

УДК 617.731: 617.7-007.681-07

Влияние разгрузочных медикаментозных проб на стереометрические характеристики зрительного нерва при первичной открытоугольной глаукоме

Макашова Н.В., д.м.н., старший научный сотрудник отдела глаукомы¹;

Васильева А.Е., ассистент кафедры глазных болезней².

¹ФГБНУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, 11 А, Б;

²Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава РФ, 119991, Российская Федерация, Москва, ул. Трубецкая, д. 8, стр. 2.

Авторы не получали финансирование при проведении исследования и написании статьи.

Конфликт интересов: отсутствует.

Резюме

ЦЕЛЬ. Изучить влияние разгрузочных медикаментозных проб на стереометрические характеристики зрительного нерва у пациентов с установленным диагнозом первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ) I-III стадий.

МЕТОДЫ. Всего обследовано 165 человек, 222 глаза; из них 135 пациентов, 186 глаз с установленным диагнозом ПОУГ I-III стадий и 30 пациентов, 36 глаз — группа контроля. Средний возраст пациентов составил $62 \pm 8,2$ года. Группы были стандартизированы по полу и возрасту, диапазону исходного роговично-компенсированного ВГД ($21-30$ мм рт.ст.), по длине переднезадней оси глаза (ПЗО). Проводили стандартное офтальмологическое обследование, включавшее визометрию, биомикроскопию, гониоскопию, офтальмоскопию и компьютерную статическую периметрию Humphrey. Исследование вязкоэластических свойств фиброзной оболочки глаза и внутриглазного давления (ВГД) с помощью динамической двунаправленной аппланации роговицы выполняли на приборе Ocular Response Analyzer (ORA) («Reichert», США). Длину ПЗО глаза измеряли с помощью ультразвукового А-сканирования на приборе Ocuscan RxP («Alcon», США) в режиме 10 МГц. Для оценки стереометрических характеристик головки зрительного нерва (ГЗН) использовали конфокальную лазерную сканирующую офтальмоскопию (Heidelberg Retina Tomograph) HRT III.

РЕЗУЛЬТАТЫ. На основании полученных данных в ходе проведения разгрузочных проб для оценки биомеханических свойств головки зрительного нерва предложен коэффициент объемной ригидности головки зрительного нерва (КР ГЗН), который рассчитывали по формуле: $\text{КР ГЗН} = (\Delta \text{ВГД} / \Delta \text{объема экскавации ДЗН}) / 100$. В соответствии с данной формулой увеличение модуля коэффициента свидетельствует о росте ригидности структур головки зрительного нерва. У пациентов группы контроля

КР ГЗН составил $3,0 \pm 1,4$ мм рт.ст./мм³. У пациентов с начальной стадией ПОУГ КР ГЗН достоверно не различался с группой контроля и был равен $3,3 \pm 1,0$ мм рт.ст./мм³, что может свидетельствовать о сохранении способности к восстановлению структур головки зрительного нерва и окружающих ее тканей. У пациентов с развитой стадией глаукомы на фоне разгрузочных медикаментозных проб обнаружены значимые изменения стереометрических параметров; КР ГЗН достоверно увеличился и составил $5,7 \pm 1,1$ мм рт.ст./мм³ и положительно коррелировал с длительностью заболевания ПОУГ ($r=0,4$; $p=0,006$). У пациентов с далеко зашедшей стадией ПОУГ на фоне снижения ВГД при проведении разгрузочных медикаментозных проб выявлены максимально высокие значения КР ГЗН ($8,6 \pm 3,6$ мм рт.ст./мм³), что может свидетельствовать о выраженном увеличении ригидности структур головки зрительного нерва и окружающих ее тканей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Разработанный коэффициент ригидности головки зрительного нерва достоверно отражает степень влияния снижения ВГД на объем экскавации головки зрительного нерва; повышение его может служить фактором риска прогрессирования глаукомной оптической нейропатии (ГОН). Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать включение в комплекс обследования пациентов с первичной открытоугольной глаукомой расчет коэффициента ригидности ГЗН, который может служить прогностическим фактором для оценки прогрессирования ГОН.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: первичная открытоугольная глаукома, разгрузочные медикаментозные пробы, биомеханические параметры фиброзной оболочки глаза, стереометрические характеристики зрительного нерва, головка зрительного нерва, коэффициент ригидности головки зрительного нерва, объем нейроретинального ободка, объем экскавации.

Для контактов:

Макашова Надежда Васильевна, e-mail: nvmakashova@mail.ru

ENGLISH

Changes in optic nerve head stereometric parameters in response to drug-induced stress-relief tests in patients with primary open-angle glaucoma

MAKASHOVA N.V., Med.Sc.D., Senior Research Associate of Glaucoma Department¹;
VASILIEVA A.E., Assistant Professor².

¹ Scientific Research Institute of Eye Diseases, Glaucoma Department, 11 Rossolimo st., Moscow, Russian Federation, 119021;

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University, Ophthalmology Department, 8/2 Trubetskaya st., Moscow, Russian Federation, 119991.

Conflicts of Interest and Source of Funding: none declared.

Abstract

PURPOSE: To evaluate the changes of optic nerve head (ONH) stereometric parameters during drug-induced stress-relief tests in patients with primary open-angle glaucoma.

METHODS: 165 people (222 eyes) were examined. 135 patients (186 eyes) had open-angle glaucoma diagnosis of different severity (early, moderate, advanced). Also 30 healthy controls (36 eyes) were included. Patients' mean age was 62 ± 8.2 years. Groups were standardized by sex, age and range of the original corneal-compensated IOP ($21-30$ mmHg), as well as by length of the anterior-posterior axis of the eye. All people underwent standard ophthalmologic examination including visometry, biomicroscopy, gonioscopy, ophthalmoscopy and Humphrey visual field assessment. Corneal hysteresis (CH), corneal resistance factor (CRF), corneal-compensated IOP (IOPcc), and Goldmann-related IOP (IOPg) were measured using ocular response analyzer (ORA). The length of the anterior-posterior axis of the eye was measured using A-scan ultrasound biometry (Ocuscan RxP, "Alcon" USA). Confocal laser scanning ophthalmoscopy (Heidelberg Retina Tomograph) HRT III was used to evaluate ONH stereometric parameters.

RESULTS: ONH rigidity coefficient (RC) was formulated according to the analysis of changes in ONH stereometric parameters as a result of drug induced stress-relief tests. RC coefficient was calculated according to the following formula: $RC = (\Delta IOP / \Delta \text{cup volume}) / 100$. According to this

formula, the coefficient modulus increase indicates growing rigidity of ONH structures. RC value of the healthy control group was 3.0 ± 1.4 mm Hg/mm³. In patients with early glaucoma RC did not differ from the control group and equaled 3.3 ± 1.0 mm Hg/mm³. It may be indicative of maintaining resilience of the structures of the optic nerve head and the surrounding tissue in early glaucoma. Significant changes of ONH stereometric parameters were found in patients with moderate glaucoma during drug-induced stress-relief test; CR increased significantly and amounted to 5.7 ± 1.1 mm Hg/mm³ and showed a positive correlation with disease duration ($r=0.4$; $p=0.006$). Advanced glaucoma patients group revealed the highest possible CR value (8.6 ± 3.6 mm Hg/mm³), which may indicate a marked increase in the rigidity of ONH structures and surrounding tissues.

