

## РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ РОГІВКИ ОКА ПРИ ПАТОЛОГІЇ ЕКСТРАОКУЛЯРНИХ М'ЯЗІВ

Проф. М. Л. КОЧИНА<sup>1</sup>, проф. Ю. А. ДЬОМІН<sup>2</sup>, Н. М. КОВТУН<sup>2</sup>, І. В. КАПЛІН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна,

<sup>2</sup> Харківська медична академія післядипломної освіти, Україна

Подано результати використання поляризованого світла для дослідження напружено-деформованого стану рогівки ока при патології екстраокулярних м'язів. Вивчення форми інтерференційних картин показало, що відхилення ока у горизонтальному напрямі у більшості випадків зумовлене зміщенням місця прикріплення верхнього прямого м'яза у бік внутрішнього прямого м'яза. При нормальному прикріпленні верхнього прямого м'яза до склери спостерігається дисбаланс дії горизонтальних м'язів.

*Ключові слова:* поляризоване світло, оптична анізотропія, рогівка, екстраокулярні м'язи, інтерференційна картина.

Уже багато років значний інтерес із точки зору розроблення нових методів діагностики очних захворювань викликають у фахівців поляризаційно-оптичні властивості тканин ока [1–10]. Такі дослідження дають можливість отримати нову діагностичну інформацію, оскільки усі тканини ока більшою чи меншою мірою оптично анізотропні [11, 12], що виявляється при їх взаємодії з поляризованим світлом.

Анізотропні властивості рогівки, склери та судинної оболонки ока зумовлені наявністю в їх структурі колагенових волокон. Колаген має регулярну структуру з упорядкованим розташуванням волокон, що зумовлює його оптичні властивості [10, 13–15].

Перше дослідження кришталіка у поляризованому світлі було виконане у 1815 р. Д. Брюстером [16], який не виявив у нього оптичної анізотропії та вважав його ізотропним. Результати подальших досліджень показали, що ізольований кришталік оптично анізотропний і його поляризаційно-оптичні властивості значно змінюються з розвитком катаракти [8, 9].

Із використанням методу поляризаційної офтальмоскопії було визначено наявність оптичної анізотропії та дихроїзму тканин очного дна. Дихроїзм – це властивість речовини по-різному поглинати світло з різними напрямками площини поляризації. Тканини очного дна демонструють властивість дихроїзму, яка залежить від напрямку площини поляризації, освітленості та виявляється зміною кольору окремих його ділянок при змінах площини поляризації [7]. Оскільки світло з різною довжиною хвиль поглинається речовиною неоднаково, кольорові відтінки дихроїчної тканини при повороті поляроїдного фільтру змінюються [9, 11, 12]. Під час дослідження у поляризованому світлі з обертанням схрещених поляроїдів картина

очного дна, що спостерігається, має різний вигляд: виникають його різні рефлекси, змінюється забарвлення та блиск елементів [17].

Поряд із дослідженнями оптичних властивостей кришталіка Д. Брюстер [16] вивчав рогівку живого ока у поляризованому світлі. У 1861 р. було проведено перше детальне вивчення ізольованої рогівки у схрещених поляроїдах та описано інтерференційну картину (ІК), що має вигляд темного хреста по її центру і кольорових кілець по периферії. ІК, що спостерігалася на рогівці живого ока, була схожа з картиною, яка виникає на одновісних кристалах у поляризованому світлі. Це дало змогу зробити припущення про подібність рогівки ока до зігнутої кристалічної пластинки, оптична вісь якої перпендикулярна її поверхні.

Пізніше ІК рогівки живого ока була описана Д. С. Согом (1941) [18]. Автор вважав, що ІК має вигляд темного хреста по центру та кольорових смуг по периферії рогівки. На основі вивчення усіх наявних літературних джерел автор не запропонував ніякої правдоподібної теорії, яка б пояснювала ефект, що спостерігався. Автор визначив, що темний хрест на рогівці обертався синхронно з обертами схрещених поляроїдів та зникав, якщо обертати один із поляроїдів, а інший залишати у вихідному стані. Аналогічні результати було отримано іншими дослідниками [10, 19].

