

**СТОКС ПОЛЯРИМЕТРИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ
ОРІЄНТАЦІЙНОЇ ПОБУДОВИ ГІСТОЛОГІЧНИХ ЗРІЗІВ
ОКОРУХОВИХ М'ЯЗІВ ПЛОДІВ ЛЮДИНИ**

Буковинський державний медичний університет (м. Чернівці)

***Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича**

(м. Чернівці)

Дослідження є фрагментом планової комплексної міжфакультетської НДР кафедр анатомії людини ім. М. Г. Туркевича (зав. – проф. Б. Г. Макар), Буковинського державного медичного університету «Закономірності перинатальної анатомії та ембріотопографії. Визначення статевих особливостей будови і топографоанатомічних взаємовідношень органів та структур в онтогенезі людини», № державної реєстрації 0110U003078.

Вступ. Враховуючи надзвичайну значимість проблеми зниження перинатальної захворюваності та смертності та неможливість її вирішення без поглибленого вивчення періодів ембріогенезу і раннього фетогенезу, які в більшості визначають подальший розвиток плода та новонародженого, доцільним є дослідження різних етапів внутрішньоутробного розвитку з використанням сучасних методів дослідження [2]. Важливо встановити морфологічні особливості розвитку і становлення топографоанатомічних взаємозв'язків структур очної ділянки у пренатальному онтогенезі людини як з метою вивчення фізіологічної норми, так і диференційної діагностики патологічних процесів [1]. Дослідивши особливості орієнтаційної побудови гістологічних зрізів параорбітальної клітковини [3], вважаємо за доцільне вивчити особливості орієнтаційної побудови гістологічних зрізів окорухових м'язів при їхньому стокс-поляриметричному картографуванні.

Мета дослідження. Вивчити особливості орієнтаційної побудови гістологічних зрізів окорухових м'язів у плодів 5–10 місяців внутрішньоутробного розвитку.

Об'єкт і методи дослідження. Для описання топографічної структури класичних мікроскопічних зображень зрізів окорухових м'язів плодів 5–10 місяців внутрішньоутробного розвитку ми використали поляризоване лазерне випромінювання з наступним обчисленням набору параметрів математичного вектора Стокса, який найбільш інформативно повно характеризує орієнтаційну та полікристалічну побудову біологічних препаратів [8-10]. Для об'єктивної характеристики координатних розподілів у площині біологічного препарату параметрів вектора Стокса обчислювалися за стандартною програмою MATLAB

набору параметрів вектора Стокса ми обрали координатний розподіл значень другого параметру вектора Стокса, який в точках мікроскопічного зображення біологічного препарату несе найбільш повну інформацію про орієнтаційну побудову його речовини. Значення $S_2 = \pm 1$ відповідають максимальному ступеню впорядкованості. Значення $S_2 = 0$ відповідають максимальному ступеню розупорядкованості фібрилярної структури. **Надалі параметр S_2 будемо називати "орієнтаційним параметром"** морфологічної побудови біологічного препарату. Вимірювання координатних розподілів (двовимірні масиви значень у площині зразків) параметрів вектора Стокса виконувалося в розташованні стандартного стокс-поляриметра [3-7].

Обчислення орієнтаційного параметру S_2 у межах кожного пікселя цифрової камери відбувалось за допомогою формули:

$$S_2 = I_{0^\circ} - I_{90^\circ}$$

Тут I_{0° – інтенсивності перетвореного об'єктом випромінювання, що пройшло крізь лінійний поляризатор з кутом повороту площини пропускання $\Theta = 0^\circ, 90^\circ$.

