

ЛАЗЕРНА НЕФЕЛОМЕТРІЯ БІОТКАНИН

Д.І.Остафійчук, А.Б.Горкуненко*, Т.О.Плаксива, Н.А.Скринська

Вищий державний навчальний заклад України "Буковинський державний медичний університет", м.Чернівці
*ДВНЗ "Тернопільський державний медичний університет ім.І.Я. Горбачевського МОЗ України", м.Тернопіль

Клінічна та експериментальна патологія Т.17, №1 (63). С.127-131.

DOI:10.24061/1727-4338.XVII.1.63.2018.90

E-mail:
ostafichukdmytro@gmail.com

Резюме. У даній статті оглядово проаналізовано можливості використання методу лазерної нефелометрії (Мюллер-матричної поляризації) у діагностиці структури архітекtonіки біотканин, обґрунтовано використання поляризаційних методів дослідження в медицині, що дають нову інформацію про морфологічну й оптико-анізотропну структуру біотканин.

Ключові слова: лазери, діагностика, поляриметрия, нефелометрія, матриця Мюллера, біотканина.

Клиническая и экспериментальная патология Т.17, №1 (63). С.127-131.

ЛАЗЕРНАЯ НЕФЕЛОМЕТРИЯ БИОТКАНИ

Д.И.Остафийчук, А.Б.Горкуненко, Т.О.Плаксива, Н.А.Скринская

Резюме. В данной статье ознакомительно проанализировано возможности использования метода лазерной нефелометрии (Мюллера-матричной поляризации) в диагностике структуры архитектоники биоткани, обосновано использование поляризационных методов исследования в медицине, которые дают новую информацию о морфологической и оптически - анизотропной структуре биоткани.

Ключевые слова: лазеры, диагностика, поляриметрия, нефелометрия, матрица Мюллера, биоткань.

Clinical and experimental pathology. Vol.17, №1 (63). P.127-131.

LASER NEPHELOMETRY OF BIOTISSUE

D.I.Ostafiihuk, A.B. Horkunenko, T.O. Plaksivaya, N.A. Skrynskaya

Abstract. The possibility of using the laser nephelometry (Mueller-matrix polarization) method in the diagnostics of the biotissue architectonics structure is analyzed in this article. The use of polarization methods of research in medicine which provide new information on the morphological and optically anisotropic structure of the tissue is substantiated.

Key words: lasers, diagnostics, polarimetry, nephelometry, Mueller matrix, biotissue.

Вступ

За останній час у медичній діагностиці набули широкого застосування оптичні методи формування пошарових зображень біологічних тканин. Основою одержання такої інформації є метод оптичної когерентної томографії [1,2]. Основою методу є використання низькокогерентної інтерферометрії для отримання внутрішніх зображень (координатних розподілів інтенсивності) біотканин на заданій глибині [3,4].

Новим напрямком медичної діагностики стає поляризаційно чутлива оптична когерентна томографія, яка забезпечує високу просторову роздільну здатність інформації про стан поляризації відбитого випромінювання. Результатом використання даного методу є можливість створення поляризаційних мап зображень біооб'єкта на різних глибинах, розраховуючи відповідні матриці Мюллера (Мюллер-матричні зображення) для даного зразка [5,6].

Вимірювання Стокс-вектора світла, розсіяного на біотканині, розрахунок матриць Мюллера дає можливість отримати більш детальну інформацію про поляризаційні властивості біотканини [7].

На даний час інтенсивно розвиваються засоби оп-

тичної діагностики, які засновані на використанні монохроматичного когерентного лазерного випромінювання. Зумовлено це низкою причин:

- інформація, яка отримується в процесі досліджень, багатofакторна, що міститься в спектральних, поляризаційних, кореляційних і фотометричних характеристиках світлового поля, перетвореного біооб'єктом;
- висока чутливість і точність оптичних методик;
- оптична діагностика дистанційна і неруйнівна;
- біологічна тканина (дерма шкіри, м'язова тканина), як об'єкт дослідження, моделюється плоско паралельним шаром з однотипними оптичними властивостями, а їх поляризаційні властивості моделюються сукупністю фібрил, які утворюють архітектонічну сітку [8].

