

УДК 616.72–008.8:543.454::544.53–046.55(477)

## Методи лазерної поляриметрії у процесі дослідження синовіальної рідини

В.Л. Васюк<sup>1</sup>, Д.І. Кваснюк<sup>1</sup>, Ю.О. Ушенко<sup>2</sup>

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

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

*Possibilities of the use of laser polarimetry for studying the structure and physiological state of human tissues and fluids were assessed on the basis of existing scientific works and experimental researches. Principles of optic modelling of synovial fluid were examined.*

*Оценены возможности использования лазерной поляриметрии в изучении структуры и физиологического состояния тканей и жидкостей человека на основании научных трудов, результатов экспериментальных исследований. Рассмотрены принципы оптического моделирования синовиальной жидкости.*

**Ключові слова:** лазерна поляриметрія, синовіальна рідина, артрит, діагностика

### Вступ

Арсенал діагностичних засобів травм і захворювань суглобів містить низку фізичних методів дослідження: рентгенографія, комп'ютерна томографія, магнітно-резонансна томографія, ультразвукове дослідження тощо. Проте в процесі диференційної діагностики патології суглобів ці методи не дозволяють визначати структурні зміни синовіальної рідини на рівні макро- і мікромолекулярних структур. Пошуки вирішення проблеми діагностики патологічних змін синовіальної рідини призвели до спроб застосування лазерної поляриметрії, яка дозволяє досліджувати біологічні тканини (БТ) на субклітинному рівні, що дає можливість отримати низку нових параметрів оцінювання їх структури [23–26].

Фізичні основи лазерної поляриметрії полягають у тому, що лазерне випромінювання, як і звичайне світло, може поглинатися та розсіюватися біологічними тканинами. Кожний з цих процесів сприяє наповненню поля інформацією про мікро- і макроструктуру досліджуваного середовища та його складових.

Найбільш поширеними та апробованими на сьогодні є спектрофотометричні методи діагностики біологічних об'єктів, які базуються на аналізі просторових і часових змін інтенсивності поля, розсіяного випромінювання такими оптично-неоднорідними середовищами.

Інтенсивний розвиток векторного підходу до досліджень морфологічної структури та фізіологічного стану різноманітних біологічних тканин створив фундамент для розвитку модельних уявлень про оптико-анізотропну і самоподібну структуру будови БТ [23–26, 45–49].

Аналіз ієрархічної самоподібної будови типової сполучної тканини — сухожилка (тропоколаген, мікрофібрила, субфібрила, фібрила, фасція тощо) — встановив, що структурні ниткоподібні елементи є дискретними за своєю будовою та характеризуються масштабною повторюваністю в широкому діапазоні «оптичних розмірів» (1 мкм–10<sup>3</sup> мкм) [28–34]. Оптичні ж характеристики такої структури БТ різних типів загалом відповідають «замороженим» оптично-одноосним рідким кристалом [50].

Аналогічний підхід до опису морфологічної структури БТ було використано в джерелах, де БТ розглядається як двокомпонентна аморфно-кристалічна структура [51–56]. Аморфна компонента БТ (жири, ліпіди, неструктуровані білки) розглядається як поляризаційно-ізотропна (оптично-неактивна), а кристалічна компонента БТ — просторово зорієнтованими двопротенезаломлюючими протеїновими фібрилами (колагенові білки, міозин, еластин). Властивості кожної окремої фібрили моделюються оптично одноосним кристалом, напрямком осі якого збігається з напрямком

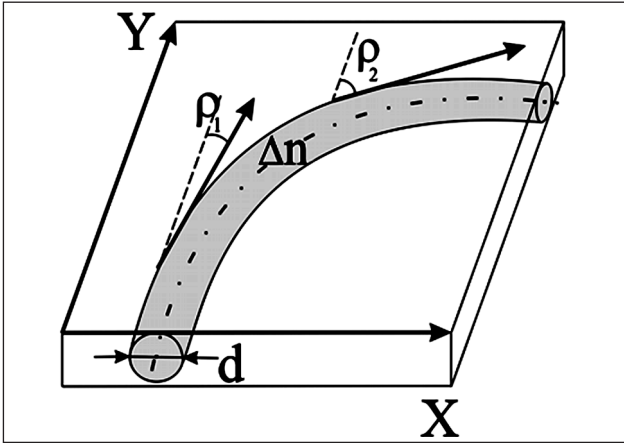


Рис. 1. Двопроменезаломлююча ( $\Delta n$ ) фібрила з діаметром перерізу  $d$ ;  $\rho_1$  — напрям укладання фібрил у площині зрізка БТ

укладання в площині БТ, а показник двоприменезаломлення визначається речовиною фібрили. Більш високим рівнем організації БТ є позаклітинна матриця, утворена різноорієнтованими двоприменезаломлюючими пучками [27].

