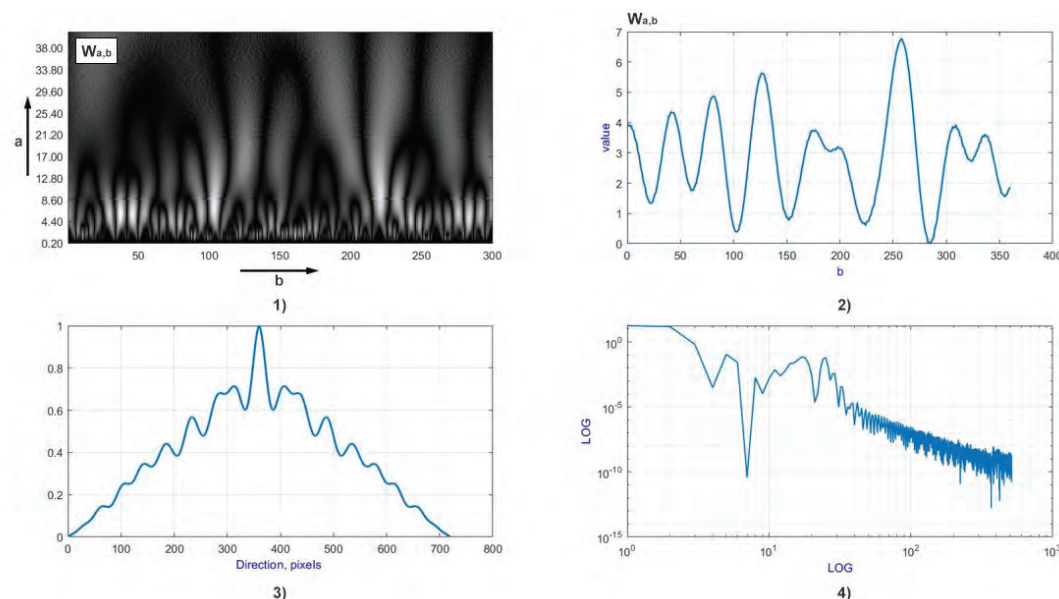


Рис. 8. Координатні (фрагмент (1)), лінійні (фрагмент (2)), автокореляційні (фрагмент (3)) і фрактальні (фрагмент (4)) характеристики вейвлет перетворення мапи *LB* нативного гістологічного зрізу мозку померлого з групи 4.

Експериментально виявлені закономірності можна пов'язати із запропонованими модельними уявленнями про некротичні зміни архітекtonіки зразків мозку померлих з дослідних груп 2-4.

В процесі наростання дегенерації та некрозу знижується рівень макроструктурного лінійного двопроектного заломлення, а також трансформації топографічної ієрархії полікристалічної архітекtonіки мозку. У результаті зменшуються відповідні випадкові значення і їх флуктуації у координатних розподілах *LB* структурних елементів полікристалічної архітекtonіки дослідних зразків мозку.

Топографічна структура алгоритмічно відтворених мап *LB* стає менш однорідною, дрібномасштабною та статистичною за рахунок дегенерації та некрозу нейронних сіток. Виходячи з цього було обґрунтовано наступні прогностичні сценарії зміни сукупності цифрових статистичних, кореляційних, фрактальних і вейвлет маркерів, які визначають патологічну трансформацію лінійного двопроектного заломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку:

- Центральні статистичні моменти 1-го і 2-го порядку (середнє Q_1 і дисперсія Q_2) – має місце послідовне

зменшення середнього рівня величини лінійного двопроектного заломлення за рахунок інфільтрації та некротичної деструкції нейронних сіток.

- Центральні статистичні моменти 3-го і 4-го порядку (асиметрія Q_3 і ексцес Q_4) – послідовно зростання величин, які обернено пропорційні Q_1 і Q_2 порядків.

- Ексцес K_4 автокореляційних функцій розподілів амплітуд вейвлет коефіцієнтів – послідовно зростає, а відповідна кореляційна площа SK , навпаки, зменшується за рахунок формування координатно неоднорідних розподілів параметрів масштабно-селективного вейвлет перетворення мап *LB* некротично змінених нейронних сіток мозку.

- Асиметрія W_3 і ексцес W_4 розподілів величини амплітуд вейвлет-коефіцієнтів послідовно зростають за рахунок зростання періоду модуляції власних значень, які пов'язані з координатною неоднорідністю мап лінійного двопроектного заломлення некротично зміненої архітекtonіки мозку.

У таблиці 1 приведені результати статистичного аналізу результатів методу азимутально-інваріантного Мюллер-матричного поляризаційного відтворення мап структурної анізотропії нейронних мереж мозку.

