

Міністерство освіти і науки України

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

ДУБОЛАЗОВ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 535.361; 535.555

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНА СТОКС-КОРЕЛОМЕТРІЯ
ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-НЕОДНОРІДНИХ ОБ'ЄКТНИХ ПОЛІВ
ОПТИЧНО-АНІЗОТРОПНИХ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ**

Спеціальність 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Чернівці – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Ушенко Олександр Григорович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича МОН України,
завідувач кафедри оптики і видавничо-
поліграфічної справи.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Поперенко Леонід Володимирович,
завідувач кафедри оптики Київського національного
університету імені Т. Шевченка МОН України
(м. Київ).

доктор фізико-математичних наук, професор
Грабар Олександр Олексійович,
ДВНЗ "Ужгородський національний університет" МОН
України, професор кафедри фізики напівпровідників,
завідувач відділу НДІ фізики і хімії твердого тіла
УжНУ (м. Ужгород).

доктор фізико-математичних наук, професор
Федів Володимир Іванович,
завідувач кафедри біологічної фізики і медичної
інформатики ВДНЗ "Буковинського державного
медичного університету", (м. Чернівці).


Захист відбудеться 26 лютого 2021 р. о 15:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 76.051.01 у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58013, м. Чернівці, вул. Рівненська, 14, корпус 8А, аудиторія 206.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, вул. Лесі Українки, 23.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: Ученому секретарю спецради Д76.051.01, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58002.

Автореферат розісланий 25 січня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради:



С.М.Новіков

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Оптичні методи діагностики біологічних об'єктів та візуалізації їх структури займають одне з провідних місць завдяки їх високій інформативності, можливості багатофункціонального (фотометричного, спектрального, поляризаційного та кореляційного) моніторингу досліджуваного середовища. Серед них виокремився самостійний напрямок – поляризаційна оптика біологічних тканин [1,2]. Аналіз поляризаційних характеристик розсіяного ними випромінювання дозволяє отримувати якісно нові результати [3] про морфологічний та фізіологічний стан біологічних тканин.

Більшість біологічних тканин характеризується оптичною анізотропією, яка викликана складною фібрилярною структурою оптично активних протеїнових молекул. Тому, для опису взаємодії поляризованого світла з такими складними полікристалічними системами необхідні багатопараметричні аналітичні підходи. До таких відносяться вектор-параметричне описання світлових пучків та Мюллер-матричне представлення поляризаційних властивостей біологічних шарів [4,5]. На цій основі розроблено різноманітні системи поляризаційної та мюллер-матричної діагностики оптичної анізотропії біологічних об'єктів. Узагальнення даного напрямку поляриметричних досліджень оптики стала лазерна поляриметрія мікроскопічних зображень біологічних тканин [6]. Такий розділ оптики біологічних тканин базується на використанні методів поляризаційного (координатні розподіли величини азимута і еліптичності поляризації – “поляризаційні мапи”) та Мюллер-матричного (координатні розподіли величини матричних елементів – “Мюллер-матричні зображення”) картографування мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біологічних тканин і полікристалічних плівок біологічних рідин. З метою визначення об'єктивних параметрів, які характеризують зміни оптичної анізотропії застосовувався комплексний статистичний, кореляційний та фрактальний аналіз розподілів величини поляризаційних параметрів мікроскопічних зображень і мюллер-матричних зображень біологічних шарів [7, 8]. В подальшому такі методи будемо називати “одноточковими”.

Основним недоліком “одноточкового” поляриметричного та мюллер-матричного картографування виявилася погана відтворюваність експериментальних даних внаслідок азимутальної залежності величини азимута та еліптичності поляризації, а також більшості матричних елементів від повороту зразку відносно напрямку опромінення. З 16 елементів матриці Мюллера лише 4 є азимутально-незалежними. Їх в подальшому будемо називати Мюллер-матричними інваріантами (ММІ). Тому актуальним є відпрацювання добре відтворюваних (азимутально-незалежних), більш точних методів лазерної поляриметрії шляхом застосування сукупності ММІ та їх комбінацій.

Узагальненням вказаних методів поляриметричного та мюллер-матричного картографування став кореляційний (“двоточковий”) підхід до аналізу координатних розподілів величини азимута та еліптичності поляризації полів

когерентного випромінювання, запропонований у [9]. Такий аналіз теоретично застосовано [10] для описання кореляційної узгодженості між станами поляризації різних точок лазерних полів шляхом використання “двоточкового” параметру – комплексного ступеня взаємної поляризації (КСВП). На цій основі розроблено азимутально-незалежні експериментальні методики прямого аналізу оптичної анізотропії біологічних шарів шляхом застосування іншого параметру – комплексного ступеня взаємної анізотропії (КСВА), який характеризує кореляційну узгодженість напрямів оптичних осей і величини двопронезаломлення біологічних полікристалічних мереж.

Разом з тим, морфологічна, а відповідно і полікристалічна, структура зразків реальних біологічних тканин має складну просторово-орієнтаційну організацію [1-3]. Тому актуальним є розроблення нових технік Мюллер-матричної поляриметричної діагностики полікристалічних мереж дифузних біологічних тканин у 3D форматі з використанням алгоритмів цифрової голографії.

Слід очікувати, що об'єднання методів поляризаційного, мюллер-матричного, поляризаційно-кореляційного картографування та цифрового голографічного відтворення розподілів комплексних амплітуд об'єктного поля фазово-неоднорідних шарів [11,12] повинно дати нову інформацію про морфологічну та оптично анізотропну структуру біологічних тканин і рідин. Така інформація актуальна в багатьох фундаментальних застосуваннях біомедичної оптики – дифузійна та фотоакустична томографія, флуорометрія, оптична когерентна томографія, фазова і конфокальна мікроскопія.

Отже, **актуальність дисертаційного дослідження** зумовлена необхідністю розробки нових комплексних підходів до аналізу поляризаційно-неоднорідних лазерних полів біологічних тканин і рідин, пошуку нових азимутально-незалежних методів стокс-поляриметрії, поляризаційно-кореляційного картографування полікристалічних біологічних мереж, а також лазерної 3D поляриметрії у діагностиці та диференціації проявів механізмів їхньої фазової анізотропії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за темами та проектами:

- “Розробка новітніх методів і систем 3D Джонс-матричної мікроскопії полікристалічних плівок біологічних рідин” (номер державної реєстрації 0118U000144) (2018-2020 р.).
- “Розробка новітніх методів і систем багатофункціональної флуоресцентної матричної поляриметрії молекулярних зображень оптично анізотропних біологічних шарів” (номер державної реєстрації 0120U102079) (2020-2022 р.).
- “Розробка новітніх методів і систем Мюллер-матричної томографії полікристалічної структури дифузних біологічних шарів” (номер державної реєстрації 0118U000142) (2018-2020 р.).
- “Розробка новітніх поляризаційно-кореляційних і цифрових голографічних методів системи 3D інтроскопії полікристалічної структури біологічних ша-

рів” (номер державної реєстрації 0119U100729) (2019-2021 р.) дисертант – керівник НДР.

- “Розробка новітніх методів і біомедичних систем поляризаційно-голографічної фракталометрії кристалів тканин і рідин органів людини ” (номер державної реєстрації 0119U100725) (2019-2021р.).
- “Біомедична корелометрія поляризаційних сингулярностей фазово-неоднорідних лазерних полів тканин і рідин органів людини ” (номер державної реєстрації 0116U001449) (2016-2018 р.) дисертант – керівник НДР.
- “Багатопараметричні поляризаційно-фазові методи цифрової голографічної томографії полікристалічних мереж тканин і рідин органів людини” (номер державної реєстрації 0116U001446) (2016-2018 р.).

Мета і задачі дослідження. Розробка багатофункціональної Стокс корелометрії поляризаційно-неоднорідних лазерних полів шляхом удосконалення традиційних поляризаційних і розробки нових поляризаційно-кореляційних, інтерференційних і цифрових голографічних методів, які забезпечують одержання комплексної інформації про дво- та тривимірні розподіли поляризаційних і фазових параметрів лазерних полів, перетворених полікристалічними мережами біологічних шарів різної морфологічної будови та фізіологічного стану.

Для досягнення цієї мети розв’язувалися такі **задачі**:

1. Вивчення фізичних закономірностей формування координатних розподілів величини модуля і фази “двохточечних” параметрів вектора Стокса поляризаційно-неоднорідних зображень оптично анізотропних біологічних шарів і пошук взаємозв’язку між статистичними, кореляційними і вейвлет параметрами, які характеризують такі розподіли, та аналогічними параметрами розподілів показників фазової анізотропії полікристалічних біологічних структур. Розробка нових методів поляризаційно-кореляційної мікроскопії для диференціації лінійно та циркулярно двопротенезаломлюючих мереж оптично активних біологічних кристалів.
2. Узагальнення поляризаційно-кореляційного описання оптичних проявів фазової анізотропії полікристалічних мереж з використанням “двохточкового” вектор-параметричного підходу та розробка нових методів багатопараметричного картографування величини модуля і фази параметрів вектора Стокса поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів.
3. Дослідження ефективності оригінального методу поляризаційно-інтерференційного картографування зображень біологічних препаратів у виявленні і диференціації змін полікристалічної структури, що пов’язані із патологічними станами органів людини, шляхом застосування статистичного, кореляційного і вейвлет аналізу координатних розподілів величини локального контрасту інтерференційних розподілів.
4. Розроблення і апробація комплексу новітніх методів 3D поляризаційної корелометрії з цифровим голографічним відтворенням пошарових розподілів величини модуля і фази “двохточечних” параметрів вектора Стокса поляризаційно-неоднорідних зображень плівок біологічних рідин з різною просторовою симетрією полікристалічних мереж органів людини.

5. Порівняльне дослідження інформативності методів багатофункціональної поляризаційної, поляризаційно-кореляційної мікроскопії, а також 3D Стокс-корелометрії у діагностиці змін фазової анізотропії полікристалічних мереж біологічних шарів.

Об'єкт дослідження: поляризаційно-кореляційні зображення оптично-анізотропних біологічних шарів; мапи модуля і фази “двоточкових” параметрів вектора Стокса”; поляризаційно-інтерференційні зображення оптично-анізотропних біологічних шарів; мапи локального контрасту; взаємозв'язки між набором об'єктивних статистичних, кореляційних і вейвлет параметрів, які характеризують розподіли значень поляризаційно-кореляційних та інтерференційних мап і аналогічними параметрами, що характеризують розподіли параметрів фазової та амплітудної анізотропії біологічних шарів; пошарові поляризаційні мапи параметрів вектора Стокса; пошарові поляризаційно-кореляційні мапи модуля і фази “двоточкових” параметрів вектора Стокса; операційні характеристики та інформативність поляризаційних, поляризаційно-кореляційних та цифрових голографічних методів відтворення пошарових розподілів величини модуля і фази “двоточкових” параметрів вектора Стокса поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів.

Предмет дослідження: лазерна поляриметрія та корелометрія мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біологічних тканин і полікристалічних плівок біологічних рідин, Стокс-поляриметричне описання розсіювання лазерного випромінювання біологічними шарами.

Методи дослідження:

- методи 2D Стокс-корелометрії (визначалися координатні розподіли величини модуля і фази “двоточкових” параметрів вектора Стокса (ступеня кореляції Стокса – СКС) мікроскопічних зображень біологічних шарів;
- методи поляризаційної-інтерферометрії (визначалися координатні розподіли величини локального контрасту інтерференційних картин в площині поляризаційно-неоднорідних мікроскопічних зображень біологічних шарів;
- методи 3D Стокс-поляриметрії з використанням опорної лазерної хвилі (визначалися пошарові координатні розподіли розподіли величини модуля і фази СКС біологічних шарів;
- методи статистичного аналізу (визначалися центральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків, які характеризують розподіли величини модуля і фази СКС, локального контрасту інтерференційних картин поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів;
- методи кореляційного аналізу (визначалися центральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків, які характеризують автокореляційні функції розподілів величини модуля і фази СКС, локального контрасту інтерференційних картин поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів;
- методи вейвлет аналізу (визначалися центральні статистичні моменти 1-го – 4-го порядків, які характеризують залежності амплітуд вейвлет коефіцієнтів

розподілів величини модуля і фази СКС, локального контрасту інтерференційних картин поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів.

Новизна наукових результатів, отриманих у дисертаційній роботі, полягає в тому, що:

1. Вперше узагальнено та обґрунтовано сукупність “одноточкових” і “двоточкових” поляризаційних і кореляційних параметрів полів лазерного випромінювання, перетвореного оптично-анізотропними біологічними шарами, шляхом застосування поляризаційного “двоточкового”; поляризаційно-інтерференційного підходів та Стокс-корелометрії із застосуванням опорної хвилі.
2. Вперше методом Стокс-корелометричного картографування виявлено та проаналізовано фізичні процеси зміни оптичної анізотропії (розподіли напрямів оптичних осей і фазова модуляція) зразків біологічних структурованих (нирка) і паренхіматозних (печінка) тканин внутрішніх органів пацюка, що обумовлені системною патологією (діабет).
3. Вперше апробовано Стокс-корелометричну методику в диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок плазми крові здорових донорів і хворих на рак простати. Виявлено, що у випадку слабких змін оптичної анізотропії методи Стокс-корелометрії залишаються більш чутливими (на 10%-20%) у порівнянні із традиційними методами поляризаційного картографування.
4. Вперше розроблено та експериментально апробовано поляризаційно-інтерференційну методику в диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок синовіальної рідини колінного суглоба людини з різною післяопераційною патологією – реактивний та асептичний синовіт. Установлені найбільш чутливі параметри (статистичні моменти 3-го і 4-го порядків, кореляційний момент 4-го порядку) до зміни структури розподілів величини локального контрасту інтерференційних картин в площині мікроскопічних зображень плівок синовіальної рідини обох типів.
5. Вперше визначено ефективність у диференціації слабких фазових змін масштабно-селективного вейвлет-аналізу мап локального контрасту інтерференційних розподілів мікроскопічних зображень полікристалічних плівок біологічних рідин і установлені взаємозв'язки між статистичними моментами 1-го – 4-го порядків, які характеризують лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах МНАТ функції та розподіли оптичної анізотропії мереж біохімічних кристалів плівок синовіальної рідини.
6. Вперше розроблено і експериментально апробовано метод 3D Стокс-поляриметрії поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів плівок біологічних рідин з різною просторовою симетрією полікристалічних мереж на основі пошарового цифрового голографічного відтворення розподілів величини еліптичності поляризації з використанням опорної лазерної хвилі. На цій основі визначено взаємозв'язки між тенденціями зміни величини статистичних і кореляційних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують пошарові розподіли 3D мап еліптичності поляризації лазерного випромінювання, перетвореного денд-

ритними і сферолітними мережами біохімічних кристалів плівок ліквору і жовчі.