Як основний аналітичний інструмент для оцінювання розподілів орієнтаційного параметру $S_2(m \times n)$ використовувалися статистичні моменти першого (Z_1), другого (Z_2), третього (Z_3) і четвертого (Z_4) порядків, які обчислювалися за такими алгоритмами [4]

$$Z_1 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N q_j;$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (q^2)_j};$$

$$Z_3 = \frac{1}{Z_2^3} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (q^3)_j;$$

$$Z_4 = \frac{1}{Z_2^4} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (q^4)_j,$$

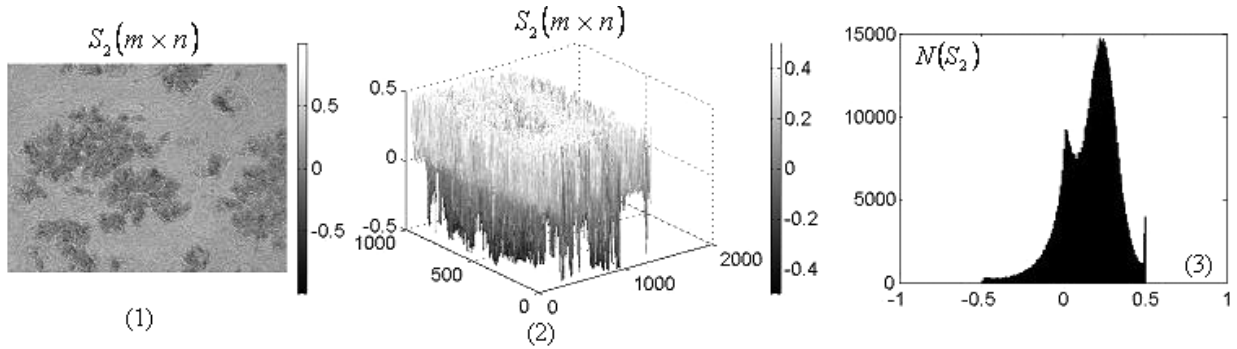


Рис. 1. Дво- (фрагменти (1)) та тривимірних (фрагменти (2)) розподілів і гістограм (фрагменти (3)) розподілів орієнтаційного параметру S_2 гістологічного зрізу окорухових м'язів (5 місяців). Пояснення в тексті.

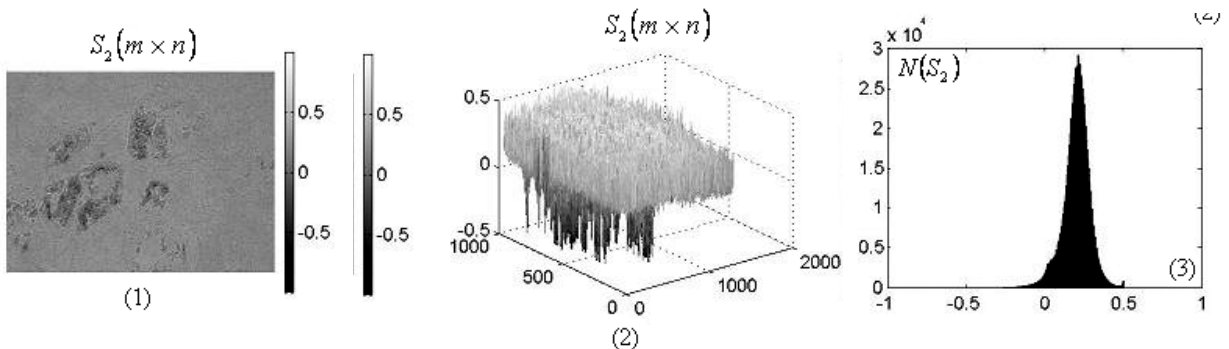


Рис. 2. Дво- (фрагменти (1)) та тривимірних (фрагменти (2)) розподілів і гістограм (фрагменти (3)) розподілів орієнтаційного параметру S_2 гістологічного зрізу окорухових м'язів (7 місяців). Пояснення в тексті.