Таблиця 1

**Статистичні маркери, які характеризують мапи лінійного двопроектного заломлення нейронних мереж
нативних гістологічних зрізів мозку померлих**

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку			
$Q_{i=1,2,3,4}$	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
$Q_1 \times 10^{-3}$	1,26±0,065	1,13±0,058	1,09±0,054	1,03±0,047
p_{ik}	$p_1 < 0,05; p_{2,3} < 0,05; p_{2,4} < 0,05; p_{3,4} < 0,05$			
$Q_2 \times 10^{-3}$	0,34±0,014	0,29±0,013	0,22±0,012	0,16±0,011
p_{ik}	$p_1 < 0,001; p_{2,3} < 0,05; p_{2,4} < 0,05; p_{3,4} < 0,05$			
Q_3	0,25±0,014	0,34±0,019	0,53±0,025	0,68±0,035
p_{ik}	$p_1 < 0,001; p_{2,3} < 0,001; p_{2,4} < 0,001; p_{3,4} < 0,001$			
Q_4	0,39±0,022	0,51±0,027	0,65±0,034	0,76±0,039
p_{ik}	$p_1 < 0,001; p_{2,3} < 0,001; p_{2,4} < 0,001; p_{3,4} < 0,001$			

Установлено цифрові статистичні маркери, які найбільш чутливі до некротичної трансформації оптично анізотропної архітектури мозку:

- асиметрія Q_3 розподілу випадкових значень величини лінійного двопроектного заломлення нейронних мереж мозку з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($< 0,001$) – прогнозоване зростання від 0,25 до 0,68;
- ексцес Q_4 (гострота піку) гістограми розподілу випадкових значень величини параметру структурної

анізотропії з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($< 0,001$) – прогнозоване зростання від 0,39 до 0,76.

На цій основі шляхом застосування принципів доказової медицини і з використанням статистичних маркерів Q_3 ; Q_4 установлені рівні збалансованої точності діагностичної сили методу поляризаційної томографії лінійного двопроектного заломлення (див. таблиця 2).

Таблиця 2

**Збалансована точність статистичних маркерів диференціальної діагностики генезу крововиливу
в речовину головного мозку методом Мюллер-матричної мікроскопії лінійного двопроектного заломлення
нейронних мереж гістологічних зрізів мозку померлих**

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку		
Group	«1-2+4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
asymmetry, Q_3	a = 96; b = 4;	c = 94; d = 6;	95
kurtosis, Q_4	a = 97; b = 3;	c = 94; d = 6;	95,5
Group	«2-4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
asymmetry, Q_3	a = 95; b = 5;	c = 93; d = 7;	
kurtosis, Q_4	a = 96; b = 4;	c = 94; d = 6;	
Group	«2-3»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
asymmetry, Q_3	a = 94; b = 6;	c = 92; d = 8;	
kurtosis, Q_4	a = 95; b = 5;	c = 92; d = 8;	
Group	«3-4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
asymmetry, Q_3	a = 94; b = 6;	c = 90; d = 10;	
kurtosis, Q_4	a = 94; b = 6;	c = 91; d = 9;	

Де b – кількість хибно негативних заключень, d – кількість хибно позитивних заключень.

Продемонстровано наступну діагностичну ефективність статистичної диференціації мап лінійного двопроектного заломлення зразків мозку з різним генезом крововиливу:

- Діагностика («контрольна група 1 – дослідні групи 2, 3, 4») – відмінний рівень збалансованої точності $Ac = 97\% - 98\%$.
- Диференціація (група 2 – група 4) – відмінний рівень збалансованої точності $Ac = 95\% - 96\%$.
- Диференціація (група 2 – група 3) – дуже хороший рівень збалансованої точності $Ac = 93\% - 94\%$.

- Диференціація (група 3 – група 4) – хороший рівень збалансованої точності $Ac = 89\% - 92\%$.

У таблиці 3 представлені результати визначення додаткових цифрових маркерів диференціальної діагностики генезу крововиливу шляхом статистичної, кореляційної та фрактальної обробки лінійних розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення мап лінійного двопроектного заломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих.

