

# БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ РИСКА ПРОГРЕССИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ОТКРЫТОУГОЛЬНОЙ ГЛАУКОМЫ

DOI: 10.17691/stm2016.8.4.08

УДК 617.7–007.681–039.36

Поступила 4.05.2016 г.

© **Е.Н. Иомдина**, д.б.н., профессор, главный научный сотрудник отдела патологии рефракции бинокулярного зрения и офтальмоэргономики<sup>1</sup>;  
**О.А. Киселева**, д.м.н., начальник отдела глаукомы<sup>1</sup>;  
**И.Н. Моисеева**, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории общей гидромеханики<sup>2</sup>;  
**А.А. Штейн**, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории общей гидромеханики<sup>2</sup>;  
**А.М. Бессмертный**, д.м.н., старший научный сотрудник отдела глаукомы<sup>1</sup>;  
**А.Ю. Арчаков**, аспирант отдела глаукомы<sup>1</sup>;  
**О.М. Калинина**, к.м.н., научный сотрудник отдела глаукомы<sup>1</sup>;  
**Л.В. Василенкова**, к.м.н., научный сотрудник отдела глаукомы<sup>1</sup>;  
**Г.А. Любимов**, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник лаборатории общей гидромеханики<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца, Москва, 105062, ул. Садовая-Черногрозская, 14/19;

<sup>2</sup>НИИ механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, 119192, Мичуринский пр., 1

**Цель исследования** — определение новых биомеханических параметров, характеризующих упругие свойства корнеосклеральной оболочки глаза, и оценка их значимости в качестве критериев риска прогрессирования первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ).

**Материалы и методы.** Обследован 41 пациент (43 глаза) с неоперированной ПОУГ в возрасте от 55 до 72 лет (средний возраст —  $64,0 \pm 4,0$  года), из них 20 глаз — с ПОУГ I стадии и 23 глаза — с ПОУГ II стадии, а также 15 пациентов без офтальмопатологии (кроме начальной катаракты) той же возрастной группы, составившие группу контроля. Офтальмологическое обследование включало эластотонometriю по Маклакову с тремя грузами различной массы, дифференциальную тонометрию по Шiotцу с использованием тонографа GlauTest 60 (Россия), томографию зрительного нерва на томографе HRT3 (Германия), статическую периметрию на приборе Humphrey (Германия). Повторное обследование проводилось через 18 мес.

**Результаты.** Расчет биомеханических показателей по разработанной нами методике проводили на основе математического моделирования с использованием данных эластотонometriи и дифференциальной тонометрии. Значения нового параметра — коэффициента эластоподъема  $\gamma_M$ , определенные по данным эластотонometriи по Маклакову и характеризующие в основном жесткость роговицы, составили в среднем  $0,88 \pm 0,20$  мм рт. ст./г груза при I стадии ПОУГ и  $0,80 \pm 0,04$  мм рт. ст./г — при II стадии, в то время как в группе контроля этот показатель в среднем был равен  $0,86 \pm 0,07$  мм рт. ст./г. При ПОУГ отмечалось повышение и другого биомеханического параметра — коэффициента эластоподъема  $\gamma_{ш}$ , определяемого по данным эластотонometriи по Шiotцу и характеризующего в основном жесткость склеры, который составил  $1,65 \pm 0,25$  мм рт. ст./г для I стадии и  $1,88 \pm 0,13$  мм рт. ст./г — для II стадии при среднем значении  $1,47 \pm 0,10$  мм рт. ст./г в контрольной группе. Выявлено, что при повышении значения коэффициента  $K = \gamma_{ш} / \gamma_M$  (как показателя индивидуального соотношения жесткости роговицы и склеры) выше порогового уровня наблюдаются клинические признаки прогрессирования глаукомного процесса.

**Заключение.** При развитии ПОУГ нарастает дисбаланс между биомеханическими характеристиками склеры ( $\gamma_{ш}$ ) и роговицы ( $\gamma_M$ ). Отношение этих показателей ( $K = \gamma_{ш} / \gamma_M$ ) может служить критерием риска прогрессирования глаукомного процесса, связанного с изменением состояния корнеосклеральной оболочки глаза.