У межах даної моделі вдалося пояснити механізми формування поляризаційної неоднорідності об'єктних полів БТ різних типів (кісткова та м'язова тканини, тканини репродуктивної сфери жінки — міометрій) [64–69]. Також знайдено, за умови одноразового розсіювання, взаємозв'язки між значеннями азимутів, еліптичностей поляризації світлових коливань об'єктного поля та напрямками (кутами) укладання фібрил, і параметрами, що характеризують двоприменезаломлення відповідних речовин [23, 35–37]. Це дозволило удосконалити метод поляризаційної візуалізації архітектонічної структури БТ різного морфологічного типу і використати статистичний аналіз координатних розподілів поляризаційних параметрів полів розсіяного випромінювання [4].

Досліджено взаємозв'язок між набором статистичних моментів 1–4 порядків, що характеризують мікрогеометрію поверхні та орієнтаційно-фазову будову двоприменезаломлюючої архітектоніки БТ людини, та сукупністю відповідних статистичних моментів координатних розподілів значень азимутів і еліптичностей поляризації (поляризаційних мап) зображень таких об'єктів. На підставі цього встановлено, що причиною зростання значень асиметрії та ексцесу розподілів величин азимутів та еліптичностей поляризаційних мап є ріст дисперсії кутів орієнтацій оптичних осей двоприменезаломлюючих фібрил біологічних тканин. Зменшення величин асиметрії та ексцесу відповідає росту дисперсії величин фазових зсувів, що вносяться біологічними кристалами архітектонічних сіток [70–73].

Загалом інтенсивне розвинення методик діагностичного використання когерентного лазерного випромінювання знайшло своє відображення в оптичній когерентній томографії, яка є найбільш зручним і розвиненим інструментом неінвазивного одержання низки пошарових зображень БТ [41–43].

Використання нового інформаційного джерела — поляризації лазерного пучка, за допомогою якої вдається проводити контрастування зображень досліджуваних БТ, стимулювало виокремлення нових напрямків оптичної когерентної томографії [73–75] і поляризаційно чутливої оптичної когерентної томографії [50, 61].

### Кристаллооптична модель позаклітинної матриці основних типів біологічних тканин

У межах модельних уявлень про оптико-геометричну структуру біологічної тканини (БТ) вважається, що вона складається із двох компонент: оптично ізотропної (аморфної) та анізотропної сітки (позаклітинної матриці) двоприменезаломлюючих оптично-одноосних фібрил [37, 48–53] (рис. 1).

Найбільш повно процеси перетворення лазерного випромінювання такими біологічними структурами показує оператор Джонса [43].

Взаємодію когерентного випромінювання з аморфною  $\{A\}$  та архітектонічною  $\{C\}$  складовими БТ характеризують такими операторами Джонса [62, 74–75]:

$$\{A\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(-\tau) & 0 \\ 0 & \exp(-\tau) \end{bmatrix};$$

$$\{C\} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos^2 \rho + \sin^2 \rho \exp(-i\delta) & \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)] \\ \cos \rho \sin \rho [1 - \exp(-i\delta)] & \sin^2 \rho + \cos^2 \rho \exp(-i\delta) \end{bmatrix};$$

де  $\tau$  — коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання шаром БТ з геометричною товщиною  $l$ ;  $\rho$  — напрям укладання анізотропних (показник двоприменезаломлення  $\Delta n$ ) фібрил у площині зрізка БТ, які вносять фазовий зсув  $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n l$  між ортогональними компонентами поляризації  $E_x$ ,  $E_y$  лазерного пучка з довжиною хвилі  $\lambda$ , що зондує зрізок БТ.

Проведений аналіз дозволив скласти уявлення про механізми формування поляризаційно-неоднорідної структури зображення БТ у кожній точці шляхом:

- «розкладання» амплітуди лазерної хвилі  $U$  на ортогональні лінійно поляризовані когерентні складові  $\begin{pmatrix} U_x(r) \\ U_y(r) \end{pmatrix}$ ;
- формування між компонентами  $\begin{pmatrix} U_x(r) \\ U_y(r) \end{pmatrix}$  за рахунок двоприменезаломлення фазового зсуву  $\delta(r)$ ;
- суперпозиції ортогонально орієнтованих компонент  $\begin{pmatrix} U_x(r) \\ U_y(r) \end{pmatrix}$ , яка супроводжується в загальному випадку виникненням еліптично поляризованої хвилі:

$$\frac{X^2}{U_x^2(r)} + \frac{Y^2}{U_y^2(r)} - \frac{2XY}{U_x(r)U_y(r)} \cos \delta(r) = \sin^2 \delta(r).$$

### Принципи оптичного моделювання синовіальної рідини

Синовіальна рідина є своєрідним індикатором життєдіяльності суглоба, утворюється і поповнюється за рахунок речовин, які надходять із плазми крові і секретуються покривним шаром суглобової мембрани, розглядається як граничний шар між синовіальною оболонкою, хрящем і субхондральною кісткою.