Основна частина

МЕТОДИ ОПТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ БІО-ОБ'ЄКТІВ

Всі методи діагностики можливо поділити на два напрямки: мікродіагностика (на рівні атомів, молекул) та макродіагностика (на рівні клітин, органів). Основою мікродіагностики є використання методів лінійної і нелінійної атомної і молекулярної лазерної спектроскопії.

Основою макродіагностики є методи пружного та квазіпружного розсіювання світла, інтерферометрія, дифрактометрія. Використання в макродіагностиці монохроматичного та когерентного лазерного випромінювання, забезпечує високоточні вимірювання положення, швидкості, переміщень і форми різноманітних компонентів біооб'єктів [9,10]. Застосування лазерів в медицині, які володіють малою кутовою розбіжністю, високою спектральною густиною, керованою поляризацією випромінювання, дозволило спростити вимірювання і підвищити їх надійність, розширити сферу застосування в гематології, імунології, вірусології.

Пружне розсіювання світла (лазерна нефелометрія) - один з ефективних методів макродіагностики. Даний метод застосовується для визначення ступеня деформованості еритроцитів при накладанні до них напруження зсуву, вмісту білків у сечі та крові, функції розподілу еритроцитів по розмірах [9,11,12,13].

Об'єктом оптичних досліджень є фазово неоднорідні шари, які можна поділити на поверхнево-розсіюючі органічного та неорганічного походження та об'ємно-розсіюючі. Для дослідження структури таких об'єктів використовують спектродиметричні, поляриметричні і кореляційні методи досліджень.

У результаті використання таких методів отримується інформація про фазово неоднорідні шари у вигляді спектральних розподілів інтенсивностей, поляризацій (азимутів та еліптичностей світлових коливань) та фаз їх об'єктних полів. Вимірюваними параметрами є сукупність статистичних амплітудно-фазових моментів об'єктного поля, автокореляційних функцій та спектрів потужностей [8]. Правда об'єктами таких досліджень є поверхнево розсіюючі шари, але переважно неорганічного походження.

Проте на даний час відома значна кількість праць з аналізу процесів світлорозсіювання фазово неоднорідними поверхнями біологічного походження (шорсткі поверхні шкіри, інших біологічних тканин). Основою таких напрямків досліджень є дослідження амплітудно-фазових статистичних моментів об'єктного поля та поляризаційних статистичних моментів, які характеризують розподіли азимутів і еліптичностей поляризації світлових коливань [14].

Поряд із статистичними підходами в оптичній діагностиці структури фазово неоднорідних шарів використовуються і методи фрактального аналізу (фрактальні поверхні мають властивості самоподібності та тонку структуру в малих масштабах) [15,16]. Самостійний інтерес являють дослідження фрактальних властивостей полів, розсіяних шорсткими поверхнями біологічних об'єктів [17,18]. Необхідно відмітити, що фрактали описують багато фізичних і природних явищ (росту, агрегації, кристалізації фазово неоднорідних речовин, які приводять до формування самоподібних структур). У якості таких об'єктів можуть бути об'ємно розсіюючі біологічні тканини [19].