7. Вперше встановлено ефективність методу 3D поляризаційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію та виявлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів еліптичності поляризації, також статистичні і кореляційні параметри, що їх характеризують.

8. Вперше розроблено метод 3D Стокс-корелометрії об'єктних полів плівок біологічних рідин на основі застосування опорної лазерної хвилі та пошарового цифрового голографічного відтворення розподілів комплексних амплітуд з наступним визначенням відповідних мап модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса. На цій основі визначено взаємозв'язки між тенденціями зміни величини статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують пошарові розподіли 3D мап модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса лазерного випромінювання, перетвореного дендритними і сферолітними мережами біохімічних кристалів плівок ліквору і жовчі.

9. Вперше виявлено ефективність методу 3D поляризаційно-кореляційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію. Встановлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів модуля і фази 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса, також статистичні параметри, що їх характеризують.

10. Вперше реалізовано масштабно-селективну диференціацію велико- і дрібномасштабних складових координатних розподілів величини модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса пошарових перерізах поля комплексних амплітуд полікристалічних плівок сечі та встановлені взаємозв'язки між тенденціями зміни величини та діапазонів зміни статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують Стокс-корелометричні мапи та симетрією різномасштабних складових дендритних і сферолітних мереж біологічних кристалів.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати роботи з Стокс-корелометрії поляризаційно-неоднорідних лазерних полів, перетворених шарами біологічних тканин і рідин людини є розв'язком важливої наукової проблеми зі створення комплексу методів багатofункціональної “двоточкової” поляризаційно-кореляційної мікроскопії та 3D Стокс-корелометрії з цифровим голографічним відтворенням полів комплексних амплітуд, які є базовими в:

1. Стокс-корелометричному картографуванні зміни оптичної анізотропії (розподіли напрямів оптичних осей і фазова модуляція) зразків біологічних структурованих (нирка) і паренхіматозних (печінка) тканин внутрішніх органів пацюка, що обумовлені системною патологією (діабет). На цій основі реалізовано диференціацію змін оптичної анізотропії з хорошою збалансо-

ваною точністю (~90%), яка на 20% - 30% вища за точність методів прямого поляризаційного картографування.

2. У диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок плазми крові здорових донорів і хворих на рак простати. Виявлено, що у випадку слабких змін оптичної анізотропії методи Стокс-корелометрії залишаються більш чутливими (на 10%-20%) у порівнянні із традиційними методами поляризаційного картографування.
3. Поляризаційно-інтерференційній диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок синовіальної рідини колінного суглоба людини з різною післяопераційною патологією – реактивний та асептичний синовіт із задовільною збалансованою точністю ~80%.
4. Масштабно-селективному вейвлет-аналізі мап локального контрасту інтерференційних розподілів мікроскопічних зображень полікристалічних плівок біологічних рідин.
5. 3D поляризаційному картографуванні полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію. На цій основі здійснено диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою точністю $A_c = 82\% - 86\%$.
6. 3D поляризаційно-кореляційному картографуванні полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію. На цій основі здійснено диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою $A_c = 88\% - 90\%$ точністю.
7. Масштабно-селективній диференціації велико- і дрібномасштабних складових координатних розподілів величини модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса пошарових перерізах поля комплексних амплітуд полікристалічних плівок сечі. Точність розглянутого методу досягає дуже хорошого $A_c = 90\% - 92\%$ і відмінного рівнів $A_c = 94\% - 96\%$.

Особистий внесок здобувача. Формулювання задач та вибір об’єктів дослідження, обговорення одержаних результатів здійснювалось здобувачем разом із науковим консультантом О.Г.Ушенко [1-6,8,11-15,17,19,22-25,27,35-38,41]. У роботах [7,9,16] разом із професорами Меглінським І., Ушенко Ю.О. та асистентом Ушенко В.О. розвинено теорію статистичного, кореляційного та фрактального аналізу даних методів інтерферометрії та 3D Мюллер-матричної поляриметрії гістологічних зрізів біологічних тканин і рідин різної морфологічної побудови та фізіологічного стану. В роботах [28-34] ввів та фізично обґрунтував новий поляризаційно-кореляційний параметр – ступінь кореляції модуля і фази параметрів вектора Стокса поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів та разом з професором Ванчуляком О.Я. та асистентом Ушенко В.О. провів аналіз експериментальних даних. У роботах [10,18,21,26] дисертантом проведено теоретичне обґрунтування експериментальних методик. У роботах [39,40,42] сформулював основну ідею досліджень і провів узагальнення отри-

маних результатів. У роботах [44,45] дисертантом запропоновано метод 3D Стокс-корелометрії об'єктних полів плівок біологічних рідин. У патентах [45-51] запропонував теоретичні основи та експериментальні методики поляризаційної, поляризаційно-кореляційної та 3D цифрової голографічної діагностики та диференціації біологічних тканин та рідин.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідалися на численних міжнародних конференціях: 11th International Conference "Micro- to Nano-Photonics IV- ROMOPTO 2015", 1-4 September 2015, Bucharest, Romania; 12th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2015), 14-18 September 2015, Chernivtsi, Ukraine; The 8th edition of the International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2016), 25 - 28 August 2016, Constanta, Romania; 3rd International Conference on Health Technology Management (ICHTM-2016), October 6-7, 2016 Chisinau, Moldova; 13th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2017), 11-15 September 2017, Chernivtsi, Ukraine; International Conference "SPIE Optics + Photonics 2017", 6-10 August 2017, San Diego, USA; The 9th edition of the International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2018), 23 - 26 August 2018, Constanta, Romania; VIII International Conference on Optoelectronic Information Technologies "PHOTONICS-ODS 2018", 2-4 October 2018, Ukraine, Vinnytsia; IX International Conference for Professionals and Young Scientists "LOW TEMPERATURE PHYSICS" ICPYS-LTP-2018, 4-8 June 2018, Kharkiv, Ukraine; 4th International Conference on Nanotechnologies and Biomedical Engineering (ICNBME-2019), 18-21 September 2019, Chisinau, Republic of Moldova; International Conference "SPIE Optics + Photonics 2019", 13-15 August 2019, San Diego, USA; 14th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2019), 11-15 September 2019, Chernivtsi, Ukraine; The 10th edition of the International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2020), 20 - 23 August 2020, Constanta, Romania.

Публікації. Результати дисертаційного дослідження опубліковано в 4 монографіях, в 1-му окремому розділі колективної монографії, 36 статтях у наукових фахових журналах України та у наукових періодичних виданнях інших держав, 3 тези наукових доповідей на конференціях, патентів - 7.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів основного тексту, результатів і висновків, додатків, списку цитованої літератури. Повний обсяг дисертації складає 383 сторінки машинописного тексту. В дисертацію включено 156 ілюстрацій. Список цитованої літератури складається з 299 найменувань і займає 35 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У *вступі* подано обґрунтування доцільності виконання досліджень та актуальності цієї роботи, сформульовано мету та основні задачі, представлено наукову новизну роботи та практичну значущість отриманих результатів, а також відомості

про апробацію та особистий внесок автора під час виконання роботи.

У *першому розділі* розглянуто сукупність методів і принципів “одноточкової” поляризаційної, Стокс-поляриметричної та Мюллер-матричної мікроскопії полікристалічної структури оптично анізотропних біологічних шарів. Проаналізовано основні системи і принципи 2D зображувальної Стокс-поляриметрії та виявлено набір діагностично актуальних взаємозв’язків між розподілами параметрів фазової та амплітудної анізотропії та розподілами значень азимута та еліптичності поляризації мікроскопічних і Мюллер-матричних зображень. Констатовано необхідність розроблення нових азимутально-інваріантних “одноточкових” методик Стокс-поляриметрії, які базуються на принципах кореляційного аналізу поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних об’єктів. Проведений огляд можливостей розроблення нових методів Стокс-корелометрії на основі синтезу методів поляриметрії, інтерферометрії та цифрового голографічного відтворення полів комплексних амплітуд у різних фазових площинах.

Другий розділ містить дані про модельний підхід до Мюллер-матричного та поляризаційно-кореляційного описання взаємодії лазерного випромінювання із оптично-неоднорідними біологічними шарами нами, а також оптичні схеми та методики 2D і 3D Стокс-корелометрії. Запропоновано представлення шару біологічної тканини або рідини у вигляді сукупності двох складових - оптично-ізотропної та оптично-анізотропної з циркулярним і лінійним двопронезаломленням. Оптичні прояви механізмів взаємодії лазерного випромінювання із зазначеними парціальними складовими структури об’єкта описуються матрицями Мюллера ослаблення $\{A\}$, лінійного двопронезаломлення $\{B\}$ циркулярного двопронезаломлення $\{C\}$:

$$\{A\} = e^{-\tau l} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \{B\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ 0 & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & b_{42} & b_{43} & b_{44} \end{pmatrix},$$

$$\begin{aligned} b_{22} &= \cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma \cos \varphi; \\ b_{23} &= b_{32} = \cos^2 2\gamma \sin 2\gamma (1 - \cos \varphi); \\ b_{33} &= \sin^2 2\gamma + \cos^2 2\gamma \cos \varphi; \\ b_{42} &= -b_{24} = \sin 2\gamma \sin \varphi; \\ b_{34} &= -b_{43} = \cos 2\gamma \sin \varphi; \\ b_{44} &= \cos \varphi. \end{aligned}$$

$$\{C\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{22} & \omega_{23} & 0 \\ 0 & \omega_{32} & \omega_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned} \omega_{22} &= \omega_{33} = \cos 2\chi; \\ \omega_{23} &= -\omega_{32} = \sin 2\chi. \end{aligned} \quad (1)$$

де: τ – коефіцієнт екстинції; l – товщина біологічного шару; γ - напрямок орієнтації оптичної осі; φ - фазовий зсув між лінійно- та ортогонально поляризованими складовими амплітуди перетвореної лазерної хвилі; χ - кут обертання площини поляризації перетвореної лазерної хвилі.

Ідея кореляційного підходу до описання поляризаційно-неоднорідних полів полягає у існуванні взаємозв’язку між координатною модуляцією величин па-

раметрів вектора Стокса та координатними змінами інтенсивності поляризаційно-неоднорідного поля, що формують значення видимості інтерференційної картини. Для двопронезаломлюючого біологічного шару визначено аналітичний вигляд “двоточкових” параметрів вектора Стокса (КСК)

$$\begin{cases} S_3 = \text{Re } S_3 + \text{Im } S_3 = (\cos \delta_2 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos \delta_1) + i(\sin \delta_2 - \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \sin \delta_1); \\ |S_3| = \sqrt{[1 + \text{ctg}^2 \rho_2 \text{tg}^2 \rho_1 - 2 \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos(\delta_2 - \delta_1)]}; \\ \text{Arg } S_3 = \text{arctg} \left(\frac{\sin \delta_2 - \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \sin \delta_1}{\cos \delta_2 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos \delta_1} \right); \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_4 = \text{Re } S_4 + \text{Im } S_4 = (\sin \delta_1 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \sin \delta_2) + i(\cos \delta_1 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos \delta_2); \\ |S_4| = \sqrt{[1 + \text{ctg}^2 \rho_2 \text{tg}^2 \rho_1 + 2 \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos(\delta_2 - \delta_1)]}; \\ \text{Arg } S_4 = \text{arctg} \left(\frac{\cos \delta_1 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \cos \delta_2}{\sin \delta_1 + \text{ctg} \rho_2 \text{tg} \rho_1 \sin \delta_2} \right). \end{cases} \quad (3)$$

Тут $|S_{i=1;2;3;4}|$ - модуль КСК, $\text{Arg } S_{i=1;2;3;4}$ - фаза КСК.

Рис. 2 ілюструє оптичну схему 2D Стокс-корелометрії мап модуля і фази КСК.

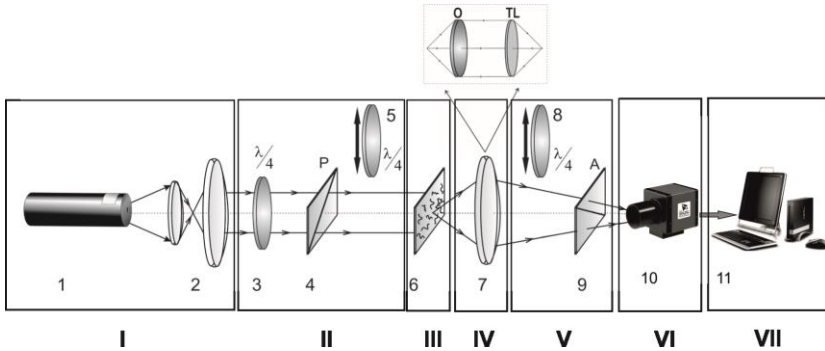


Рис. 1 Оптична та функціональна блок-схема Стокс-корелометрії, де 1 – He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова пластинка; 5, 8 – механічно рухомі чвертьхвильові пластинки; 4, 9 – поляризатор і аналізатор; 6 – біологічний шар; 7 – поляризаційний мікрооб’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер.

Оптична схема поляризаційно-інтерференційного картографування оптично анізотропних біологічних шарів представлена на рис. 3.

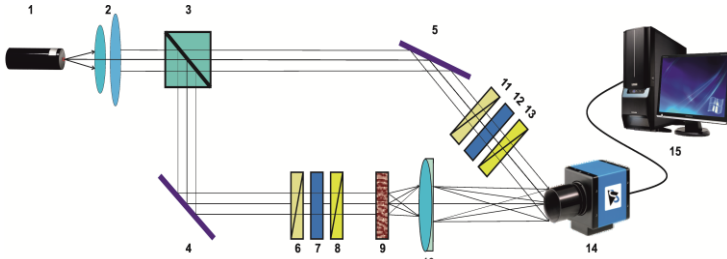


Рис. 2 Оптична схема поляризаційної інтерферометрії мікроскопічних зображень оптично-анізотропних біологічних шарів.

