

УДК 617.715

Биомеханические свойства склеры у лиц с различным типом рефракции

Э.В. Егорова¹, С.А. Борзенко¹, А.Н. Бессарабов¹, А.В. Милингерт¹, М. А. Севостьянов², А.С. Баикин²

¹ ФГАУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Москва;

² ФГБУ «Институт металлургии и материаловедения» им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), Москва

РЕФЕРАТ

Цель. Определить биомеханические особенности склеральной ткани с учетом возраста и передне-задней оси глаза.

Материал и методы. Исследовано 144 изолированных фрагментов склеры 38 кадаверных глаз человека в возрасте от 40 до 75 лет. [Среднее значение передне-задней оси (ПЗО) глаз – 23,56±3,06 мм (20,05-26,62).]

Образцы склеры стандартной ширины 5 мм вырезались микрохирургическим лезвием из передней, экваториальной и задней области глаза. Биомеханические испытания образцов склеральной ткани проводились на универсальной испытательной машине Инстрон-3322.

Результаты. Наибольшие показатели модуля Юнга (МЮ) и прочности склеры были получены в возрасте старше 60 лет. Отмечается повышение прочности склеры во всех сегментах глазного яблока, составившее 15,6±0,4 МПа в переднем отделе глаза при гиперметропии; 12,3±0,5 МПа – при миопии; при норме – 15,2±0,8 МПа; в заднем полюсе глаза данные по-

казатели также увеличиваются и составляют 13,1±0,5 МПа при гиперметропии, 10,2±0,7 МПа – при миопии, при норме – 12,8±0,7 МПа. МЮ имеет достоверно ($p<0,05$) наибольшие значения в переднем отделе глаза, составив 49,21±4,1 МПа – при гиперметропии, 37,05±5,5 МПа – при миопии, при норме – 48,29±5,3 МПа; наименьшие значения определялись в заднем полюсе глаза, составив 37,25±2,2 МПа – при гиперметропии, 24,07±7,1 МПа – при миопии, при норме – 36,78±1,5 МПа.

Выводы. Упруго-прочностные показатели фрагментов склеральной ткани возрастают с возрастом, однако сохраняется неоднородность данных показателей по областям, что обуславливает изменения ее биомеханического статуса.

Ключевые слова: склера, возраст, модуль Юнга, прочность, длина глаза. ■

Авторы не имеют финансовых или имущественных интересов в упомянутых материале и методах.

Офтальмохирургия.– 2015.– № 4.– С. 65-69.

Для корреспонденции:

Борзенко Сергей Анатольевич, докт. мед. наук, академик РАЕН, зав. Центром фундаментальных и прикладных медико-биологических проблем;

Бессарабов Анатолий Никитич, канд. тех. наук, зав. отделом информационных технологий и телекоммуникаций;

Милингерт Анастасия Валерьевна, аспирант

ФГАУ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России

Адрес: 127486, Москва, Бескудниковский бульвар, 59а

E-mail: info@mntk.ru

Тел.: (495) 484-7298

Севостьянов Михаил Анатольевич, канд. тех. наук, ст. научн. сотрудник;

Баикин Александр Сергеевич, мл. научн. сотрудник, аспирант

ФГАУ «Институт металлургии и материаловедения» им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: 119991, Москва, Ленинский просп., 49

Тел.: (499) 135-2060, факс: (499) 135-8680

E-mail: imet@imet.ac.ru

ABSTRACT

Biomechanical properties of the sclera in patients with different types of refractionE.V. Egorova¹, S.A. Borzenok¹, A.N. Bessarabov¹, A.V. Milingert¹, M.A. Sevostyanov², A.S. Baikin²¹ The S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Moscow;² The A.A. Baykov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Purpose. To determine biomechanical age-specific features of the scleral tissue and the axial length of the eye.

Material and methods. The study investigated 144 isolated fragments of the sclera of 38 cadaver human eyes at the age from 40 to 75 years. [The average value of the axial length of eyes: 23.56 ± 3.06 mm (20.05-26.62).]