**Ключевые слова:** глаукома; коэффициент жесткости роговицы; коэффициент жесткости склеры; эластотонметрия; роговица; склера.

**Как цитировать:** Iomdina E.N., Kiseleva O.A., Moiseeva I.N., Stein A.A., Bessmertny A.M., Archakov A.Ju., Kalinina O.M., Vasilenkova L.V., Lyubimov G.A. Biomechanical criteria for estimating the risk of primary open-angle glaucoma progression. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2016; 8(4): 59–63, <https://doi.org/10.17691/stm2016.8.4.08>

**Для контактов:** Арчаков Ахмед Юсупович, e-mail: archakov86@mail.ru

## Biomechanical Criteria for Estimating the Risk of Primary Open-Angle Glaucoma Progression

**E.N. Iomdina**, DSc, Professor, Chief Researcher, Department of Refraction Pathology, Binocular Vision Anomalies and Ophthalmoeconomics<sup>1</sup>;

**O.A. Kiseleva**, MD, DSc, Head of the Department of Glaucoma<sup>1</sup>;

**I.N. Moiseeva**, PhD, Senior Researcher, Laboratory of General Hydromechanics<sup>2</sup>;

**A.A. Stein**, PhD, Leading Researcher, Laboratory of General Hydromechanics<sup>2</sup>;

**A.M. Bessmertny**, MD, DSc, Senior Researcher, Department of Glaucoma<sup>1</sup>;

**A.Ju. Archakov**, PhD Student, Department of Glaucoma<sup>1</sup>;

**O.M. Kalinina**, MD, PhD, Researcher, Department of Glaucoma<sup>1</sup>;

**L.V. Vasilenkova**, MD, PhD, Researcher, Department of Glaucoma<sup>1</sup>;

**G.A. Lyubimov**, DSc, Professor, Chief Researcher, Laboratory of General Hydromechanics<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Helmholtz Research Institute of Eye Diseases, 14/19 Sadovaya-Chernogryazskaya St., Moscow, 105062, Russian Federation;

<sup>2</sup>Research Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, 1 Michurinsky prospect, Moscow, 119192, Russian Federation

**The aim of the investigation** was to identify new biomechanical parameters characterizing elastic properties of the ocular corneoscleral shell and to determine their significance for estimating the risk of primary open-angle glaucoma (POAG) progression.

**Materials and Methods.** The study involved 41 patients (43 eyes) aged 55 to 72 (mean age 64.0±4.0 years) with non-operated POAG, including 20 eyes with stage I POAG and 23 eyes with stage II, as well as 15 patients of the same age group with no eye pathology (except for age-related cataract) who served as control. The examination included Maklakov elastic tonometry with three different weights, differential Schiötz tonometry using a GlauTest 60 tomograph (Russia), optic nerve imaging using HRT3 (Germany), and static Humphrey (Germany) perimetry. All patients were re-examined 18 months after the initial examination.

**Results.** The biomechanical parameters were calculated based on mathematical modeling using elastic tonometry and differential tonometry data according to the method proposed by the authors. The value of a new parameter, elastic rise coefficient  $\gamma_M$ , characterizing mainly the rigidity of the cornea and determined using Maklakov elastic tonometry data averaged 0.88±0.20 mm Hg/g in stage I POAG and 0.80±0.04 mm Hg/g in stage II, whereas the control group showed an average of 0.86±0.07 mm Hg/g. At the same time, we revealed increase in the other biomechanical parameter, elastic rise coefficient  $\gamma_S$ , characterizing mainly the rigidity of the sclera and determined according to Schiötz elastic tonometry data. Its value amounted to 1.65±0.25 mm Hg/g for stage I POAG and 1.88±0.13 mm Hg/g for stage II, with the mean of 1.47±0.10 mm Hg/g in the control group. It was found that with the value  $K=\gamma_S/\gamma_M$  (an index showing the individual ratio of scleral and corneal rigidity) increasing above the threshold level clinical signs of glaucomatous process progression were observed.