А. Stanworth, E. J. Nayor [20] пов'язували форму ІК, що спостерігається на рогівці у поляризованому світлі, з розташуванням у ній анізотропних волокон колагену. Вони вважали, що зміни ІК мають відбуватися через зміну розташування волокон колагену у рогівці, а також при її деформації. На думку авторів, найбільш суттєвими чинниками, які викликають виникнення ІК на рогівці ока, є анізотропні властивості рогівки та падіння

під різним нахилом поляризованого світла на її анізотропні волокна.

Зовсім новий підхід до визначення причин виникнення оптичної анізотропії рогівки живого ока запропонував F. Zandman [21], який використав у своїх дослідженнях фізичні підходи теорії пружності. Він провів вивчення ІК, що спостерігаються на рогівці ока у поляризованому світлі, і вперше вказав на можливість використання їх для діагностики патології ока. Учений відзначив, що фотопружні властивості рогівки залежать від її стану й істотно змінюються при різних патологічних процесах. Основною метою F. Zandman було розроблення способу вимірювання внутрішньоочного тиску (ВОТ) без контакту датчиків із рогівкою. У його роботі було описано вигляд ІК, що спостерігається на рогівці здорового ока, визначено основні чинники, які формують цю картину. До них автор відніс механічну дію з боку екстраокулярних м'язів (ЕОМ) і ВОТ, що розтягують рогівку, а також в'язко-пружні властивості анізотропних волокон. На основі проведених досліджень F. Zandman стверджував, що усі здорові люди мають схожі за формою ІК, а у хворих вони істотно відрізняються, проте у чому конкретно полягають ці відмінності і яким чином можна використовувати ІК для діагностики, встановлено не було.

Значну увагу вивченню поляризаційно-оптичних властивостей рогівки ока було приділено М. О. Пеньковим та М. Л. Кочиною [2–6]. Їх дослідження підтверджували той факт, що на оптичну анізотропію рогівки впливає комплекс факторів, серед яких — її власна анізотропія, що зумовлена властивостями колагенових волокон та їх взаємним розташуванням в її речовині, геометричні параметри самої рогівки (товщина її в центральній зоні значно менше, ніж по периферії, тобто вона є оптичним клином), дія ЕОМ та ВОТ, що розтягують рогівку [2–6, 22]. Уперше було показано, що під впливом підвищеного ВОТ ІК змінюється, що може бути використано для діагностики. Було запропоновано методи визначення патології ЕОМ [2, 5, 23, 24] та ВОТ [4, 25] за ІК.

Дослідженням поляризаційно-оптичних властивостей рогівки ока при косоокості займалися також О. М. Водовозов та В. В. Ковилін [26], Т. О. Босенко [27], В. В. Волков та ін. [28]. Проте більшість дослідників запропонували якісні методи визначення патології ока та очорухового апарату, які базувалися на візуальному вивченні ІК, що спостерігаються на рогівці ока у поляризованому світлі. Для використання ІК у клінічній практиці у сучасних умовах потрібно було розробити кількісні критерії їх оцінювання, що дало б змогу автоматизувати процес діагностики патології ока.

Мета нашої роботи — кількісна оцінка параметрів ІК, що спостерігаються на рогівці ока у поляризованому світлі, при патології екстраокулярних м'язів.

Значну питому вагу у структурі захворювань органу зору дітей має патологія очорухового апа-

рату, що супроводжується косоокістю та порушеннями бінокулярного зору. Косоокість, окрім косметичного недоліка, досить важкого у психологічному відношенні, супроводжується серйозними розладами бінокулярних і монокулярних функцій дитини. За даними авторів [29], явну косоокість діагностують у 0,5–3,5% дітей, у структурі дитячої очної патології в Україні вона займає друге місце після аномалій рефракції, її питома вага становить 25,6% випадків. Визначення причини відхилення ока у кожному конкретному випадку має певні складнощі, оскільки однакові прояви косоокості можуть бути спричинені різним станом ЕОМ та всієї зорової системи. Використання поляризованого світла дає змогу отримати додаткову інформацію щодо структурно-функціонального стану ЕОМ та покращити діагностику їх порушень.

ІК, яка спостерігається на рогівці живого ока у поляризованому світлі, має вигляд фігури, східної з ромбом, кути якого у нормі розташовані на горизонтальному та вертикальному меридіанах ока. Сторони інтерференційного ромба утворені смугами різного кольору, які мають назву «ізохром» (смуги однакового кольору, що поєднують точки з рівними напруженнями). ІК перетинає темний хрест, сторони якого розташовані вздовж меридіанів. Така картина спостерігається за використання схрещених поляроїдів [3].