Samples of sclera with a standard 5 mm width were cut out with microsurgical blade from the anterior, equatorial and posterior areas of the eye. Biomechanical test of scleral samples was carried out using the universal testing Instron-3322 machine.

Results. The highest indices of scleral strength and Jung's Modulus (JM) were obtained at the age of over 60 years. A strength increase of the sclera was noted in all segments of the eyeball, amounting to 15.6 ± 0.4 MPa in the anterior segment in case of hyperopia; 12.3 ± 0.5 MPa in myopia; in norm: 15.2 ± 0.8 MPa; in the posterior pole of the eye these indices also increased and were

The Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. – 2015. – No. 4. – P. 65-69.

13.1 ± 0.5 MPa in hyperopia, 10.2 ± 0.7 MPa for myopia, in norm: 12.8 ± 0.7 MPa. The JM has significantly ($p < 0.05$) the highest value in the anterior segment 49.21 ± 4.1 MPa in hyperopia, 37.05 ± 5.5 MPa for myopia, in norm: 48.29 ± 5.3 MPa; the lowest values were determined in the posterior pole of the eye amounting 37.25 ± 2.2 MPa in hyperopia, 24.07 ± 7.1 MPa for myopia, in norm: 36.78 ± 1.5 MPa.

Conclusions. Biomechanical characteristics of scleral tissue fragments show that the strength and resilience of the scleral tissue increases with age, however, the heterogeneity of these indices remains by segments, that leads to a variability in its biomechanical status.

Key words: sclera, age, Jung's modulus, strength, axial length of the eye. ■

No author has a financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

Склеральная оболочка является основной опорной структурой глазного яблока, и нарушение ее биомеханических свойств играет существенную роль в развитии определенных патологических изменений глаза [1-5, 7, 9-17].

В естественных условиях элементы склеры живого глаза находятся в некотором напряженно-деформированном состоянии, определяемом внутриглазным давлением и механическими свойствами склеральной ткани, а также анизотропией и неоднородностью этих свойств [2, 3, 6, 9-11, 14, 17]. Биомеханические модели склеры демонстрируют, что наиболее значимыми факторами в развитии экскавации диска зрительного нерва (ДЗН) являются модуль Юнга (МЮ) и прочность склеры, которые противостоят растягивающим напряжениям оболочек, порождаемым внутриглазным давлением (ВГД) [1-3, 5, 6, 20, 22-26].

К настоящему моменту сведения о величине МЮ достаточно разнородны. Так, Bataglioli J.L и Kamm R.D приводят широкий диапазон МЮ склеры в меридиональном и экваториальном направлениях, которые со-

ставляет 1-100 МПа, а в радиальном (т.е. перпендикулярно поверхности склеры) направлении этот показатель примерно в 2 раза меньше [20, 21]. Несколько другие данные приводит Frieberg T.R., Lase J.W. – 1,8-2,9 МПа, Arciniegas A.A. – 5,3-41 МПа [17, 22, 23]. Полученные результаты Йомдиной Е.Н. показывают, что продольный модуль Юнга (Em) существенно зависит от локализации исследуемой области склеры и колеблется в пределах от 17,4 до 44,2 МПа, снижаясь в направлении от передней области к заднему полюсу глаза [9, 10, 11].

Однако ключевые различия в биомеханических характеристиках склеры глаз с различной рефракцией существенны и до настоящего времени четко не установлены, а биомеханические механизмы возникновения нарушений остаются до сих пор неясными [6-9, 12-19].

Бурное развитие информационно-вычислительных технологий в течение последних 30 лет затронуло и область различных инженерных расчетов. Вычислительные возможности инженерных систем неизбежно привлекли внимание различных медицинских исследовате-

лей, специализирующихся на изучении механических и биомеханических параметров самых различных биологических тканей организма [5, 6, 9-11]. Разрабатываемые сегодня биомеханические модели оказываются весьма полезными для разработки новых способов лечения и диагностики, поэтому дальнейшее изучение данных свойств позволит смоделировать биомеханические свойства склеральной оболочки по критериям соответствия и на их основе создать новые методы лечения глаукомы, тем самым предупредив каскад метаболических изменений, ведущих к развитию оптической нейропатии.

