

Оптическая когерентная томография переднего сегмента глаза в оценке оптической плотности и неоднородности трабекулярной сети и перилимбальной склеры при открытоугольной глаукоме

Першин К.Б., д.м.н., профессор, медицинский директор сети офтальмологических клиник¹, профессор кафедры офтальмологии²; <https://orcid.org/0000-0003-3445-8899>

Пашинова Н.Ф., д.м.н., главный врач¹, профессор, профессор кафедры офтальмологии²; <https://orcid.org/0000-0001-5973-0102>

Цыганков А.Ю., к.м.н., врач-офтальмолог, научный референт медицинского директора сети клиник¹; <https://orcid.org/0000-0001-9475-3545>

Панов А.А., врач-офтальмолог¹, аспирант кафедры офтальмологии². <https://orcid.org/0000-0002-2547-5913>

¹Офтальмологический центр «Эксимер», 109147, Российская Федерация, Москва, ул. Марксистская, 3, стр. 1;

²АПО ФГБУ ФНКЦ ФМБА России, 125371, Российская Федерация, Москва, Волоколамское шоссе, 91.

Финансирование: авторы не получали финансирование при проведении исследования и написании статьи.

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Першин К.Б., Пашинова Н.Ф., Цыганков А.Ю., Панов А.А. Оптическая когерентная томография переднего сегмента глаза в оценке оптической плотности и неоднородности трабекулярной сети и перилимбальной склеры при открытоугольной глаукоме. *Национальный журнал глаукома*. 2025; 24(2):29-39.

Резюме

ЦЕЛЬ. Изучение оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры и трабекулярной сети при открытоугольной глаукоме и без нее.

МЕТОДЫ. Включено 49 пациентов (89 глаз), которых разделили на 2 группы: опытную (45 глаз с открытоугольной глаукомой I–IV стадий) и контрольную (44 глаза без глаукомы). Проводили стандартные офтальмологические обследования и сканирование угла передней камеры глаза в 4 квадрантах с помощью оптической когерентной томографии (ОКТ). Анализировали параметры оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры и трабекулярной сети.

РЕЗУЛЬТАТЫ. В опытной группе отмечали большую оптическую плотность трабекулярной сети в нижнем квадранте по сравнению с контрольной группой. Этот показатель положительно коррелировал с уровнем внутриглазного давления (ВГД).

В опытной группе выявлена меньшая неоднородность перилимбальной склеры в височном квадранте по сравнению с контрольной группой. С увеличением стадии глаукомы отмечалась тенденция к снижению ее оптической плотности в нижнем квадранте. Изменения перилимбальной склеры не коррелировали с ВГД.

Оптическая плотность трабекулярной сети в верхнем квадранте, а также перилимбальной склеры во всех квадрантах отрицательно коррелировали с возрастом. Неоднородность перилимбальной склеры в височном и нижнем квадрантах положительно коррелировала с возрастом; в височном, верхнем и нижнем квадрантах отрицательно коррелировала с аксиальной длиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Оптическая плотность и неоднородность перилимбальной склеры и трабекулярной сети различаются в норме и при открытоугольной глаукоме. Отдельные показатели меняются в зависимости от стадии глаукомы и коррелируют с уровнем ВГД. Изменения оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры и трабекулярной сети, выявляемые с помощью ОКТ, согласуются с данными патоморфологических исследований, поэтому их потенциально можно использовать в клинической практике в качестве предикторов развития и прогрессирования открытоугольной глаукомы. Необходимы дальнейшие исследования на большей когорте пациентов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оптическая плотность, склера, трабекулярная сеть, открытоугольная глаукома, оптическая когерентная томография, ОКТ, ImageJ, глаукома, внутриглазное давление

Для контактов:

Цыганков Александр Юрьевич, e-mail: alexsysyankov1986@yandex.ru

ORIGINAL ARTICLE

Anterior segment optical coherence tomography in the assessment of optical density and heterogeneity of the trabecular meshwork and perilimbal sclera in open-angle glaucoma

PERSHIN K.B., Dr. Sci. (Med.), Professor, Medical director of the Ophthalmic Clinics Network¹, Professor at the Academic Department of Ophthalmology²; <https://orcid.org/0000-0003-3445-8899>

PASHINOVA N.F., Dr. Sci. (Med.), Professor, Chief Physician¹, Professor at the Academic Department of Ophthalmology²; <https://orcid.org/0000-0001-5973-0102>

TSYGANKOV A.YU., Cand. Sci. (Med.), ophthalmologist, scientific assistant of the Medical Director¹; <https://orcid.org/0000-0001-9475-3545>

PANOV A.A., ophthalmologist¹, postgraduate student at the Academic Department of Ophthalmology². <https://orcid.org/0000-0002-2547-5913>

¹Ophthalmological center "Eximer", 3/1 Marksistskaya St., Moscow, Russian Federation, 109147;

²Academy of Postgraduate Education of the Federal Medical-Biological Agency, 91 Volokolamskoe av., Moscow, Russian Federation, 125371.