Таблиця 3

Кореляційні і фрактальні маркери, які характеризують вейвлет перетворення мап лінійного двопроектного заломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку			
Групи	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4
Параметри	Вейвлет			
Асиметрія, W_3	0,081±0,004	0,12±0,007	0,21±0,012	0,33±0,017
p_{ik}	$p_1 < 0,001$; $p_{2,3} < 0,001$; $p_{2,4} < 0,05$; $p_{3,4} < 0,001$			
Ексцес, W_4	0,91±0,045	1,34±0,076	1,96±0,11	2,79±0,15
p_{ik}	$p_1 < 0,001$; $p_{2,3} < 0,001$; $p_{2,4} < 0,05$; $p_{3,4} < 0,001$			
Параметри	Автокореляційні			
Ексцес, K_4	1,11±0,053	0,92±0,054	0,74±0,039	0,41±0,021
p_{ik}	$p_1 < 0,001$; $p_{2,3} < 0,001$; $p_{2,4} < 0,05$; $p_{3,4} < 0,001$			
Площа, SK	0,191±0,001	0,222±0,011	0,246±0,001	0,281±0,0011
p_{ik}	$p_1 < 0,001$; $p_{2,3} < 0,001$; $p_{2,4} < 0,05$; $p_{3,4} < 0,001$			

Аналіз результатів алгоритмічної діагностичної кореляційної і фрактальної обробки розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення мап LB виявив наступні цифрові діагностичні маркери:

- Кореляційний ексцес K_4 , величина якого характеризує гостроту піку автокореляційних функцій розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення мап структурної анізотропії нейронних сіток нативних гістологічних зрізів мозку померлих з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($<0,001$) – прогнозоване зменшення від 1,11 до 0,41;

- кореляційна площа SK автокореляційної функції лінійного розподілу величини амплітуд вейвлет коефіцієнтів з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($<0,001$) – прогнозоване зростання від 0,191 до 0,281;

- асиметрія розподілів значень амплітуд вейвлет коефіцієнтів мап лінійного двопроектного заломлення нейронних сіток експериментальних зразків мозку померлих W_4 з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($<0,001$) – прогнозоване зростання від 0,081 до 0,33;

- Ексцес W_4 розподілів амплітуд вейвлет коефіцієнтів мап ЛД нейронних мереж з діагностичним діапазоном статистично достовірної зміни ($<0,001$) – прогнозоване зростання від 0,91 до 2,79;

У таблиці 4 представлені результати визначення операційних характеристик (чутливість, специфічність і збалансована точність) діагностичної сили методу азимутально-інваріантного картографування мап LB нативних гістологічних зрізів мозку померлих шляхом використання виявлених цифрових статистичних і кореляційних маркерів вейвлет параметрів.

Таблиця 4

Збалансована точність кореляційних і фрактальних маркерів диференціальної діагностики ґенезу крововиливу методом поляризаційного відтворення мап LB нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих

Зразок	Нативні гістологічні зрізи мозку		
Групи	«1-2+4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
Асиметрія, W_3	a = 98; b = 2;	c = 96; d = 4;	97
Ексцес, W_4	a = 98; b = 2;	c = 97; d = 3;	97,5
Ексцес, K_4	a = 99; b = 1;	c = 95; d = 5;	97
Площа АКФ, SK	a = 98; b = 2;	c = 96; d = 4;	95
Групи	«2-4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
Асиметрія, W_3	a = 98; b = 2;	c = 95; d = 5;	96,5
Ексцес, W_4	a = 98; b = 2;	c = 96; d = 4;	97
Ексцес, K_4	a = 98; b = 2;	c = 95; d = 5;	96,5
Площа АКФ, SK	a = 97; b = 3;	c = 94; d = 6;	95,5
Групи	«2-4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
Асиметрія, W_3	a = 97; b = 3;	c = 95; d = 5;	96
Ексцес, W_4	a = 98; b = 2;	c = 95; d = 5;	96,5
Ексцес, K_4	a = 97; b = 3;	c = 94; d = 6;	95,5
Площа АКФ, SK	a = 96; b = 4;	c = 92; d = 8;	94
Групи	«2-4»		
$Q_{i=1,2,3,4}$	Se, %	Sp, %	Ac, %
Асиметрія, W_3	a = 96; b = 4;	c = 94; d = 6;	95
Ексцес, W_4	a = 97; b = 3;	c = 95; d = 5;	96

Continuation of the table 4

Sample	Native histological brain sections		
Ексцес, K_4	$a = 96; b = 4;$	$c = 95; d = 5;$	95,5
Площа АКФ, SK	$a = 95; b = 5;$	$c = 92; d = 8;$	93,5

Визначено наступні рівні точності діагностичної диференціації для:

1. Кореляційних маркерів K_4 ; SK вейвлет перетворення поляризаційно реконструйованих мап LB:

- Діагностика («контрольна група 1 – дослідні групи 2, 3, 4») – відмінний $Ac = 95\% - 97\%$ рівень збалансованої точності.