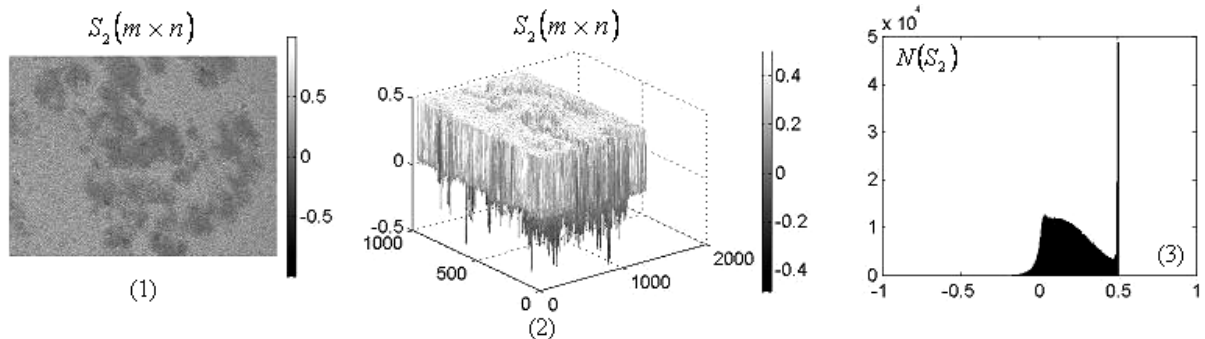


Рис. 3. Дво- (фрагменти (1)) та тривимірних (фрагменти (2)) розподілів і гістограм (фрагменти (3)) розподілів орієнтаційного параметру S_2 гістологічного зрізу окорухових м'язів (10 місяців). Пояснення в тексті.

де N – кількість елементів дискретизації, що визначається числом пікселів світлочутливої площадки CCD-камери.

Під статистичним моментом першого порядку будемо розуміти середнє значення випадкових величин координатних розподілів параметрів вектора Стокса.

Під дисперсією (статистичний момент другого порядку) випадкової величини будемо розуміти міру розкиду даної випадкової величини, тобто її відхилення від математичного очікування.

Асиметрією називають величину (статистичний момент третього порядку), яка характеризує відхилення від нормального розподілу випадкової величини.

Під ексцесом (статистичний момент четвертого порядку) будемо розуміти міру гостроти «піку» розподілу випадкової величини.

Всі дослідження проведені з дотриманням основних біоетичних положень Конвенції Ради Європи про права людини та біомедицину (від 04. 04. 1997 р.), Гельсінської декларації Всесвітньої медичної асоціації про етичні принципи проведення наукових медичних досліджень за участю людини (1964–2008 рр.), а також наказу МОЗ України №690 від 23. 09. 2009 р.

Результати досліджень та їх обговорення. На рис. 1 – рис. 3 наведено серію координатних дво- (фрагменти (1)) та тривимірних (фрагменти (2)) розподілів і гістограм (фрагменти (3)) розподілів

орієнтаційного параметру S_2 гістологічного зрізу окорухових м'язів.

У **табл.** наведені хронологічні залежності значень статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру S_2 , визначеного для серії гістологічних зрізів окорухових м'язів плодів різного періоду розвитку.

З оптичної точки зору такі об'єкти володіють яскраво окресленою впорядкованістю структури фібрилярної мережі та кристалічною побудовою. Аналіз експериментальних даних дослідження статистичної структури координатних розподілів набору орієнтаційних параметрів S_2 , які характеризують ступінь впорядкованості речовини гістологічних зрізів окорухових м'язів очної ямки на різних етапах розвитку плода виявив такі результати:

1) Діапазон зміни випадкових значень орієнтаційного параметру S_2 у межах площини гістологічного зрізу окорухових м'язів очної ямки перерозподіляється в бік більших значень $-0,2 < S_2 < 0,6$ (**рис. 1 – рис. 3**, фрагменти (1),(2)). Така тенденція вказує на високу ступінь орієнтаційної однорідності побудови фібрилярної мережі даної біологічної тканини. Це фізично впливає з того, що найбільш імовірними значеннями орієнтаційного параметру мікроскопічних зображень гістологічних зрізів окорухових м'язів є такі, що припадають на діапазон $S_2 \sim 0,3-0,5$, які об'єктивно відповідають високій ступені впорядкованості структури даної тканини.