Особливістю морфологічного формування біологічних тканин усіх типів є процеси необмеженого росту. У результаті росту утворюється структурована двокомпонентна структура, яка складається з побудованої

фібрилярної (ниткоподібної) позаклітинної матриці, що містить різного роду клітинні утворення. За вказаним принципом біотканини поділяють на групи: сполучна тканина (хрящі, сухожилля, шкіра, кров, лімфа); епітеліальна тканина (покриваючі клітини для легень, кишківника, кровоносних судин т.ін.), м'язова тканина (структурована система сукупності протеїнових пучків, створених оптично ізотропним актином і анізотропним міозином). Позаклітинна матриця всіх типів біотканин утворена ниткоподібними протеїновими ієрархічно побудованими фібрилами (колагени, міозин, еластин). Геометрична структура фібрил дискретна і самоподібна. Отже, морфологічна структура даних біооб'єктів, володіє самоподібною, а можливо і фрактальною геометрією (дослідження фрактальної структури сітки трабекул і остеонів, що формують кісткову тканину) [20,21,22].

Просторово-кутова геометрія архітектоніки біотканин різних типів подібна до оптично одноосних рідких кристалів. Такий підхід використовують для статистичного моделювання оптичних властивостей структурованих біологічних тканин.

Біотканину розглядають як модель аморфно-кристалічної матриці. Аморфна компонента біологічної тканини (жири, ліпіди, неструктуровані білки) поляризаційно ізотропна, тобто, оптично неактивна. Кристалічна компонента біотканини утворена просторово зорієнтованими двоприменезаломлюючими протеїновими фібрилами (колагенові білки, міозин). Властивості кожної окремої фібрили моделюються оптично-одноосним кристалом, напрямок осі якого збігається з напрямком укладання в площині біотканини, а показник двоприменезаломлення визначається її речовиною. Аналітичний опис процесів світлорозсіювання біотканин різних типів здійснюється на основі застосування матриці Мюллера для оптично одноосних структур [14,23-27].

У рамках такої моделі вдалося:

- пояснити механізми формування поляризаційної неоднорідності об'єктних полів біологічних тканин різних типів;
- встановлено зв'язки між величинами азимутів, еліптичностей поляризації світлових коливань об'єктного поля і напрямком укладання фібрил та їх анізотропією [28-32,];
- розроблено метод візуалізації архітектонічної структури біологічної тканини;
- впроваджено статистичний аналіз координатних розподілів поляризаційних параметрів полів розсіяного випромінювання;
- досліджено взаємозв'язок дисперсії азимутів і еліптичностей поляризації об'єктних полів фізіологічно нормальних і патологічно змінених біологічних тканин;
- запропоновано критерії статистичної поляризаційної диференціації фізіологічних станів структурованих біологічних тканин [33-36].

Отже, складено новий напрямок оптичної діагностики біотканини, в основі якої лежить лазерна поляриметрія розподілів азимутів та еліптичностей поляризації світлових коливань в граничному об'єктному полі або

зображенні біотканини [33-37]. Доповненням до даного напрямку є метод поляризаційної нефелометрії (з використанням матриці Мюллера, яка несе найбільш повну інформацію про поляризаційні властивості біологічних об'єктів).

Елементи матриці розсіювання світла (матриці Мюллера) залежить від довжини хвилі, кута розсіювання, геометричних і оптичних параметрів розсіювачів. Вимірювання кутових залежностей елементів матриці Мюллера для кристалика ока людини, які були проведені за допомогою лазерного поляризаційного нефелометра, показали суттєву відмінність для нормальних та катарактальних кристаликів і ці розбіжності зумовлені появою великих несферичних розсіювачів часток в середовищі каламутного кристалика за рахунок формування конгломератів високомолекулярних білків [38].

Дослідження склоподібного тіла показали, що ця біотканина, аморфної структури, не змінює поляризаційних характеристик світла, але деякі патології (невеликі внутрішні крововиливи) легко фіксуються за рахунок сильного розсіювання на еритроцитах, що призводить до змін елементів матриці розсіювання світла [39].