CONCLUSION: ONH rigidity coefficient (RC) significantly reflects the degree of IOP reduction effect on ONH cup volume; RC value increase may serve as a risk factor for glaucoma progression. Based on our research results we can recommend including RC calculation into complex examination of primary open-angle glaucoma patients. RC may be a possible prognostic factor for evaluating glaucomatous optic neuropathy progression.

KEYWORDS: primary open-angle glaucoma, induced stress-relief tests, optic nerve head stereometric parameters, optic nerve head rigidity coefficient, rim volume, cup volume.

Известно, что функциональные изменения при глаукомной оптической нейропатии носят обратимый характер и могут быть выявлены значительно позднее структурных [1-12]. «Резерв» времени, в течение которого головка зрительного нерва (ГЗН) и окружающие ее ткани выдерживают действие «давящего» фактора внутриглазного давления (ВГД), последующие сосудистые и метаболические нарушения, помимо прочих факторов, зависит от уровня «защиты» фиброзной оболочки глаза (ФОГ), то есть прежде всего от ее биомеханических свойств в области решетчатой

пластинки склеры [13-21]. А.П. Нестеров, Е.А. Егоров (1981) отмечали, что склеральная пластинка в зоне диска зрительного нерва должна быть перфорированной и вместе с тем эластичной, чтобы не ущемлять нервные волокна при колебаниях ВГД [22]. Важнейшие свойства ФОГ — ригидность и эластичность. Ригидность (лат. Rigidus — жёсткий, твёрдый) — жёсткость, твёрдость, неэластичность. В физиологии — резкое повышение тонуса анатомических структур и их сопротивляемости деформированию. Эластичность склеральной оболочки глаза — понятие, обратное термину «ригидность»

[23-25]. Под эластичностью вещества понимают такое его свойство, когда деформация материала прямо пропорциональна приложенной силе воздействия, независимо от продолжительности воздействия и скорости приложения силы. Эластичность ФОГ фактически определяет ее амортизирующие свойства и характеризует обратимость изменений наиболее подверженной «давящему фактору» структуры — решетчатой пластинки склеры [26]. Таким образом, свойство ригидности фиброзной оболочки глаза определяет ее структуру и жесткость, но вместе с тем при ее увеличении теряются эластические свойства, ответственные за возможные обратимые динамические изменения объема глазного яблока. В последнее время изучение биомеханических особенностей фиброзной оболочки глаза с каждым годом приобретает все большее значение для изучения физиологических особенностей, а также аспектов патогенеза различных заболеваний глазного яблока. Выявлено, что многие физиологические процессы зависят от биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза, соответственно изучение их свойств является одной из первоочередных задач современных ученых-офтальмологов.

Если рассматривать головку зрительного нерва (ГЗН), а также входящие в это понятие структурные элементы ФОГ, то одной из самых уязвимых областей, подверженных влиянию ВГД, является экскавация диска зрительного нерва (ДЗН). Экскавация является объемной конструкцией, жесткость которой на растяжение в основном определяется способностью всех структур ГЗН и окружающих ее тканей сопротивляться изменению формы. Изменения ее объема зависят от соотношения ригидности и эластичности тканей, входящих в понятие ГЗН. Соответственно, ригидность экскавации в области ГЗН должна определяться как свойство конструкции этой области и характеризоваться объемной ригидностью. Таким образом, «резерв» времени до необратимых функциональных изменений определяется сохранностью эластических свойств структур ГЗН и способностью сохранять объем экскавации.

В настоящее время часто отмечается неопределенный характер симптомов в начальной стадии заболевания, существование доброкачественной офтальмогипертензии, с одной стороны, и глаукомы с нормальным давлением — с другой [27]. Доброкачественной офтальмогипертензией офтальмологи называют превышение нормативных показателей ВГД, не приводящее к нарушениям в структуре и функциях зрительного нерва. Возможно, что регистрация показателей офтальмотонуса и оценка структур ГЗН в таких случаях проводится именно в тот резервный период, когда биомеханические свойства тканей ГЗН обладают настолько эластическими свойствами, что в течение нагрузки выдерживают влияние давящего фактора ВГД. Как отмечает А.П. Нестеров [28], при гипертензиях, которые

еще не приняли характер глаукомных, все структуры ГЗН хорошо противостоят гипербарической нагрузке изнутри. Таким образом, немаловажно определять толерантный уровень ВГД, индивидуальный для каждого пациента, при котором не происходят патологические изменения в головке зрительного нерва. В ФГБУ «НИИГБ» РАМН в 2010 г. была предложена и разработана оригинальная методика определения индивидуальной нормы ВГД, расчет которой производят по предложенной авторами формуле, использующей в качестве основной переменной величину объемного глазного кровотока (ОГК), измеренного с помощью анализатора глазного кровотока (Ocular Blood Flow Analyzer, OBFA) [18].

При проведении разгрузочных медикаментозных проб на фоне снижения ВГД подвержены изменениям основные структуры, точкой приложения которых является «давящий» фактор повышенного давления, а именно: нейроретинальный пояс (НРП), экскавация ГЗН и окружающие ее ткани, входящие в понятие «головка зрительного нерва». С помощью современных методов исследования, в том числе с помощью гейдльбергского томографа, можно с точностью до тысячных долей миллиметра вычислять изменения стереометрических параметров структур ГЗН, а также определять степень изменения объема экскавации и, соответственно, эластичности ГЗН и окружающих ее тканей в зависимости от изменения уровня офтальмотонуса.

В доступной литературе не обнаружено работ, посвященных изучению влияния снижения ВГД на изменения стереометрических параметров зрительного нерва у пациентов в разных стадиях ПОУГ.

Цель настоящей работы — изучить влияние разгрузочных медикаментозных проб на морфометрические характеристики зрительного нерва у пациентов с установленным диагнозом ПОУГ I-III стадий.

Материалы и методы

Всего обследовано 165 человек, 222 глаза; из них 135 пациентов (186 глаз) с установленным диагнозом ПОУГ I-III стадий и 30 пациентов (36 глаз) — группа контроля. Средний возраст пациентов — $62 \pm 8,2$ года. Группы были стандартизированы по полу и возрасту, диапазону исходного роговично-компенсированного ВГД (21-30 мм рт.ст.), длине переднезадней оси глаза.

Все пациенты с ПОУГ были разделены на подгруппы в соответствии с двумя критериями:

- 1) наличие или отсутствие гипотензивной терапии (у всех пациентов без лечения была диагностирована впервые выявленная глаукома);
- 2) выраженность морфофункциональных изменений — стадия глаукомы.