Синовіальна рідина одразу реагує на структурні зміни в тканинах суглобів, які притаманні тим чи іншим захворюванням опорно-рухової системи, тому зараз вже нема сумнівів у значущості аналізу синовіальної рідини у хворих на остеоартрит (ОА), ревматоїдний артрит (РА), подагричний (ПА) і септичний (СеА) артрити, анкілозивний спондилоартрит (АС) [5–10].

Фізичні показники клінічного аналізу синовіальної рідини подано в табл. 1 [14]. У деяких випадках колір синовії може бути світло- або молочножовтим, яскраво-лимонним, бурштиновим, слабкозеленим, білим, рожевим а також бурим [1–3, 6]. У нормі суглобовий ліквор прозорий, тоді як у разі АС набуває напівпрозорого вигляду, а в разі РА — помірно мутного. СеА супроводжується інтенсивно мутним відтінком синовіальної рідини зі слабким муциновим згустком, великою кількістю лейкоцитів, високим вмістом загального білка і молочної кислоти на фоні низьких показників глюкози [10, 15–17]. У доступній нам літературі не знайдено відомостей про зв'язок між поляриметричними характеристиками синовіальної рідини та її фізичними показниками (табл. 1) [14].

Важливе значення в разі захворювань опорно-рухової системи надається вивченню реологічних властивостей синовії. У нормі синовіальна рідина

дуже в'язка, і її показники на 20% перевищують значення показників крові, а в разі всіх захворювань суглобів в'язкість знижується, що пов'язано з деполімеризацією гіалуронової кислоти або утворенням низькомолекулярних гіалуронатів унаслідок порушення синтезу. У першу чергу, процеси деполімеризації спричиняє дія лізосомальних ферментів і перекисних радикалів. В'язкісні властивості також залежать від рН середовища та концентрації електролітів у ньому [14, 20–22].

Незалежно від нозологічної форми артриту в синовіальній рідині підвищується рівень загального білка. Показники окремих білків у суглобовій рідині хворих на остеоартроз, ревматоїдний артрит, анкілозивний спондиліт подано в табл. 2 [14].

З оптичної точки зору синовіальна рідина являє собою багатокомпонентну рідину, до складу якої входять три основні фракції (рис. 2) [34–40, 48–53]:

- 1) оптично ізотропна — оптично гомогенний комплекс гіалуронової кислоти з білками, великою кількістю лейкоцитів, високим вмістом загального білка і молочної кислоти на фоні низьких показників глюкози (І — рис. 2 а);
- 2) оптично анізотропна — рідкокристалічна фаза (А — рис. 2 а), що складається із сукупності рідких кристалів різних типів: фібринових ниток, колагенових волокон;
- 3) оптично анізотропна — твердокристалічна фаза відламків хряща і синовіальної оболонки. Можна спостерігати зернистий осад («рисові тільця»), який утворений із фрагментів насиченої фібрином некротичної суглобової мембрани.

Виходячи із запропонованої моделі структури синовіальної рідини можна припустити, що в процесі їх зондування лазерним випромінюванням одночасно будуть реалізовуватися такі механізми:

- 1) формування оптично-ізотропних складових зображення відповідає координатному розподілу ізотропних складових синовіальної рідини;

Таблиця 1. Фізичні показники синовіальної рідини людини

| Показник                          | Норма | Захворювання |         |        |         |          |
|-----------------------------------|-------|--------------|---------|--------|---------|----------|
|                                   |       | ОА           | РА      | АС     | ПА      | СеА      |
| Колір                             | сол.  | бурштиновий  | зелений | жовтий | зелений | червоний |
| Прозорість                        | +++   | ++           | - -     | -      | - -     | - - -    |
| рН                                | ~7,5  | ~7,3         | ~6,7    | ~7,0   | ~6,6    | ~6,9     |
| В'язкість, мП с                   | ~20   | ~12          | ~3      | ~7     | ~15     | ~10      |
| ВС, мН/м                          | ~50   | ~45          | ~35     | ~40    | ~35     | ~45      |
| ВР, с                             | ~300  | ~350         | ~500    | ~420   | ~450    | ~350     |
| ПН, мН/м                          | ~50   | ~45          | ~35     | ~30    | ~40     | ~30      |
| Муциновий згусток                 | +++   | +/-          | - - -   | ++     | ++      | -        |
| Лейкоцити, 10 <sup>9</sup> екз/мл | <2    | <10          | <25     | <8     | <20     | <100     |
| Загальний білок, г/л              | ~15   | ~30          | ~55     | ~35    | ~45     | ~55      |
| Відламки хряща                    | -     | +++          | -       | -      | -       | -        |
| Кристали                          | -     | +            | -       | -      | -       | -        |