2) Порівняльний (від 5 місяців до 10 місяців) моніторинг зміни структури мікроскопічних зображень набору гістологічних зрізів для різних часових етапів розвитку плода об'єктивно виявив послідовне формування орієнтаційної структурованості фібрилярної мережі окорухових м'язів очної ямки. Зазначену трансформацію морфологічної побудови ілюструє зростання ймовірності значень орієнтаційного параметру S_2 , які відмінні від нуля – $S_2 \neq 0$ у ділянці $S_2 \sim 0,5$ (**рис. 1 – рис. 3**, фрагменти (2)). Установлена тенденція може бути пов'язана із тим, що у процесі розвитку плода структура фібрилярної мережі м'язової тканини геометрично масштабується та впорядковується. За рахунок цього зростають значення орієнтаційного параметру ($S_2 \uparrow$), визначеного шляхом поляризаційної обробки низки мікроскопічних зображень гістологічних зрізів даного препарату. Найбільш виразно такий сценарій спостерігається на пізніх етапах розвитку плода – реалізується чітка тенденція до загального збільшення значень даного об'єктивного параметру.

3) Часову морфологічну еволюцію фібрилярної мережі окорухових м'язів кількісно ілюструють

гістограми розподілів випадкових значень орієнтаційного параметру S_2 , визначеного шляхом обробки у площині поляризаційно відфільтрованих мікроскопічних зображень гістологічних зрізів даного набору біологічних препаратів. Такі дані наведено на фрагментах (3) серії **рис. 1 – рис. 3**. Із порівняльного аналізу залежностей статистичних розподілів видно, що екстремуми гістограм $N(S_2)$ зразків гістологічних зрізів окорухових м'язів послідовно зазнають зсуву в ділянку більших значень S_2 . На ранніх етапах розвитку плода вони локалізовані в ділянці $S_2 = 0,15 - 0,25$ (**рис. 1, рис. 3**, фрагменти (3)). На пізніх стадіях зміщуються і набувають максимального рівня в ділянці $S_2 = 0,5$ (**рис. 3**, фрагмент (3)). Така трансформація вказує на послідовне зростання ступеня впорядкованості побудови фібрилярної мережі речовини окорухових м'язів. За рахунок вказаного морфологічного процесу екстремально зростають значення статистичних моментів вищих порядків – суттєво зростає асиметрія ($Z_3 \uparrow$) та гострота піку ($Z_4 \uparrow$) гістограм $N(S_2)$ (**рис. 1 – рис. 3**, фрагменти (3)) для координатного розподілу значень орієнтаційного параметру S_2 мікроскопічних зображень гістологічних зрізів даного об'єкту.

4) У межах статистичного підходу об'єктивного аналізу поляризаційно відфільтрованих мікроскопічних зображень гістологічних зрізів препаратів окорухових м'язів такі морфологічні зміни побудови фібрилярної мережі детектуються наступною трансформацією значень набору статистичних моментів 1-го – 4-го порядків (співвідношення (2)) – $Z_1 \uparrow, Z_2 \uparrow, Z_3 \uparrow, Z_4 \uparrow$, які характеризують гістограми $N(S_2)$, що наведені на фрагментах (2) **рис. 1 – рис. 3**.

Нами одержано наступні результати обчислення набору статистичних моментів 1-го-4-го порядків, що характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру $S_2(m \times n)$ поляризаційно відфільтрованих мікроскопічних зображень гістологічних зрізів окорухових м'язів очної ямки плодів різного періоду розвитку (**табл.**)

Таблиця

Статистичні $Z_{i=1;2;3;4}$ параметри, що характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру $S_2(m \times n)$ гістологічних зрізів окорухових м'язів плодів різного періоду розвитку