Основные данные по распределению пациентов по этим критериям представлены в табл. 1.

Распределение пациентов по стадиям ПОУГ и уровню ВГД

Группы		Число пациентов (глаз)
ПОУГ I	без лечения	15 (26)
	на фоне лечения	15 (20)
ПОУГ II	без лечения	59 (81)
	на фоне лечения	16 (20)
ПОУГ III	без лечения	14 (19)
	на фоне лечения	16 (20)

При проведении разгрузочных проб у пациентов без медикаментозного режима в качестве гипотензивного препарата применяли в инстилляциях фиксированную комбинацию дорзоламида гидрохлорида и тимолола малеата (Косопт). Через 2 часа проводили повторные исследования. Пациенты, получающие максимальную гипотензивную терапию в каплях и имеющие высокий уровень ВГД, принимали внутрь глицероаскорбат из расчета 1,5 г на 1 кг массы тела пациента. В этом случае контрольные исследования проводили через 1 час. Для стандартизации оценки изменений биомеханических свойств ФОГ все пациенты были рандомизированы по уровню снижения ВГД в результате проведения разгрузочных проб: в исследование вошли больные с изменением роговично-компенсированного ВГД в диапазоне от 5 до 10 мм рт.ст., группы достоверно не различались по этому параметру ($p > 0,05$). Пробу считали положительной при снижении ВГД на 5 и более мм рт.ст. Все пациенты с сомнительными и отрицательными результатами проб исключались из исследования.

Коэффициент, связывающий изменение ВГД с соответствующим ему изменением объема глазного яблока, принято называть коэффициентом ригидности (КР) глаза. В офтальмологической литературе обычно это коэффициент (К), связывающий изменение внутриглазного давления (Р) с соответствующим ему изменением объема (V) глазного яблока ($K = dP/dV$) и, безусловно, зависящий от механических свойств корнеосклеральной оболочки [29-34]. Численные значения КР в диапазоне физиологических значений ВГД в здоровых глазах различного возраста и при некоторых патологических состояниях приводятся, например, в работах К.Е. Котляра и И.Н. Кошица (2009) [35], которые описали параметры ригидности глаза, принятые у разных исследователей, а также I.G. Pallikaris (2005-2006) [36, 37]. Экспериментально установлено наличие четкой отрицательной корреляции между КР и объемом глаза [38, 39].

С помощью ретинотомографа HRT III можно вычислить объем экскавации ГЗН с точностью до сотых долей кубических миллиметров. В ходе разгрузочных проб, на фоне снижения ВГД, уменьшается давление на все структуры ГЗН, в том числе и на экскавацию ГЗН и окружающие ее ткани, соответственно меняется и объем экскавации, а также все параметры, связанные с уменьшением давящей силы на упругое тело. В работах Ю.С. Астахова, Е.Л. Аكوпова, В.В. Потемкина (2003) авторы проводили дозированную вакуумную нагрузку, с помощью гейдельбергского ретинального томографа (HRT II) отметили увеличение глубины прогиба решетчатой пластинки, изменение других сопряженных стереометрических параметров ДЗН [40-42]. В 2005 г. А.А. Рябцева, Е.Н. Хомякова, С.Г. Сергушев модифицировали и оптимизировали данный

метод с помощью изменения способа нагрузки (использование цикломеда), авторы отмечали значимые достоверные изменения стереометрических параметров ДЗН. В 2015 г. В.В. Страхов, Н.В. Корчагин изучили реакции мягких тканей ГЗН и перипапиллярных сосудов хориоидеи на компрессионное повышение ВГД с помощью ретинотомографа Spectralis OCT [43]. Авторы выявили изменения практически всех параметров экскавации ГЗН, за исключением ширины отверстия мембраны Бруха и положения передней поверхности lamina cribrosa.

Представив экскавацию ГЗН и окружающих ее тканей в качестве упругого тела с коэффициентом ригидности (коэффициент ригидности — КР), можно рассматривать изменение давления в глазном яблоке и изменение объема экскавации (cup volume) при проведении разгрузочных медикаментозных проб, связанные соотношением:

$$КР\ ГЗН = \Delta ВГД / \Delta Cup\ Volume,$$

где $\Delta ВГД$ — это дельта давления; ВГД1 — до пробы и ВГД2 — после пробы, то есть $\Delta ВГД = ВГД1 - ВГД2$, и соответственно $\Delta Cup\ Volume = Cup\ Volume1 - Cup\ Volume2$ (заявка на патент РФ № 017003 от 24.03.2016 г., регистрационный № 2016110772).

Таким образом, для оценки биомеханических свойств ГЗН и окружающих ее тканей по данным гейдельбергской томографии зрительного нерва в исследовании был использован коэффициент ригидности головки зрительного нерва (КР ГЗН). Формула объемного коэффициента ригидности ГЗН определялась как отношение происходящего изменения ВГД при проведении разгрузочной медикаментозной пробы к соответствующему изменению объема экскавации. Коэффициент рассчитывали по формуле:

$$КР\ ГЗН = (\Delta ВГД / \Delta Cup\ Volume) / 100.$$

Соответственно данной формуле с увеличением ригидности ГЗН увеличивается модуль коэффициента.

В исследование включены пациенты со средними значениями площади ГЗН (average disc size), по данным компьютерного программного обеспечения прибора HRT III 95% доверительный интервал

**Динамика морфометрических характеристик ГЗН до и после разгрузочных проб
в группах исследования ($M \pm \sigma$)**

		ПОУГ I без лечения n=26	ПОУГ I на фоне лечения n=20	ПОУГ II без лечения n=81	ПОУГ II на фоне лечения n=20	ПОУГ III без лечения n=19	ПОУГ III на фоне лечения n=20	Контроль n=36
Cup Volume, mm ³	до	0,14±0,04	0,16±0,04	0,19 [#] ±0,08	0,24 [#] ±0,08	0,27 [#] ±0,07	0,29 [#] ±0,05	0,12±0,08
	после	0,11±0,05	0,13±0,02	0,15 [#] ±0,07	0,21 [#] ±0,08	0,26 ^{**} ±0,09	0,28 ^{**} ±0,04	0,10 [*] ±0,07
Rim Volume, mm ³	до	0,33±0,11	0,30±0,10	0,28 [#] ±0,15	0,27 [#] ±0,17	0,22 [#] ±0,06	0,16 [#] ±0,07	0,38±0,12
	после	0,35±0,11	0,33±0,12	0,31 [#] ±0,16	0,28 ^{**} ±0,16	0,24 [#] ±0,06	0,17 ^{**} ±0,07	0,39 [*] ±0,14
Mean RNFL, mm	до	0,24±0,04	0,21±0,02	0,19 [#] ±0,05	0,17 [#] ±0,06	0,13 [#] ±0,05	0,13 [#] ±0,05	0,24±0,03
	после	0,24 [*] ±0,04	0,21 [*] ±0,02	0,20 ^{**} ±0,05	0,17 ^{**} ±0,06	0,13 ^{**} ±0,05	0,13 ^{**} ±0,05	0,24 [*] ±0,03
ПЗО, мм		23,4±0,5	22,4±0,6	23,4±0,5	22,7±1,0	22,7±1,2	22,5±0,7	23,2±0,9
КР ГЗН, мм рт.ст./мм ³		3,0±2,1	3,5 [#] ±0,8	3,2±2,7	5,7 [#] ±1,1	7,3 [#] ±3,4	11,3 [#] ±4,1	3,0±1,4
		3,3±1,0		4,6 [#] ±2,7		8,6 [#] ±3,6		

Примечание: * — $p \geq 0,5$, достоверность различий в результате разгрузочной пробы; # — $p < 0,05$, по сравнению с группой контроля.