Таблиця 2. Вміст білків і амінокислот у синовіальній рідині хворих на артрит

| Показник                 | Захворювання |         |         |
|--------------------------|--------------|---------|---------|
|                          | ОА           | РА      | АС      |
| Загальний білок, г/л     | 25÷35        | 50÷60   | 35÷45   |
| СРП, мг/л                | 2÷4          | 7÷9     | 9÷11    |
| IgG, г/л                 | 4÷6          | 16÷18   | 14÷16   |
| IgA, г/л                 | 0,9÷1,1      | 0,9:1,1 | 1,2÷1,4 |
| IgM, г/л                 | 0,4÷0,6      | 2÷4     | 0,9÷1,1 |
| Макроглобулін, г/л       | 3÷3,5        | 3,8÷4,3 | 4÷4,5   |
| Фібронектин, мкг/мл      | 1÷1,5        | 0,8÷1,3 | 0,9÷1,4 |
| Агрекан, мкг/мл          | 500÷600      | 550÷650 | 550÷650 |
| ОМПХ, од./л              | 600÷700      | 500÷600 | 400÷500 |
| Хондроїтинсульфати, мг/л | 15÷25        | 20÷30   | 10÷20   |
| Сіалові кислоти, ммоль/л | 250÷350      | 150÷250 | 100÷200 |
| Мікроглобулін, мг/л      | 1,5÷2,5      | 3,0÷4,0 | 2,5÷3,5 |
| Аргінін                  | 3÷4          | 5÷6     | 5÷6     |
| Глутамін                 | 0,7÷0,9      | 0,4÷0,6 | 0,5÷0,7 |
| Оксипролін               | 0,5÷0,7      | 0,4÷0,6 | 0,3÷0,5 |
| Пролін                   | 6÷7          | 4÷5     | 5÷6     |
| Тирозин                  | 5÷6          | 6÷7     | 5÷6     |

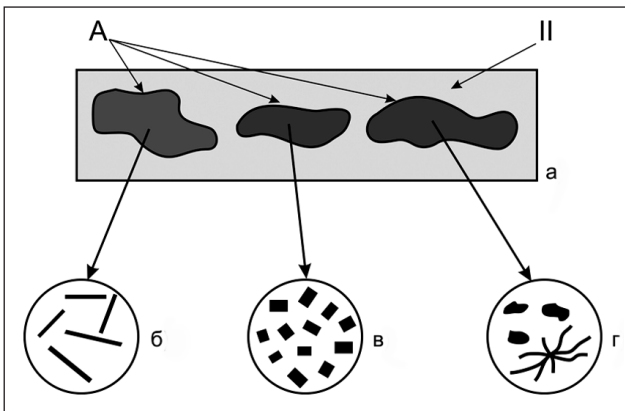


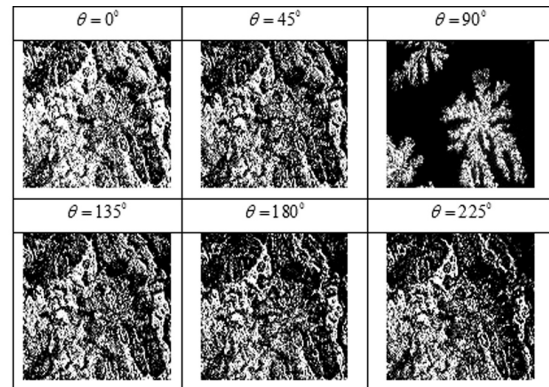
Рис. 2. Оптична модель синовіальної рідини як ізотропно (I) — анізотропно (A) рідини

2) формування поляризаційно неоднорідної складової зображення зумовлено впливами оптично анізотропних рідко- і твердокристалічних структурних елементів.

Поляризаційно підтвердити (розподілити) наявність таких складових лазерного зображення можна шляхом обертання ( $\theta$ ) площини пропускання аналізатора. У цьому сенсі зміна кута ( $\theta$ ) є ще одним діагностичним параметром [4]. Показано серію лазерних зображень шару синовіальної рідини, зареєстрованих для різних значень кута ( $\theta$ ) між площинами пропускання поляризатора і аналізатора (рис. 3) [4, 69–73].

Порівняльний аналіз сукупності поляризаційних лазерних зображень шарів синовіальної рідини людини виявив:

1) розподіл інтенсивності являє координатно неоднорідні структури, сформовані як оптико-ізотропними (I — рис. 2 а), так і оптико-анізотропними (рідкокристалічна фаза (A — рис. 2 а);

Рис. 3. Поляризаційні зображення шарів синовіальної рідини людини зареєстровано у співосних ( $\theta=0^\circ$ ) і перехрещених ( $\theta=90^\circ$ ) площинах пропускання поляризатора і аналізатора

2) реєстрація лазерних зображень у перехрещених ( $\theta=90^\circ$ ) площинах пропускання поляризатора та аналізатора дозволяє візуалізувати координатний розподіл її рідкокристалічної фази.