Параметри	5 місяців	6 місяців	7 місяців	8 місяців	9 місяців	10 місяців
Z_1	0,27	0,31	0,36	0,41	0,42	0,45
Z_2	0,18	0,22	0,24	0,27	0,28	0,31
Z_3	0,56	0,83	0,92	0,98	1,54	2,23
Z_4	0,24	0,43	0,54	0,61	1,27	1,84

Із аналізу одержаних даних про статистичні характеристики координатних розподілів орієнтаційного параметру S_2 поляризаційних мікроскопічних зображень гістологічних зрізів окорухових м'язів очної ямки плодів різного періоду розвитку (**табл.**) впливає висока чутливість набору об'єктивних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують ступень орієнтаційної впорядкованості побудови фібрилярної сітки даного об'єкту. Установлено наступні кількісні відмінності між значеннями набору статистичних моментів $\bar{Z}_i(q)$ (співвідношення (2)) для розглянутого періоду (5 місяців – 10 місяців) розвитку окорухових м'язів плода

$$\begin{cases} \Delta Z_1(S_2) = 1,67; \\ \Delta Z_2(S_2) = 1,82; \\ \Delta Z_3(S_3) = 3,98; \\ \Delta Z_4(S_4) = 7,67. \end{cases}$$

Як видно, структуризація фібрилярної мережі м'язової тканини та формування її орієнтаційної узгодженості взаємопов'язана із зростанням значень всіх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру S_2 набору поляризаційно відфільтрованих мікроскопічних зображень досліджених гістологічних зрізів даного біологічного препарату.

Найбільш чутливими до зміни ступеня орієнтаційної впорядкованості сітки фібрил окорухових м'язів очної ямки плодів різного періоду розвитку виявилися статистичні моменти 3-го – 4-го порядків, які характеризують динаміку зміни асиметрії та гостроти піку гістограм координатних розподілів орієнтаційного параметру серії мікроскопічних

зображень відповідних біологічних препаратів очної ямки. Нами виявлено значне ($\Delta Z_3(S_3) = 3,98$; $\Delta Z_4(S_4) = 7,67$) зростання значень таких параметрів на протязі дослідженого часового інтервалу розвитку тканин очної ямки.

Висновки. Вперше запропоновано метод стоку поляриметричного статистичного аналізу мікроскопічних зображень гістологічних зрізів окорухових м'язів очної ямки плодів різного періоду розвитку та застосовано об'єктивний статистичний аналіз (обчислення статистичних моментів 1-го – 4-го порядків) координатних розподілів параметрів вектора Стокса. Вперше запропоновано аналітичний параметр оцінювання морфологічної побудови набору біологічних препаратів очної ямки плода різного періоду розвитку – орієнтаційний параметр S_2 . Експериментально досліджено координатні розподіли орієнтаційного параметру S_2 окорухових м'язів очної ямки плодів різного періоду розвитку. Виявлено основні взаємозв'язки між змінами набору статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру та особливостями часової просторової структуризації речовини тканин окорухових м'язів плодів різного періоду розвитку – найбільш чутливими виявилися статистичні моменти 3-го і 4-го порядків з наступним діапазоном зміни власних значень

$$\begin{cases} \Delta Z_3(S_3) = 3,98; \\ \Delta Z_4(S_4) = 7,67. \end{cases}$$

Перспективи подальших досліджень. Доцільно дослідити гістологічні зрізи зорового нерва плодів 5–10 місяців внутрішньоутробного розвитку для встановлення їх орієнтаційної та кристалічної побудови.