Паралельний ($\varnothing = 2 \times 10^3 \mu m$) пучок He-Ne ($\lambda = 0,6328 \mu m$) лазера 1, сформований за допомогою коліматора 2, за допомогою 50% світлоподільника 3, розділяється на “опромінюючий” та “опорний”. “Опромінюючий” за допомогою обертаючого дзеркала 4 спрямовується крізь поляризаційний фільтр 6 – 8 у напрямку зразку біологічного шару 9. Поляризаційно-неоднорідне зображення об’єкту 9 об’єктивом 10 проектується у площину цифрової камери 14. “Опорний” пучок дзеркалом 5 спрямовується дзеркалом крізь поляризаційний фільтр 11 - 13 у площину поляризаційно-неоднорідного зображення об’єкту 9. У результаті формується інтерференційна картина, координатний розподіл інтенсивності якої реєструє цифрова камера 14.

За умови слабких фазових флуктуацій ($\delta \rightarrow 0: \cos \delta \approx 1; \sin \delta \approx \delta$) визначено видність видність інтерференційного розподілу в різних точках двопробнезаламлюючого біологічного шару

$$W(\delta, r_1, r_2) = \frac{\delta^2(r_1) - \delta^2(r_2)}{\delta^2(r_1) + \delta^2(r_2)}. \quad (4)$$

Методика 3D Стокс-корелометрії з опорною лазерною хвилею (рис. 2) полягає у наступній послідовності дій:

- Формують в “опромінюючому” та “опорному” пучках подібні стани поляризації, - $(0^0 - 0^0)$, $(90^0 - 90^0)$, $(45^0 - 45^0)$, $(135^0 - 135^0)$, $(\otimes - \otimes)$, $(\oplus - \oplus)$.

- Для кожного з таких станів поляризації реєструють кожен парціальну інтерференційну картину крізь поляризатор-аналізатор 13 з орієнтацією площини пропускання під кутами $\Theta = 0^0$; $\Theta = 90^0$.

- За допомогою прямого та зворотного Фур’є перетворення відтворюють координатні розподіли комплексних амплітуд $\{E_x(\varphi, r); E_y(\varphi, r)\}$ об’єктного поля у площині мікроскопічного зображення біологічного шару.

- У кожній фазовій площині ($\varphi_k = k\Delta\varphi, k = 0; 1; 2; \dots$) розраховують (співвідношення (2), (3)) пошарові розподіли модуля $|S_{i=1;2;3;4}|(\varphi, x, y)$ і фази $Arg[S_{i=1;2;3;4}(\varphi, x, y)]$ СКС.

Наведена характеристика об'єктів дослідження. Проаналізовані аналітичні (статистичний, кореляційний, фрактальний та вейвлет аналіз) та інформаційні (чутливість, специфічність та збалансована точність) підходи до аналізу сукупності експериментальних результатів. На рис.3 наведена структурно-логічна схема дисертаційного дослідження.

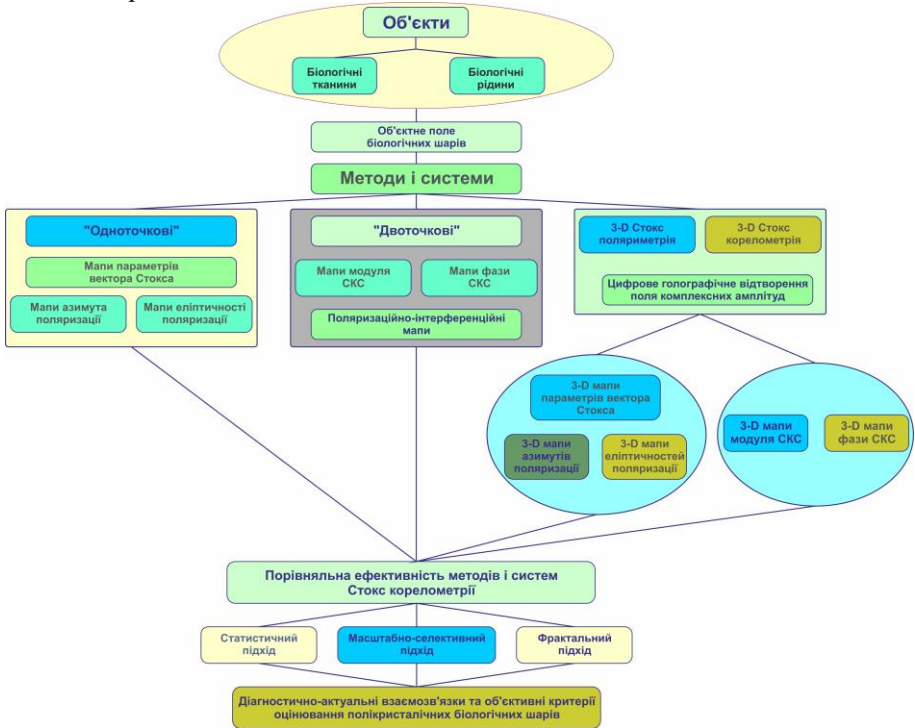


Рис. 3. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження

У *третьому розділі* наведено результати комп'ютерного моделювання взаємозв'язків між мапами модуля і фази ступеня кореляції параметрів вектора Стокса (СКС) та розподілами напрямів оптичних осей і фазових зсувів; еспериментальній апробації методу поляризаційного СКС - картографування і вейвлет-аналізу біологічних тканин (міокард і мозок – “фібрилярні оптично-анізотропні мережі” та стінка прямої кишки – “острівкові оптично-анізотропні структури”) і рідин (полікристалічні плівки синовіальної рідини – суперпозиція “структурованих та острівкових мереж біологічних кристалів”).

Вплив зміни геометрії укладання циліндрів з колоподібними геометричними осями у площині двоприменезаломлюючої сітки на топографічну, кореляційну та масштабно-самоподібну структуру розподілів значень модуля СКС ілюструють рис. 4, рис. 5.

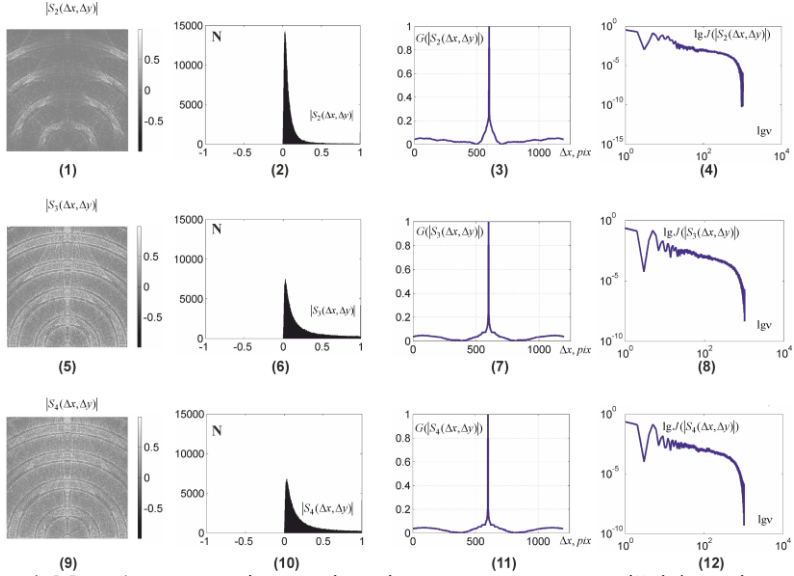


Рис. 4. Мапи (координатні розподіли, гістограми, автокореляційні функції, логарифмічні залежності спектрів потужності) модуля СКС поляризаційно-неоднорідних зображень полікристалічних сіток з детермінованою зміною величини двопронезаломлення.

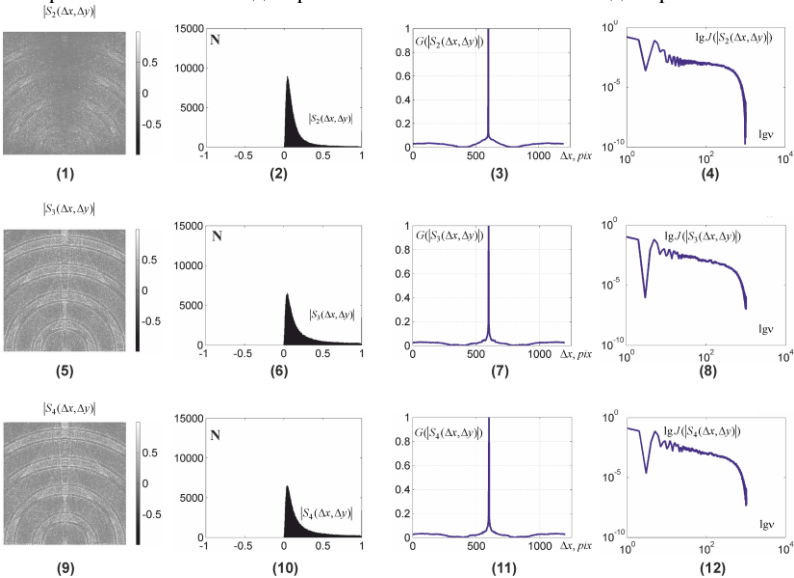


Рис. 5. Мапи (координатні розподіли, гістограми, автокореляційні функції, логарифмічні залежності спектрів потужності) модуля СКС поляризаційно-неоднорідних зображень полікристалічних сіток з детермінованою та рандомізованою ($\Delta n \pm \text{random}(0,5\Delta n)$) зміною величини двопронезаломлення.

Аналіз одержаних двомірних розподілів значень модуля СКС $\text{Re } S_{i=2;3;4}(\Delta x, \Delta y)$ виявив формування асиметрично-розташованих топографічних структур відносно вертикального OY напрямку в площині двопронезаломлюючої сітки (Рис. 4). Даний факт можна пов'язаний із тим, що у кожній точці площини такого об'єкту одночасно змінюються напрямком оптичної осі γ (напрямок дотичної до колоподібної геометричної осі циліндру у цій точці) та величиною фазового зсуву ϕ (величина геометричного перерізу). За рахунок цього для кутів $\pm\gamma$ відносно напрямку OY реалізується різний ступень узгодженості між величинами параметрів вектора Стокса у різних точках площини сітки. Тому у відповідних півплощинах має місце формування різних величин модуля СКС - $\text{Re } S_{i=2;3;4}[(x; x - \Delta x); (y)] \neq \text{Re } S_{i=2;3;4}[(x; x + \Delta x); (y)]$. Окрім цього швидкість координатної зміни даних кореляційних параметрів $\text{Re } S_{i=2;3;4}(\Delta x, \Delta y)$ зростає. Установлено, що наявність рандомізованої компоненти у координатному розподілі параметрів оптичної анізотропії призводить до:

- зростання декореляції між координатними розподілами параметрів вектора Стокса у точках поляризаційно-неоднорідного зображення сітки - збільшення ймовірності мінімальних значень модуля СКС $N(\text{Re } S_{i=2;3;4}(\Delta x; \Delta y) = 0) \uparrow$;
- зростання величини екстремумів $N(\text{Re } S_i \rightarrow 0)$ гістограм $N(\text{Re } S_i)$;
- трансформацію автокореляційних залежностей $G(\text{Re } S_{i=2;3;4}(\Delta x; \Delta y))$ у більш швидко спадаючі криві з меншою півшириною та амплітудою модуляції власних значень у площині поляризаційно-неоднорідних зображень;
- зменшення діапазону прямолінійної ділянки апроксимуючої кривої та дисперсія логарифмічних залежностей спектрів потужності $\log J(\text{Re } S_{i=2;3;4}(\Delta x, \Delta y)) - \log \nu$ розподілів значень модуля СКС.

Разом із тим, реальні оптично-анізотропні сітки мають декілька шарів, де реалізується координатна залежність величини двопронезаломлення та геометричних напрямів укладання фібрил всієї мережі. Вперше методом Стокс-корелометричного картографування виявлено та проаналізовано в межах статистичного аналізу фізичні процеси зміни оптичної анізотропії (розподіли напрямів оптичних осей і фазова модуляція) зразків біологічних структурованих (нирка) і паренхіматозних (печінка) тканин внутрішніх органів пацюка, що обумовлені системною патологією (діабет).

На рис. 6 і рис. 7 приведені СКС – мапи розподілу значень модуля $\text{Re}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$ і фази $\text{Arg}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$ поляризаційно-неоднорідних мікроскопічних зображень гістологічних зрізів паренхіматозної тканини печінки здорового та хворого на діабет (11 діб) лабораторного пацюка.

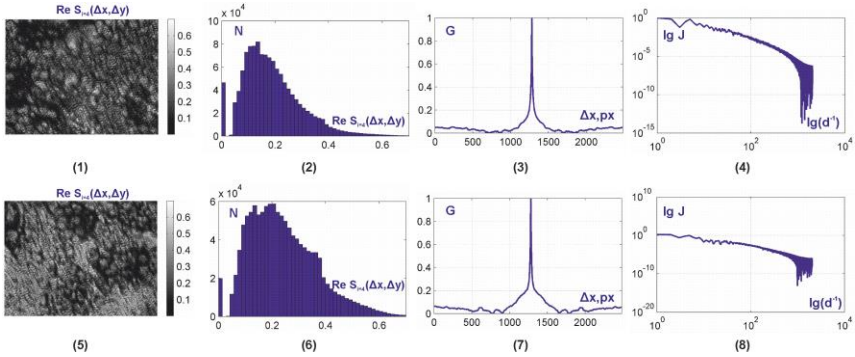


Рис. 6. Мапи ((1),(5), гістограми (2),(6), автокореляційні функції (3),(7), логарифмічні залежності спектрів потужності (4),(8) модуля СКК $\text{Re}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$ поляризаційно-неоднорідних зображень гістологічних зрізів здорової ((1)-(4)) та патологічно зміненої ((5)-(8)) печінки пацюка.