составил 1,9-2,2 мм². Статистической обработке подвергались общие ретинотомографические параметры (global), характеризующие весь ГЗН, без оценки по секторам.

При анализе результатов стереометрических исследований ДЗН, описанных в табл. 2, у пациентов с первой стадией глаукомы на фоне снижения ВГД (табл. 4) были выявлены достоверные изменения в объеме нейроретинального ободка (Rim Volume), а также в объеме экскавации (Cup Volume). Длительность заболевания составила $2,4 \pm 0,7$ года в группе без лечения и $5,13 \pm 1,5$ года в группе на фоне лечения. Коэффициент КР ГЗН в группе без лечения был равен $3,0 \pm 2,1$ мм рт.ст./мм³ и недостоверно отличался от такового в группе контроля ($p \geq 0,5$), что может косвенно свидетельствовать о начальных и, возможно, обратимых структурных изменениях ГЗН и окружающих ее тканей у пациентов с впервые выявленной глаукомой первой стадии. При проведении медикаментозных проб у пациентов с первой стадией глаукомы на фоне предшествующей гипотензивной терапии рассчитанный коэффициент ригидности ГЗН составил $3,5 \pm 0,8$ мм рт.ст./мм³ и достоверно различался с группой контроля. Вероятно, большая длительность заболевания в этой группе явилась одной из возможных причин повышения ригидности ГЗН. На фоне снижения ВГД в обеих группах при I стадии глаукомы выявлено достоверное изменение периметрических индексов MD и PSD ($p < 0,05$) (табл. 3).

В группе пациентов с впервые выявленной глаукомой второй стадии без предшествующего лечения длительность заболевания составила $3,0 \pm 1,2$ года. На фоне снижения ВГД наблюдались значимые изме-

нения в таких стереометрических параметрах, как объем экскавации и объем нейроретинального пояса. Среднее значение коэффициента ригидности ГЗН в этой группе равнялось $3,2 \pm 2,7$ мм рт.ст./мм³. По сравнению с группой контроля и группой пациентов ПОУГ I стадии без лечения наблюдалась тенденция к увеличению показателей, однако достоверные различия не были найдены (ПОУГ II стадии (без лечения) — $3,2 \pm 2,7$ мм рт.ст./мм³; ПОУГ I стадии без лечения — $3,0 \pm 2,1$ мм рт.ст./мм³; контроль — $3,0 \pm 1,4$ мм рт.ст./мм³; $p \geq 0,5$).

В группе пациентов со второй стадией ПОУГ, у которых пробы проводились на фоне постоянного медикаментозного режима, длительность заболевания составила $5,9 \pm 0,9$ года. Патологические структурные изменения ГЗН были более выражены, а динамика изменений после снижения ВГД была значительно меньшей по сравнению с другими группами. Коэффициент ригидности ГЗН в этой группе, по сравнению с группами контроля и пациентов с ПОУГ I стадии, а также ПОУГ II стадии без предшествующего лечения, имел большее значение — $5,7 \pm 1,1$ мм рт.ст./мм³. КР ГЗН положительно коррелировал с длительностью заболевания ПОУГ ($r = 0,4$; $p = 0,006$). Полученные результаты позволяют говорить о большей ригидности ГЗН и окружающих ее тканей у пациентов на медикаментозном режиме. Отсутствие компенсации на фоне длительной медикаментозной терапии, вероятно, за время заболевания приводит к изменению биомеханических свойств тканей ГЗН. Периметрические индексы и общая светочувствительность в центральном поле зрения достоверно не изменились ($p > 0,05$): отмечалась лишь тенденция снижения модулей MD,

Таблица 3

Динамика светочувствительности сетчатки по данным статической компьютерной периметрии Humphrey до и после разгрузочных проб в группах исследования, Ме (Q25%; Q75%)

		ПОУГ I без лечения n=26	ПОУГ I на фоне лечения n=20	ПОУГ II без лечения n=81	ПОУГ II на фоне лечения n=20	ПОУГ III без лечения n=19	ПОУГ III на фоне лечения n=20	Контроль n=36
MD	до	-3,96 (-2,15 – -4,51) [#]	-4,71 (-4,32 – -5,01) [#]	-8,56 (-6,87 – -10,35) [#]	-9,6 (-7,21 – -11,15) [#]	-16,81 (-15,51 – -18,15) [#]	-18,16 (-16,77 – -19,95) [#]	+0,56 (-0,57 – +1,10) [*]
	после	-2,71 (-1,75 – -3,92) [#]	-3,81 (-2,75 – -4,32) [#]	-5,16 (-4,27 – -7,15) [#]	-6,16 (-4,99 – -8,35) [#]	-16,11 (-15,07 – -17,67) ^{**}	-17,16 (-16,21 – -19,35) ^{**}	+0,51 (-0,47 – +1,29) [*]
PSD	до	5,71 (2,94 – 6,55) [#]	6,34 (4,14 – 7,10) [#]	6,86 (3,97 – 7,25) [#]	6,89 (4,63 – 7,86) [#]	10,62 (8,53 – 11,55) [#]	11,16 (9,47 – 12,75) [#]	1,5 (0,99 – 1,35) [*]
	после	4,72 (2,51 – 5,37) [#]	5,49 (3,02 – 6,19) [#]	5,56 (2,88 – 6,77) [#]	6,02 (4,33 – 7,24) ^{**}	8,44 (6,89 – 10,69) [#]	11,06 (9,31 – 12,31) ^{**}	1,46 (0,90 – 1,30) [*]

Примечание: * — $p \geq 0,5$, достоверность различий в результате разгрузочной пробы; # — $p < 0,05$, по сравнению с группой контроля.

Таблица 4

Динамика показателей тонометрии и биомеханических характеристик роговицы до и после разгрузочных проб в группах исследования, $M \pm \sigma$, мм рт.ст.