ЦЕЛЬ

Определить биомеханические особенности склеральной ткани с учетом возраста и величины передне-задней оси глаза.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовано 144 изолированных фрагмента склеры 38 кадавер-

ных глаз человека в возрасте от 40 до 75 лет. В исследование не включались глаза с травмами и оперативными вмешательствами на глазах в анамнезе.

Среднее значение передне-задней оси (ПЗО) глаз – $23,56 \pm 3,06$ мм (20,05-26,62) рассчитано с помощью ультразвуковой биометрии (А-метода).

Образцы склеры стандартной ширины 5 мм вырезались микрохирургическим лезвием из передней, экваториальной и задней области глаза. Для транспортировки фрагментов склеры в лабораторию для биомеханических испытаний использовалась среда Борзенка-Мороз для хранения роговицы.

Биомеханические испытания образцов склеральной ткани проводились в режиме однократного нагружения. После измерения их толщины образцы ткани подвергались одноосному нагружению вплоть до разрыва на универсальной испытательной машине Инстрон-3322. На экране монитора фиксировалась кривая зависимости удлинения образца от приложенной нагрузки, после обработки которой вычислялись соответствующие упруго-прочностные показатели склеры. Исследования проводились в лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов № 10 ФГБУ ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова (зав. лабораторией – канд. техн. наук Севостьянов М.А.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Деформативно-прочностные показатели фрагментов склеральной ткани показывают, что прочность нормальной склеральной ткани возрастает с возрастом, однако сохраняется неоднородность этого показателя по областям. Результаты приведены в табл. 1.

В возрасте до 45 лет наибольшая прочность склеры обнаружена у лиц с гиперметропическим типом рефракции в передней области склеральной капсулы, составив $13,8 \pm 0,5$ МПа; у лиц с миопическим типом рефракции данный показатель составляет $10,2 \pm 0,3$ МПа ($r=0,933$); при норме – $13,6 \pm 0,4$ МПа (табл. 1, 3).

Наименьшей прочностью обладает задний полюс глаза, составив

Таблица 1

Прочность склеры, МПа (М±σ)			
Локализация	Рефракция		
	Гиперметропия	Эмметропия	Миопия
Возраст до 45 лет			
Лимбальная зона	$12,9 \pm 0,4$ *	$12,8 \pm 0,3$ *	$10,8 \pm 0,4$ *
Экваториальная зона	$13,8 \pm 0,5$ *	$13,6 \pm 0,4$ *	$10,2 \pm 0,3$ *
Задний полюс глаза	$10,1 \pm 0,7$ *	$10,8 \pm 0,3$ *	$8,0 \pm 0,7$ *
Возраст 46-60 лет			
Лимбальная зона	$14,3 \pm 0,6$ *	$13,6 \pm 0,5$ *	$11,0 \pm 0,7$ *
Экваториальная зона	$14,9 \pm 0,3$ *	$14,2 \pm 0,6$ *	$10,3 \pm 0,4$ *
Задний полюс глаза	$11,6 \pm 0,3$ *	$11,3 \pm 0,4$ *	$8,4 \pm 0,5$ *
Возраст старше 60 лет			
Лимбальная зона	$15,6 \pm 0,4$ *	$15,2 \pm 0,8$ *	$12,3 \pm 0,5$ *
Экваториальная зона	$14,8 \pm 0,3$ *	$14,4 \pm 0,5$ *	$11,1 \pm 1,3$ *
Задний полюс глаза	$13,1 \pm 0,5$ *	$12,8 \pm 0,7$ *	$10,2 \pm 0,7$ *

* Различия между нормой, миопией и гиперметропией статистически достоверны, $p < 0,05$.