Попередні дослідження параметрів ІК показали, що найбільш інформативними з них для оцінювання стану ЕОМ є відрізки діагоналей інтерференційного ромба (ОК, ОН, ОР, ОР) та кути між ними ( $\angle KOP$ ,  $\angle PON$ ,  $\angle NOR$ ,  $\angle ROK$ ) (рис. 1) [30].

Для полегшення визначення параметрів ІК було розроблено метод їх параметризації та спеціалізоване програмне забезпечення, яке дає можливість в інтерактивному режимі на зображенні рогівки ока визначити координати характерних точок ізохром і рогівки, які допомагають досить точно описати ІК [31].

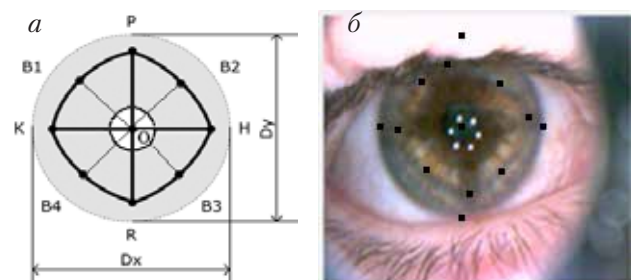


Рис. 1. Схема інтерференційної картини, що спостерігається на рогівці ока у поляризованому світлі (а).

$D_x$ ,  $D_y$  — горизонтальний та вертикальний діаметри рогівки ока; ОК, ОН, ОР, ОР — відрізки діагоналей інтерференційного ромба; ОВ1, ОВ2, ОВ3, ОВ4 — відрізки, що з'єднують центр рогівки та середини сторін інтерференційного ромба. Фотографія інтерференційної картини рогівки ока з розміткою для визначення її параметрів (б)

Дослідження параметрів ІК було проведено з використанням зображень рогики ока 147 хворих на косоокість. Усім пацієнтам із косоокістю після реєстрації ІК було виконано хірургічне втручання на ЕОМ та підтверджено причини відхилення очей. Це дало змогу провести зіставлення результатів, отриманих шляхом дослідження параметрів ІК, та реальних причин косоокості. В обстеженій групі у всіх хворих спостерігалася збіжна косоокість, у 32 — ще й вертикальний компонент.

Усі визначені параметри ІК було піддано нечіткій кластеризації за алгоритмом *c*-середніх. У попередніх дослідженнях [30] нами було встановлено, що найкраще ІК поділяються на кластери за кутами КОР і РОН. За результатами кластеризації було побудовано «портрети» кластерів (рис. 2, а). На другому етапі кожний із виділених кластерів було поділено за алгоритмом нечітких *c*-середніх на дві групи за відрізками горизонтальної діагоналі інтерференційного ромба ОК і ОН (рис. 2, б).

Форма ІК першого кластера (рис. 2, а) свідчить про те, що горизонтальне відхилення очей хворих, віднесених до нього, зумовлено змішанням місця прикріплення верхнього прямого м'яза (точка Р) від відповідного меридіана у бік внутрішнього прямого м'яза (точка К). Як показали клінічні спостереження, при такому розташуванні м'язів спостерігається збіжна косоокість [2, 5, 27, 30]. Форма ІК, побудованої для другого кластера, подібна до нормальної (рис. 1), проте для кластеризації було відібрано показники дітей із горизонтальною косоокістю. У цьому випадку можна припускати наявність чисто функціональних порушень ЕОМ (посилення сили дії внутрішнього прямого м'яза на тлі ослаблення зовнішнього).

У результаті другого етапу кластеризації кожен кластер було поділено на дві групи (рис. 2, б) за значеннями відрізків горизонтальної діагоналі (ОК і ОН). У першому кластері в обох отриманих групах визначається зміщення кута інтерференційного ромба, що відповідає місцю прикріплення верхнього прямого м'яза до склери, у бік внутрішнього прямого м'яза. Це вказує на те, що причиною відхи-

лення ока не є дисбаланс дії ЕОМ, а виникнення обертового моменту, пов'язаного з дислокацією верхнього прямого м'яза. Окрім того, у першій групі спостерігається значна різниця у довжинах відрізків горизонтальної діагоналі, що може вказувати на гіперфункції внутрішнього прямого м'яза. У другій групі цього кластера причиною відхилення ока є тільки дислокація верхнього прямого м'яза від вертикального меридіана, оскільки довжини відрізків діагоналі відрізняються незначно.