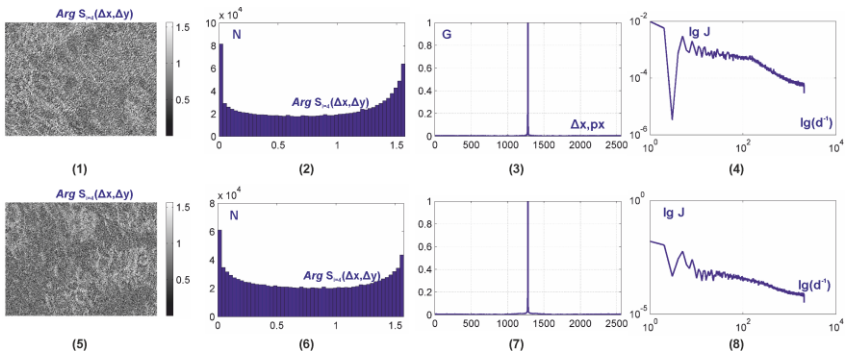


Рис. 7. Мапи ((1),(5), гістограми (2),(6), автокореляційні функції (3),(7), логарифмічні залежності спектрів потужності (4),(8) фази СКК $\text{Arg}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$ поляризаційно-неоднорідних зображень гістологічних зрізів здорової ((1)-(4)) та патологічно зміненої ((5)-(8)) печінки пацюка.

Установлено зростання середнє і півширина гістограм $N^*(\text{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)))$ розподілів значень модуля $\text{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y))$ граничного поля зразку печінки пацюка хворого на діабет (рис. 6, (2),(6)). Аналогічні зміни мають місце для величини статистичних моментів 1-го і 2-го порядків, які характеризують розподіли значень фази СКК $\text{Arg}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y))$ (рис. 7, (2),(6)).

Статистичні моменти вищих порядків, які характеризують асиметрію та ексцес розподілів модуля і фази СКК зображень зразка хворої печінки змінюються за наступним сценарієм

$$\left\{ Z_3 \left(\operatorname{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)); \operatorname{Arg}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)) \right) \downarrow; \left\{ Z_2^K \left(\operatorname{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)); \operatorname{Arg}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)) \right) \uparrow; \right. \\ \left. \left\{ Z_4 \left(\operatorname{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)); \operatorname{Arg}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)) \right) \downarrow; \left\{ Z_4^K \left(\operatorname{Re}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)); \operatorname{Arg}(S_{i=3;4}(\Delta x; \Delta y)) \right) \downarrow. \right. \right.$$

Кількісно можливості стокс-корелометричної диференціації двох груп зразків (по 36 гістологічних зрізів) печінки пацюків ілюструють дані, що наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Статистичні, кореляційні та фрактальні параметри мап модуля СКС зображень гістологічних зрізів здорової та патологічно зміненої печінки пацюка

Параметри	$\operatorname{Re}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$		$\operatorname{Arg}(S_{i=4}(\Delta x; \Delta y))$	
Стан	Норма	Норма	Діабет	Діабет
Z_1	$0,11 \pm 0,093$	$0,14 \pm 0,011$	$0,22 \pm 0,017$	$0,15 \pm 0,012$
Z_2	$0,12 \pm 0,09$	$0,14 \pm 0,011$	$0,21 \pm 0,015$	$0,21 \pm 0,016$
Z_3	$1,07 \pm 0,11$	$0,77 \pm 0,064$	$0,58 \pm 0,041$	$0,89 \pm 0,065$
Z_4	$0,95 \pm 0,072$	$1,29 \pm 0,12$	$0,63 \pm 0,051$	$0,62 \pm 0,049$
Z_2^k	$0,095 \pm 0,007$	$0,08 \pm 0,007$	$0,06 \pm 0,005$	$0,067 \pm 0,005$
Z_4^k	$0,89 \pm 0,069$	$2,67 \pm 0,22$	$3,71 \pm 0,31$	$1,36 \pm 0,11$
D^f	$0,22 \pm 0,016$	$0,18 \pm 0,017$	$0,29 \pm 0,023$	$0,31 \pm 0,023$

Найбільш чутливі показники виділені у таблицях 1 і 2 сірим – відмінності між величинами об'єктивних параметрів досягають 2 разів.

Проведений комплекс досліджень виявив суттєво більшу (на 25%-30%) точність методів Стокс-корелометрії у диференціації слабких змін оптичної анізотропії оптично-тонких структурованих ($84\% \leq \max A_c \leq 90\%$) і паренхіматозних ($80\% \leq \max A_c \leq 85\%$) біологічних тканин.

Четвертий розділ роботи містить результати експериментальної апробації методу поляризаційно-інтерференційного картографування з просторово-частотною фільтрацією мап локального контрасту мікроскопічних зображень біологічних тканин (міокард і мозок – “фібрилярні оптично-анізотропні мережі” та стінка прямої кишки – “острівкові оптично-анізотропні структури”) і рідин (полікристалічні плівки синовіальної рідини – суперпозиція “структурованих та острівкових мереж біологічних кристалів”).

Діагностичні можливості методу ілюструють рис. 8 і рис. 9.

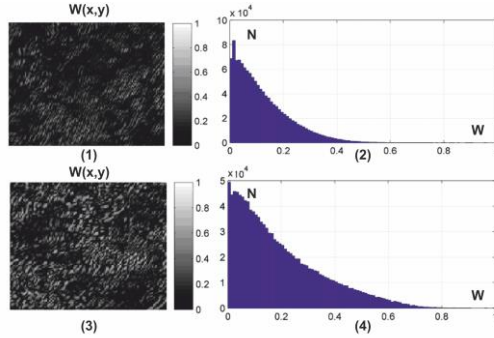


Рис. 8 Мапи ((1),(3)) і гістограми ((2),(4)) розподілів значень локального контрасту інтерференційних розподілів у площині поляризаційно-неоднорідних зображень гістологічних зрізів стінки здорової матки ((1),(2) рядок) і фіброміому (3),(4)).

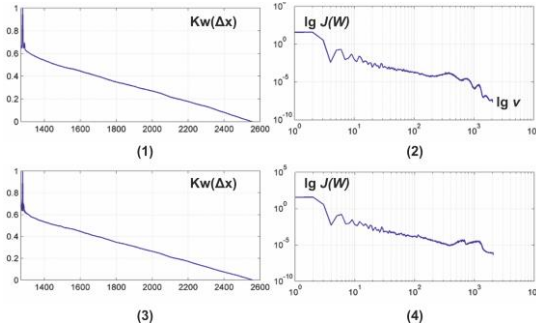


Рис. 9 Кореляційні та фрактальні параметри мап локального контрасту мікроскопічних зображень гістологічних зрізів стінки матки і фіброміому.

Виявлено значні діапазони зміни величини локального контрасту $0 \leq W \leq 0,5$ і $0 \leq W \leq 0,7$ (рис. 8, (2),(4)). Для поляризаційно-інтерференційного зображення стінки здорової матки залежність $K_w(\Delta x)$ спадає більш швидко (рис. 9, (3)) у порівнянні з аналогічною залежністю автокореляційної функції, що обчислена для $W(x, y)$ зображення фіброміому (рис. 9, (1)). Фрактальність розподілів $W(x, y)$ обумовлена тим, що геометрія будови фібрилярних мереж фізіологічно нормальних біологічних тканин є масштабно-самоподібною. Онкологічні зміни призводять до їх руйнації з формуванням дрібномасштабних структур, що і виявляється у зростанні модуляції ($D^f \uparrow$) відповідних залежностей $\log J(W) - \log \nu$ на високих просторових частотах ν .

Проведений порівняльний аналіз діагностичної ефективності методів інтерференційного картографування та лазерної поляриметрії тканини стінки матки у диференціації доброякісних пухлин і пльок синовіальної рідини суглоба людини з різною ступенем важкості післяопераційного стану (таблиця 2).

Таблиця 2

Точність методів інтерференційного картографування та лазерної поляриметрії

Зразки Параметри	Стінка матки			Синовіальна рідина		
	$Ac(W),\%$	$Ac(\alpha),\%$	$Ac(\beta),\%$	$Ac(W),\%$	$Ac(\alpha),\%$	$Ac(\beta),\%$
Z_1	86	72	76	72	72	76
Z_2	77	70	74	68	70	74
Z_3	88	84	87	76	80	76
Z_4	90	84	86	84	82	78
Z_2^k	72	71	68	70	71	68
Z_4^k	90	88	86	84	80	74
D^f	82	78	74	72	72	70

Виявлено більш високу (на 5% - 10%) діагностичну чутливість до слабких змін оптичної анізотропії зразків доброякісних і злоякісних пухлин стінки матки та плівок синовіальної рідини колінного суглоба людини з різним ступенем важкості патології ніж сукупність традиційних методів поляризаційного картографування.

У *п'ятому розділі* приведено результати пошарового вимірювання координатних розподілів величини еліптичності поляризації лазерного випромінювання перетвореного полікристалічними плівками біологічних рідини з різною симетрією оптично-анізотропних мереж біохімічних сполук – ліквор і жовч. У межах статистичного і кореляційного підходів визначено величини та діапазони зміни статистичних і кореляційних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують розподіли еліптичності поляризації лазерного випромінювання, перетвореного дендритними та сферолітними полікристалічними мережами у різних фазових перерізах. Розглянуто ефективність методу 3D поляризаційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію.

Рис. 10, рис. 11 і рис. 12 (фрагменти (1),(2)) ілюструють топографічну структуру пошарових мап еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі з групи 1 (практично здоров донори) і групи 2 (пацієнти з альбумінурією).

Результати кроскореляційного аналізу пошарових розподілів ($\varphi = 0,4rad$; $0,8rad$; $1,2rad$) величини еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі здорових донорів (фрагменти (1)) та хворих на альбумінурію (фрагменти (2)) приведені на серії рис. 10, рис. 11 і рис. 12 (фрагменти (3),(4)).

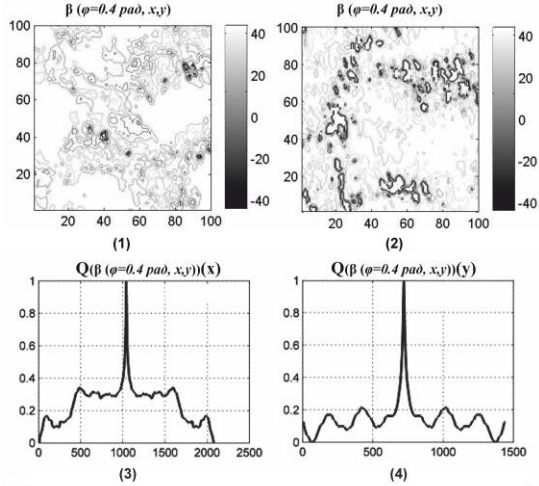


Рис. 10. Топографічна і кореляційна структура ($100 \text{ pix} \times 100 \text{ pix}$) мап еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі здорових донорів (фрагмент (1)) та хворих на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,4$.

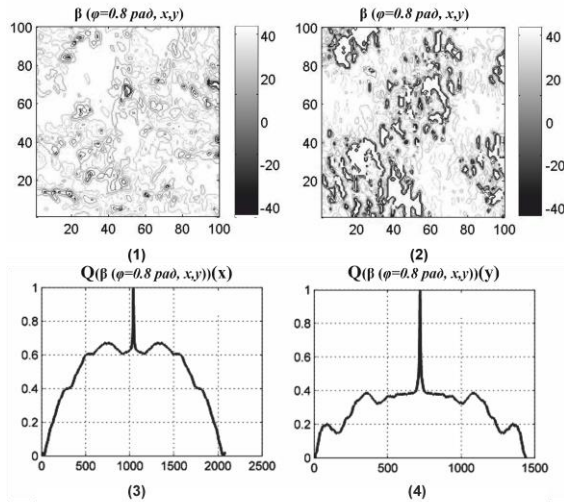


Рис. 11. Топографічна і кореляційна структура ($100 \text{ pix} \times 100 \text{ pix}$) мап еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі здорових донорів (фрагмент (1)) та хворих на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,8$.

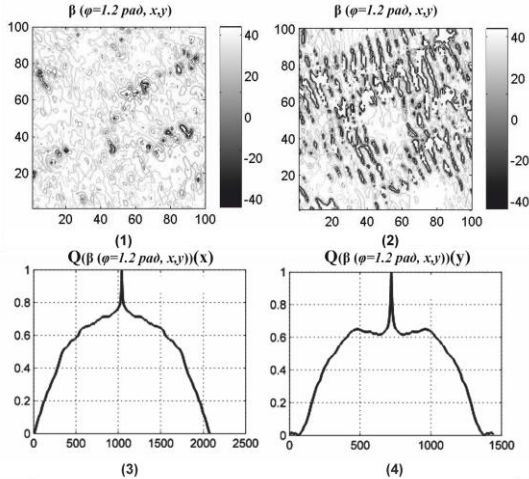


Рис. 12. Топографічна і кореляційна структура ($100\text{pix} \times 100\text{pix}$) мап еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі здорових донорів (фрагмент (1)) та хворих на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 1,2$.

Встановлено:

1. Наявність поляризаційно–неоднорідної структури об’єктних полів зразків плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію в усіх фазових перерізах.
2. З ростом величини фази φ_i має місце зростання середньої величини β та діапазону зміни даного параметру.
3. Автокореляційні залежності $Q(x)$ і $Q(y)$ координатних розподілів величини еліптичності поляризації $\beta_i(\varphi, x, y)$ складаються з двох частин – монотонно спадаючої та флуктуаційної.

Виявлені наступні відмінності:

1. Для полікристалічних оптично анізотропних мереж плівок сечі з групи 2 притаманний більший рівень лінійного двопроменезаломлення, що виявляється у зростанні середнього значення та діапазону розкиду величини еліптичності поляризації.
2. Мапи еліптичності поляризації $\beta_i(\varphi, x, y)$ поля лазерного випромінювання в об’ємі полікристалічних плівок сечі хворих на альбумінурію більш топографічно неоднорідні.
3. Автокореляційні залежності $Q(x)$ і $Q(y)$ розподілів величини еліптичності поляризації $\beta_i(\varphi, x, y)$ зразків сечі хворих на альбумінурію характеризуються меншою півшириною та амплітудою флуктуацій на тлі більшої асиметрії та гостроти піку.

Паралельно до цього збільшується кількість, розкид значень і розміри поляризаційних доменів еліптичності для зразків з групи 2.