Параметры	Проба	ПОУГ I без лечения n=26	ПОУГ I на фоне лечения n=20	ПОУГ II без лечения n=81	ПОУГ II на фоне лечения n=20	ПОУГ III без лечения n=19	ПОУГ III на фоне лечения n=20	Контроль n=36
IOPcc	до	23,87 $\pm$ 3,10	25,26 $\pm$ 2,23	24,4 $\pm$ 1,61	25,32 $\pm$ 2,24	28,06 $\pm$ 1,28	26,8 $\pm$ 2,76	18,52 $\pm$ 2,61
	после	15,31 $\pm$ 2,87	14,79 $\pm$ 1,93	17,44 $\pm$ 2,29	15,82 $\pm$ 2,08	19,23 $\pm$ 2,6	18,08 $\pm$ 1,51	11,85 $\pm$ 2,2
	Δ	8,56 $\pm$ 1,42	10,47 $\pm$ 1,17	6,97 $\pm$ 1,79	9,5 $\pm$ 0,29	8,84 $\pm$ 1,47	8,0 $\pm$ 2,72	6,7 $\pm$ 1,92
IOPg	до	23,92 $\pm$ 3,51	25,87 $\pm$ 2,56	24,2 $\pm$ 2,4	25,44 $\pm$ 2,7	26,1 $\pm$ 1,44	24,98 $\pm$ 1,47	16,77 $\pm$ 1,7
	после	15,94 $\pm$ 3,55	15,14 $\pm$ 2,15	17,51 $\pm$ 1,71	16,37 $\pm$ 2,37	17,28 $\pm$ 2,7	16,0 $\pm$ 1,18	10,6 $\pm$ 2,8
CH	до	9,82 $\pm$ 1,42	8,77 $\pm$ 1,02	9,67 $\pm$ 1,84	9,59 $\pm$ 1,16	7,4 $\pm$ 1,11	8,06 $\pm$ 1,43	9,37 $\pm$ 2,3
	после	11,39 $\pm$ 1,21	11,20 $\pm$ 0,65	10,91 $\pm$ 1,7	11,46 $\pm$ 1,04	7,83 $\pm$ 1,44	8,41 $\pm$ 1,20	10,33 $\pm$ 1,67
	Δ	1,79 $\pm$ 0,62	2,32 $\pm$ 0,43	1,2 $\pm$ 0,47	1,87 $\pm$ 0,43	0,45 $\pm$ 0,6	0,35 $\pm$ 1,27	0,96 $\pm$ 0,36
CRF	до	12,43 $\pm$ 1,74	11,78 $\pm$ 1,14	11,60 $\pm$ 1,75	12,4 $\pm$ 1,37	10,25 $\pm$ 0,88	10,7 $\pm$ 1,20	9,67 $\pm$ 1,21
	после	11,37 $\pm$ 1,74	10,53 $\pm$ 1,31	11,02 $\pm$ 1,73	11,36 $\pm$ 1,31	8,23 $\pm$ 1,09	8,58 $\pm$ 1,10	8,87 $\pm$ 1,43
	Δ	1,06 $\pm$ 0,48	1,26 $\pm$ 0,52	0,59 $\pm$ 0,38	1,04 $\pm$ 0,42	1,98 $\pm$ 1,06	2,15 $\pm$ 0,9	0,93 $\pm$ 0,46
CH/CRF	до	0,79 $\pm$ 0,07	0,74 $\pm$ 0,08	0,83 $\pm$ 0,05	0,77 $\pm$ 0,04	0,72 $\pm$ 1,05	0,75 $\pm$ 0,09	0,97 $\pm$ 0,07
	после	1,01 $\pm$ 0,10	1,00 $\pm$ 0,10	0,99 $\pm$ 0,04	1,01 $\pm$ 0,06	0,94 $\pm$ 0,08	0,98 $\pm$ 0,06	1,17 $\pm$ 0,09

Примечание: ** — $p \geq 0,5$; * — $p < 0,5$, достоверность различий по сравнению с группой контроля.

PSD (табл. 3). Необходимо подчеркнуть более выраженные изменения в параметрах, характеризующих светочувствительность сетчатки у пациентов, находящихся на постоянной гипотензивной терапии.

У пациентов с ПОУГ II стадии, находящихся на максимальном медикаментозном режиме, после разгрузочной пробы, несмотря на достоверное снижение ВГД и тенденцию к улучшению световой чувствительности сетчатки, не наблюдалось достоверного восстановления ретиноматографических

показателей ГЗН, отмечена лишь тенденция. Этот факт можно объяснить более глубокими нарушениями в биомеханических свойствах структур ГЗН у пациентов ПОУГ II стадии, длительно страдающих глаукомой, не имеющих постоянной компенсации на максимальном медикаментозном режиме.

В группе пациентов с третьей стадией ПОУГ без гипотензивного режима длительность заболевания составила $6,9 \pm 2,1$ года. В этой группе среднее значение КР ГЗН составило $8,32 \pm 3,44$ мм рт.ст./мм³. Высокие значения КР ГЗН могут свидетельствовать

о выраженном увеличении ригидности структур ГЗН и окружающих ее тканей. После снижения офтальмотонуса светочувствительность сетчатки по данным периметрии (табл. 3) имела достоверную тенденцию к повышению функциональных результатов. Необходимо отметить, что на фоне резкого снижения ВГД в 7 (36,8%) случаях из 19 наблюдалось парадоксальное увеличение модулей периметрических индексов и сопутствующее снижение общей светочувствительности. Такие результаты, вероятно, могут быть связаны с резким снижением перфузионного давления при большом перепаде ВГД.

У пациентов с третьей стадией ПОУГ, находящихся на максимальном медикаментозном режиме, длительность заболевания в среднем составила $7,2 \pm 2,7$ года. Результаты разгрузочной пробы с глицероаскорбатом на фоне медикаментозного гипотензивного лечения показали достоверное снижение ВГД (как ИОРсс, так и ИОРг; $p < 0,001$), данные представлены в табл. 4. Периметрические индексы и общая светочувствительность сетчатки имели недостоверную тенденцию к изменению и продолжали соответствовать далеко зашедшей стадии глаукомы (табл. 3).

Результаты исследования стереометрических параметров ГЗН, по данным гейдельбергской томографии, не выявили значимых изменений на фоне снижения ВГД. КР ГЗН имел самое высокое значение по сравнению с таковым во всех остальных группах — $11,3 \pm 4,1$ мм рт.ст./мм³ (табл. 2).

Таким образом, результаты разгрузочной пробы с глицероаскорбатом в группе пациентов с III стадией ПОУГ с длительным анамнезом заболевания показали, что даже при приближении уровня офтальмотонуса к компенсации по данным соотношения СН/CRF, стереометрические параметры ГЗН изменяются недостоверно и незначительно.

Полученные данные могут свидетельствовать о декомпенсации биомеханических свойств фиброзной оболочки у пациентов с далеко зашедшей стадией ПОУГ.