Таким чином, шляхом поляризаційної селекції лазерних зображень шарів синовіальної рідини людини різного фізіологічного стану можна дослідити головні оптичні прояви виникнення та перебігу основних типів захворювань суглобів, які пов'язані із трансформацією оптико-анізотропної структури синовіальної рідини.

## Висновки

Аналіз методів і засобів сучасної поляриметричної діагностики двоприменезаломлюючих мереж біологічних тканин виявив:

– найбільшу чутливість до зміни оптичних властивостей сіток біологічних кристалів здорових і патологічно змінених тканин статистичних моментів вищих порядків (асиметрія та ексцес),

- які характеризують розподіли поляризаційних, поляризаційно-кореляційних і сингулярних параметрів лазерних зображень біологічних тканин;
- самоподібну (фрактальну) структуру координатних розподілів азимутів і еліптичностей поляризації зображень здорових біологічних тканин;
- статистичну структуру координатних розподілів азимутів і еліптичностей поляризації зображень патологічно змінених біологічних тканин;
- перспективність та обґрунтованість застосування методів лазерної поляриметрії для дослідження синовіальної рідини в умовах різних патологічних станів і захворювань суглобів людини.

## Література

1. Бобков В. А. Показатели кислотно-основного состояния синовиальной жидкости у больных ревматоидным артритом в ранней стадии / В. А. Бобков, Т. Н. Браленкова, Р. С. Моисеенко // Тер. арх. — 2000. — Т. 72, № 12. — С. 35–38.
2. Гнилорыбов А. М. Нейропептиды и нейрогенные механизмы артрита / А. М. Гнилорыбов // Укр. ревматол. журн. — 2004. — Т. 16, № 2. — С. 8–15.
3. Гнилорыбов А. М. Роль олигомерного матричного протеина хряща в диагностике поражения суставов / А. М. Гнилорыбов, Т. П. Хрещачкова // Укр. ревматол. журн. — 2004. — Т. 17, № 3. — С. 8–11.
4. Денисенко В. Г. Измерение морфологических форм поляризационных сингулярностей и их статистических весов в оптических векторных полях / В. Г. Денисенко, Р. И. Егоров, М. С. Соскин // Письма в ЖЭТФ. — 2004. — Т. 80, № 1. — С. 21–24.
5. Егоров Р. И. Топологический отклик неоднородных эллиптически поляризованных световых полей на управляемые анизотропные возмущения / Р. И. Егоров, В. Г. Денисенко, М. С. Соскин // Письма в ЖЭТФ. — 2005. — Т. 81. — С. 464–467.
6. Залесский В. Н. Потенциальная роль микрочастиц клеток крови и синовиальной жидкости в патогенезе ревматических заболеваний / В. Н. Залесский, О. Б. Дынник // Укр. ревматол. журн. — 2006. — Т. 26, № 4. — С. 32–39.
7. Захарова М. М. Исследование синовиальной жидкости / М. М. Захарова // Ревматические болезни. — М.: Медицина, 1997. — С. 77–80.
8. Клубова Г. Ф. Ревматоидный артрит: стан системного та локального імунітету на фоні застосування глюкокортикостероїдів і базисної терапії / Г. Ф. Клубова // Укр. ревматол. журн. — 2003. — Т. 11, № 1. — С. 45–50.
9. Лазерна поляриметрична діагностика в біології та медицині / В. П. Пішак, О. Г. Ушенко, О. В. Ангельський, С. Б. Єрмоленко та ін.; під ред. В. П. Пішака та О. Г. Ушенка. — Чернівці: Медакадемія, 2000. — 305 с.
10. Лисенко І. В. Діагностична цінність оксипроліну й арахідонової кислоти як біологічних маркерів деградації хрящової тканини / І. В. Лисенко // Укр. ревматол. журн. — 2006. — Т. 24, № 2. — С. 40–44.
11. Лазерна поляризаційна морфологія біологічних тканин: статистичний і фрактальний підходи / О. Г. Ушенко, В. П. Пішак, О. В. Ангельський, Ю. О. Ушенко. — Чернівці: Колір-Друк, 2007. — 314 с.
12. Порівняльний аналіз крові та синовіальної рідини при різних стадіях остеоартрозу / М. О. Корж, Ф. С. Леонтьєва, О. П. Вікторов, І. В. Лисенко // Укр. ревматол. журн. — 2005. — Т. 21, № 3. — С. 45–47.
13. Рассеяние лазерного излучения мультифрактальными биоструктурами / О. В. Ангельский, А. Г. Ушенко, А. Д. Архелюк та ін. // Опт. и спектр. — 2000. — Т. 88, № 3. — С. 495–498.