У межах кореляційного підходу зростання поляризаційної неоднорідності об'єктного поля плівок сечі хворих альбумінурією призводить до більш швидкої декореляції розподілів еліптичності (швидке спадання $Q(\varphi_i, \Delta x)$ і $Q(\varphi_i, \Delta y)$ та зменшення амплітуди осциляцій $\tilde{Q}(\varphi_i, \Delta x)$, $\tilde{Q}(\varphi_i, \Delta y)$) поляризації.

В таблиці 3 приведені середні значення ($\bar{Z}_{i=1;2;3;4}$, $\bar{K}_{i=1;2;3;4}$) і середні похибки ($\pm\sigma$) статистичних $Z_{i=1;2;3;4}$ і кореляційних $K_{i=1;2;3;4}$ моментів 1-го – 4-го порядків, визначених для серії фазових розподілів величини еліптичності поляризації полікристалічних плівок сечі

Таблиця 3

Статистичні моменти $Z_{i=1;2;3;4}$, які характеризують “фазові” розподіли величини еліптичності поляризації β мікроскопічних зображень полікристалічних плівок сечі здорових донорів та хворих на альбумінурію

β		Норма	Альбумінурія	Ac, %
$\varphi = 0,4$	Z_1	$0,08 \pm 0,005$	$0,1 \pm 0,006$	69
	Z_2	$0,11 \pm 0,006$	$0,13 \pm 0,007$	71
	Z_3	$1,65 \pm 0,092$	$1,21 \pm 0,073$	75
	Z_4	$2,21 \pm 0,13$	$1,57 \pm 0,092$	78
$\varphi = 0,8$	Z_1	$0,105 \pm 0,006$	$0,14 \pm 0,008$	70
	Z_2	$0,125 \pm 0,007$	$0,16 \pm 0,009$	74
	Z_3	$1,32 \pm 0,086$	$0,88 \pm 0,054$	82
	Z_4	$1,88 \pm 0,11$	$1,06 \pm 0,064$	86
$\varphi = 1,2$	Z_1	$0,14 \pm 0,008$	$0,21 \pm 0,013$	74
	Z_2	$0,15 \pm 0,009$	$0,19 \pm 0,011$	72
	Z_3	$1,12 \pm 0,073$	$0,87 \pm 0,058$	80
	Z_4	$1,34 \pm 0,079$	$0,92 \pm 0,068$	78

Установлено, що можна здійснити диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою точністю (виділено сірим) - $Ac(Z_{3;4}(\varphi = 0,8)) = 82\% - 86\%$.

Шостий розділ роботи містить результати експериментального виявлення і фізичного аналізу взаємозв'язків між 3D розподілами параметрів оптичної анізотропії полікристалічних мереж плівок біологічних рідин різного біохімічного складу та пошаровими фазовими перерізами об'ємних розподілів величини модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення.

У межах статистичного підходу із використанням масштабно-селективного вейвлет-аналізу визначено величини та діапазони зміни статистичних 1-го – 4-го порядків, які характеризують:

- розподіли значень модуля та фази параметрів вектора Стокса лазерного випромінювання, перетвореного дендритними та сферолітними полікристалічними мережами плівок біологічних рідин, у різних фазових перерізах об'єктного поля;
- сукупності значень амплітуд вейвлет-коефіцієнтів для різних масштабів геометричних розмірів мап модуля і фази ступеня кореляції параметрів вектора Стокса (СКС).

На цій основі фізично обґрунтовано та експериментально визначено ефективність методу 3D Стокс-корелометричного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію.

Досліджено додаткові можливості розширення функціональних можливостей та підвищення чутливості методу 3D Стокс-кореляційного картографування слабких змін оптичної анізотропії з використанням вейвлет-аналізу координатних розподілів величини модуля (МСКС) і фази (ФСКС) ступеня кореляції параметрів вектора Стокса об'єктного поля сформованого координатно-неоднорідними мережами сферолітних і дендритних кристалів.

На серії рис. 13, рис. 15 і рис. 17 представлені координатна структура мап $ArgS_4(\varphi, x, y)$ полікристалічних плівок сечі здорових донорів (фрагменти (1)) та хворих на альбумінурію (фрагменти (2)) у різних фазових перерізах $\varphi = 0,4 \text{ рад}$; $0,8 \text{ рад}$; $1,2 \text{ рад}$.

Залежності амплітуд вейвлет-коефіцієнтів $C_{a,b}$ пошарових мап $ArgS_4(\varphi, x, y)$ об'єктного поля полікристалічних плівок сечі з групи 1 (фрагменти (1),(3)) і групи 2 (фрагменти (2),(4)) приведені на рис. 14, рис. 16 і рис. 18.

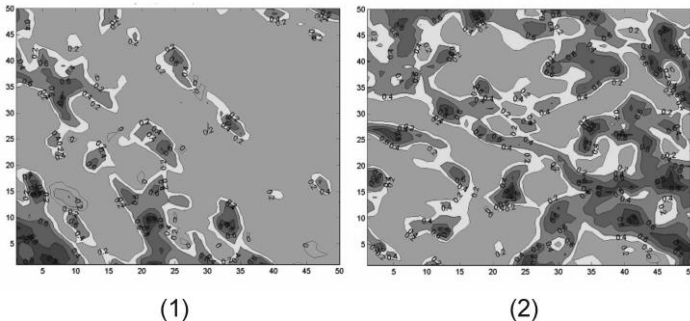


Рис. 13. Координатні розподіли величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сечі здорового донора (фрагмент (1)) та хворого на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,4$.

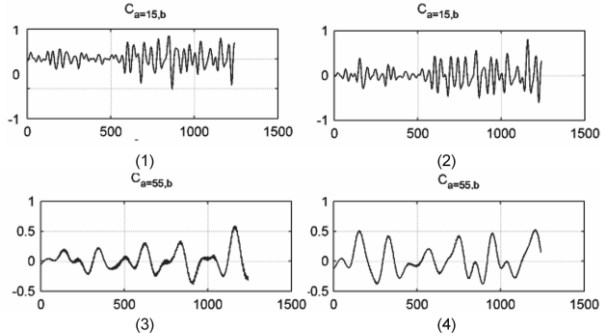


Рис. 14. Лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів розподілів величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сечі здорового донора (фрагменти (1),(3)) та хворого на альбумінурію (фрагменти (2),(4)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,4$.

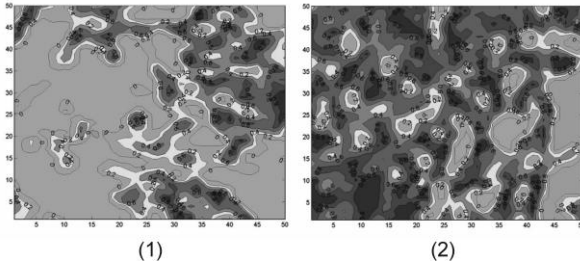


Рис. 15. Координатні розподіли величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточково-го” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сечі здорового донора (фрагмент (1)) та хворого на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,8$.

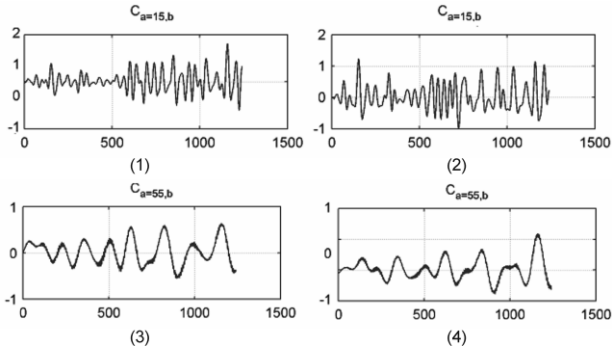


Рис. 16. Лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів розподілів величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сечі здорового донора (фрагменти (1),(3)) та хворого на альбумінурію (фрагменти (2),(4)) у фазовому перерізі $\varphi = 0,8$.

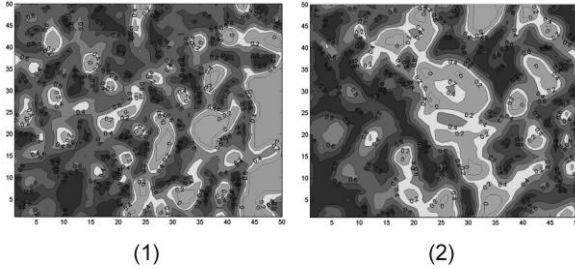


Рис. 17. Координатні розподіли величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сеті здорового донора (фрагмент (1)) та хворого на альбумінурію (фрагмент (2)) у фазовому перерізі $\varphi = 1,2$.

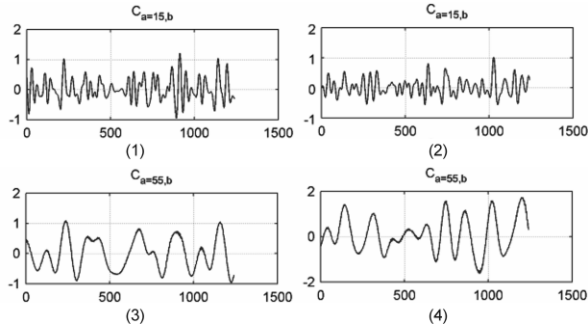


Рис. 18. Лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів розподілів величини фази $ArgS_4$ 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса мікроскопічного зображення полікристалічних плівок сеті здорового донора (фрагменти (1),(3)) та хворого на альбумінурію (фрагменти (2),(4)) у фазовому перерізі $\varphi = 1,2$.

Установлено:

1. Наявність координатно-неоднорідної фазової модуляції (розподіли величини ФСКС $ArgS_4(\varphi, x, y) \Leftrightarrow \delta(\varphi, x, y)$ в усіх фазових перерізах, – рис. 13, рис. 15, рис. 17.
2. З ростом величини фази φ_i має місце зменшення середньої величини $ArgS_4(\varphi, x, y)$ та, навпаки, збільшення діапазону зміни величини ФСКС в пошарових перерізах об’єктного поля лазерного випромінювання полікристалічних плівок сеті обох груп пацієнтів.
3. Величина середнього (Z_1) випадкових значень модуля $ArgS_4(\varphi, x, y)$ об’єктного поля плівок сеті хворих на альбумінурію менша ніж для лазерного випромінювання, перетвореного зразками здорових донорів – фрагменти (2) рис. 13, рис. 15, рис. 17.

З фізичної точки зору це можна пов’язати з тим, що для більші значення амплітуди фазової модуляції тривимірному розподілу поля комплексних амплітуд

відповідають механізмам взаємодії парціальних хвиль з оптично-анізотропними кристалічними утвореннями більшої концентрації або розмірів. Внаслідок цього зростає вплив глибини фазової модуляції $\Delta\delta(\varphi, x, y) \uparrow$ полікристалічної структури плівок сечі пацієнтів з групи 2 на поляризаційно-кореляційну структуру об'єктного поля. В результаті зростання координатної декореляції між величинами $\delta(\varphi, x, y)$ екстремальні значення фази $ArgS_4(\varphi, x, y) = 1,75 \text{ рад}$ перерозподіляються у більш широкий діапазон їх зміни $0 \leq ArgS_4(\varphi, x, y) \leq 1,75 \text{ рад}$. Таким чином, зменшується середнє та зростає дисперсія, які характеризують відповідні гістограми на фоні зменшення величини асиметрії та ексцесу.

В таблиці 4 приведені середні значення ($\bar{Z}_{i=1;2;3;4}$), середні похибки ($\pm\sigma$) статистичних моментів 1-го – 4-го порядків та збалансована точність ($A_c, \%$), визначені для розподілів величини МСКС в межах обох груп біологічних препаратів.

Таблиця 4

Статистичні моменти $Z_{i=1;2;3;4}$, які характеризують “фазові” розподіли величини МСКС полікристалічних плівок сечі обох груп пацієнтів

$ ArgS_4 $		Норма	Альбумінурія	$A_c, \%$
$\varphi = 0,4$	Z_1	$1,14 \pm 0,081$	$0,98 \pm 0,084$	76
	Z_2	$0,17 \pm 0,008$	$0,25 \pm 0,011$	72
	Z_3	$0,45 \pm 0,036$	$0,31 \pm 0,015$	74
	Z_4	$0,61 \pm 0,044$	$0,47 \pm 0,028$	78
$\varphi = 0,8$	Z_1	$0,84 \pm 0,085$	$0,58 \pm 0,036$	88
	Z_2	$0,19 \pm 0,012$	$0,29 \pm 0,012$	90
	Z_3	$0,39 \pm 0,041$	$0,27 \pm 0,009$	80
	Z_4	$0,47 \pm 0,036$	$0,34 \pm 0,019$	76
$\varphi = 1,2$	Z_1	$0,71 \pm 0,039$	$0,47 \pm 0,023$	86
	Z_2	$0,21 \pm 0,019$	$0,34 \pm 0,018$	78
	Z_3	$0,28 \pm 0,016$	$0,21 \pm 0,011$	74
	Z_4	$0,36 \pm 0,027$	$0,28 \pm 0,014$	76

Установлено, що максимальний рівень точності досягає хорошого рівня $A_c(Z_{1;2}(\varphi = 0,8)) = 88\% - 90\%$. У рамках вейвлет-аналізу встановлено зростання діапазону зміни амплітуди лінійних залежностей $C_{a=55,b}$ вейвлет-коефіцієнтів, які характеризують великомасштабну структуру розподілів фази $ArgS_4(\varphi, x, y)$ поля комплексних амплітуд плівок сечі хворих на альбумінурію (рис. 14, рис.

16, рис. 18, фрагменти (4)). Даний факт можна пов'язати з тим, що у випадку патології нирок для полікристалічної мережі плівок сечі зростає кількість великомасштабних оптично-анізотропних утворень. У результаті зростає діапазон зміни амплітуди відповідних вейвлет-коефіцієнтів $C_{a,b}$, величина яких визначається ступенем кореляційної узгодженості розмірів доменів $Arg(\varphi, \Delta x, \Delta y)$ з масштабами вікна МНАТ функції.