- Диференціація (група 2 – група 4) – відмінний $Ac = 95,5\% - 96,5\%$ рівень збалансованої точності.

- Диференціація (група 2 – група 3) – хороший (SK) $Ac = 93,5\%$ і відмінний (K_4) $Ac = 95,5\%$ рівень збалансованої точності.

- Диференціація (група 3 – група 4) – хороший (SK) $Ac = 93,5\%$ і відмінний (K_4) $Ac = 95,5\%$ рівень збалансованої точності.

2. Статистичних маркерів розподілів амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення W_3, W_4 :

- Діагностика («контрольна група 1 – дослідні групи 2, 3, 4») – відмінний $Ac = 97\% - 97,5\%$ рівень збалансованої точності.

- Диференціація (група 2 – група 4) – відмінний рівень збалансованої точності $Ac = 96,5\% - 97\%$.

- Диференціація (група 2 – група 3) – відмінний $Ac = 96\% - 96,5\%$ рівень збалансованої точності.

- Диференціація (група 3 – група 4) – хороший (W_3) $Ac = 95\%$ і відмінний (W_4) $Ac = 96\%$ рівень збалансованої точності.

Висновки

1. Експериментально апробовано метод азимутально-інваріантного Мюллер-матричної мікроскопії з алгоритмічним відтворенням мап лінійного двопронезаломлення полікристалічної архітектури нейронних мереж експериментальних зразків нативних гістологічних зрізів мозку померлих від крововиливу головний мозок травматичного та нетравматичного генезу.

Література:

1. Bertozzi G, Maglietta F, Sessa F, Scoto E, Cipolloni L, Di Mizio G, et al. Traumatic Brain Injury: A Forensic Approach: A Literature Review. *Curr Neuroparmacol*. 2020;18(6):538-50. DOI: <http://doi.org/10.2174/1570159x17666191101123145> PMID: 31686630; PMCID: PMC7457403.
2. Ghosh N, Vitkin IA. Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook. *J Biomed Opt*. 2011;16(11):110801. DOI: <http://doi.org/10.1117/1.3652896> PMID: 22112102.
3. Layden D, Ghosh N, Vitkin A. Quantitative Polarimetry for Tissue Characterization and Diagnosis. In: Wang RK, Tuchin VV, editors. *Advanced Biophotonics*. CRC Press; 2013. Chapter 13, p. 73-108. DOI: <http://doi.org/10.1201/b15256-3>
4. Vitkin A, Ghosh N, de Martino A. Tissue Polarimetry. In: Andrews DL, editor. *Photonics: Scientific Foundations, Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd; 2015. Chapter 7, p. 239-321. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119011804.ch7>
5. Angelsky OV, Ushenko AG, Mokhun II, Zenkova CY, Bogatyryova HV, Felde CV, et al. Optical Measurements: Polarization and Coherence of Light Fields. In: Cocco L, editor. *Modern Metrology Concerns*. InTech; 2012. Chapter 10, 56 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/36553>
6. Ushenko AG, Dubolazov OV, Ushenko VA, Novakovskaya OY, Olar OV. Fourier polarimetry of human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations. *Appl Opt*. 2016;55(12): B56-60. DOI: <http://doi.org/10.1364/AO.55.000B56> PMID: 27140132.
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. In: *Phase Mapping of Human Biological Tissues*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology; 2023. Part F697, p. 53-70. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-99-3269-6_4
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. In: *Laser Polarimetry of Biological Tissues*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 27-42. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1734-1_3
9. Hu Z, Ushenko YA, Litvinenko OY, Gorsky MP, 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 In: *Laser Polarimetry of Biological Tissues*. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 9-26. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-99-1734-1_2

2. В рамках комплексного статистичного аналізу кореляційного і вейвлет перетворення координатних розподілів випадкових значень величини лінійного двопронезаломлення визначено сукупність цифрових маркерів (центральної статистичні моменти 3-го і 4-го порядків розподілів параметра анізотропії та амплітуд коефіцієнтів вейвлет перетворення, а також ексцесу та кореляційної площі автокореляційних функцій таких розподілів) диференціальної діагностики некротичних змін структурної анізотропії нативних гістологічних зрізів мозку померлих та встановлено величини збалансованої точності диференціальної діагностики травматичного та нетравматичного генезу крововиливів.

3. Встановлено діагностичну силу методу азимутально-інваріантної Мюллер-матричної мікроскопії з алгоритмічним відтворенням мап лінійного двопронезаломлення нейронних мереж нативних гістологічних зрізів мозку померлих внаслідок крововиливів травматичного та нетравматичного генезу на відмінному рівні (до 97,5%).