Висновки

Отже, у рамках оптико-кристалічної моделі побудови біологічної тканини [40] обґрунтована залежність кутових розподілів індикатрис елементів матриці Мюллера біотканини від оптичних параметрів їх архітектонічної сітки, встановлено взаємозв'язок між розподілами орієнтацій та величини двопронезаломлення речовини біотканини і відносними значеннями елементів матриці Мюллера [39,41,42,43]. На основі цього розроблений метод стоксполяриметричної диференціації виникнення паталогічних змін архітектоники структурованих біологічних тканин, одержана нова інформація про структуру біологічної тканини у вигляді фазових та орієнтаційних томограм їх архітектоники [44,45].

Список літератури

1. Tuchin VV. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. 2-е изд. Москва: Физматлит; 2010. 478 с.
2. Tuchin VV, editors. Handbook of Coherent-domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science. Vol. 1. 2nd ed. Springer; 2013.
3. Fercher AF. Optical coherence tomography. J Biomed Opt. 1996;1(2):157-73. doi: 10.1117/12.231361
4. Schmitt JM. Optical coherence tomography (OCT): a review. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1999;5(4):1205-15. doi: 10.1109/2944.796348
5. de Boer JF, Milner TE, van Gemert MJ, Nelson JS. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography. Opt Lett. 1997;22(12):934-6.
6. Jiao S, Yao G, Wang LV. Depth-resolved two-dimensional Stokes vectors of backscattered light and Mueller matrices of biological tissue measured with optical coherence tomography. Appl Opt. 2000;39(34):6318-24. doi: https://doi.org/10.1364/AO.39.006318
7. van de Hulst HC. Light scattering by small particles. 2th ed. New York: Dover Publications; 1981. 470 p.
8. Ушенко ОГ, Бачинський ВТ. Лазерна нефелометрія біологічних тканин: монографія. Чернівці: Пута; 2007. 300 с.
9. Приезжев АВ, Тучин ВВ, Шубочкин ЛП. Лазерная диагностика в биологии и медицине. Москва: Наука; 1989. 240 с.
10. Letokhov VS. Laser biology and medicine. Nature. 1985;316(6026):325-30. 11. Фреши РЯ. Культура животных. Клінічна та експериментальна патологія. 2018. Т.17, №1 (63)

клеток. Методы. Москва: Мир; 1989. 318 с.

12. Tuchin VV, editors. Cell and Biotissue Optics: Application in Laser Diagnostics and Therapy. Proc SPIE. 1994;2100.

13. Tertappen LW, de Grooth BG, Visscher K, van Kousterik FA, Greve J. Four-parameter white blood cell differential counting based on light scattering measurement. Cytometry. 1988;9(1):39-43. doi: 10.1002/cyto.990090107

14. Ушенко АГ. Лазерная диагностика биофракталов. Квантовая электроника. 1999;29(3):239-45.

15. Mandelbrot BB. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: WH Freeman; 1982. 468 p.

16. Sayles R, Thomas TR. Surface topography as a nonstationary random process. Nature. 1978;271:431-4. doi: 10.1038/271431a0

17. Зимняков ДА. Эволюция фрактальной размерности флуктуаций интенсивности в зоне дифракции Френеля. Оптика и спектроскопия. 1997;83(5):795-800.

18. Zimnyakov DA, Tuchin VV. Fractality of speckle intensity fluctuations. Appl Opt. 1996;35(22):3325-33.

19. Pietronero L, Tosati E, editors. Fractals in Physics. Amsterdam; 1996. 422 p.

20. Brown JH, West GB, editors. Scaling in biology (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity). 1st ed. Oxford University Press; 2000. 352 p.

21. Fernandez E, Jelinek HF. Use of fractal theory in neuroscience: methods, advantages and potential problems. Methods. 2001;24(4):309-21. doi: 10.1006/meth.2001.1201

22. Cowin SC. How is a tissue built? J Biomed Eng. 2000; 122(6):553-68.

23. Пішак ВП, Ушенко ОГ, редактори. Лазерна поляриметрична діагностика в біології та медицині. Чернівці: Медакадемія; 2000. 305 с.