Таблиця 5

Збалансована точність вейвлет-аналізу даних методу 3D картографування ФКС об'єктних полів полікристалічних плівок сечі обох груп пацієнтів

φ_i	Z_i	$ S_4 , C_{a=0,15,b}, Ac, \%$	$ S_4 , C_{a=0,55,b}, Ac, \%$
$\varphi = 0,8$	Z_1	64	66
	Z_2	68	90
	Z_3	76	92
	Z_4	74	82

Максимальний рівень точності досягає дуже хорошого рівня у певному “оптимальному” фазовому перерізі для статистичних моментів 2-го і 3-го порядків - $Ac(Z_{2,3}(\varphi = 0,8)) = 90\% - 92\%$.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

1. Узагальнено та обґрунтовано сукупність “одноточкових” і “двоточкових” поляризаційних і кореляційних параметрів полів лазерного випромінювання, перетвореного оптично-анізотропними біологічними шарами шляхом застосування “двоточкового” поляризаційного; поляризаційного-інтерференційного” підходів та стокс-корелометрії із застосуванням опорної хвилі.
2. Установлені величини та діапазони зміни набору об'єктивних параметрів, які характеризують випадкову (статистичні моменти 1-го – 4-го порядків), кореляційну (кореляційні моменти 2-го і 4-го порядків) та масштабно-самоподібну (дисперсія розподілу логарифмічних залежностей спектрів потужності) структуру мап 3-го і 4-го параметрів “двоточкового” вектора Стокса в площині поляризаційно-неоднорідних мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біологічних тканин зі структурованою та паренхіматозною оптично-анізотропними складовими.
3. Вперше методом Стокс-корелометричного картографування виявлено та проаналізовано фізичні процеси зміни оптичної анізотропії (розподіли напрямів оптичних осей і фазова модуляція) зразків біологічних структурованих (нирка) і паренхіматозних (печінка) тканин внутрішніх органів пацюка, що обумовлені системною патологією (діабет). На цій основі реалізовано диференціацію змін оптичної анізотропії з хорошою збалансованою точністю ($\sim 90\%$), яка на 20% - 30% вища за точність методів прямого поляризаційного картографування.

4. Вперше апробовано Стокс-корелометричну методику в диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок плазми крові здорових донорів і хворих на рак простати. Виявлено, що у випадку слабких змін оптичної анізотропії методи Стокс-корелометрії залишаються більш чутливими (на 10%-20%) у порівнянні із традиційними методами поляризаційного картографування.

5. Вперше розроблено та експериментально апробовано поляризаційно-інтерференційну методику в диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок синовіальної рідини колінного суглоба людини з різною післяопераційною патологією – реактивний та асептичний синовіт. Установлені найбільш чутливі параметри (статистичні моменти 3-го і 4-го порядків, кореляційний момент 4-го порядку) до зміни структури розподілів величини локального контрасту інтерференційних картин в площині мікроскопічних зображень плівок синовіальної рідини обох типів та досягнуто задовільної збалансованої точності $A_c \sim 80\%$.

6. Вперше визначено ефективність у диференціації слабких фазових змін масштабно-селективного вейвлет-аналізу мап локального контрасту інтерференційних розподілів мікроскопічних зображень полікристалічних плівок біологічних рідин і установлені взаємозв'язки між статистичними моментами 1-го – 4-го порядків, які характеризують лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах МНАТ функції та розподіли оптичної анізотропії мереж біохімічних кристалів плівок синовіальної рідини.

7. Вперше розроблено і експериментально апробовано метод 3D Стокс-поляриметрії поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів плівок біологічних рідин з різною просторовою симетрією полікристалічних мереж на основі пошарового цифрового голографічного відтворення розподілів величини еліптичності поляризації з використанням опорної лазерної хвилі. На цій основі визначено взаємозв'язки між тенденціями зміни величини статистичних і кореляційних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують пошарові розподіли 3D мап еліптичності поляризації лазерного випромінювання, перетвореного дендритними і сферолітними мережами біохімічних кристалів плівок ліквору і жовчі.

8. Вперше установлено ефективність методу 3D поляризаційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію та виявлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів еліптичності поляризації, також статистичні і кореляційні параметри, що їх характеризують. На цій основі здійснено диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою точністю $A_c(Z_{3,4}(\varphi = 0,8)) = 82\% - 86\%$.

9. Вперше розроблено метод 3D Стокс-корелометрії об'єктних полів плівок біологічних рідин на основі застосування опорної лазерної хвилі та пошарового цифрового голографічного відтворення розподілів комплексних амплітуд з на-

ступним визначенням відповідних мап модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса. На цій основі визначено взаємозв’язки між тенденціями зміни величини статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують пошарові розподіли 3D мап модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса лазерного випромінювання, перетвореного дендритними і сферолітними мережами біохімічних кристалів плівок ліквору і жовчі.

10. Вперше виявлено ефективність методу 3D поляризаційно-кореляційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію. Установлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів модуля і фази 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса, також статистичні параметри, що їх характеризують. На цій основі здійснено диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою $A_c(Z_{1;2}(|S_4|, ArgS_4)) = 88\% - 90\%$ точністю.

11. Вперше реалізовано масштабно-селективну диференціацію велико- і дрібно-масштабних складових мап координатних розподілів величини модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса пошарових перерізах поля комплексних амплітуд полікристалічних плівок сечі та установлені взаємозв’язки між тенденціями зміни величини та діапазонів зміни статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують Стокс-корелометричні мапи та симетрію різномасштабних складових дендритних і сферолітних мереж біологічних кристалів. Точність розглянутого методу досягає дуже хорошого $A_c(Z_{2;3}(ArgS_4)) = 90\% - 92\%$ і відмінного рівнів $A_c(Z_{3;4}(|S_4|)) = 94\% - 96\%$.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tuchin V. V. Tissue optics and photonics: light-tissue interaction / J. Biomedical Photonics & Eng. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 98-134.
2. Tuchin V.V. Tissue Optics: Light Scattering Methods and Instruments for Medical Diagnostics, 3rd ed./ SPIE Press, Bellingham. – 2015.– p. 254.
3. Diagnostics of Structure and Physiological State of Birefringent Biological Tissues: Statistical, Correlation and Topological Approaches / Y. A. Ushenko, T. M. Boychuk, V. T. Bachynsky, O. P. Mincer // Handbook of Coherent-Domain Optical Methods. – New York : Springer Science+Business Media – 2013. – P. 107-148.
4. Ghosh N. Mueller matrix approach for probing multifractality in the underlying anisotropic connective tissue / Nandan Kumar Das, Rajib Dey, Nirmalya Ghosh // J. Biomed. Opt. – 2016. – 21(9). – 095004.
5. Qi J. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review / Qi J., Elson D.S. // Journal of Biophotonics. – 2017. – 10 (8). – pp. 950-982.
6. V.T. Bachynskiy Laser polarimetry of biological tissues and fluids Chapter 1. Polarization mapping of optically thin layers of biological tissues and fluids / V.T. Bachynskiy, T.M. Boychuk, A. G. Ushenko, A. V. Dubolazov, O.Ya. Vanchuliak, Yu. A. Ushenko, V.A. Ushenko // LAP LAMBERT Academic Publishing. – 2017. – 196 p.

7. Ушенко О. Г. Лазерна поляриметрія фазово-неоднорідних об'єктів і середовищ / О. Г. Ушенко. – Чернівці : Медакадемія, 2000. – 256 с.
8. Придідій О. Г. Двовимірна стоксполариметрія лазерних полів, перетворених сітками двопротоменезаломлюючих біологічних кристалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.05 “Оптика, лазерна фізика” / О. Г. Придідій – Чернівці, 2010. – 20 с.
9. A. G. Ushenko Polarization Correlometry of Scattering Biological Tissues and Fluids / V. T. Bachinskyi, O. Ya. Wanchulyak, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko, A. V. Dubolazov, Igor Meglinski // Springer Singapore 2020, – 76p.
10. Ангельська А. О. Комплексний ступінь взаємної поляризації лазерних полів двопротоменезаломлюючих матриць біологічних тканин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. фіз.-мат. наук : спец. 01.04.05 “Оптика, лазерна фізика” / А.О. Ангельська ; Чернів. нац. ун-т ім. Ю.Федьковича. – Чернівці, 2009. – 20 с.
11. Kobata T. Digital holographic three-dimensional Mueller matrix imaging / Kobata T., Nomura T. // Appl. Opt. – 2015.– 54(17). – 5591-5596.
12. Ushenko A. Stokes-Correlometry Analysis of Biological Tissues with Polycrystalline Structure / Ushenko A., Sdobnov A., Dubolazov A., Grytsiuk M., Ushenko Y., Bykov A., Meglinski I. // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2019. – 25 (1). – № 8438957.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Dubolazov A. V. Polarization Correlometry of Scattering Biological Tissues and Fluids / V. T. Bachinskyi, O. Ya. Wanchulyak, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko, A. V. Dubolazov, Igor Meglinski // Springer Singapore 2020, – 76p. ISBN: 978-981-15-2627-5.
2. Dubolazov O.V. Laser Müller matrix diagnostics of changes in the optical anisotropy of biological tissues / A.G. Ushenko, A.V. Dubolazov, Y.A. Ushenko, M.Yu. Sakhnovskiy, P.M. Grygoryshyn, N. Pavlyukovich, O.V. Pavlyukovich, V.T. Bachynskiy, S.V. Pavlov, R. Dzierzak, O. Mamyrbayev // Information Technology in Medical Diagnostics II / Wójcik W. (Ed.), Pavlov S. (Ed.), Kalimoldayev M. (Ed.). – London: CRC Press 2019, – Chapter 23. – P.199-209.
3. Dubolazov A.V. Laser polarimetry of biological tissues and fluids. Chapter 5. 2D-3D polarization tomography of anisotropic structures of biological layers / V.T. Bachinskyi, T.M. Boychuk, A.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko, A.V. Dubolazov et.al. / LAP Lambert Academic Publishers 2018, – 252 p. ISBN: 978-613-9-88665-4.
4. Dubolazov A.V. Laser polarimetry of biological tissues and fluids Chapter 7. 3D methods of Mueller-matrix polarimetry of optically anisotropic biological layers / Victor Bachinskyi, Lilia Trifonyuk, Oleg Wanchuliak, Alexander Ushenko, Alexander Dubolazov et.al. // LAP Lambert Academic Publishers 2020, – 272 p. ISBN: 978-620-2-66720-3.
5. Dubolazov A.V. Laser polarimetry of biological tissues and fluids Chapter 8. Information methods and systems of polarization correlometry of optically anisotropic biological crystals / Natalia Pavlukovitch, Olexander Pavlukovitch, Ivan Savka, Yuriy Ushenko, Alexander Dubolazov, Alexander Ushenko et. al. // LAP Lambert Academic Publishers 2020, – 440 p. ISBN: 978-620-2-66986-3.

6. Dubolazov O.V. Mueller matrix images of polycrystalline films of human biological fluids / Ushenko A.G., Pashkovskaya N.V., Dubolazov O.V., Ushenko Y.A., Marchuk Y.F., Ushenko V.A. // *Romanian Reports in Physics*. – 2015. – №67. – С. 1467–1479.
7. Dubolazov O.V. Statistical and fractal analyses of autofluorescence of myocardium tissue images in diagnostics of acute coronary insufficiency / O.V.Dubolazov, M.I. Sidor, A.O. Karachevtsev // *Semiconductor physics, Quantum electronics and Optoelectronics*. – 2015. – V.18(N.2). – P. 152-157.
8. Dubolazov O.V. Polarization-phase images of liquor polycrystalline films in determining time of death / Garazdyuk M.S., Bachinskyi V.T., Vanchulyak O.Ya., Ushenko A.G., Dubolazov O.V., Gorsky M.P. // *Applied Optics*. – 2016. - 55 (12). - B67-B71.
9. Dubolazov A.V. Birefringence images of polycrystalline films of human urine in early diagnostics of kidney pathology / Dubolazov A.V., Pashkovskaya N.V., Ushenko Yu.A., Marchuk Yu.F., Ushenko V.A., Novakovskaya O.Yu. // *Applied Optics*. – 2016. - 55 (12). - B85 - B90.
10. Dubolazov A.V. Jones-matrix mapping of complex degree of mutual anisotropy of birefringent protein networks during the differentiation of myocardium necrotic changes / Ushenko Yu.A., Bachynsky V.T., Vanchulyak O.Ya., Dubolazov A.V., Garazdyuk M.S., Ushenko V.A. // *Applied Optics*. – 2016. – 55 (12). – B113-B119.
11. Dubolazov O.V., Fourier polarimetry of human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations / Ushenko A.G., Dubolazov O.V., Ushenko V.A., Novakovskaya O.Yu., Olar O.V. // *Applied Optics*. – 2016. - 55 (12). – B56-B60.
12. Dubolazov A.V. Polarization-dependent laser autofluorescence of the polycrystalline networks of blood plasma films in the task of liver pathology differentiation / Prsyazhnyuk V.P., Ushenko Yu.A., Dubolazov A.V., Ushenko A.G., Ushenko V.A. // *Applied Optics*. – 2016. – 55 (12). - B126-B132.
13. Dubolazov O.V. Mueller-matrix of laser-induced autofluorescence of polycrystalline films of dried peritoneal fluid in diagnostics of endometriosis / Ushenko Y.A., Koval G.D., Ushenko A.G., Dubolazov O.V., Ushenko V.A., Novakovskaia O.Y. // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – 21 (7). - 071116.
14. Dubolazov A.V. Statistical analysis of polarization-inhomogeneous Fourier spectra of laser radiation scattered by human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations / Ushenko A.G., Dubolazov A.V., Ushenko V.A., Novakovskaya O.Y. // *Journal of Biomedical Optics*. – 2016. – 21 (7). – 071110.
15. Dubolazov O.V. Diagnostic possibilities of the method of mapping laser polarization distribution ellipticity of microscopic images of polycrystalline films of blood plasma in definition of liver diseases / Prsyazhnyuk V. P., Ushenko O. G., Dubolazov O. V. // *Одеський медичний журнал*. – 2016. – 1 (153). – 20-25.
16. Dubolazov O. Complementary analysis of Mueller-matrix images of optically anisotropic highly scattering biological tissues / Borovkova M., Peyvasteh M., Dubolazov O., Ushenko Y., Ushenko V., Bykov A., Deby S., Rehbindler J., Novikova T., Meglinski I. // *Journal of the European Optical Society*. – 2018. - 14 (1). - 20.