**Conclusion.** The results indicate growing imbalance between biomechanical parameters of the sclera ( $\gamma_S$ ) and the cornea ( $\gamma_M$ ) during POAG development. The ratio of these parameters ( $K=\gamma_S/\gamma_M$ ) can serve as a measure of risk in progression of glaucomatous process related to the change in the state of the ocular corneoscleral shell.

**Key words:** glaucoma; corneal rigidity coefficient; scleral rigidity coefficient; elastic tonometry; cornea; sclera.

В настоящее время глаукомную оптическую нейропатию считают мультифакториальным заболеванием и в качестве одного из патогенетических механизмов рассматривают нарушение биомеханических свойств корнеосклеральной оболочки глаза [1, 2]. Установлено, что биомеханические свойства склеры и роговицы различаются между собой, а их изменение, с одной стороны, влияет на точность определения внутриглазного давления (ВГД), а с другой — нарушает гидродинамику внутриглазной жидкости и предраполагает к прогрессированию глаукомного процесса [1–7]. В связи с этим клиническая оценка механических свойств корнеосклеральной капсулы имеет несомненную диагностическую значимость.

Для клинической оценки ригидности корнеосклеральной оболочки глаза используется тонометрия по Маклакову и по Шютцу. При эластотонометрии, базирующейся на тонометрии по Маклакову, упругие свойства глазного яблока обычно характеризуются эластоподъемом, т.е. разностью двух измерений ВГД ( $p_2-p_1$ ) при разных грузах, причём сами эти грузы  $G_2$  и  $G_1$  фиксированы (например, 15 и 5 г) [8].

В опубликованных нами ранее расчетах [9–11] для каждого типа тонометра определена функция  $p(G)$ , показывающая зависимость тонометрического давления  $p$  от массы груза  $G$ . В широком диапазоне физиологических значений параметров эти функции близки к линейным, поэтому возможно ввести некоторый коэф-

коэффициент  $\gamma$ , названный нами коэффициентом эластоподъема и определяемый по двум измерениям тонометрического давления  $p_1$  и  $p_2$  при двух разных грузах  $G_1$  и  $G_2$  по формуле  $\gamma = (p_2 - p_1) / (G_2 - G_1)$ . Вычисленные по данным разных типов тонометров коэффициенты эластоподъема для одного и того же глаза получаются разными и не выражаются один через другой, что связано с их разной зависимостью от двух структурных упругих параметров: жесткости роговицы ( $E_c$ ) и жесткости склеры ( $E_s$ ) [10, 11]. В частности, коэффициент эластоподъема  $\gamma_{ш}$ , определенный по данным тонометра Шиотцу, как показали наши предыдущие расчеты, оказался относительно мало зависящим от роговичной жесткости и, таким образом, может служить характеристикой жесткости склеральной области  $E_s$ . При этом он не совпадает с ригидностью по Фриденвальду, также определяемой при тонометрии по Шиотцу, отличаясь от нее способом вычисления, размерностью и отчетливым физическим смыслом. С другой стороны, коэффициент  $\gamma_M$ , полученный по результатам тонометрии с разными грузами по Маклакову, оказывается существенно зависящим от обеих структурных жесткостей  $E_c$  и  $E_s$ , но в большей степени от жесткости роговицы [10, 11].

Эти модельные расчеты послужили основой для разработки метода определения относительного вклада изменений упругих свойств роговицы и склеры в биомеханическую составляющую глаукомного поражения, связанную с состоянием корнеосклеральной оболочки глаза, и для оценки возможной связи дисбаланса между биомеханическими характеристиками роговицы и склеры с прогрессированием первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ).

**Цель исследования** — определение новых биомеханических параметров, характеризующих упругие свойства корнеосклеральной оболочки глаза, и оценка их значимости в качестве критериев риска прогрессирования первичной открытоугольной глаукомы.