14. Синяченко О. В. Современные аспекты анализа синовиальной жидкости / О. В. Синяченко // Укр. ревматол. журн. — 2008. — Т. 2, № 32. — С. 30–39.
15. Синяченко О. В. Исследование суставов / О. В. Синяченко, Г. А. Игнатенко. — Донецьк: Донеччина, 1998. — 216 с.
16. Тучин В. В. Исследование биотканей методами светорассеяния / В. В. Тучин // Успехи физ. наук. — 1997. — Т. 167. — С. 517–539.
17. Ушенко А. Г. Лазерная диагностика биофракталов / А. Г. Ушенко // Квантовая электроника. — 1999. — Т. 29, № 3. — С. 1–7.
18. Ушенко О. Г. Дослідження мікроструктури кісткової тканини у поляризованому лазерному світлі / О. Г. Ушенко, В. П. Пішак, О. В. Пішак // Медичні перспективи. — 2000. — Т. 5, № 4. — С. 3–7.
19. Ушенко О. Г. Дослідження динаміки патологічних змін дисперсії та контрасту когерентних зображень кісткової тканини / О. Г. Ушенко, О. В. Пішак, В. П. Пішак // Укр. мед. альманах. — 2000. — Т. 3, № 4. — С. 170–173.
20. Физико-химические свойства биологических жидкостей в ревматологии / В. Н. Казаков, О. В. Синяченко, Г. А. Игнатенко та ін. — Донецьк: Донеччина, 2003. — 279 с.
21. Шевчук С. В. Ефективність місцевого застосування метиленового синього та унітіолу в лікуванні хворих на ревматоїдний артрит із синовітом колінного суглоба / С. В. Шевчук // Укр. ревматол. журн. — 2002. — Т. 9, № 3. — С. 41–44.
22. Шишкин В. И. Зависимый от pH механизм трансформации энергии в клетках синовиальной жидкости при остеоартрозе колленного сустава и нормализующее влияние на него хондроитинсульфата / В. И. Шишкин, Г. В. Кудрявцева, А. Б. Рябков // Тер. арх. — 2005. — Т. 77, № 10. — С. 79–82.
23. Apostol A. First- and second-order statistics of optical near fields / A. Apostol, A. Dogariu // Opt. Lett. — 2004. — Vol. 29. — P. 235–237.
24. Angelsky O. V. Complex degree of mutual polarization of biological tissue coherent images for the diagnostics of their physiological state / O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, Y. G. Ushenko // J Biomed Opt. — 2005. — Vol. 10, № 6. — P. 65.
25. Angelsky O. V. Investigation of the correlation structure of biological tissue polarization images during the diagnostics of their oncological changes / O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, Ye. G. Ushenko // Phys. Med. Biol. — 2005. — Vol. 50. — P. 4811–4822.
26. A Monte Carlo model of light propagation in tissue / S. A. Prael, M. Keijzer, S. L. Jacques, A. J. Welch // Proceedings of Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology. — 1989. — Vol. 5. — P. 102–111.
27. Baleine E. Variable-coherence tomography for inverse scattering problems / E. Baleine, A. Dogariu // J. Opt. Soc. Am. A. — 2004. — Vol. 21, № 10. — P. 1917–1923.
28. Berry M. V. Umbilic points on Gaussian random surfaces / M. V. Berry, J. H. Hannay // J. Phys. A: Math. Gen. — 1977. — Vol. 10. — P. 1809–1821.
29. Bejia I. Search for crystals in synovial fluid / I. Bejia, M. Touzi, N. Bergaoui // Tunis Med. — 2006. — Vol. 84, № 2. — P. 69–73.
30. Cheong W.-F. A Review of the Optical Properties of Biological Tissues / W.-F. Cheong, S. A. Prael, A. J. Welch // J. of Quant. Elec. — 1990. — Vol. 26. — P. 166–2185.
31. Claudia Mujat. Statistics of partially coherent beams: a numerical analysis / Mujat Claudia, Aristide Dogariu // J. Opt. Soc. Am. A. — 2004. — Vol. 21, № 6. — P. 1000–1003.
32. Chou C. T. Failure to identify salmonella bacteria DNA by polymerase chain reaction in peripheral blood and synovial fluid cells in chinese patients with rheumatoid arthritis and ankylosing spondylitis / C. T. Chou, C. Y. Tsai, A. P. Huo // J. Clin. Rheumatol. — 2004. — Vol. 10, № 5. — P. 285–286.
33. Cowin S. C. How is a tissue built? [Text] / S. C. Cowin // J. Biomed. Eng. — 2000. — Vol. 122. — P. 553–568.
34. Correlation between different components of synovial fluid and pathogenesis of rheumatic diseases / C. Ciurtin, V. M. Cojocaru, I. M. Miron et al. // Rom. J. Intern. Med. 2006. — Vol. 44, № 2. — P. 171–181.