$10,1 \pm 0,7$ МПа – при гиперметропии, $8,0 \pm 0,7$ МПа – при миопии, при норме – $10,8 \pm 0,3$ МПа (табл. 1, 3).

В возрасте с 46 до 60 лет прочностные характеристики склеры возрастают, однако сохраняется неоднородность данного показателя по областям. Наибольшие параметры прочности сохраняются в передней области капсулы глаза, составив $14,9 \pm 0,3$ МПа – при гиперметропии, $11,0 \pm 0,7$ МПа – при миопии, при норме – $14,2 \pm 0,6$ МПа.

Наименьшие показатели прочности склеры сохраняются в заднем полюсе глаза, составив $11,6 \pm 0,3$ МПа – при гиперметропии; $8,4 \pm 0,5$ МПа – при миопии; при норме – $11,3 \pm 0,4$ МПа (табл. 1).

В возрасте старше 60 лет прочность склеры возрастает во всех сегментах глазного яблока, составив $15,6 \pm 0,4$ МПа – в переднем отделе глаза при гиперметропии; $12,3 \pm 0,5$ МПа – при миопии, при норме – $15,2 \pm 0,8$ МПа, в заднем полюсе глаза данные показатели также увеличиваются и составляют $13,1 \pm 0,5$ МПа – при гиперметропии; $10,2 \pm 0,7$ МПа – при миопии, при норме – $12,8 \pm 0,7$ МПа (табл. 1).

Полученные данные показывают, что с возрастом как в норме, так и при миопии передняя область склеральной капсулы характеризует-

ся наибольшей величиной модуля упругости, а область заднего полюса глаза – наименьшей. Результаты приведены в табл. 2.

В возрасте до 45 лет величина модуля упругости имела достоверно ($p < 0,05$) наибольшие значения в переднем отделе глаза, составив $44,85 \pm 4,2$ МПа – при гиперметропии, $35,30 \pm 4,4$ МПа – при миопии, при норме – $45,15 \pm 5,1$ МПа. Наименьшие значения определялись в заднем полюсе глаза, составив $31,67 \pm 3,3$ МПа – при гиперметропии, $21,83 \pm 3,7$ МПа – при миопии, при норме – $30,21 \pm 4,3$ МПа (табл. 2).

В возрасте с 46 до 60 лет величина модуля упругости имела достоверно ($p < 0,05$) наибольшие значения в переднем отделе глаза, составив $46,27 \pm 4,6$ МПа – при гиперметропии, $35,62 \pm 3,7$ МПа – при миопии, при норме – $44,33 \pm 3,6$ МПа; наименьшие значения определялись в заднем полюсе глаза, составив $34,73 \pm 3,1$ МПа – при гиперметропии, $23,65 \pm 5,3$ МПа – при миопии, при норме – $34,28 \pm 3,4$ МПа (табл. 2).

В возрасте старше 60 лет величина модуля упругости сохраняла достоверно ($p < 0,05$) наибольшие значения в переднем отделе глаза, составив $49,21 \pm 4,1$ МПа – при гиперметропии, $37,05 \pm 5,5$ МПа – при миопии, при норме – $48,29 \pm 5,3$ МПа;

Таблица 2

Модуль упругости склеры, МПа (M±σ)

Локализация	Рефракция		
	Гиперметропия	Эмметропия	Миопия
Возраст до 45 лет			
Лимбальная зона	44,85±4,2 *	44,33±3,6*	35,30±4,4*
Экваториальная зона	38,26±3,5 *	37,86±4,3*	31,15±3,3*
Задний полюс глаза	31,67±3,3 *	30,21±4,3*	21,83±3,7*
Возраст 46-60 лет			
Лимбальная зона	46,27±4,6*	45,15±5,1*	35,62±3,7*
Экваториальная зона	42,86±3,5*	42,61±4,5*	33,32±4,4*
Задний полюс глаза	34,73±3,1*	34,28±3,4*	23,65±5,3*
Возраст старше 60 лет			
Лимбальная зона	49,21±4,1*	48,29±5,3*	37,05±5,5*
Экваториальная зона	46,82±3,5*	45,52±4,9*	35,45±5,2*
Задний полюс глаза	37,25±2,2*	36,78±1,5*	24,07±7,1*

* Различия между нормой, миопией и гиперметропией статистически достоверны, $p < 0,05$.