24. Ушенко АГ, Ангельский ОВ, Архелюк АД, Ермоленко СБ, Бурковец ДН. Рассеяние лазерного излучения мультифрактальными биоструктурами. Оптика и спектроскопия. 2000;88(3):495-8.

25. Ушенко АГ. Поляризационная структура биоспектров и деполаризация лазерного излучения. Оптика и спектроскопия. 2000;88(4):651-4.

26. Gerrard A, Burch JM. Introduction to matrix methods in optics. New York: Dover Publications, Inc; 1975.

27. Ushenko AG. Stokes Correlometry of Biotissues. Laser Physics. 2000;10(6):1286.

28. Пішак ВП, Ушенко ОГ, Пішак ОВ. Дослідження мікроструктури кісткової тканини у поляризованому лазерному світлі. Медичні перспективи. 2000;5(4):3-7.

29. Пішак ВП, Ушенко ОГ, Пішак ОВ. Дослідження динаміки паталогічних змін дисперсії та контрасту когерентних зображень кісткової тканини. Український медичний альманах. 2000; 3(4):170-3.

30. Ushenko AG. Laser polarization microscopy of biofractals. Proc SPIE. 1998;3573:609-12.

31. Ushenko AG, Burkovets DM, Yermolenko SB, Arkheliyuk AD, Pishak VP, Pishak OV, et al. Laser polarimetry of the orientational structure of bone tissue osteons. Proc SPIE. 1999; 3904:557-61.

32. Ushenko AG, Burkovets DM, Yermolenko SB, Arkheliyuk AD, Ushenko YA, Pishak VP, et al. Polarized mikrostructure of laser radiation scattered by optically active biotissues. Proc SPIE. 1999;3904:542-8.

33. Ushenko AG. Laser polarimetry of polarization-phase statistical moments of the objects field of optically anisotropic scattering layers. Optics and Spectroscopy. 2001;91(2):313-6.

34. Angel'skiĭ OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Ushenko YuA. Polarization-correlation analysis of anisotropic structures in bone tissue for the diagnostics of pathological changes. Optics and Spectroscopy. 2001;90(3):458-62.

35. Ushenko AG. Laser probing of biological tissues and the polarization selection of their images. Optics and Spectroscopy. 2001;91(6):932-6.

36. Ushenko AG. Polarization contrast enhancement of images of biological tissues under the conditions of multiple scattering. Optics and Spectroscopy. 2001;91(6):937-40.

37. Yermolenko SB, Angelsky OV, Ushenko AG, Pishak VP, Pishak OV. Laser polarimetry tomography of biotissue pathological

changes. Proc SPIE. 2001;4425:117-23.

38. Tuchin VV, Maksimova II, Zimnyakov DA, Kon IL, Mavlyutov AH, Mishin AA. Light propagation in tissues with controlled optical properties. J Biomed Opt. 1997;2(4):401-17. doi: 10.1117/12.281502

39. Jyzwicki R, Patorski K, Angelsky OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Ushenko YA. Automatic polarimetric system for early medical diagnosis by biotissue testing. Optica Applicata. 2002;32(4):603-12.

40. Ангельский ОВ, Ушенко АГ, Архелюк АД, Ермоленко СБ, Бурковец ДН. О структуре матриц преобразования лазерного излучения биофракталами. Квантовая электроника. 1999; 29(3):235-8.

41. Ushenko AG. Polarization introscopy of phase-inhomogeneous layers. Proc SPIE. 2002;4900:1323-6.

42. Angelsky OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Pishak VP, Pishak OV. Laser polarimetry of pathological changes in biotissues. Proc SPIE. 2002;4900:1045-9.

43. Ushenko AG, Pishak VP, Pishak OV, Olar OI, Yermolenko SB, Prydij AG, et al. Mueller matrices mapping of biological tissue architectonics. Proc SPIE. 2004;5477:422-9.

44. Ushenko AG. 2D phase tomography of biotissues: I. Topological structure value of birefringence. Proc SPIE. 2004; 5477:438-9.