35. Coutlakis P.J. Another look at synovial fluid leukocytosis and infection / P.J. Coutlakis, W.N. Roberts, C.M. Wise // *J. Clin. Rheumatol.* — 2002. — Vol. 8, № 2. — P. 67–71.
36. Dennis M.R. Polarization singularities in paraxial vector fields: morphology and statistics / M.R. Dennis // *Opt. Commun.* — 2002. — Vol. 213. — P. 201–221.
37. Ellis J. Complex degree of mutual polarization / J. Ellis, A. Dogariu // *Opt. Lett.* — 2004. — Vol. 29. — P. 536–538.
38. Fam H. Rheological properties of synovial fluids / H. Fam, J.T. Bryant, M. Kontopoulou // *Biorheology.* — 2007. — Vol. 44, № 2. — P. 59–74.
39. Fukui N. Cell biology of osteoarthritis: the chondrocyte's response to injury / N. Fukui, C. R. Purple, L. J. Sandell // *Curr. Rheumatol. Rep.* — 2001. — Vol. 3, № 6. — P. 496–505.
40. Free-radical oxidation and superoxide dismutase activity in synovial fluid of patients with temporomandibular disorders / H.X. Cai, J.M. Luo, X. Long et al. // *Orofac. Pain.* — 2006. — Vol. 20, № 1. — P. 53–58.
41. Freund Isaac Elliptic critical points in paraxialoptical fields / I. Freund, M.S. Soskin, A.I. Mokhun // *Optics Communications.* — 2002. — Vol. 207. — P. 223–253.
42. Gori F. Matrix treatment for partially polarized, partially coherent beams / F. Gori // *Opt. Lett.* — 1998. — Vol. 23. — P. 241–243.
43. Investigation of 2D Mueller matrix structure of biological tissues for pre-clinical diagnostics of their pathological states / O.V. Angelsky, Yu.Ya. Tomka, A.G. Ushenko et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 2005. — Vol. 38. — P. 4227–4235.
44. Increased chromogranin levels indicate sympathetic hyperactivity in patients with rheumatoid arthritis and systemic lupus erythematosus / S. Capellino, T. Lowin, P. Angele, W. Falk // *J. Rheumatol.* — 2008. — Vol. 35, № 1. — P. 91–99.
45. Interferometric measurement of the degree of polarization and control of the contrast of intensity fluctuations / J. Ellis, A. Dogariu, S. Ponomarenko, E. Wolf // *Opt. Lett.* — 2004. — Vol. 29. — P. 1536–1538.
46. Korotkova O. Spectral degree of coherence of a random three-dimensional electromagnetic field / O. Korotkova, E. Wolf // *J. Opt. Soc. Am. A.* — 2004. — Vol. 21, № 10. — P. 2382–2385.
47. Laser measurements of crystal optical properties of blood-formed elements / A.G. Ushenko, V.P. Pishak, S.B. Yermolenko et al. // *Proc. SPIE.* — 1997. — Vol. 3317. — P. 425–433.
48. Mueller-matrix reconstruction of biological tissue architectonics / Yu.A. Ushenko, G.V. Sorochan, Yu.Y. Tomka, O.Y. Wanchulyak // *Proc. SPIE.* — 2006. — Vol. 6254. — P. 62541.
49. Moon J. A. Image resolution by use of multiply scattered light / J.A. Moon, J. Reintjes // *Opt. Lett.* — 1994. — Vol. 19. — P. 521–523.
50. Mujat M. Polarimetric and spectral changes in random electromagnetic fields / M. Mujat, A. Dogariu // *Opt. Lett.* — 2003. — Vol. 28. — P. 2153–2155.
51. Mujat M. Correlation matrix of a completely polarized, statistically stationary electromagnetic field / M. Mujat, A. Dogariu, G.S. Agarwal // *Opt. Lett.* — 2004. — Vol. 29. — P. 1539–1541.
52. Nearfield Polarization Effects on Light Propagation in Random Media / M.R. Ostermeyer, D.V. Stephens, L. Wang, S.L. Jacques // *Trends in Optics and Photonics: Biomedical Optical Spectroscopy and Diagnostics.* — 1996. — Vol. 3. — P. 20–26.
53. Nye J.F. Dislocations in wave trains / J.F. Nye, M. Berry // *Proc. R. Soc. Lond.* — 1974. — Vol. A 336. — P. 165–190.
54. Polarization singularities from unfolding an optical vortex through a birefringent crystal / F. Flossmann, U.T. Schwarz, M. Maier, M.R. Dennis // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Vol. 95. — P. 253.
55. Polarizing-correlative processing of images of statistic objects in visualization and topology reconstruction of their phase heterogeneity / O.V. Angelsky, A.G. Ushenko, V.P. Pishak et al. // *Proc. SPIE.* — 1999. — Vol. 4016. — P. 419–424.