**Материалы и методы.** Обследован 41 пациент (43 глаза) в возрасте от 55 до 72 лет (средний возраст —  $64,0 \pm 4,0$  года) с неоперированной ПОУГ, из них 20 глаз — с ПОУГ I стадии и 23 глаза — с ПОУГ II стадии. Контрольная группа включала 15 соматически здоровых пациентов (15 глаз) той же возрастной группы без офтальмопатологии (кроме начальной катаракты). У больных с глаукомой ВГД было компенсировано на инстилляционном гипотензивном режиме в течение всего периода исследования.

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией, принятой в июне 1964 г. (Хельсинки, Финляндия) и пересмотренной в октябре 2000 г. (Эдинбург, Шотландия), и одобрено Этическим комитетом Научно-исследовательского института глазных болезней им. Гельмгольца. От каждого пациента получено информированное согласие.

Всем больным проводили эластотонометрию по Маклакову с грузами 7,5 г ( $G_1$ ), 10 г ( $G_2$ ) и 15 г ( $G_3$ ). С помощью линейки Поляка определяли соответ-

ствующие тонометрические давления  $p_1$ ,  $p_2$  и  $p_3$ . Затем вычисляли коэффициент эластоподъема  $\gamma_M$  как среднее арифметическое двух значений  $\gamma_{M1}$  и  $\gamma_{M2}$ , определенных по формулам:  $\gamma_{M1} = (p_2 - p_1) / (G_2 - G_1)$  и  $\gamma_{M2} = (p_3 - p_2) / (G_3 - G_2)$ . Как указано выше,  $\gamma_M$  в основном характеризует биомеханический статус (жесткость) роговицы [10, 11].

Сразу же после эластотонометрии по Маклакову на том же глазу проводили дифференциальную тонометрию по Шиотцу с использованием тонографа GlauTest 60 (Россия) грузами 5,5 и 7,5 г. При этом для определения значений тонометрического давления использовали графические зависимости, получаемые в режиме GlauTest 60 «Дифференциальная тонометрия» и предназначенные для определения коэффициента ригидности E. По ним определяли «заглубления» датчика тонографа и пересчитывали в значения тонометрического давления  $p_1$  и  $p_2$ , затем рассчитывали коэффициент эластоподъема по формуле  $\gamma_{ш} = (p_2 - p_1) / (G_2 - G_1)$ . Как указано выше,  $\gamma_{ш}$  в основном характеризует биомеханический статус (жесткость) склеры [10, 11].

Для оценки относительного вклада роговицы и склеры в формирование интегрального биомеханического статуса корнеосклеральной оболочки мы сочли возможным ввести показатель  $K = \gamma_{ш} / \gamma_M$ .

Клиническое обследование включало также оценку состояния структур диска зрительного нерва (ДЗН) с помощью лазерного сканирующего томографа HRT3 (Heidelberg Engineering GmbH, Германия), определение средней толщины слоя нервных волокон (mean RNFL thickness), объема нейроретинального пояса (rim volume), объема экскавации ДЗН (cup volume).

Для оценки функционального состояния зрительной системы проводили статическую периметрию на приборе Humphrey (Carl Zeiss, Германия) по пороговой программе 30-2 Threshold test с использованием алгоритма SITA-Standard для определения периметрических индексов MD (mean deviation) и PSD (pattern standard deviation). Через 18 мес данный комплекс исследований выполняли повторно.

При статистической обработке полученных данных использовали параметрические критерии  $M \pm \sigma$  (среднее значение  $\pm$  среднее отклонение), а при сравнении групп — критерий Стьюдента. Достоверными считали отличия со значениями  $p < 0,05$ .

**Результаты.** Значения коэффициента эластоподъема  $\gamma_M$ , определенные по данным эластотонометрии по Маклакову, в группе контроля варьировали в пределах от 0,7 до 1,1 мм рт. ст./г груза, составляя в среднем  $0,86 \pm 0,07$  мм рт. ст./г.