45. Ushenko AG. 2D phase tomography of biotissues: II. Polarization visualization and selection of biotissue image two-layer scattering medium. Proc SPIE. 2004;5477:450-6.

References

1. Tuchin VV. Lazery i volokonnaja optika v biomedicinskih issledovaniyah [Lasers and fiber optics in biomedical research]. 2-e izd. Moskov: Fizmatlit; 2010. 478 s. (in Russian).

2. Tuchin VV, editors. Handbook of Coherent-domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science. Vol. 1. 2nd ed. Springer; 2013.

3. Fercher AF. Optical coherence tomography. J Biomed Opt. 1996;1(2):157-73. doi: 10.1117/12.231361

4. Schmitt JM. Optical coherence tomography (OCT): a review. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 1999;5(4):1205-15. doi: 10.1109/2944.796348

5. de Boer JF, Milner TE, van Gemert MJ, Nelson JS. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography. Opt Lett. 1997;22(12):934-6.

6. Jiao S, Yao G, Wang LV. Depth-resolved two-dimensional Stokes vectors of backscattered light and Mueller matrices of biological tissue measured with optical coherence tomography. Appl Opt. 2000;39(34):6318-24. doi: https://doi.org/10.1364/AO.39.006318

7. van de Hulst HC. Light scattering by small particles. 2th ed. New York: Dover Publications; 1981. 470 p.

8. Ushenko OH, Bachyn'skyi VT. Lazerna nefelometriia biolohichnykh tkanyh [Laser nefelometry of biological tissues]: monohrafiia. Chernivtsi: Ruta; 2007. 300 s. (in Ukrainian).

9. Priezhev AV, Tuchin VV, Shubochkin LP. Lazernaja diagnostika v biologii i medicine [Laser diagnostics in biology and medicine]. Moskov: Nauka; 1989. 240 s. (in Russian).

10. Letokhov VS. Laser biology and medicine. Nature. 1985;316(6026):325-30. 11. Freshni PJa. Kul'tura zhyvotnyh kletok. Metody [Culture of animal cells. Methods]. Moskov: Mir; 1989. 318 s. (in Russian).

12. Tuchin VV, editors. Cell and Biotissue Optics: Application in Laser Diagnostics and Therapy. Proc SPIE. 1994;2100.

13. Tertappen LW, de Grooth BG, Visscher K, van Kouterik FA, Greve J. Four-parameter white blood cell differential counting based on light scattering measurement. Cytometry. 1988;9(1):39-43. doi: 10.1002/cyto.990090107

14. Ushenko AG. Lazernaja diagnostika biofraktalov [Laser diagnostics of biofractals]. Kvantovaja jelektronika. 1999; 29(3):239-45. (in Russian).

15. Mandelbrot BB. The Fractal Geometry of Nature. San Francisco: WH Freeman; 1982. 468 p.

16. Sayles R, Thomas TR. Surface topography as a nonstationary random process. Nature. 1978;271:431-4. doi: 10.1038/271431a0

17. Zimnjakov DA. Jevoljucija fraktal'noj razmernosti fluktuacij intenzivnosti v zone difrakcii Frenel'ja [Evolution of the fractal dimension of intensity fluctuations in the Fresnel diffraction zone]. Optika i spektroskopija. 1997;83(5):795-800. (in Russian).

18. Zimnyakov DA, Tuchin VV. Fractality of speckle intensity fluctuations. Appl Opt. 1996;35(22):3325-33.

19. Pietronero L, Tosati E, editors. Fractals in Physics. Amsterdam; 1996. 422 p.

20. Brown JH, West GB, editors. Scaling in biology (Santa Fe Institute Studies on the Sciences of Complexity). 1st ed. Oxford University Press; 2000. 352 p.