Література

1. Олійник І. Ю. Обґрунтування лазерного поляриметричного дослідження біологічних тканин у пренатальному онтогенезі очноямкової ділянки людини / І. Ю. Олійник, О. В. Собко // Ключові питання наукових досліджень у сфері медицини XXI ст. : Міжнар. наук. -практ. конф. (Одеса, 1-2 березня 2013): матеріали конф. – Одеса : ГО «Південна фундація медицини», 2013. – С. 89–94.
2. Собко О. В. Про актуальність лазерного поляриметричного дослідження біологічних тканин структур очноямкової ділянки у пренатальному онтогенезі людини / О. В. Собко // Хист: Всеукр. мед. ж. мол. вчених. – Чернівці : Медуніверситет, 2013. – Вип. 15. – С. 210.
3. Собко О. В. Сток поляриметричне картографування орієнтаційної побудови гістологічних зрізів параорбітальної клітковини плодів людини / О. В. Собко, І. Ю. Олійник, О. Г. Ушенко // Вісник проблем біології і медицини. – 2014. – Вип. 3, том 3 (112). – С. 229–234.
4. Polarization visualization and selection of biotissue image two-layer scattering medium / O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, D. N. Burcovets, Yu. A. Ushenko // J. Biomed. Opt. – 2005. – Vol. 10, № 1. – P. 014010.
5. Polarization speckle-reconstruction of biological tissues architectonics: Part 1. Polarization correlometry of birefringence architectonics: singular approach / A. O. Angelskaya, Yu. A. Ushenko, A. G. Ushenko [et al.] // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6635. – P. 66350KP.
6. Polarization phase reconstruction of biological tissue architectonics: Part 3. Polarizing-correlative processing of images of statistical objects in the problem of visualization and topology reconstruction of their phase heterogeneity / A. O. Angelskaya, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko [et al.] // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6635. – P. 66350MP.
7. Polarization phase reconstruction of biological tissue architectonics: Part 4. Coherent introscopy of phase-inhomogeneous surface and layers / A. O. Angelskaya, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko [et al.] // Proc. SPIE. – May 08, 2007. – Vol. 6635. – P. 66350N.
8. Ushenko A. G. Polarization introscopy of phase-inhomogeneous layers / A. G. Ushenko // Proc. SPIE. – 2002. – Vol. 4900. – P. 1323–1326.
9. 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.
10. Ushenko A. G. Laser polarimetry of polarization-phase statistical moments of the objects field of optically anisotropic scattering layers / A. G. Ushenko // Опт. и спектр. – 2001. – Т. 91, № 2. – С. 313–317.

УДК 616-053. 15-018:[535. 361:535. 51]

СТОКС ПОЛЯРИМЕТРИЧНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ОРІЕНТАЦІЙНОЇ ПОБУДОВИ ГІСТОЛОГІЧНИХ ЗРІЗІВ ОКОРУХОВИХ М'ЯЗІВ ПЛОДІВ ЛЮДИНИ

Собко О. В., Олійник І. Ю., Ушенко О. Г.

Резюме. При дослідженні особливостей орієнтаційної побудови гістологічних зрізів окорухових м'язів плодів людини методом стокс поляриметричного картографування нами вперше запропоновано метод стокс-поляриметричного статистичного аналізу мікроскопічних зображень гістологічних зрізів окорухових м'язів плодів 5–10 місяців внутрішньоутробного розвитку. Встановлено основні взаємозв'язки між змінами набору статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують координатні розподіли орієнтаційного параметру та особливостями часової просторової структуризації речовини тканин очної ямки плодів різних періодів розвитку. Для гістологічних зрізів окорухових м'язів найбільш чутливими виявилися статистичні моменти 3-го – 4-го порядків.

Ключові слова: плід, окоруховий м'яз, очна ямка, стокс поляриметр, орієнтаційний параметр, вектор Стокса, статистичний момент.

УДК 616-053. 15-018:[535. 361:535. 51]

СТОКС-ПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННОГО СТРОЕНИЯ ГИСТОЛОГИЧЕСКИХ СРЕЗОВ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ ПЛОДОВ ЧЕЛОВЕКА

Собко О. В., Олийнык И. Ю., Ушенко А. Г.