56. Polarization-correlation investigations of biotissue multifractal structures and their pathological changes diagnostics / O. Angelsky, D. Burkovets, V. Pishak et al. // *Laser Physics.* — 2000. — Vol. 10, № 5. — P. 1136–1142.
57. Polarization-based visualization of multifractal structures for the diagnostics of pathological changes in biological tissues / O.V. Angel'skiy, A.G. Ushenko, S.B. Ermolenko et al. // *Optics and Spectroscopy.* — 2000. — Vol. 89, № 5. — P. 799–804.
58. Polarization-correlation investigation of biotissue multifractal structure and diagnostics of its pathological change / O.V. Angelsky, V.P. Pishak, A.G. Ushenko et al. // *Proc. SPIE.* — 2001. — Vol. 4242. — P. 201–209.
59. Seteikin A. Yu. Monte Carlo Analysis of the Propagation of Laser Radiation in Multilayer Biomaterials / A.Yu. Seteikin // *Russian Physics J.* — 2005. — Vol. 48, № 3. — P. 53–57.
60. Soskin M. Topological networks of paraxial ellipse speckle-fields / M. Soskin, V. Denisenko, R. Egorov // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* — 2004. — Vol. 6. — P. 281–287.
61. Soskin M.S. Optical polarization singularities and elliptic stationary points / M.S. Soskin, V. Denisenko, I. Freund // *Opt. Lett.* — 2003. — Vol. 28. — P. 1475–1477.
62. Soskin M.S. Space-time topological dynamics of singularities and optical diabolos in developing generic light fields / M.S. Soskin, V.I. Vasil'ev // *Proc. SPIE.* — 2007. — Vol. 6729. — P. 672.
63. Soskin M.S. Singular elliptic light fields: genesis of topology and morphology / M.S. Soskin, V.G. Denisenko, R.I. Egorov // *Proc. SPIE.* — 2006. — Vol. 6254. — P. 625404.
64. Stokes parameters in the unfolding of an optical vortex through a birefringent crystal / F. Flossmann, U.T. Schwarz, M. Maier, M.R. Dennis // *Opt. Express.* — 2006. — Vol. 14. — P. 11402–11411.
65. Synovial fluid levels of anti-cyclic citrullinated peptide antibodies and IgA rheumatoid factor in rheumatoid arthritis, psoriatic arthritis, and osteoarthritis / D. Caspi, M. Anouk, I. Golan et al. // *Arthr. Rheum.* — 2006. — Vol. 55, № 1. — P. 53–56.
66. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography / J.F. de Boer, T.E. Milner, M.J.C. van Gemert, J.S. Nelson // *Opt. Lett.* — 1997. — Vol. 22. — P. 934–936.
67. Tervo J. Degree of coherence for electromagnetic fields / J. Tervo, T. Setälä, A. Friberg // *Opt. Express.* — 2003. — Vol. 11. — P. 1137–1143.
68. Ushenko A. G. Polarization structure of scattering laser fields / A.G. Ushenko // *Optical Engineering.* — 1995. — Vol. 34, №4. — P. 1088–1093.
69. Ushenko Ye. G. Complex Degree of Mutual Polarization of Biotissue's Speckle-Images / Ye.G. Ushenko // *Ukr. J. Phys. Opt.* — 2005. — Vol. 6, № 3. — P. 104–113.
70. Ushenko A.G. The Vector Structure of Laser Biospeckle Fields and Polarization Diagnostics of Collagen Skin Structures / A.G. Ushenko // *Laser Physics.* — 2000. — Vol. 10, № 5. — P. 1143–1149.
71. Ushenko Yu.A. Statistical structure of polarization-inhomogeneous images of biotissues with different morphological structures / Yu.A. Ushenko // *Ukr. J. Phys. Opt.* — 2005. — Vol. 6, № 2. — P. 63–70.
72. Ushenko Ye.G. Complex degree of mutual polarization for biological tissue coherent images / Ye.G. Ushenko, Yu.Y. Tomka // *Proc. SPIE.* — 2006. — Vol. 6254. — P. 62541.
73. Wolf E. Unified theory of coherence and polarization of random electromagnetic beams / E. Wolf // *Phys. Lett. A.* — 2003. — Vol. 312. — P. 263–267.
74. Wolf E. Significance and measurability of the phase of a spatially coherent optical field / E. Wolf // *Opt. Lett.* — 2003. — Vol. 28. — P. 5–6.
75. Wolf E. Correlation-induced changes in the degree of polarization, the degree of coherence, and the spectrum of random electromagnetic beams on propagation / E. Wolf // *Opt. Lett.* — 2003. — Vol. 28. — P. 1078–1080.