21. Fernandez E, Jelinek HF. Use of fractal theory in neuroscience: methods, advantages and potential problems. Methods. 2001;24(4):309-21. doi: 10.1006/meth.2001.1201

22. Cowin SC. How is a tissue built? J Biomed Eng. 2000; 122(6):553-68.

23. Pishak VP, Ushenko OH, redaktory. Lazerna poliarymetrychna diahnozyka v biologii ta medytsyni [Laser polarimetric diagnostics in biology and medicine]. Chernivtsi: Medakademiia; 2000. 305 s. (in Ukrainian).

24. Ushenko AG, Angel'skij OV, Arheliuk AD, Ermolenko SB, Burkovets DN. Rassejanie lazernogo izluchenija mul'tifraktal'nymi biostrukturami [Scattering of laser radiation by multifractal biostructures]. Optika i spektroskopija. 2000;88(3):495-8. (in Russian).

25. Ushenko AG. Poljarizacionnaja struktura biospeklov i depolarizacija lazernogo izluchenija [Polarization structure of biospectra and depolarization of laser radiation]. Optika i spektroskopija. 2000;88(4):651-4. (in Russian).

26. Gerrard A, Burch JM. Introduction to matrix methods in optics. New York; Dover Publications, Inc; 1975.

27. Ushenko AG. Stokes Correlometry of Biotissues. Laser Physics. 2000;10(6):1286.

28. Pishak VP, Ushenko OH, Pishak OV. Doslidzhennia mikrostruktury kistkovoji tkanyh u poliaryzovanomu lazernomu svitli [Investigation of bone tissue microstructure in polarized laser light]. Medychni perspektyvy. 2000;5(4):3-7. (in Ukrainian).

29. Pishak VP, Ushenko OH, Pishak OV. Doslidzhennia dynamiky patolohichnykh zmin dyspersii ta kontrastu koherentnykh zobrazhen' kistkovoji tkanyh [Research of dynamics of pathological changes of dispersion and contrast of coherent images of bone tissue]. Ukrain's'kyi medychnyi al'manakh. 2000;3(4):170-3. (in Ukrainian).

30. Ushenko AG. Laser polarization microscopy of biofractals. Proc SPIE. 1998;3573:609-12.

31. Ushenko AG, Burkovets DM, Yermolenko SB, Arkheliuk AD, Pishak VP, Pishak OV, et al. Laser polarimetry of the orientational structure of bone tissue osteons. Proc SPIE. 1999;3904:557-61.

32. Ushenko AG, Burkovets DM, Yermolenko SB, Arkheliuk AD, Ushenko YA, Pishak VP, et al. Polarized mikrostructure of laser radiation scattered by optically active biotissues. Proc SPIE. 1999;3904:542-8.

33. Ushenko AG. Laser polarimetry of polarization-phase statistical moments of the objects field of optically anisotropic scattering layers. Optics and Spectroscopy. 2001;91(2):313-6.

34. Angel'skij OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Ushenko YA. Polarization-correlation analysis of anisotropic structures in bone tissue for the diagnostics of pathological changes. Optics and Spectroscopy. 2001;90(3):458-62.

35. Ushenko AG. Laser probing of biological tissues and the polarization selection of their images. Optics and Spectroscopy. 2001;91(6):932-6.

36. Ushenko AG. Polarization contrast enhancement of images of biological tissues under the conditions of multiple scattering. Optics and Spectroscopy. 2001;91(6):937-40.

37. Yermolenko SB, Angelsky OV, Ushenko AG, Pishak VP, Pishak OV. Laser polarimetry tomography of biotissue pathological changes. Proc SPIE. 2001;4425:117-23.

38. Tuchin VV, Maksimova II, Zimnyakov DA, Kon IL, Mavlyutov AH, Mishin AA. Light propagation in tissues with controlled optical properties. J Biomed Opt. 1997;2(4):401-17. doi: 10.1117/12.281502

39. Jyzwicki R, Patorski K, Angelsky OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Ushenko YA. Automatic polarimetric system for Клінічна та експериментальна патологія. 2018. Т.17, №1 (63)

early medical diagnosis by biotissue testing. *Optica Applicata*. 2002;32(4):603-12.