Резюме. При исследовании особенностей ориентационного строения гистологических срезов глазодвигательных мышц плодов человека методом стокс поляриметрического картографирования нами впервые предложен метод стокс-поляриметрического статистического анализа микроскопических изображений гистологических срезов глазодвигательных мышц плодов 5–10 месяцев внутриутробного развития. Установлены основные взаимосвязи между изменениями набора статистических моментов 1-го – 4-го порядков, которые характеризуют координатные распределения ориентационного параметра и особенностями временной пространственной структуризации вещества тканей глазной ямки плодов разных периодов развития. Для гистологических срезов глазодвигательных мышц наиболее чувствительными являются статистические моменты 3-го – 4-го порядков.

Ключевые слова: плод, глазодвигательная мышца, глазная ямка, стокс поляриметр, ориентационный параметр, вектор Стокса, статистический момент.

UDC 616-053. 15-018:[535. 361:535. 51]

Stokes Polarimetric Mapping of Histological Sections Orientation Structure of Human Fetal Oculomotor Muscles

Sobko O. V., Oliinyk I. Yu., Ushenko A. G.

Abstract. Objective. It is impossible to solve the problem of perinatal morbidity and mortality without advanced study of embryogenesis and early fetogenesis periods. Having examined the features of orientation structure of paraorbital tissue histological sections [3], we consider it appropriate to study the features of orientation structure of histological sections in the oculomotor muscles of 5-10 months old human fetuses with their Stokes polarimetric mapping.

Material and methods of research. To describe the topographic structure of oculomotor muscles sections classical microscopic images in 5-10 months old fetuses, we used polarized laser radiation with the following calculation of mathematical Stokes vector parameters, which characterize orientation and polycrystalline structure of biologicals in the most informative and complete way. We chose the coordinate distribution of values of the Stokes vector second parameter (S_2), which, in the dots of biological preparation microscopic image, bears the most complete information about its substance orientation structure. We measured coordinate distributions (two-dimensional masses of values in the samples plane) of Stokes vector parameters in the location of a standard Stokes polarimeter.

Results. An analysis of the experimental findings from the study of statistic structure of orientation parameters coordinate distributions S_2 , which characterize the degree of organization of oculomotor muscles histological sections in the eye pit at different stages of the fetal growth found a range of changes in random values of orientation parameter S_2 within the plane of histological section in eye pit oculomotor muscles, which is redistributed to bigger values $-0,2 < S_2 < 0,6$. Comparative (from 5 to 10 months) monitoring of changes in the structure of histological sections microscopic images at different stages of the fetal growth objectively detected a consistent formation of the orientation structure of a fibrillar net of the eye pit oculomotor muscles. Time morphological evolution of the oculomotor muscles fibrillar net is illustrated quantitatively by the histograms of the random values distributions of the orientation parameter S_2 , which is determined by processing the histological sections of certain biologicals in the plane of filtered microscopic images by means of polarization. The structurization of muscular tissue fibrillar net and formation of its orientation coordination are interrelated with an increase of values of all statistical moments of the 1st – 4th orders.

Conclusions. We were the first to suggest the method of Stokes polarimetric statistical analysis of histological sections microscopic images of eye pit oculomotor muscles in the fetuses at different stages of their growth and

to use objectively statistical analysis (calculation of the 1st – 4th orders statistical moments) of coordinate distributions of the Stokes vector parameters. We have explored by means of experiments the coordinate distributions of the orientation parameter S_2 of the eye pit oculomotor muscles in fetuses at different stages of their growth. We have found the main interrelations between the changes in statistical moments of the 1st – 4th orders, characterizing coordinate distributions of the orientation parameter, and the features of time and space structure of the tissue substance in the fetal oculomotor muscles at different stages of growth – the statistical moments of the 3rd and 4th orders, having this range of values change

$$\begin{cases} \Delta Z_3(S_3) = 3,98; \\ \Delta Z_4(S_4) = 7,67. \end{cases} \text{ , proved to be the most sensitive}$$

Keywords: fetus, oculomotor muscle, eye pit, Stokes polarimeter, orientation parameter, Stokes vector, statistical moment.

Рецензент – проф. Єрошенко Г. А.

Стаття надійшла 10. 08. 2014 р.