Выводы

1. При проведении разгрузочных медикаментозных проб в начальной стадии ПОУГ на фоне достоверного снижения ВГД выявлено достоверное уменьшение объема экскавации ГЗН и увеличение объема нейроретинального пояса, что может свидетельствовать о сохраненной способности к восстановлению структур ГЗН и окружающих ее тканей. Эти результаты подтверждаются низкими значениями коэффициента ригидности ГЗН, сопоставимыми с группой контроля.

2. При проведении разгрузочных медикаментозных проб в развитой стадии глаукомы обнаружены значимые изменения ретинотомографических

параметров; коэффициент ригидности ГЗН достоверно увеличился — $5,7 \pm 1,1$ мм рт.ст./мм³ и положительно коррелировал с длительностью заболевания ПОУГ ($r=0,4$; $p=0,006$).

3. При проведении разгрузочных медикаментозных проб в далеко зашедшей стадии ПОУГ на фоне снижения ВГД минимальные недостоверные изменения объемных ретинотомографических параметров, высокие значения КР ГЗН ($8,6 \pm 3,6$ мм рт.ст./мм³) свидетельствуют о выраженном увеличении ригидности структур ГЗН и окружающих ее тканей.

4. При длительном течении заболевания на фоне постоянной медикаментозной терапии выявляются более выраженные изменения биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза и структур ГЗН.

5. Предложенный коэффициент ригидности ГЗН достоверно отражает степень влияния снижения ВГД на объем экскавации головки зрительного нерва, и повышение его может служить фактором риска прогрессирования ГОН.

Результаты проведенных исследований позволяют рекомендовать включение в комплекс обследования пациентов с первичной открытоугольной глаукомой расчет коэффициента ригидности ГЗН, что может служить прогностическим фактором для оценки возможного прогрессирования глаукомной оптической нейропатии.

Литература / References

1. Еричев В.П., Петров С.Ю., Козлова И.В., Макарова А.С. и др. Современные методы функциональной диагностики и мониторинга глаукомы. Часть 1. Периметрия как метод функциональных исследований. *Национальный журнал глаукома* 2015; 14(2):75-81. [Erichiev V.P., Petrov S.Yu., Kozlova I.V., Makarova A.S. et al. Modern methods of functional diagnostics and monitoring of glaucoma. Part 1. Perimetry as a functional diagnostics method. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma* 2015; 14(2):75-81. (In Russ.)].
2. Еричев В.П., Петров С.Ю., Макарова А.С., Козлова И.В. и др. Современные методы функциональной диагностики и мониторинга глаукомы. Часть 2. Диагностика структурных повреждений сетчатки и зрительного нерва. *Национальный журнал глаукома* 2015; 14(3):72-79. [Erichiev V.P., Petrov S.Yu., Kozlova I.V., Makarova A.S. et al. Modern methods of functional diagnostics and monitoring of glaucoma. Part 1. Diagnosis of structural damage of the retina and optic nerve. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma* 2015; 14(3):72-79. (In Russ.)].
3. Еричев В.П., Петров С.Ю., Козлова И.В., Макарова А.С. и др. Современные методы функциональной диагностики и мониторинга глаукомы. Часть 3. Роль морфофункциональных взаимоотношений в раннем выявлении и мониторинге глаукомы. *Национальный журнал глаукома* 2016; 15(2):96-101. [Erichiev V.P., Petrov S.Yu., Kozlova I.V., Makarova A.S. et al. Modern methods of functional diagnostics and monitoring of glaucoma. Part 3. The role of the morphological and functional relationships in the early detection and monitoring of glaucoma. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma* 2016; 15(2):96-101. (In Russ.)].
4. Airaksinen P.J., Drance S.M., Douglas G.R., Mawson D.K., Nieminen H. Diffuse and localized nerve fiber loss in glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1984; 98(5):566-571.
5. Sommer A., Katz J., Quigley H.A., Miller N.R., Robin A.L., Richter R.C., et al. Clinically detectable nerve fiber atrophy precedes the onset of glaucomatous field loss. *Arch Ophthalmol* 1991; 109(1):77-83.