40. Angel'skij OV, Ushenko AG, Arheljuk AD, Ermolenko SB, Burkovec DN. O strukture matric preobrazovanija lazernogo izluchenija biofraktalami [On the structure of matrices for the conversion of laser radiation by biofractals]. *Kvantovaja jelektronika*. 1999;29(3):235-8. (in Russian).

41. Ushenko AG. Polarization introscopy of phase-inhomogeneous layers. *Proc SPIE*. 2002;4900:1323-6.

42. Angelsky OV, Ushenko AG, Burkovets DN, Pishak VP,

Pishak OV. Laser polarimetry of pathological changes in biotissues. *Proc SPIE*. 2002;4900:1045-9.

43. Ushenko AG, Pishak VP, Pishak OV, Olar OI, Yermolenko SB, Prydij AG, et al. Mueller matrices mapping of biological tissue architectonics. *Proc SPIE*. 2004;5477:422-9.

44. Ushenko AG. 2D phase tomography of biotissues: I. Topological structure value of birefringence. *Proc SPIE*. 2004;5477:438-9.

45. Ushenko AG. 2D phase tomography of biotissues: II. Polarization visualization and selection of biotissue image two-layer scattering medium. *Proc SPIE*. 2004;5477:450-6.

Відомості про авторів:

Остафійчук Д.І. - асистент кафедри біологічної фізики та медичної інформатики ВДНЗ України "Буковинський державний медичний університет", м. Чернівці, Україна.

Горкуненко А.Б. - доцент кафедри медичної фізики, діагностичного та лікувального обладнання ДВНЗ "Тернопільський державний медичний університет ім.І.Я.Горбачевського МОЗ України", м.Тернопіль, Україна.

Плаксива Т.О. -, студентка медичного факультету №1 ВДНЗ України "Буковинський державний медичний університет", м. Чернівці, Україна.

Скринська Н.А. - студентка медичного факультету №1 ВДНЗ України "Буковинський державний медичний університет", м. Чернівці, Україна.

Сведения об авторах:

Остафийчук Д.И. - ассистент кафедры биологической физики и медицинской информатики ВГУЗ Украины "Буковинский государственный медицинский университет", г.Черновцы, Украина.

Горкуненко А.Б. - доцент кафедры медицинской физики, диагностического и лечебного оборудования ГБУЗ "Тернопольский государственный медицинский университет им.И.Я.Горбачевского МОЗ Украины", г.Тернополь, Украина.

Плаксивая Т.А. - студентка медицинского факультета №1 ВГУЗ Украины "Буковинский государственный медицинский университет", г. Черновцы, Украина.

Скринская Н.А. - студентка медицинского факультета №1 ВГУЗ Украины "Буковинский государственный медицинский университет", г.Черновцы, Украина.

Information about the authors:

Ostafyichuk D.I - assistant professor of the Department of Biological Physics and Medical Informatics VDNZ Ukraine "Bukovinian State Medical University", Chernivtsi, Ukraine.

Gorkunenko A.B - Associate Professor of the Department of Medical Physics, Diagnostic and Medical Equipment, State Institution of Higher Education "Ternopil State Medical University named after I.Ya.Gorbachevsky of the Ministry of Health of Ukraine", Ternopil, Ukraine.

Plaksiva T.O. - student of medical faculty №1 of the Department of Higher Education of Ukraine "Bukowina State Medical University", Chernivtsi, Ukraine.

Skrinskaya N.A. - student of medical faculty №1 of VDNZ Ukraine "Bukovinian State Medical University", Chernivtsi, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2018

Рецензент – проф. В. Бачинський

© Д.І.Остафійчук, А.Б.Горкуненко, Т.О.Плаксива, Н.А.Скринська, 2018