наименьшие значения определялись в заднем полюсе глаза, составив $37,25 \pm 2,2$ МПа – при гиперметропии, $24,07 \pm 7,1$ МПа – при миопии, при норме – $36,78 \pm 1,5$ МПа (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Склеральная оболочка глаза имеет неоднородную структуру на всем своем протяжении, что обуславливает изменчивость ее биомеханических свойств [6-8, 11-20]. В последнее время большинство авторов указывают, что изменение биомеханических свойств глазного яблока может являться причиной повышения офтальмотонуса и развития первичной открытоугольной глаукомы [1, 2, 4, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 20, 23]. Полученные результаты демонстрируют высокую корреляционную связь прочности и модуля Юнга (МЮ) во всех возрастных группах ($r=1$).

Наибольший коэффициент корреляции прочности и МЮ склеры был получен у лиц с эмметропическим типом рефракции ($r=0,945$) в лимбальной зоне, ($r=0,89$) в экваториальной зоне, ($r=0,976$) в заднем полюсе глаза (табл. 3).

У лиц с миопическим типом рефракции коэффициент корреляции прочности в лимбальной зоне составил $0,933$, в экваториальной

зоне – $0,878$, в заднем полюсе глаза – $0,931$ (табл. 3).

У лиц с гиперметропическим типом рефракции коэффициент корреляции прочности и МЮ в лимбальной зоне составил $0,924$, в экваториальной зоне – $0,883$, в заднем полюсе глаза – $0,958$.

Таким образом, выявляется высокая степень корреляции между показателями прочности и МЮ ($r=0,976$). Полученные результаты совпадают с данными проф. Иомдиной Е.Н, однако имеют тенденцию к повышению, так как с возрастом происходит постепенное уплотнение склеральной оболочки, что проявляется в изменении биомеханических свойств в сторону повышения ее плотности [5, 12, 13]. На морфологическом уровне инволюционные изменения склеры сводятся к более плотной упаковке фибрилл, уплотнению основной цементирующей субстанции, в которой происходит качественное и количественное перераспределение гликозаминогликанов, в результате чего изменяются биомеханические параметры склеры, которые проявляются в повышении ее прочностных характеристик [7, 11, 14]. Дальнейшее изучение склеральной капсулы глаза, учитывая изменения биомеханических характеристик, может быть использовано для моделирования оболочки глаза и позво-

лит в дальнейшем разработать новые методы коррекции глаукомных изменений.

ВЫВОДЫ

1. Прочностные показатели фрагментов склеральной ткани увеличиваются с возрастом и имеют наибольшие значения у лиц старше 60 лет с уменьшением к заднему полюсу глаза, что может иметь значение в развитии глаукомной оптиконейропатии.

2. Наименьшими биомеханическими характеристиками обладают фрагменты склеры с миопическим типом рефракции, что обуславливает выраженные изменения биомеханического статуса по сравнению с другими типами рефракции, а именно на $38,4-52,8\%$ меньше, чем при эмметропическом типе, и на $45,1-54,8\%$ – при гиперметропическом типе рефракции.

3. Моделируя биомеханические свойства по критериям соответствия (МЮ, прочности) в наиболее прогностически опасных зонах (задний полюс глаза), представляется возможным разработать метод инвазивного воздействия на фиброзную оболочку глаза для стабилизации глаукоматозных изменений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акпатров А.И. Взаимосвязь между коэффициентом ригидности, объемом глаза и модулем упругости склеры в эксперименте // Вестник офтальмологии. – 1980. – № 4. – С. 5-7.
2. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю. Центральная пахиметрия роговицы, внутриглазное давление, фактор напряжения оболочек и состояния поля зрения при открытоугольной глаукоме // Федоровские чтения: Сб. научн. тр. – М., 2008. – С. 118.
3. Анисимов С.И., Анисимова С.Ю., Ивошин Д.В. и др. Периневральная склеропластика при глаукоме. Ч. 1. Моделирование механических нагрузок в области диска зрительного нерва для оптимизации этого типа операций // Глаукома. – 2010. – № 4. – С. 40-45.
4. Арутюнян Л.Л. Роль биомеханических свойств глаза в определении целевого давления // Глаукома. – 2007. – № 3. – С. 60-67.
5. Бауэр С.М., Зимин Б.А., Товстик П.Е. Простейшие модели теории