При I стадии ПОУГ среднее значение этого коэффициента составило  $0,88 \pm 0,20$  мм рт. ст./г, при II стадии —  $0,80 \pm 0,04$  мм рт. ст./г. Статистически значимые отличия данного коэффициента от нормы определялись только при II стадии ПОУГ ( $p < 0,05$ ). Снижение показателя  $\gamma_M$  по мере развития глаукомного поражения можно расценить как свидетельство постепен-

**Структурно-функциональные показатели ( $M \pm \sigma$ ) у пациентов с различным сдвигом соотношения биомеханических свойств склеры и роговицы ( $K = \gamma_{\text{ш}} / \gamma_{\text{м}}$ )**

Показатель	1-я группа	2-я группа	3-я группа
Средняя толщина слоя нервных волокон, мм:			
исходно	0,29±0,02	0,30±0,06	0,29±0,04
через 18 мес	0,29±0,04 p=0,315	0,28±0,08 p=0,059	0,27±0,03 p=0,04
Объем нейроретинального пояса, мм <sup>3</sup> :			
исходно	0,31±0,02	0,29±0,08	0,30±0,10
через 18 мес	0,30±0,05 p=0,221	0,27±0,04 p=0,044	0,26±0,06 p=0,031
Объем экскавации диска зрительного нерва, мм <sup>3</sup> :			
исходно	0,54±0,20	0,52±0,18	0,53±0,12
через 18 мес	0,56±0,10 p=0,117	0,56±0,11 p=0,048	0,60±0,15 p=0,042
MD, дБ:			
исходно	-4,1±1,9	-4,4±1,3	-4,2±2,1
через 18 мес	-4,2±1,7 p=0,362	-4,6±2,2 p=0,065	-4,9±2,4 p=0,05
PSD, дБ:			
исходно	2,8±2,2	2,7±1,1	2,8±2,0
через 18 мес	2,9±2,6 p=0,146	2,9±1,6 p=0,045	3,3±1,5 p=0,039

Примечание. Значения p рассчитывали при сравнении соответствующего показателя, определенного в срок наблюдения 18 мес, с его исходным уровнем.

ного изменения биомеханических свойств роговицы, что может оказывать влияние на точность определения ВГД.

Значения коэффициента эластоподъема  $\gamma_{\text{ш}}$ , определенные по данным дифференциальной тонометрии по Шиотцу, в контрольной группе варьировали в пределах от 0,8 до 1,7 мм рт. ст./г, составляя в среднем  $1,47 \pm 0,10$  мм рт. ст./г. При ПОУГ значения этого коэффициента были выше: при I стадии —  $1,65 \pm 0,25$  мм рт. ст./г, при II стадии —  $1,88 \pm 0,13$  мм рт. ст./г. При этом отличия данного показателя от нормы при II стадии ПОУГ оказались статистически значимыми ( $p < 0,05$ ). Поскольку  $\gamma_{\text{ш}}$  в большей степени отражает биомеханические характеристики склеры, повышение этого показателя в процессе развития ПОУГ, по всей видимости, указывает на изменение свойств склеральной оболочки в сторону повышения ее жесткости, что совпадает с выводами, полученными ранее в работах [2, 6], и может быть причиной развития глаукомной экскавации ДЗН.

Свидетельством дисбаланса между биомеханическими характеристиками глаукомной склеры ( $\gamma_{\text{ш}}$ ) и роговицы ( $\gamma_{\text{м}}$ ) может служить изменение предложенного нами показателя  $K = \gamma_{\text{ш}} / \gamma_{\text{м}}$ . Расчет этого коэффициента в норме (в группе контроля) показал, что он варьирует в пределах от 1,4 до 2,4, составляя в среднем  $1,90 \pm 0,22$ .

В то же время при I стадии ПОУГ отмечается повышение значений  $K$  в среднем до  $2,15 \pm 0,75$ , а при II стадии — до  $2,53 \pm 0,17$ . Отличия этого показателя от нормы при II стадии ПОУГ становятся статистически значимыми ( $p < 0,05$ ). Эти данные указывают на нарастающий дисбаланс биомеханических свойств роговицы и склеры при развитии заболевания.