6. Борисова С.А., Никитин Ю.М., Еричев В.П. Ультразвуковое доплерографическое исследование кровотока в орбитальных сосудах у больных первичной глаукомой. *Ультразвуковая и функциональная диагностика* 1997; 2:8-12. [Borisova S.A., Nikitin Yu.M., Elichev V.P. Ultrasound doppler sonography study blood flow in vessels orbiting in patients with primary glaucoma. *Ultrasonic and functional diagnostics* 1997; 2:8-12. (In Russ.)].
7. Куроедов А.В., Авдеев Р.В., Александров А.С., Бакунина Н.А., Басинский А.С., Блюм Е.А. и др. Предполагаемый возраст пациентов и период болезни для проведения интенсивных лечебно-профилактических манипуляций при первичной глаукоме. *Офтальмология Восточная Европа* 2014; 3(22): 60-71. [Kuroedov A.V., Avdeev R.V., Aleksandrov A.S., Bakunina N.A., Basinskii A.S., Blyum E.A. et al. The estimated age of the patients and the duration of the illness for intensive treatment and prevention of manipulation for primary glaucoma. *Ophthalmology Eastern Europe* 2014; 3(22):60-71. (In Russ.)].
8. Егорова И.В., Шамшинова А.М., Еричев В.П. Функциональные методы исследования в диагностике глаукомы. *Вестник офтальмологии* 2001; 117(6):38-40. [Egorova I.V., Shamshinova A.M., Elichev V.P. Functional methods in the glaucoma diagnostics. *Vestn Oftalmol* 2001; 117(6):38-40. (In Russ.)].
9. Кугоева Е.Э., Подгорная Н.Н., Шерстнева Л.В., Петров С.Ю., Черкашина А.В. Изучение гемодинамики глаза и общесоматического статуса больных с первичной открытоугольной глаукомой. *Вестник офтальмологии* 2000; 116(4):26-28. [Kugoeva E.E., Podgornaya N.N., Shersrueva L.V., Petrov S.Yu., Cherkashina A.V. The study of eye hemodynamics and somatic status of patients with primary open angle glaucoma. *Vestn Oftalmol* 2000; 116(4):26-28. (In Russ.)].
10. Куроедов А.В., Еричев В.П., Ходыкина Н.П., Городничий В.В. и др. О корреляционных взаимоотношениях между суточными колебаниями внутриглазного давления и морфометрической структурой диска зрительного нерва. *Офтальмология* 2006; 3(1):43-49. [Kuroedov A.V., Elichev V.P., Khodykina N.P., Gorodnichii V.V. et al. Correlation relationship between daily fluctuations in intraocular pressure and morpho-metric structure of the optic nerve. *Ophthalmology* 2006; 3(1):43-49. (In Russ.)].
11. Городничий В.В., Дорофеев Д.А., Завадский П.Ч., Зверева О.Г., Каримов У.Р., Кулик А.В., Куроедов А.В. и др. Факторы риска, патогенные факторы развития и прогрессирования глаукомы по результатам многоцентрового исследования российского глаукомного общества. *Медико-биологические проблемы жизнедеятельности* 2012; 2(8):57-69. [Gorodnichii V.V., Dorofeev D.A., Zavadskii P.Ch., Zvereva O.G., Karimov U.R., Kulik A.V., Kuroedov A.V. et al. Prediction of the duration of the disease and the age of patients with different stages of primary open-angle glaucoma. *Medical and Biological Problems of Life Activity* 2012; 2(8):57-69. (In Russ.)].
12. Шамшинова А.М., Еричев В.П., Егорова И.В. Нарушения цветовой и контрастной чувствительности в диагностике глаукомы. *Глаукома* 2002; 1:2-7. [Shamshinova A.M., Elichev V.P., Egorova I.V. Violations of color and contrast sensitivity in the diagnosis of glaucoma. *Glaucoma* 2002; 1:2-7. (In Russ.)].
13. Шмырева В.Ф., Зиангирова Г.Г., Мазурова Ю.В., Петров С.Ю. Клинико-морфологическая характеристика дренажной зоны склеры при глаукоме нормального внутриглазного давления. *Вестник офтальмологии* 2007; 123(6):32-35. [Shmyreva V.F., Ziangirova G.G., Mazurova Yu.V., Petrov S.Yu. Clinical and morphological characteristics of the scleral drainage area in normotensive glaucoma. *Vestn Oftalmol* 2007; 123(6):32-35. (In Russ.)].
14. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Петров С.Ю., Антонов А.А., Решичкова В.С. Особенности биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой. *Национальный журнал глаукома* 2012; 4:7-12. [Avetisov S.E., Bubnova I.A., Petrov S.Yu., Antonov A.A., Reshchikova V.S. Features of the biomechanical properties of the fibrous membrane of the eye in patients with primary open-angle glaucoma. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma* 2012; 4:7-12. (In Russ.)].
15. Шмырева В.Ф., Петров С.Ю., Антонов А.А., Данилов С.С. Исследование суточных колебаний офтальмотонуса у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой при монотерапии тимололом, латанопростом и травопростом. *РМЖ. Клиническая офтальмология* 2010; 11(4):125-127. [Shmyreva V.F., Petrov S.Yu., Antonov A.A., Danilov S.S. The study of daily IOP fluctuations in patients with primary open-angle glaucoma as monotherapy with timolol, latanoprost and travoprost. *RMJ Clinical Ophthalmology* 2010; 11(4):125-127. (In Russ.)].
16. Еричев В.П., Еремина М.В., Якубова Л.В., Арефьева Ю.А. Анализатор биомеханических свойств глаза в оценке вязкоэластических свойств роговицы в здоровых глазах. *Глаукома* 2007; 1:11-15. [Elichev V.P., Eryomina M.V., Yakubova L.V., Arefyeva U.A. Ocular Response Analyzer in valuation of cornea's viscoelastic properties in normal eyes. *Glaucoma* 2007; 1:11-15. (In Russ.)].
17. Арутюнян Л.Л., Еричев В.П., Филиппова О.М., Акопян А.И. Вязкоэластические свойства роговицы при первичной открытоугольной глаукоме. *Глаукома* 2007; 2:14-19. [Arutyunyan L.L., Elichev V.P., Filippova O.M., Akopyan A.I. Viscoelastic properties of the cornea in primary open-angle glaucoma. *Glaucoma* 2007; 2:14-19. (In Russ.)].
18. Аветисов С.Э., Мамиконян В.Р., Казарян Э.Э., Шмелева-Демир О.А., Галоян Н.С., Мазурова Ю.В. и др. Результаты клинической оценки нового скринингового метода определения индивидуальной нормы внутриглазного давления. *Вестник офтальмологии* 2010; 126(2):5-7. [Avetisov S.E., Mamikonyan V.R., Kazaryan E.E., Shmeleva-Demir O.A., Galoyan N.S., Mazurova Yu.V. et al. The results of the clinical evaluation of a new screening method for determining an individual rate of intraocular pressure. *Vestn Oftalmol* 2010; 126(2):5-7. (In Russ.)].
19. Аветисов С.Э., Мамиконян В.Р., Казарян Э.Э., Шмелева-Демир О.А., Мазурова Ю.В., Рыжкова Е.Г. и др. Новый скрининговый метод определения толерантного внутриглазного давления. *Вестник офтальмологии* 2009; 125(5):3-7. [Avetisov S.E., Mamikonyan V.R., Kazaryan E.E., Shmeleva-Demir O.A., Mazurova Yu.V., Ryzhkova E.G. et al. New screening method for determining the tolerance of intraocular pressure. *Vestn Oftalmol* 2009; 125(5):3-7. (In Russ.)].
20. Еремина М.В., Еричев В.П., Якубова Л.В. Влияние центральной толщины роговицы на уровень внутриглазного давления в норме и при глаукоме. *Глаукома* 2006; 4:78-83. [Eremina M.V., Elichev V.P., Yakubova L.V. Effect of central corneal thickness at the level of intraocular pressure in normal and in glaucoma. *Glaucoma* 2006; 4:78-83. (In Russ.)].
21. Аветисов С.Э., Мамиконян В.Р., Завалишин Н.Н., Ненюков А.К. Экспериментальное исследование механических характеристик роговицы и прилегающих участков склеры. *Офтальмологический журнал* 1988; 4:233-237. [Avetisov S.E., Mamikonyan V.R., Zavalishin N.N., Nenyukov A.K. Experimental study of mechanical properties of the cornea and sclera adjacent areas. *Oftalmologicheskii Zhurnal* 1988; 4:233-237. (In Russ.)].
22. Нестеров А.П., Егоров Е.А. Глаукоматозная атрофия зрительного нерва. М.: Медицина, 1981; 22-53. [Glaukomatoznaya atrofiya zritel'nogo nerva [Glaucomatous optic neuropathy]. Moscow, Meditsina Publ., 1981; 22-53].
23. Ethier C.R., Johnson M., Ruberti J. Ocular biomechanics and biotransport. *Annual Review of Biomedical Engineering* 2004; 6:249-273. doi:10.1146/annurev.bioeng.6.040803.140055.
24. Светлова О.В., Балашевич Л.И., Засеева М.В., Дроздова Г.А., Макаров Ф.Н., Кошиц И.Н. Физиологическая роль ригидности склеры в формировании уровня внутриглазного давления в норме и при глаукоме. *Глаукома* 2010; 1: 26-40. [Svetlova O.V., Balashevich L.I., Zaseeva M.V., Drozdova G.A., Makarov F.N., Koshits I.N. The physiological role of the sclera rigidity for the IOP level in normal and glaucoma subjects. *Glaucoma* 2010; 1: 26-40. (In Russ.)].
25. Светлова О.В., Кошиц И.Н. Физиологические функции фиброзной оболочки глаза и их исполнительные механизмы. Нормальная и патологическая физиология глаза. СПб: Издательство ГБОУ ВПО СЗГМУ им. И.И. Мечникова, 2013; 19 с. [Svetlova O.V., Koshits I.N. Fiziologicheskie funktsii fibroznoi obolochki glaza i ikh ispolnitel'nye mekhanizmy. Normal'naya i patologicheskaya fiziologiya glaza [Physiological functions of the tunica fibrosa oculi and its executive mechanisms. Normal and pathologic physiology of the eye]. Sankt-Petersburg, GBOU VPO SZGMU im. I.I. Mechnikova Publ., 2013; 19 p. (In Russ.)].