Другий кластер (рис. 2, а), на відміну від першого, сформований ІК, на яких кути між діагоналями ромба прямі, що вказує на відсутність істотних дислокацій окорухових м'язів від ліній їх дії. Третю групу утворили симетричні ІК. Така форма картин свідчить про прикріплення ЕОМ у ділянці відповідних меридіанів. Горизонтальне відхилення очного яблука від ортофоричного положення у цьому випадку може бути пов'язане з суто функціональними порушеннями. У четвертій групі наявна більш виражена асиметрія відрізків горизонтальної діагоналі.

Така форма ІК є характерною для горизонтальної косоокості, зумовленої дисбалансом дії горизонтальних прямих м'язів. Зазвичай у таких випадках проводять рецесію внутрішнього прямого м'яза, а за потреби ще резекцію зовнішнього, що дає змогу створити нормальний баланс дії ЕОМ та досягти нормального положення очей хворого на косоокість. Таким чином, ІК очей, віднесених до другого кластера, належать пацієнтам із більш простими формами ураження ЕОМ, які зазвичай добре піддаються корекції. Перший кластер, утворений ІК пацієнтів, відхилення очей яких по горизонталі зумовлено аномаліями прикріплення верхньої прямого м'яза, з точки зору хірургічного лікування більш складний.

У кожному виділеному кластері було визначено середні значення інформативних показників, за якими проводилася двоетапна кластеризація (таблиця).

Одержані середні значення показників у кластерах і групах можуть бути використані при розробленні системи підтримки прийняття рішення щодо визначення причин косоокості та виявлення структурно-функціональних порушень ЕОМ.

Таким чином, проведене дослідження показало, що відхилення ока у горизонтальному напрямі у 56% випадків зумовлене зміщенням місця прикріплення верхнього прямого м'яза у бік внутрішнього прямого м'яза, з них у 36% спостережень визначено ще й дисбаланс дії горизонтальних м'язів, що підтверджується відповідними змінами форми ІК. При нормальному прикріпленні верхнього прямого м'яза до склери дисбаланс дії горизонтальних м'язів спостерігається у 67% випадків, в 33% — косоокість може мати інші причини.

Перспективою подальших досліджень є розроблення автоматизованої системи підтримки прийняття рішень лікарем щодо визначення патології екстраокулярних м'язів із використанням поляризованого світла.

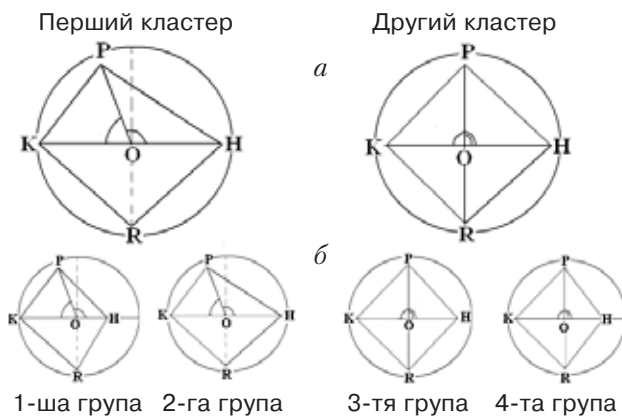


Рис. 2. «Портрети» інтерференційних картин кластерів та груп

## Середні значення показників інтерференційних картин у різних кластерах, %

Кластер	Кути		Група	Відрізки діагоналі	
	KOP <sup>0</sup>	POH <sup>0</sup>		OK	OH
1 n = 82 (56±4,1)	78±2,0	102±1,5	1 n = 30 (36±5,3)	0,46±0,02	0,41±0,01
			2 n = 52 (64±5,3)	0,4±0,02	0,4±0,01
2 n = 65 (44±4,1)	89±1,0	91±2,0	1 n = 21 (33±5,8)	0,44±0,01	0,43±0,02
			2 n = 44 (67±5,8)	0,42±0,02	0,36±0,01

Примітка. n – кількість ІК у кластері.