Для оценки возможной роли выявленного дисбаланса как фактора риска прогрессирования глаукомного процесса пациенты с отклонением коэффициента  $K = \gamma_{\text{ш}} / \gamma_{\text{м}}$  от нормы в сторону его повышения были разделены на три группы.

В 1-й группе (7 глаз с I стадией ПОУГ и 5 глаз со II стадией) отклонение было незначительным и составило 0,1–0,3; во 2-й группе (8 глаз с I стадией ПОУГ и 10 глаз со II стадией) — 0,3–0,9; в 3-й группе (5 глаз с I стадией ПОУГ и 8 глаз со II стадией) — 1,0 и более.

В 1-й группе (с минимальным сдвигом коэффициента  $K$  по отношению к норме) лишь в 25% случаев (1 глаз с I стадией ПОУГ и 2 глаза со II стадией) через 18 мес были выявлены изменения исследованных структурно-

функциональных показателей. Однако в среднем по группе эти изменения были статистически не значимыми (см. таблицу).

В то же время во 2-й и 3-й группах уже в 67,7% случаев (8 глаз с I стадией ПОУГ и 13 глаз со II стадией) в конце срока наблюдения выявлены определенные изменения исследованных структурно-функциональных показателей.

Во 2-й группе, где нарушения биомеханических свойств роговицы и склеры, а также дисбаланс исследованных биомеханических характеристик были более выраженными, чем в 1-й группе, отмечены статистически значимые клинические и структурные изменения: снижение объема нейроретинального пояса и увеличение объема экскавации ДЗН. Периметрический индекс PSD в этой группе через 18 мес также стал статистически значимо выше.

В 3-й группе (со значительным сдвигом значений коэффициента  $K$  по отношению к норме) обнаружены значимые изменения всех исследованных структурных и функциональных показателей (см. таблицу), что соответствует прогрессированию глаукомного процесса.

Таким образом, нарушение биомеханических свойств роговицы и склеры, а также дисбаланс этих характеристик можно расценить как фактор риска прогрессирования глаукомного поражения.

**Заключение.** Результаты оценки упругих свойств корнеосклеральной оболочки глаза по предложенной нами методике показал их достоверное нарушение по мере увеличения стадии первичной открытоугольной глаукомы. Наличие у пациентов с компенсированным внутриглазным давлением дисбаланса между биомеханическими характеристиками склеры и роговицы (повышение отношения  $K = \gamma_{\text{ш}} / \gamma_{\text{м}}$ ) может служить фак-

тором риска прогрессирования первичной открытоугольной глаукомы, что обуславливает необходимость усиления гипотензивного режима или проведения гипотензивной операции для стабилизации глаукомного процесса. Полученные результаты позволяют утверждать, что показатель  $K=\gamma_{ш}/\gamma_{м}$  имеет диагностическую и прогностическую значимость в оценке риска прогрессирования глаукомного процесса.