17. Dubolazov A. 3D Mueller-matrix diffusive tomography of polycrystalline blood films for cancer diagnosis / Ushenko V., Sdobnov A., Syvokorovskaya A., Dubolazov A., Vanchulyak O., Ushenko A., Ushenko Y., Gorsky M., Sidor M., Bykov A., Meglinski I. // *Photonics*. – 2018. - 5 (4). – № 54.
18. Dubolazov A. 2D-Mueller-matrix tomography of optically anisotropic polycrystalline networks of biological tissues histological sections / Trifonyuk L., Baranowski W., Ushenko V., Olar O., Dubolazov A., Ushenko Y., Bodnar B., Vanchulyak O., Kushnerik L., Sakhnovskiy M. // *Opto-electronics Review*. – 2018. – 26 (3). - 252-259.
19. Dubolazov A.V. Mapping of polycrystalline films of biological fluids utilizing the Jones-matrix formalism / Ushenko V.A., Dubolazov A.V., Pidkamin L.Y., Sakhnovsky M.Y., Bodnar A.B., Ushenko Y.A., Ushenko A.G., Bykov A., Meglinski I. // *Laser Physics*. – 2018. – 28 (2). – 025602.
20. Dubolazov A. Differential Mueller matrix imaging of partially depolarizing optically anisotropic biological tissues / Trifonyuk L., Sdobnov A., Baranowski W., Ushenko V., Olar O., Dubolazov A., Pidkamin L., Sidor M., Vanchuliak O., Motrich A., Gorsky M., Meglinski I. // *Lasers in Medical Science*. – 2020. – 35(4). – 877-891.
21. Dubolazov O.V. Multifunctional polarization tomography of birefringence networks of biological crystals / O.V. Dubolazov, O.I. Olar, D.M. Burkovets // *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. — 2015. — Т. 18, № 1. — С. 170-174.
22. Dubolazov A. Stokes-Correlometry Analysis of Biological Tissues with Polycrystalline Structure / Ushenko A., Sdobnov A., Dubolazov A., Grytsiuk M., Ushenko Y., Bykov A., Meglinski I. // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. – 2019. – 25 (1). - 8438957.
23. Dubolazov O. Mueller-matrix-based polarization imaging and quantitative assessment of optically anisotropic polycrystalline networks / Borovkova M., Trifonyuk L., Ushenko V., Dubolazov O., Vanchulyak O., Bodnar G., Ushenko Y., Olar O., Ushenko O., Sakhnovskiy M., Bykov A., Meglinski I. // *PLoS ONE*. –2019. - 14 (5). – № e0214494.
24. Dubolazov A.V. Biomedical applications of Jones-matrix tomography to polycrystalline films of biological fluids / Ushenko V.A., Sdobnov A.Y., Mishalov W.D., Dubolazov A.V., Olar O.V., Bachinskyi V.T., Ushenko A.G., Ushenko Y.A., Wanchuliak O.Y., Meglinski I. // *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. – 2019. – 12 (6). – № 1950017.
25. Dubolazov O. V. Поляризаційно-інтерференційне картографування мереж в полікристалічних дифузних біологічних тканинах / Olar O. V., Ushenko V. O., Sakhnovsky M. Y., Ushenko Y. O., Dubolazov O. V., Ushenko O. G. // *Біофізичний вісник*. – 2019. – 41. – 41-51.
26. Dubolazov O.V. Azimuthally invariant laser polarimetry of polycrystalline smears of biological liquids / Yu.O. Ushenko, O.V. Dubolazov, A.V. Motrich, G.B. Bodnar // *Semiconductor Physics Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2015. – Т. 18, № 1. – С. 158-163.

27. Dubolazov A. Two-point Stokes vector diagnostic approach for characterization of optically anisotropic biological tissues / Peyvasteh M., Dubolazov A., Popov A., Ushenko A., Ushenko Y., Meglinski I. // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2020. – 53 (39). - 395401.
28. Dubolazov A. 3D Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours / Peyvasteh M., Tryfonyuk L., Ushenko V., Syvokorovskaya A. V., Dubolazov A., Vanchulyak O., Tomka Y. // *Laser Physics Letters*. – 2020. – 17(11).– 115606.
29. Dubolazov O.V. Polarization-correlation microscopy of human liquid polycrystalline films in infertility diagnosis / Ushenko, V.A., Prsyazhnyuk, V.P., Dubolazov, O.V., Karachevtsev, A.O., Olar, O.I., Olar, O.V., Marchuk, Y.F., Savich, V.O. // *Proc. SPIE*. – 2015. – 9599. – 959922.
30. Dubolazov O.V. Methods and means of 3D diffuse Mueller-matrix tomography of depolarizing optically anisotropic biological layers / Dubolazov O.V., Ushenko V.O., Trifoniuk L., Ushenko Y.O., Zhytaryuk V.G., Prydiy O.G., Grytsyuk M., Kushnerik L., Meglinskiy I. // *Proc. SPIE*. – 2017. – 10396. – 103962P.
31. Dubolazov O.V. New opportunities of differential diagnosis of biological tissues polycrystalline structure using methods of Stokes correlometry mapping of polarization inhomogeneous images / Trifonyuk L., Dubolazov O.V., Ushenko Y.O., Zhytaryuk V.G., Prydiy O.G., Grytsyuk M., Kushnerik L., Meglinskiy I., Savka I.G., // *Proc. SPIE*. – 2017. – 10396. - 103962R.
32. Dubolazov O.V., Two-point Stokes vector parameters of object field for diagnosis and differentiation of optically anisotropic biological tissues / Dubolazov O.V., Trifonyuk L., Marchuk Y., Ushenko Y.O., Zhytaryuk V.G., Prydiy O.G., Kushnerik L., Meglinskiy I. // *Proc. SPIE*. – 2017. – 10352. – 103520V.
33. Dubolazov O.V. Polarization-interference mapping of biological fluids polycrystalline films in differentiation of weak changes of optical anisotropy / Ushenko V.O., Vanchuliak O., Sakhnovskiy M.Y., Dubolazov O.V., Grygoryshyn P., Soltys I.V., Olar O.V., Antoniv A. // *Proc. SPIE*. – 2017. – 10396. - 103962O.
34. Dubolazov O. Fractal analysis of patterns for birefringence biological tissues in the diagnostics of pathological and necrotic states / Pavlyukovich O., Pavlyukovich N., Ushenko Y., Galochkin O., Sakhnovskiy M., Kovalchuk M., Dovgun A., Golub S., Dubolazov O. // *Proc. SPIE*. - 2019. – 11105. - 1110518.
35. Dubolazov O. Stokes-correlometry of polycrystalline films of biological fluids in the early diagnostics of system pathologies / Vanchulyak O., Ushenko O., Zhytaryuk V., Dvorjak V., Pavlyukovich O., Dubolazov O., Pavlyukovich N., Penteleichuk N.P., // *Proc. SPIE*. – 2019. – 11105. - 1110519.
36. Dubolazov A.V. Polarization tomography of synovial fluids polycrystalline layers / Protsiuk V.V., Vasiyk V.L., Vasylichshyn Y.M., Ushenko O.G., Shaplavskiy M.V., Bodnar O.B., Dubolazov A.V., Ushenko Y.O., Tomka Y.Y. // *IFMBE Proc. Springer*. – 2020. – 77. – 497-501.
37. Dubolazov A. Azimuthally invariant Mueller-matrix tomography of the distribution of phase and amplitude anisotropy of biological tissues / A. Gutsul, V. Ushenko, I. Soltys, M. Shaplavsky, S. Sokolnyuk, A. Dubolazov, A. Ushenko, A. Motrich, R.

Besaga // Proc. SPIE 11510, Applications of Digital Image Processing XLIII. – 2020. – 115102.– №115102S.

38. A. V. Dubolazov. Analytical modeling of polarization transformation of laser radiation of various spectral ranges by birefringent structures / A. V. Motrich, A. V. Dubolazov, O. G. Ushenko // Proc. SPIE. – 2020. – 11105. – 111051A.

39. Dubolazov A.V. Stokes-correlometric differentiation of polarization-heterogeneous images of biological tissues and some legal aspects of the use of early diagnosis of diseases / Dubolazov A.V., Getmantseva N.D., Getmantsev A.V., Ushenko Y.O., Gorsky M.P., Slyotov M.M., Zhytaryuk V.G., Penteleichuk N.P. // Proc. SPIE. – 2020. – 11369. – № 113691W.

40. Dubolazov A. Polarization-interference mapping of the distributions of the parameters of the Stokes vector of the object field of a biological optically anisotropic layer / Dubolazov A., Ushenko V., Litvinenko O., Bachinskiy V., Petrushak A., Karachevtsev A., Kovalchuk M.L. // Proc. SPIE. – 2020. – 11369. – № 113691N.

41. Dubolazov A.V. 3D polarization correlometry of object fields of networks of biological crystals / Ushenko A.G., Dubolazov A.V., Litvinenko O.Y., Bachinskiy V.T., Bin L., Bin G., Zhebo C. // Proc. SPIE. – 2020. – 11369. – № 113691M.

42. Dubolazov A.V. Spatial-frequency polarimetry in diagnostics of pathological changes in biological objects / A.V. Dubolazov, V.O. Ushenko, O.V. Olar, I.V. Soltys // Abstract of 3rd International Conference on Health Technology Management (ICHTM-2016), 6-7 October, 2016 Chisinau, Moldova. P.53.

43. Dubolazov A.V. Complex degree of mutual coherence of biological liquids / V. A. Ushenko, A. V. Dubolazov, A. G. Ushenko, O. V. Olar // Abstract of VIII International Conference for Professionals and Young Scientists LOW TEMPERATURE PHYSICS, 2017, Kharkiv, Ukraine. P.165.

44. Дуболазов О.В. ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ГОЛОГРАФІЧНА СИСТЕМА ЗД МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЇ ТОМОГРАФІЇ / Ушенко О.Г., Житарюк В.Г., Сідор М.І., Ванчуляк О.Я., Сльотов М.М., Махній В.П., Ушенко Ю.О., Дуболазов О.В.// Abstract of VIII International Conference on Optoelectronic Information Technologies PHOTONICS-ODS 2018, VNTU, Vinnytsia, Ukraine. С. 109.

45. Пат. 134221 Україна: МПК А61В 5/00, G01N 33/00. Спосіб 3D цифрової голографічної діагностики альбумінурії / Ушенко О.Г.; Ушенко Ю.О.; Ушенко В.О.; Дуболазов О.В.; Григоришин П.М.; Сахновський М.Ю.; Мотрич А.В.; заявник і патентовласник Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – № u2018 11638; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

46. Пат. 145300 Україна, МПК (2006) G01N 33/00, G01J 4/00, А61В 5/00. Спосіб поляризаційно-кореляційного картографування оптичної анізотропії гістологічних зрізів тканини мозку / Гараздюк М.С.; Бачинський В.Т.; Ванчуляк О.Я.; Ушенко О.Г.; Ушенко Ю.О.; Дуболазов О.В.; Томка Ю.Я.; Мотрич А.В.; заявник і патентовласник Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – № u2020 04520 25.11.2020, заявл. 20.07.2020; опубл. бюл. № 22.

47. Пат. 134217 Україна: МПК А61В 5/00, G01N 33/00 Спосіб поляризаційно - фазового відтворення розподілів двоприменезаломлення біологічних шарів / Ушенко О. Г. ; Ушенко Ю. О.; Ушенко В. О.; Дуболазов О.В.; Григоришин П.

М.; Сахновський М. Ю.; Мотрич А. В.; заявник і патентовласник Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – № u201811596; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

48. Пат. : 134215 Україна: МПК А61В 5/00, G01N 33/00. Спосіб кореляційної стокс-поляриметрії мікроскопічних зображень біологічних шарів / Ушенко О. Г.; Ушенко Ю. О. ; Ушенко В. О.; Дуболазов О. В.; Григоришин П. М.; Сахновський М. Ю.; Мотрич А. В.; заявник і патентовласник Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – № u2018 11592; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

49. Пат. 134214 Україна: МПК А61В 5/00, G01N 33/00, G01J 4/00. Спосіб 3D Мюллер-матричної діагностики і диференціації жовчнокам'яної хвороби на фоні некаменевого холециститу і цукрового діабету II типу / Ушенко О. Г.; Ушенко Ю. О.; Ушенко В. О.; Дуболазов О. В.; Григоришин П. М.; Сахновський М. Ю.; Мотрич А. В.; заявник і патентовласник Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича. – № u2018 11579; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

50. Пат. 134210 Україна: МПК А61В 5/00, G01N 33/00. № u2018 11575 Спосіб 3D цифрового голографічного відтворення розподілів двоприменезаломлення біологічних шарів / Ушенко О. Г.; Ушенко Ю. О.; Ушенко В. О.; Дуболазов О. В. ; Григоришин П. М.; Сахновський М. Ю.; Мотрич А. В.; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

51. Пат. 134199 Україна: МПК G01N 33/48, G01N 21/21. № u2018 11339 Спосіб масштабно-селективного поляризаційно – кореляційного картографування оптичної анізотропії полікристалічних плівок плазми крові / Ушенко О. Г.; Ушенко Ю. О.; Ушенко В. О.; Дуболазов О. В.; Сідор М. І.; Григоришин П. М.; Сахновський М. Ю.; Солтис І. В.; Бачинський В. Т.; Сивокоровська А.-В. С.; Підкамінь Л. Й.; заявл. 26.11.2018; опубл. 10.05.2019, бюл. № 9.

АНОТАЦІЯ

Дуболазов О.В. Багатофункціональна Стокс-корелометрія поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів оптично-анізотропних біологічних шарів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2021.