26. Светлова О.В., Рябцева А.А., Засеева М.В. Функциональное состояние склеры — необходимое патогенетическое звено в диагностике, профилактике и лечении открытоугольной глаукомы. Эффективная фармакотерапия. *Офтальмология* 2012; 1:44-45; 55-56. [Svetlova O.V., Ryabtseva A.A., Zaseeva M.V. Sclera functional status is a necessary component for primary glaucoma diagnostics, precaution and treatment. Effective management]. *Ophthalmology* 2012; 1:44-45, 55-56. (In Russ.).]
27. Нестеров А.П. Основные принципы диагностики первичной открытоугольной глаукомы. *Вестн офтальмологии* 1998; 2:3-6. [Nesterov A.P. The main diagnostics primary open-angle glaucoma principles. *Vestn Oftalmol* 1998; 2:3-6 (In Russ.).]
28. Нестеров А.П. Глаукома. М: Медицина, 1995; 256 с. [Nesterov A.P. Glaucoma. Moscow, Meditsina Publ., 1995; 256 p. (In Russ.).]
29. Friedenwald J.S., Rytel D. Contribution to the histopathology of cataract. *AMA Arch Ophthalmol* 1955; 53(6):825-831.
30. Holland M.G., Madison J., Bean W. The ocular rigidity function. *Am J Ophthalmol* 1960; 50:958-974.
31. Hommer A., Fuchsjäger-Mayrl G., Resch H., Vass C., Garhofer G., Schmetterer L. Estimation of ocular rigidity based on measurement of pulse amplitude using pneumotonometry and fundus pulse using laser interferometry in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008; 49(9):4046-4050. doi:10.1167/iovs.07-1342.
32. Woo S.L., Kobayashi A.S., Schlegel W.A., Lawrence C. Nonlinear material properties of intact cornea and sclera. *Exp Eye Res* 1972; 14(1):29-39.
33. Römer P. Руководство по глазным болезням в форме клинических лекций. Т. 2. С.-Петербург: Практическая медицина (В.С. Эттингер), 1913; 805 с. [Römer P. Rukovodstvo po glaznym boleznyam v forme klinicheskikh lektzii. Vtoroi tom. [Eye diseases Guideline: clinical lectures] S.-Peterburg, Prakticheskaya meditsina (V.S. Ettinger) Publ., 1913; 805 p. (In Russ.).]
34. Синеок А.Е., Золотарев А.В., Карлова Е.В., Шевченко М.В., Милудин Е.С. Ригидность глаза в эксперименте. *Российский офтальмологический журнал* 2011; 4(3):73-77. [Sineok A.E., Zolotarev A.V., Karlova E.V., Shevchenko M.V., Milyudin E.S. Eye rigidity experiment. *Russian Ophthalmological J* 2011; 4(3):73-77. (In Russ.).]
35. Кошиц И.Н., Светлова О.В., Котляр К.Е., Макаров Ф.Н., Смольников Б.А. Биомеханический анализ традиционных и современных представлений о патогенезе первичной открытоугольной глаукомы. *Глаукома* 2005; 1:41-62. [Koshits I.N., Svetlova O.V., Kotlyar K.E., Makarov F.N., Smol'nikov B.A. Biomechanical analysis of the traditional and current views on primary open-angle glaucoma pathogenesis. *Glaucoma* 2005; 1:41-62. (In Russ.).]
36. Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Christodoulakis E., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in patients with age-related macular degeneration. *Am J Ophthalmol* 2006; 141(4):611-615. doi:10.1016/j.ajo.2005.11.010.
37. Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in living human eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005; 46(2):409-414. doi:10.1167/iovs.04-0162.
38. Абрамов В.Г., Акпатов А.И. Коэффициент ригидности глаза в свете повторных измерений. *Вестник офтальмологии* 1983; 1:14-17. [Abramov V.G., Akpatov A.I. Repeat determination of the ocular rigidity coefficient. *Vestn Oftalmol* 1983; 1:14-17. (In Russ.).]
39. Акпатов А.И., Кустов В.Н. О зависимости между коэффициентом ригидности и объемом глаза. *Вестник офтальмологии* 1978; 6:15-17. [Akpatov A.I., Kustov V.N. Relationship between ocular rigidity coefficient and eye volume. *Vestn Oftalmol* 1978; 6:15-17. (In Russ.).]
40. Астахов Ю.С., Даль Н.Ю. Вакуум-компрессионный автоматизированный тест в ранней диагностике глаукомы и первые результаты его применения. *Глаукома* 2001; 1:17-19. [Astakhov Yu.S., Dal' N.Yu. Diagnostic consideration of the vacuum compressive automatic test in early diagnostics of glaucoma. First results. *Glaucoma* 2001; 1:17-19. (In Russ.).]
41. Астахов Ю.С., Даль Н.Ю., Акопов Е.Л. Оценка изменений диска зрительного нерва при вакуум-компрессионной нагрузке при помощи Гейдельбергского ретинального томографа HRT-II (предварительное сообщение). *Клиническая офтальмология* 2003; 2:4:70-72. [Astakhov Yu.S., Dal' N.Yu., Akopov E.L. Evaluating optic disc changes after vacuum compressive test by Heidelberg Retina Tomograph HRT-II. *RMJ Clinical Ophthalmology* 2003; 2;4:70-72. (In Russ.).]
42. Астахов Ю.С., Акопов Е.Л., Даль Н.Ю., Потемкин В.В. Хронопериметрическая модификация вакуум-компрессионного автоматизированного теста. *Глаукома* 2004; 1:15-17. [Astakhov Yu.S., Akopov E.L., Dal' N.Yu., Potemkin V.V. Chronoperimetrical modification of the vacuum compressive automatic test. *Glaucoma* 2004; 1:15-17. (In Russ.).]
43. Страхов В.В., Корчагин Н.В., Попова А.А. Биомеханический аспект формирования глаукомной экскавации. *Глаукома* 2015; 3:58-71. [Strakhov V.V., Korchagin N.V., Popova A.A. The biomechanical aspect of the pathological optic disc cupping development in glaucoma. *Glaucoma* 2015; 3:58-71. (In Russ.).]

Поступила 05.07.2016