Funding: the authors received no specific funding for this work.

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Pershin K.B., Pashinova N.F., Tsygankov A.Yu., Panov A.A. Anterior segment optical coherence tomography in the assessment of optical density and heterogeneity of the trabecular meshwork and perilimbal sclera in open-angle glaucoma. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2025; 24(2):29-39.

Abstract

PURPOSE. To study the optical density and heterogeneity of perilimbal sclera and trabecular meshwork in individuals with and without open-angle glaucoma.

METHODS. The study included 49 patients (89 eyes), divided into two groups: the study group (45 eyes with open-angle glaucoma stages I–IV) and the control group (44 eyes without glaucoma). All patients underwent standard ophthalmological examinations recommended for glaucoma, as well as anterior chamber angle scanning in four quadrants using anterior segment optical coherence tomography (OCT). Parameters of optical density and heterogeneity of the perilimbal sclera and trabecular meshwork were analyzed.

RESULTS. In the study group, the optical density of the trabecular meshwork was higher in the inferior quadrant than in the control group, with a positive correlation to intraocular pressure (IOP).

The study group also exhibited lower heterogeneity of the perilimbal sclera in the temporal quadrant compared to the control group. A trend toward reduced optical density in the inferior quadrant as glaucoma stage progressed

was observed. Changes in the perilimbal sclera did not correlate with IOP.

The optical density of the trabecular meshwork in the superior quadrant and of the perilimbal sclera in all quadrants negatively correlated with age. Meanwhile, perilimbal scleral heterogeneity in the temporal and inferior quadrants positively correlated with age, while in the temporal, superior, and inferior quadrants, it negatively correlated with axial length.

CONCLUSION. The optical density and heterogeneity of the perilimbal sclera and trabecular meshwork differ between normal and glaucomatous eyes. Specific parameters vary with glaucoma stage and correlate with IOP. Changes in the optical density and heterogeneity of these structures, as identified by OCT, are consistent with the histopathological findings, suggesting their potential use in clinical practice as predictors of the development and progression of open-angle glaucoma. Further studies on a larger cohort of patients are needed.

KEYWORDS: optical density, sclera, trabecular meshwork, open-angle glaucoma, optical coherence tomography, OCT, ImageJ, glaucoma, intraocular pressure

Глаукома — группа заболеваний, для которой характерны гибель ганглиозных клеток сетчатки, появление экскавации диска зрительного нерва (ДЗН) и возникающие вследствие этого дефекты полей зрения. По патогенезу ее делят на открытоугольную и закрытоугольную [1]. Первая является более распространенной в большинстве стран мира, включая Российскую Федерацию [2]. Несмотря на успехи в лечении открытоугольной глаукомы, она до сих пор остается ведущей причиной необратимой потери зрения [3]. Этот факт свидетельствует о том, что механизмы развития данной болезни не полностью изучены и ясны.

Гистологический (патоморфологический) метод позволяет исследовать патогенез многих заболеваний, включая глаукому, однако он не лишен недостатков: инвазивность, длительность, трудоемкость, зависимость от качества взятия и подготовки

гистологического материала, наличие посмертных изменений тканей, артефактов фиксации и др. Технология оптической когерентной томографии (ОКТ) обладает преимуществами перед гистологическим исследованием: она неинвазивна, дает возможность получить результат быстрее и с меньшими трудозатратами, является менее «оператор-зависимым» методом, а также позволяет изучать ткани в реальном времени *in vivo*. Благодаря высокому разрешению и вышеперечисленным достоинствам, ОКТ возможно использовать в ситуациях, когда применение патоморфологического метода (например, биопсии), представляется чрезмерно опасным, невозможным или нецелесообразным [4]. ОКТ получила широкое распространение в офтальмологии [5].

В настоящее время существует достаточно большое число работ, посвященных ОКТ-морфометрии структур угла передней камеры (УПК) глаза: трабекулярной сети, шлеммова канала, склеральной