**Финансирование исследования.** Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект №14-01-00475).

**Конфликта интересов у авторов нет.**

## Литература/References

1. Арутюнян Л.Л. Роль биомеханических свойств глаза в определении целевого давления. *Глаукома* 2007; 3: 60–67. Arutunyan L.L. Ocular biomechanical properties to set appropriate intraocular pressure target. *Glaucoma* 2007; 3: 60–67.
2. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. М: Реальное время. 2015; 208 с. Iomdina E.N., Bauer S.M., Kotliar K.E. *Biomekhanika glaza: teoreticheskie aspekty i klinicheskie prilozheniya* [Eye biomechanics: theoretical aspects and clinical applications]. Moscow: Real'noe vremya, 2015; 208 p.
3. Иомдина Е.Н., Киселева О.А., Бессмертный А.М., Арчаков А.Ю. Биомеханические исследования корнеосклеральной оболочки глаза при первичной глаукоме. *Российский офтальмологический журнал* 2015; 8(3): 84–92. Iomdina E.N., Kiseleva O.A., Bessmertny A.M., Archakov A.Yu. Biomechanical studies of the corneoscleral shell in primary glaucoma. *Rossiyskiy oftal'mologicheskiy zhurnal* 2015; 8(3): 84–92.
4. Иомдина Е.Н., Киселева О.А., Назаренко Л.А., Игнатъева Н.Ю., Баграташвили В.Н. Влияние биомеханических свойств корнеосклеральной капсулы глаза на гидродинамику внутриглазной жидкости. *Биомедицина* 2012; 3: 25–34. Iomdina E.N., Kiseleva O.A., Nazarenko L.A., Ignatieva N.Yu., Bagratashvili V.N. The impact of biomechanical properties of the corneoscleral shell on eye hydrodynamics (an experimental study). *Biomedicine* 2012; 3: 25–34.
5. Costin B.R., Fleming G.P., Weber P.A., Mahmoud A.M., Roberts C.J. Corneal biomechanical properties affect Goldmann applanation tonometry in primary open-angle glaucoma. *J Glaucoma* 2014; 23(2): 69–74, <https://doi.org/10.1097/ijg.0b013e318269804b>.
6. Crawford Downs J., Roberts M.D., Sigal I.A. Glaucomatous cupping of the lamina cribrosa: a review of the evidence for active progressive remodeling as a mechanism. *Exp Eye Res* 2011; 93(2): 133–140, <https://doi.org/10.1016/j.exer.2010.08.004>.
7. Светикова Л.А., Иомдина Е.Н., Киселева О.А. Биомеханические и биохимические особенности корнеосклеральной капсулы глаза при первичной открытоугольной глаукоме. *Российский офтальмологический журнал* 2013; 6(2): 105–112. Svetikova L.A., Iomdina E.N., Kiseleva O.A. Biomechanical and biochemical parameters of the corneoscleral capsule of patients with primary open-angle glaucoma. *Rossiyskiy oftal'mologicheskiy zhurnal* 2013; 6(2): 105–112.
8. Нестеров А.П. Глаукома. М: Медицина; 1995; 256 с. Nesterov A.P. *Glaukoma* [Glaucoma]. Moscow: Meditsina; 1995; 256 p.
9. Иомдина Е.Н., Любимов Г.А., Моисеева И.Н., Штейн А.А., Киселева О.А., Арчаков А.Ю. Возможности клинической оценки механических свойств корнеосклеральной капсулы при глаукоме с помощью тонометрических методов. В кн.: Материалы VIII Российского общенационального офтальмологического форума. Т. 2. М; 2015; с. 678–687. Iomdina E.N., Lyubimov G.A., Moiseeva I.N., Stein A.A., Kiseleva O.A., Archakov A.Yu. Vozmozhnosti klinicheskoy otsenki mekhanicheskikh svoystv korneoskleroal'noy kapsuly pri glaukome s pomoshch'yu tonometricheskikh metodov. V kn.: *Materialy VIII Rossiyskogo obshchenatsional'nogo oftal'mologicheskogo foruma*. T. 2 [Features of clinical evaluation of the mechanical properties of the corneoscleral capsule in glaucoma using tonometric methods. In: Proceedings of the VIII Russian national ophthalmology forum. Vol. 2]. Moscow; 2015; p. 678–687.
10. Moiseeva I.N., Stein A.A. Analysis of the pressure-volume relationship for the eyeball loaded by a flat stamp on the basis of a two-segment elastic model. *Fluid Dynamics* 2011; 46(5): 673–683, <https://doi.org/10.1134/s0015462811050012>.
11. Штейн А.А. О понятии ригидности глаза. В кн.: Материалы IV Российского общенационального офтальмологического форума. Т. 2. М; 2011; с. 257–261. Stein A.A. O ponyatii rigidnosti glaza. V kn.: *Materialy IV Rossiyskogo obshchenatsional'nogo oftal'mologicheskogo foruma*. T. 2 [On the concept of eye rigidity. In: Proceedings of the IV Russian national ophthalmology forum. Vol. 2]. Moscow; 2011; p. 257–261.