У дисертації узагальнено та обґрунтовано сукупність “одноточкових” і “двоточкових” поляризаційних і кореляційних параметрів полів лазерного випромінювання, перетвореного оптично-анізотропними біологічними шарами. На цій основі установлені величини та діапазони зміни набору об'єктивних параметрів, які характеризують випадкову (статистичні моменти 1-го – 4-го порядків), кореляційну (кореляційні моменти 2-го і 4-го порядків) та масштабно-самоподібну (дисперсія розподілу логарифмічних залежностей спектрів потужності) структуру мап 3-го і 4-го параметрів “двоточкового” вектора Стокса. Вперше апробовано Стокс-корелометричну методику в диференціації слабких змін оптичної

анізотропії полікристалічних плівок плазми крові здорових донорів і хворих на рак простати. Виявлено, що у випадку слабких змін оптичної анізотропії методи Стокс-корелометрії залишаються більш чутливими (на 10%-20%) у порівнянні із методами поляризаційного картографування. Вперше розроблено та експериментально апробовано поляризаційно-інтерференційну методику в диференціації слабких змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок синовіальної рідини колінного суглоба людини з різною післяопераційною патологією – реактивний та асептичний синовіт. Вперше визначено ефективність у диференціації слабких фазових змін масштабно-селективного вейвлет-аналізу мап локального контрасту інтерференційних розподілів мікроскопічних зображень полікристалічних плівок біологічних рідин і установлені взаємозв'язки між статистичними моментами 1-го – 4-го порядків, які характеризують лінійні залежності амплітуди вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах МНАТ функції та розподіли оптичної анізотропії мереж біохімічних кристалів плівок синовіальної рідини. Вперше розроблено і експериментально апробовано метод 3D Стокс-поляриметрії поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів плівок біологічних рідин з різною просторовою симетрією полікристалічних мереж на основі пошарового цифрового голографічного відтворення розподілів величини еліптичності поляризації з використанням опорної лазерної хвилі. На цій основі визначено взаємозв'язки між тенденціями зміни величини статистичних і кореляційних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують пошарові розподіли 3D мап еліптичності поляризації лазерного випромінювання, перетвореного дендритними і сферолітними мережами біохімічних кристалів плівок ліквору і жовчі. Вперше установлено ефективність методу 3D поляризаційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію та виявлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів еліптичності поляризації, також статистичні і кореляційні параметри, що їх характеризують. Вперше виявлено ефективність методу 3D поляризаційно-кореляційного картографування полікристалічних мереж у диференціації оптично-анізотропних плівок сечі здорових донорів і хворих на альбумінурію. Установлено найбільш чутливі до змін оптичної анізотропії полікристалічних плівок сечі фазові перерізи розподілів модуля і фази 4-го параметру “двоточкового” вектора Стокса, також статистичні параметри, що їх характеризують. На цій основі здійснено диференціацію оптичних проявів структури біохімічних кристалів здорових донорів і пацієнтів хворих на альбумінурію з хорошою $Ac(Z_{1,2}(|S_4|, ArgS_4)) = 88\% - 90\%$ точністю. Вперше реалізовано масштабно-селективну диференціацію велико- і дрібномасштабних складових координатних розподілів величини модуля і фази параметрів “двоточкового” вектора Стокса пошарових перерізах поля комплексних амплітуд полікристалічних плівок сечі. Точність розглянутого методу досягає дуже хорошого $Ac(Z_{2,3}(ArgS_4)) = 90\% - 92\%$ і відмінного рівнів $Ac(Z_{3,4}(|S_4|)) = 94\% - 96\%$.

Ключові слова: поляризація, інтерференція, голографія, ступінь взаємної кореляції вектора Стокса, локальний контраст, 3D Стокс корелометрія, "двоточкові" параметри вектора Стокса, просторово-частотна фільтрація, оптична анізотропія, матриця взаємної спектральної густини, гістологічні зрізи біологічних тканин, полікристалічні плівки біологічних рідин, статистичний аналіз, фрактальний аналіз, кореляційний аналіз, вейвлет аналіз, збалансована точність.

АННОТАЦІЯ

Дуболазов А.В. Многофункциональная Стокс-корелометрия поляризации-неоднородных объектных полей оптически анизотропных биологических слоев. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, 2021.

В диссертации обобщены и обоснованы совокупность "одноточечных" и "двухточечных" поляризационных и корреляционных параметров полей лазерного излучения, преобразованного оптически анизотропными биологическими слоями путем применения поляризационного "двухточечного"; поляризационно-интерференционного подходов и стокс-корелометрии с применением опорной волны. На этой основе установлены величины и диапазоны изменения набора объективных параметров, характеризующих случайную (статистические моменты 1-го - 4-го порядков), корреляционную (корреляционные моменты 2-го и 4-го порядков) и масштабнo-самоподобную (дисперсия распределения логарифмических зависимостей спектров мощности) структуру карт 3-го и 4-го параметров "двухточечного" вектора Стокса в плоскости поляризационно-неоднородных микроскопических изображений гистологических срезов биологических тканей со структурированными и паренхиматозными оптически анизотропными составляющими. Впервые методом Стокс-корелометричного картографирования выявлены и проанализированы физические процессы изменения оптической анизотропии (распределения направлений оптических осей и фазовая модуляция) образцов биологических структурированных (почка) и паренхиматозных (печень) тканей внутренних органов крысы, которые обусловлены системной патологией (диабет). Реализовано дифференциацию изменений оптической анизотропии с хорошей сбалансированной точностью (~ 90%), которая на 20% - 30% выше точности методов прямого поляризационного картографирования. Впервые апробирована методика Стокс-корелометрии в дифференциации слабых изменений оптической анизотропии поликристаллических пленок плазмы крови здоровых доноров и больных раком простаты. Выявлено, что в случае слабых изменений оптической анизотропии методы Стокс-корелометрии остаются более чувствительными (на 10% -20%) по сравнению с методами поляризационного картографирования. Впервые разработана и экспериментально апробирована поляризационно-интерференционная методика в дифференциации слабых изменений оптической анизотропии поликристаллических пленок синовиальной жидкости коленного сустава человека с разной по-

слеоперационной патологией - реактивный и асептический синовит. Установлены наиболее чувствительные параметры (статистические моменты 3-го и 4-го порядков, корреляционный момент 4-го порядка) к изменению структуры распределений величины локального контраста интерференционных картин в плоскости микроскопических изображений пленок синовиальной жидкости обоих типов и достигнуто удовлетворительной сбалансированной точности $A_c \sim 80\%$. Впервые определена эффективность в дифференциации слабых фазовых изменений масштабно-селективного вейвлет-анализа карт локального контраста интерференционных распределений микроскопических изображений поликристаллических пленок биологических жидкостей и установлены взаимосвязи между статистическими моментами 1-го - 4-го порядков, характеризующих линейные зависимости амплитуды вейвлет-коэффициентов на разных масштабах МНАТ функции и распределения оптической анизотропии сетей биохимических кристаллов пленок синовиальной жидкости. Впервые разработан и экспериментально апробирован метод 3D Стокс-поляриметрии поляризационно-неоднородных объектных полей пленок биологических жидкостей с разной пространственной симметрией поликристаллических сетей на основе послойного цифрового голографического воспроизведения распределений величины эллиптичности поляризации с использованием опорной лазерной волны. На этой основе определены взаимосвязи между тенденциями изменения величины статистических и корреляционных моментов 1-го - 4-го порядков, которые характеризуют послойные распределения 3D карт эллиптичности поляризации лазерного излучения, преобразованного дендритными и сферолитными сетями биохимических кристаллов пленок ликвора и желчи. Впервые установлено эффективность метода 3D поляризационного картографирования поликристаллических сетей в дифференциации оптически анизотропных пленок мочи здоровых доноров и больных на альбуминурию и выявлены наиболее чувствительны к изменениям оптической анизотропии поликристаллических пленок мочи фазовые сечения распределений эллиптичности поляризации, а также статистические и корреляционные параметры, которые их характеризуют. На этой основе осуществлено дифференциацию оптических проявлений структуры биохимических кристаллов здоровых доноров и пациентов с альбуминурию с хорошей точностью $A_c(Z_{3,4}(\varphi = 0,8)) = 82\% - 86\%$. Впервые разработан метод 3D Стокс-корелометрии объектных полей пленок биологических жидкостей на основе применения опорной лазерной волны и послойного цифрового голографического воспроизведения распределений комплексных амплитуд с последующим определением соответствующих карт модуля и фазы параметров "двухточечного" вектора Стокса. Впервые выявлена эффективность метода 3D поляризационно-корреляционного картографирования поликристаллических сетей в дифференциации оптически анизотропных пленок мочи здоровых доноров и больных альбуминурией. Установлены наиболее чувствительные к изменениям оптической анизотропии поликристаллических пленок мочи фазовые сечения распределений модуля и фазы 4-го параметра "двухточечного" вектора Стокса, а

также статистические параметры, которые их характеризуют. На этой основе осуществлено дифференциацию оптических проявлений структуры биохимических кристаллов здоровых доноров и пациентов с альбуминурией с хорошей $Ac(Z_{1,2}(|S_4|, ArgS_4)) = 88\% - 90\%$ точностью. Впервые реализовано масштабнo-селективную дифференциацию крупно и мелко масштабных составляющих координатных распределений величины модуля и фазы параметров "двухточечного" вектора Стокса в послойных сечениях поля комплексных амплитуд поликристаллических пленок мочи и установлены взаимосвязи между тенденциями изменения величины и диапазонов изменения статистических моментов 1-го - 4-го порядков, которые характеризуют Стокс-корелометричные карты и симметрией разномасштабных составляющих дендритных и сферолитных сетей биологических кристаллов. Точность рассматриваемого метода достигает очень хорошего $Ac(Z_{2,3}(ArgS_4)) = 90\% - 92\%$ и отличного $Ac(Z_{3,4}(|S_4|)) = 94\% - 96\%$ уровней.

Ключевые слова: поляризация, интерференция, голография, степень взаимной корреляции вектора Стокса, локальный контраст, 3D Стокс корелометрия, "двухточечные" параметры вектора Стокса, пространственно-частотная фильтрация, оптическая анизотропия, матрица взаимной спектральной плотности, гистологические срезы биологических тканей, поликристаллические пленки биологических жидкостей, статистический анализ, фрактальный анализ, корреляционный анализ, вейвлет анализ, сбалансированная точность.

SUMMARY

Dubolazov O.V. Multifunctional Stokes correlometry of polarization-inhomogeneous object fields of optically anisotropic biological layers. Manuscript.

Thesis for a doctoral scientific degree in Physics and Mathematics on speciality 01.04.05. – Optics, Laser Physics. – Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, - Chernivtsi, 2021.

The dissertation summarizes and substantiates a set of "one-point" and "two-point" polarization and correlation parameters of laser radiation fields converted by optically anisotropic biological layers by applying a polarization "two-point" and polarization-interference approaches and method of Stokes-correlometry using a reference wave. On this basis, the values and ranges of variation of the set of objective parameters characterizing the random (statistical moments of the 1st - 4th orders), correlation (correlation moments of the 2nd and 4th orders) and scale-selective (variance of the distribution of logarithmic dependences of spectra power) structure of maps of the 3rd and 4th parameters of the "two-point" Stokes vector in the plane of polarization-inhomogeneous microscopic images of histological sections of biological tissues with structured and parenchymal optically anisotropic components. For the first time, using Stokes-corelometric mapping, the physical processes of optical anisotropy changes (distribution of optical axes directions and phase modulation) of samples of biological structured (kidney) and parenchymal (liver) tissues of rat internal organs, which are caused by systemic pathology (diabetes),

were identified and analyzed. Differentiation of changes in optical anisotropy with a good balanced accuracy ($\sim 90\%$), which is 20% - 30% higher than the accuracy of direct polarization mapping methods, has been implemented. For the first time, the Stokes-correlation technique was tested in differentiating weak changes in the optical anisotropy of polycrystalline blood plasma films from healthy donors and patients with prostate cancer. It was revealed that in the case of weak changes in optical anisotropy, Stokes-correlation methods remain more sensitive (by 10% -20%) compared to polarization mapping methods. For the first time, a polarization-interference technique was developed and experimentally tested in differentiating weak changes in the optical anisotropy of polycrystalline films of the synovial fluid of the knee joint of a person with different postoperative pathologies - reactive and aseptic sinusitis. The most sensitive parameters (statistical moments of the 3rd and 4th orders, correlation moment of the 4th order) to a change in the structure of local contrast value distributions of interference patterns in the plane of microscopic images of synovial fluid films of both types and a satisfactory balanced accuracy $A_c \sim 80\%$ was achieved. For the first time, the efficiency in differentiation of weak phase changes of scale-selective wavelet analysis of local contrast maps of microscopic images interference distributions of biological fluids polycrystalline films has been determined and relationships have been established between statistical moments of the 1st - 4th orders that characterizing the linear dependences of the amplitude of wavelet coefficients at different scales of MHAT function and optical anisotropy distributions of biochemical crystal networks in synovial fluid films. The method of 3D Stokes polarimetry of polarization-inhomogeneous object fields of obiological fluids films with different spatial symmetry of polycrystalline networks was developed and experimentally tested for the first time on the basis of layer-by-layer digital holographic reproduction of the distributions of the polarization ellipticity using a reference laser wave. On this basis, the relationships between the tendencies of changes in the magnitude of the statistical and correlation moments of the 1st - 4th orders, which characterize the layer-by-layer distributions of 3D maps of the ellipticity of the polarization of laser radiation, transformed by dendritic and spherolithymal networks of biochemical crystals of the films of cerebrospinal fluid and bile were determined. On this basis, the differentiation of optical manifestations of the biochemical crystals structure of healthy donors and patients with albuminuria was carried out with good accuracy $A_c(Z_{3,4}(\varphi = 0,8)) = 82\% - 86\%$. The most sensitive phase sections to changes in the optical anisotropy of polycrystalline urine films of the distributions of the modulus and phase of the 4th parameter of the "two-point" Stokes vector, as well as the statistical parameters that characterize them, have been established. On this basis, the differentiation of optical manifestations of the structure of biochemical crystals of healthy donors and patients with albuminuria was carried out with good accuracy $A_c(Z_{1,2}(|S_4|, ArgS_4)) = 88\% - 90\%$. For the first time, a scale-selective differentiation of large and small-scale components of the coordinate distributions of the magnitude and phase of the parameters of the "two-point" Stokes vector in layer-by-layer sections of the field of complex amplitudes of polycrystalline urine films has been implemented,

orders, which characterize Stokes-corelometric maps and symmetry of different-scale components of dendritic and spherulite networks of biological crystals. The accuracy of the method in question reaches very good $Ac(Z_{2,3}(ArgS_4)) = 90\% - 92\%$ and excellent $Ac(Z_{3,4}(S_4)) = 94\% - 96\%$ levels.

Keywords: polarization, interference, holography, degree of mutual correlation of the Stokes vector, local contrast, 3D Stokes correlometry, “two-point” parameters of the Stokes vector, spatial-frequency filtering, optical anisotropy, cross-spectral density matrix, histological sections of biological tissues, polycrystalline films of biological fluids, statistical analysis, fractal analysis, correlation analysis, wavelet analysis, balanced accuracy.