## Список літератури

1. Кокер Л. Оптический метод исследования напряжений / Л. Кокер, Н. Файлон.— М.: ОНТИ, 1936.— 120 с.
2. Пеньков М. А. Интерференционный метод в диагностике косоглазия / М. А. Пеньков, М. Л. Кочина // Офтальмологический журн.— 1979.— № 8.— С. 497–498.
3. Пеньков М. А. Применение поляризованного света в офтальмологии (обзор) / М. А. Пеньков, М. Л. Кочина // Офтальмологический журн.— 1981.— № 6.— С. 368–372.
4. Пеньков М. А. Способ диагностики патологии внутриглазного давления / М. А. Пеньков, М. Л. Кочина // Офтальмологический журн.— 1981.— № 8.— С. 476–479.
5. Пеньков М. А. Интерференционный метод в диагностике косоглазия / М. А. Пеньков, М. Л. Кочина // Вестн. офтальмологии.— 1981.— № 1.— С. 39–41.
6. Способ профилактики послеоперационного астигматизма / М. А., Пеньков М. Л. Кочина, А. В. Яворский, Д. М. Мирошник // Офтальмологический журн.— 1988.— № 4.— С. 230–233.
7. Русакович О. А. Исследование глазного дна при миопии в поляризованном свете / О. А. Русакович // Вестн. офтальмологии.— 1979.— № 4.— С. 38–41.
8. Чередниченко В. М. Применение поляризационной биомикроскопии для диагностики катаракты / В. М. Чередниченко, Н. М. Воронцова // Офтальмологический журн.— 1987.— № 1.— С. 19–21.
9. Шерклифф У. Поляризованный свет (получение и применение) / У. Шерклифф.— М.: Мир, 1965.— 264 с.
10. Bour L. J. On the birefringence of the living human eye / L. J. Bour, N. J. Lopez Cardozo // Vision Res.— 1981.— Vol. 21, № 9.— P. 1413–1421.
11. Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений / Л. Файлон.— М.-Л.: Гостехлитиздат, 1940.— 120 с.
12. Фрохт М. М. Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений / М. М. Фрохт.— М.-Л.: Гостехиздат, 1950.— 488 с.
13. Anderson K. Application of structural analysis to the mechanical behavior of the cornea / K. Anderson, A. El-Sheikh, T. Newson // J. R. Soc. Interface.— 2004.— Vol. 1.— P. 1–15.
14. Atasoy S. Wave Interference for Pattern Description. Proc. / S. Atasoy, D. Mateus, A. Georgiou // Asian Conference on Computer Vision (ACCV), Queenstown, New Zealand, 2010 Nov. 8–12.— Queenstown, 2010.— P. 124.
15. Komai Y. The three dimensional organization of collagen fibrils in the human cornea and sclera. Invest. / Y. Komai, T. Ushiki // Ophthalmol. Vis. Sci.— 1991.— Vol. 32, № 8.— P. 2244–2257.
16. Brewster D. Experiments on the depolarization of light as exhibited by various mineral, animal and vegetable bodies with a reference of the phenomena to the general principles of polarization / D. Brewster // Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.— 1815.— Vol. 1.— P. 21–53.
17. Миткох Д. И. Применение поляризованного света для изучения анатомии, физиологии и патологии глазного дна / Д. И. Миткох // Проблемы физиологической оптики.— М., 1969.— Т. XV.— С. 164–167.
18. Cogan D. C. Some ocular phenomena produced with polarized light / D. C. Cogan // Arch. Ophthalmol.— 1941.— Vol. 25, № 3.— P. 391–400.
19. Van Bloklend G. J. Corneal polarization in the living human eye explained with a biaxial model / G. J. Van Bloklend, S. C. Verhelst // Opt. Soc. Am. A.— 1987.— Vol. 4, № 1.— P. 82–90.
20. Stanworth A. Polarized light studies of the cornea I. The isolated cornea / A. Stanworth, E. J. Naylor // J. Exp. Biol.— 1953.— Vol. 30.— P. 160–163.
21. Zandman F. The photoelastic effect of the living eye / F. Zandman // Experim. Mechanics.— 1966.— Vol. 6, № 5.— P. 19–25.
22. Кочина М. Л. Некоторые результаты моделирования напряженного состояния роговой оболочки глаза / М. Л. Кочина // Кибернетика и вычислительная техника.— 1991.— Вып. 90.— С. 97–99.
23. Способ диагностики патологии глазодвигательных мышц: пат. 799716 СССР: МКИ2 А61F 9/00. № 2666874; заявл. 05.07.78; опубл. 30.01.81, Бюл. № 4.— 2 с.
24. Способ определения функционального состояния глазодвигательных мышц: патент 1762893 СССР: (я) з А61В 3/00, А61F 9/00. № 4182507; заявл. 16.01.87; опубл. 23.09.92, Бюл. № 35.— URL: <https://findpatent.ru/patent/176/1762893.html>