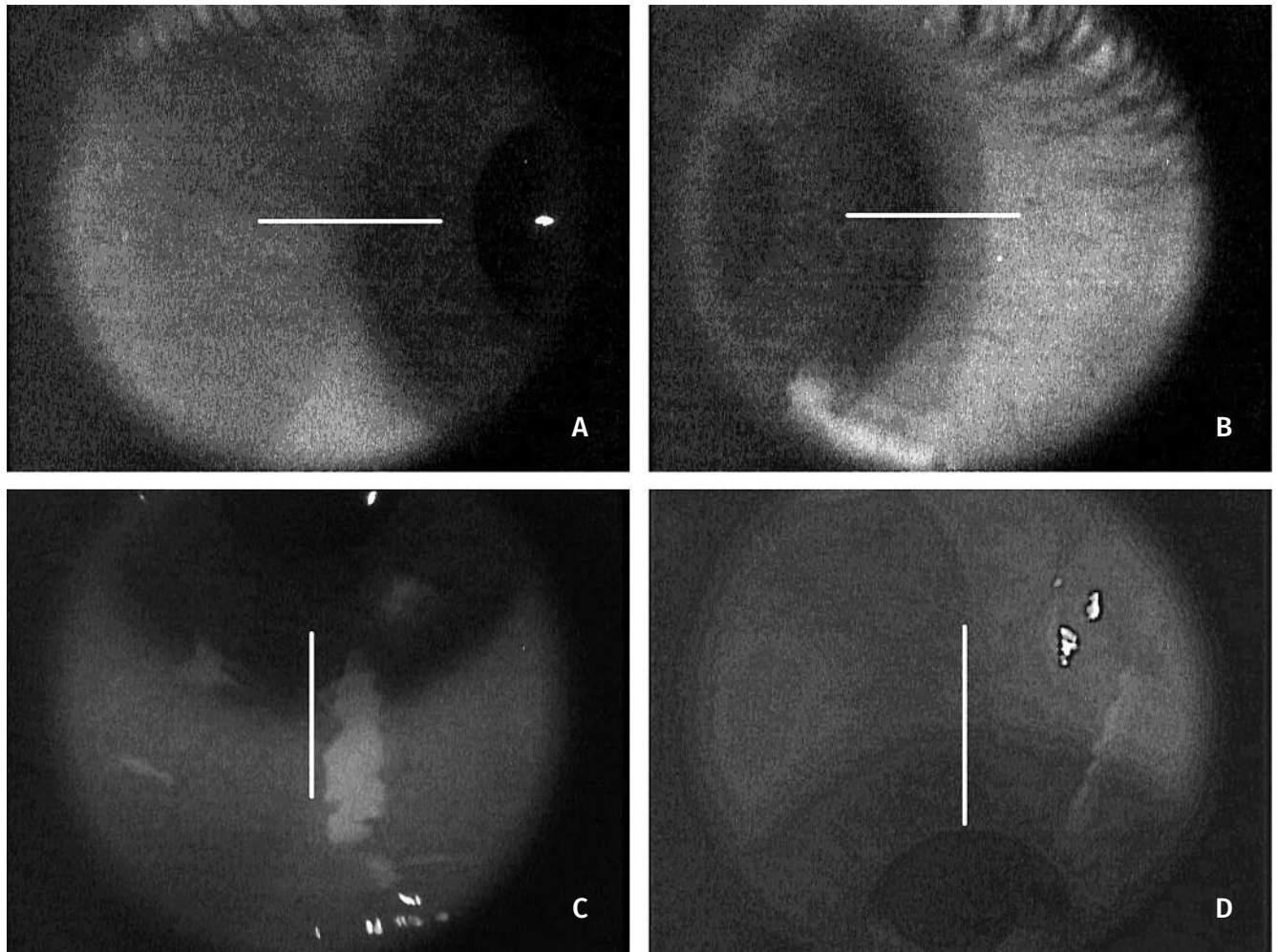


Рис. 1. Схема сканирования УПК правого глаза. Белая линия соответствует положению скана. А — височный квадрант, В — носовой квадрант, С — нижний квадрант, D — верхний квадрант.

Fig. 1. Scheme of anterior chamber angle scanning, right eye. The white line corresponds to the scan position. A — temporal quadrant, B — nasal quadrant, C — inferior quadrant, D — superior quadrant.

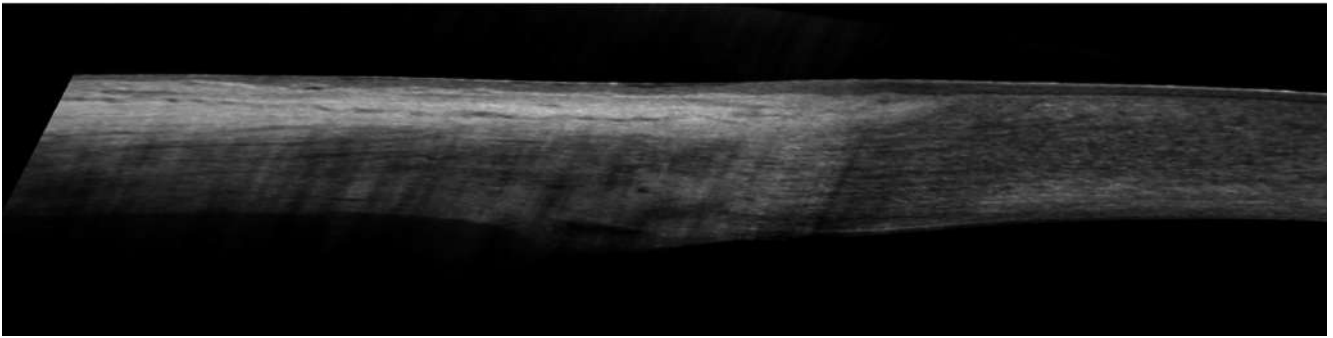


Рис. 2. Пример ОКТ-скана УПК.