Перспектива подальших досліджень. З метою покращення чутливості і точності диференціальної діагностики генезу крововиливу в речовину головного мозку досліджуються можливості апробації наведеного методу Мюллер-матричного картографування нативних гістологічних зрізів мозку з алгоритмічним відтворенням мап іншого механізму оптичної анізотропії – циркулярного двопронезаломлення, яке пов'язано з оптичною активністю окремих молекулярних комплексів.

Конфлікт інтересів: відсутній.

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

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. In: Phase Mapping of Human Biological Tissues. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology; 2023. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 1-10. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-3269-6_1

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 Postmortal Nature and Temporal Dynamics of Abrasions. In: Laser Polarimetry of Biological Tissues. Springer Briefs in Applied Sciences and Technology; 2023. p. 43-75. DOI: http://doi.org/10.1007/978-981-99-1734-1_4

POLARIZATION REPRODUCTION OF STRUCTURAL ANISOTROPY MAPS OF BRAIN PREPARATIONS FOR DIFFERENTIAL DIAGNOSTICS OF HEMORRHAGES OF TRAUMATIC AND NON-TRAUMATIC GENESIS

M.Garazdiuk¹, O.Ushenko², O.Dubolazov²

**Bukovinian State Medical University¹,
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University²
(Chernivtsi, Ukraine)**

Summary.

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 diagnostics of the polycrystalline structure of biological layers.

The purpose and tasks of the research. To experimentally test and determine a set of markers for differential diagnosis of the cause of death due to the formation of hemorrhages of traumatic and non-traumatic genesis in the substance of the human brain by using the Muller matrix mapping method with algorithmic reproduction of linear birefringence of native histological brain sections.

Research materials and methods. As a research material, native histological sections of human brain taken from the parietal region of head from the deceased, whose cause of death was traumatic hemorrhage – group II (total number n=100), ischemic cerebral infarction – group III (n=100), non-traumatic hemorrhage – group IV (n=100), acute coronary insufficiency – group I – control (n=40), were used. The extracted samples of human brain matter were frozen at a temperature of –70 °C and histological sections were then made using a freezing microtome. Further, the obtained samples were studied using a Stokes polarimeter using the method of azimuthal-invariant experimental measurement of coordinate distributions of the magnitude of the elements of the Muller matrix of native histological sections of the brain from deceased.

Research results. In the process of increasing degeneration and necrosis, the level of macrostructural linear birefringence decreases, as well as the transformation of the topographic hierarchy of the polycrystalline architectonics of the brain. As a result, the corresponding random values and their fluctuations in the coordinate distributions of linear birefringence of the structural elements of the polycrystalline architectonics of the experimental brain samples decrease. The topographic structure of algorithmically reproduced maps becomes less homogeneous, small-scale and statistical due to degeneration and necrosis of neural networks. Based on this, prognostic scenarios of changes in the set of digital statistical, correlation, fractal and wavelet markers that determine the pathological transformation of linear birefringence of neural networks of native histological brain sections were substantiated.

Conclusions. The diagnostic power of the method of azimuthal-invariant Muller matrix microscopy of native histological sections of the brain of deceased persons due to hemorrhages of traumatic and non-traumatic hegemony has been established at an excellent level (up to 97.5%).

Key words: Traumatic Brain Injury; Forensic Medicine; Time of Hemorrhage Formation; Laser Polarimetry, Birefringence; Histological Sections.

Контактна інформація:

Гараздіук М. С. – к.мед.н., доцент кафедри судової медицини та медичного правознавства Буковинського державного медичного університету (м.Чернівці, Україна)

e-mail: m.garazdiuk@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7811-3211>

ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/C-8134-2017>

Ушенко О. Г. – д.фіз.-мат.н., 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)

e-mail: o.ushenko@chnu.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-5088-592X>

Дуболазов О. В. – д.фіз.-мат.н., професор, професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці, Україна)

e-mail: a.dubolazov@chnu.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1051-2811>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=35318204300>

Contact information:

M. Garazdiuk – PhD, Associate Professor of Department of Forensic Medicine and Medical Law of Bukovinian State Medical University (Chernivtsi, Ukraine)

e-mail: m.garazdiuk@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7811-3211>

ResearcherID: <http://www.researcherid.com/rid/C-8134-2017>

O. Ushenko. – 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 of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)

e-mail: o.ushenko@chnu.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-5088-592X>

O. Dubolazov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Optics and Publishing and Printing of Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)

e-mail: a.dubolazov@chnu.edu.ua

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1051-2811>

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorid=35318204300>



Надійшло до редакції 17.01.2025 р.
Підписано до друку 20.03.2025 р.