Таблица 3

Коэффициенты корреляции прочности склеры и модуля Юнга при попарных сочетаниях параметров

	Лимбаль- ная зона	Эквато- риальная зона	Задний полус глаза	Возраст до 45 лет	Возраст 46-60 лет	Возраст старше 60 лет	Гипер- метропия	Эмметро- пия	Миопия
Лимбальная зона	1,0000 1,0000	0,9027 0,9443	0,9863 0,9859	0,1785 0,3343	0,0265 0,4710	-0,0473 0,5059	0,9246 0,9378	0,9452 0,9353	0,9334 0,9798
Экваториальная зона	0,9027 0,9443	1,0000 1,0000	0,8845 0,9743	0,5612 0,0434	0,4389 0,2163	0,3651 0,2606	0,8834 0,9453	0,8904 0,9408	0,8778 0,9079
Задний полус глаза	0,9863 0,9859	0,8845 0,9743	1,0000 1,0000	0,1671 0,2579	0,0062 0,4609	-0,1005 0,4609	0,9579 0,9529	0,9760 0,9709	0,9310 0,9709
Возраст до 45 лет	0,1785 0,3343	0,5612 0,0434	0,1671 0,2579	1,0000 1,0000	0,9771 0,9746	0,9090 0,9613	0,2468 0,1420	0,2191 0,1536	0,1554 0,4029
Возраст 46-60 лет	0,0265 0,4710	0,4389 0,2163	0,0062 0,4609	0,9771 0,9746	1,0000 1,0000	0,9590 0,9978	0,3557 0,2967	0,3397 0,3085	0,3258 0,5759
Возраст старше 60 лет	-0,0473 0,5059	0,3651 0,2606	-0,1005 0,4609	0,9090 0,9613	0,9590 0,9978	1,0000 1,0000	0,3689 0,3370	0,3888 0,3479	0,3989 0,5759
Гиперметропия	0,9246 0,9378	0,8834 0,9453	0,9579 0,9529	0,2468 0,1420	0,3557 0,2967	0,3689 0,3370	1,0000 1,0000	0,9854 0,9973	0,9053 0,9574
Эмметропия	0,9452 0,9353	0,8904 0,9408	0,9760 0,9709	0,2191 0,1536	0,3397 0,3085	0,3888 0,3479	0,9854 0,9973	1,0000 1,0000	0,9242 0,9590
Миопия	0,9334 0,9798	0,8778 0,9079	0,9310 0,9709	0,1554 0,4029	0,3258 0,5759	0,3989 0,5759	0,9053 0,9574	0,9242 0,9590	1,0000 1,0000

оболочек и пластин в офтальмологии. – СПбГУ, 2000. – 92 с.

6. *Ермаков А.М.* Численный анализ задач неклассических теории анизотропных оболочек: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук, 2011. – 91 с.

7. *Засеева М.В.* Исследование ригидности склеры в здоровых и глаукомных глазах: Дис. ... канд. мед. наук. – СПб., 2009. – 145 с.

8. *Затулина Н.И.* Структурно-функциональные взаимоотношения дренажной системы глаза человека при физиологическом старении и первичной глаукоме: Автореф. дис. ... докт. мед. наук. – М., 1978. – 29 с.

9. *Иомдина Е.Н.* Механические свойства тканей глаз человека // Современные проблемы биомеханики. – Вып. 11. – М.: Изд-во МГУ, 2006. – С. 183-200.