25. Спосіб виміру внутрішньоочного тиску: пат. 33640 Україна: МПК (2006), А61В 3/16, А61В 8/10. Заявл. 23.10.2007; опубл. 10.07.2008.— URL: <http://uapatents.com/2-33640-sposib-vimiru-vnutrishnoochnogo-tisku.html>
26. *Водовозов А. М.* Использование поляризационно-оптического метода для диагностики состояния глазодвигательных мышц при вертикальной девиации / А. М. Водовозов, В. В. Ковылин // Офтальмологический журн.— 1990.— № 4.— С. 201–204.
27. *Босенко Т. А.* Диагностика асимметрии наружных мышц глаза в поляризованном свете при косоглазии / Т. А. Босенко // Актуальные вопросы офтальмологии: сб. науч. тр.— Харьков, 1987.— С. 33–35.
28. *Волков В. В.* Современное состояние и перспективы применения метода фотоупругости / В. В. Волков, В. К. Малышев, А. И. Журавлев // Офтальмологический журн.— 1990.— № 8.— С. 479–482.
29. *Вітовська О. П.* Структура та частота хвороб ока та придаткового апарату у дітей в Україні / О. П. Вітовська, О. М. Савіна // Медичні перспективи.— 2015.— Т. XX, № 3.— С. 133–138.
30. *Кочина М. Л.* Классификация поражений глазодвигательных мышц с использованием аппарата нечеткой логики / М. Л. Кочина, В. Г. Калиманов // Кибернетика и вычислительная техника.— 2011.— Вып. 166.— С. 97–107.
31. *Каплін І. В.* Концепція телемедичної системи для експрес-оцінювання рівня внутрішньоочного тиску / І. В. Каплін, М. Л. Кочина, О. Г. Фірсов // Кибернетика и вычислительная техника.— 2018.— № 1 (191).— С. 76–94.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РОГОВИЦЫ ГЛАЗА ПРИ ПАТОЛОГИИ ЭКСТРАОКУЛЯРНЫХ МЫШЦ

М. Л. КОЧИНА, Ю. А. ДЕМИН, Н. М. КОВТУН, И. В. КАПЛИН

Представлены результаты использования поляризованного света для исследования напряженно-деформированного состояния роговицы глаза при патологии экстраокулярных мышц. Изучение формы интерференционных картин показало, что отклонение глаза в горизонтальном направлении в большинстве случаев обусловлено смещением места прикрепления верхней прямой мышцы в сторону внутренней прямой мышцы. При нормальном прикреплении верхней прямой мышцы к склере наблюдается дисбаланс действия горизонтальных мышц.

*Ключевые слова:* поляризованный свет, оптическая анизотропия, роговица, экстраокулярные мышцы, интерференционная картина.

### RESULTS OF POLARIZED LIGHT USE FOR STUDY OF STRESS-STRAIN STATE OF CORNEA IN PATHOLOGY OF EXTRAOCULAR MUSCLES

M. L. KOCHINA, Yu. A. DEMIN, N. M. KOVTUN, I. V. KAPLIN

The results of using the polarized light to study the cornea stress-strain state in pathology of extraocular muscles are presented. Examination of the shape of the interference pattern has shown that the horizontal eye deviation in most cases occurs due to the displacement of the upper rectus muscle attachment towards the inner rectus muscle. The normal attachment of the upper rectus muscle to the sclera results in an imbalance of horizontal muscles.

*Key words:* polarized light, optical anisotropy, cornea, extra-ocular muscles, interference picture.

Надійшла 22.08.2019