10. *Иомдина Е.Н., Кораблев Д.О.* Исследование зависимости «напряжение-деформация» в корнеосклеральной оболочке глаза // Материалы 2-й Всерос. конф. по биомеханике. – Т. 2. – Н. Новгород, 1994 – С. 59-60.

11. *Иомдина Е.Н., Кораблев Д.О., Кузнецова С.Б.* К построению биомеханической модели корнеосклеральной оболочки глаза // Тезисы докл. 1-й Всерос. конф. «Биомеханика на защите жизни и здоровья человека». – Т. 2. – Н. Новгород, 1992. – С. 116-117.

12. *Козлов В.И.* Новый метод изучения растяжимости и эластичности оболочек глаза при изменении офталь-

мотонуса // Вестн. офтальм. – 1967. – № 2. – С. 5-9.

13. *Котляр К.Е., Макаров Ф.Н., Смольников Б.А.* Ригидность и эластичность фиброзной оболочки глаза. Биомеханические и клинические аспекты // Научн.-практ. конф. «Биомеханика глаза – 2009» МНИИ ГБ им. Гемгольца: Сб. тр. – М., 2009. – С. 126-133.

14. *Саулгозис Ю.А., Волков В.В., Малышев Л.К. и др.* Исследование напряжений роговицы глаза человека для диагностики глазных заболеваний // Междунар. конф. достижений биомеханики в медицине: Сб. мат. – Рига, 1986. – С. 359-364.

15. *Светлова О.В., Кошниц И.Н.* Старение оболочек глаза – возможное ключевое звено в патогенезе открытоугольной глаукомы // Съезд офтальмологов России, 7-й: Тез. докладов. – Ч. 1. – М., 2000. – С. 193.

16. *Синеок А.Е., Золотарев А.В., Карлова Е.В.* К вопросу об эластичности и гистерезисе склеры // Биомеханика глаза – 2007: Сб. тр. МНИИ ГБ им. Гельмгольца. – М., 2007. – С. 106-111.

17. *Arciniegas A., Amaya I.E.* Mechanical behavior of the sclera // Ophthalmologica. – 1986. – Vol. 193, № 1-2. – P. 45-55.

18. *Bailey A.J.* Structure, function and aging of the collagens in the eye // Eye. – 1987. – Vol. 1-2. – P. 175-183.

19. *Bailey A., Paul R.G., Knott L.* Mechanism maturation and aging of

collagen // Mech. Ageing Dev. – 1998. – Vol. 106. – P. 1-56.

20. *Battaglioli J.L., Kamm R.D.* Measurements of the compressive properties of scleral tissue // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. – 1984. – Vol. 25, № 1. – P. 59-65.

21. *Belleza A.J., Hart R.T., Buorgoyne C.F.* The optics head as a biomechanical structure initiale finite element modeling // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. – 2000. – Vol. 41, № 3. – P. 2991-3000.

22. *Friberg T.R., Fourman S.B.* Scleral Buckling and Ocular Rigidity. Clinical Ramifications // Arch. Ophthal. – 1990. – Vol. 108. – P. 1622-1627.

23. *Friberg T.R., Lacey J.W.* A comparison of the elastic properties of human choroid and sclera // Exp. Eye Res. – 1988. – Vol. 47, № 3. – P. 429-436.

24. *Norman R.E., Flanagan J.G., Rausch et al.* Dimension of the human sclera: thickness measurement regional changes with axial length // Exp. Eye Res. – 2010. – Vol. 90, № 2. – P. 277-284.

25. *Schachar R.A., Huang T., Hung X.* Mathematic Proof of Schachars Hypothesis of Accomodation // Ann. Ophthalmol. – 1993. – Vol. 25. – P. 5-9.

26. *Sigal I.A., Flanagan J.G., Terting I., Etier C.R.* Finite element modeling of optic nerve head biomechanics // Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. – 2004. – Vol. 45. – P. 4378-4387.

Поступила 03.09.2015