Fig. 2. Example of an OCT scan of the anterior chamber angle.

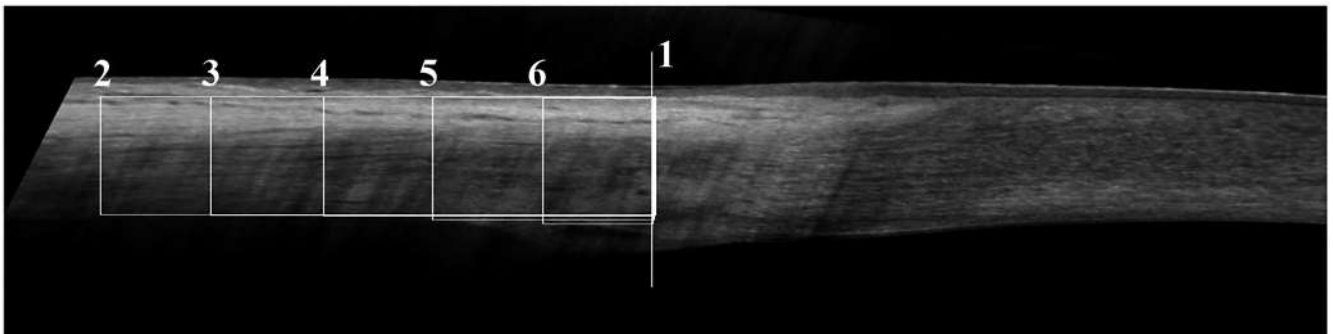


Рис. 3. Схема проведения морфометрии склеральной ткани.

Fig. 3. Scheme of scleral tissue morphometry.

шпоры как в норме, так и при глаукоме. Эти исследования сфокусированы на измерении их линейных размеров [6–8]. Так, при открытоугольной глаукоме отмечается уменьшение площади [6, 7] и линейных размеров шлеммова канала [7], укорочение склеральной шпоры [8]. При этом вопрос изменения оптической плотности структур УПК в норме и при глаукоме и его влияния на течение заболевания остается недостаточно изученным.

Цель данной работы — изучение оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры и трабекулярной сети у лиц с первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ) и без нее.

Материалы и методы

В исследование было включено 49 пациентов (13 мужчин и 36 женщин), 89 глаз (44 глаза — без глаукомы; 45 глаз — с ПОУГ: I стадии — 24 глаза, II стадии — 10 глаз, III стадии — 5 глаз, IV стадии — 6 глаз).

Критериями не включения являлись новообразование конъюнктивы, эписклеры и склеры (поскольку они препятствуют адекватной ОКТ-визуализации), антиглаукомные операции в анамнезе, закрытоугольная глаукома.

Всем пациентам были проведены следующие исследования: авторефрактометрия, визометрия, пневмотонометрия, оптическая биометрия,

статическая периметрия, биомикроскопия, гониоскопия, офтальмоскопия, ОКТ-сканирование ДЗН и УПК.

ОКТ-сканирование УПК проводили в скотопических условиях без медикаментозного мидриаза на томографе RTVue XR Avanti в режиме Angle (1 линейный скан длиной 6 мм) в 4 квадрантах: височном, носовом (на 3 и 9 часах — ориентация скана горизонтальная), нижнем и верхнем (на 6 и 12 часах — ориентация скана вертикальная). Середину линейного скана располагали в области лимба (рис. 1).

Сканы экспортировали в исходном формате (OCT), дальнейший анализ проводили в формате ImageJ. Все изображения переводили в формат 8-bit, устанавливали масштаб (6×2,25 мм), поворачивали таким образом, чтобы зона видимой на скане склеры располагалась параллельно горизонтали, вносили поправку на яркость фона: вручную выделяли область выше эпителия конъюнктивы и роговицы, определяли ее медианную яркость (интенсивность) пикселей и это значение вычитали из яркости каждого пикселя на изображении. Пример получаемого изображения представлен на рис. 2.

Морфометрию перилимбальной склеры проводили по следующему алгоритму: определяли самую близкую к роговице точку шлеммова канала, через нее проводили вертикальную линию (линия 1 на рис. 3). От этой линии отмеряли

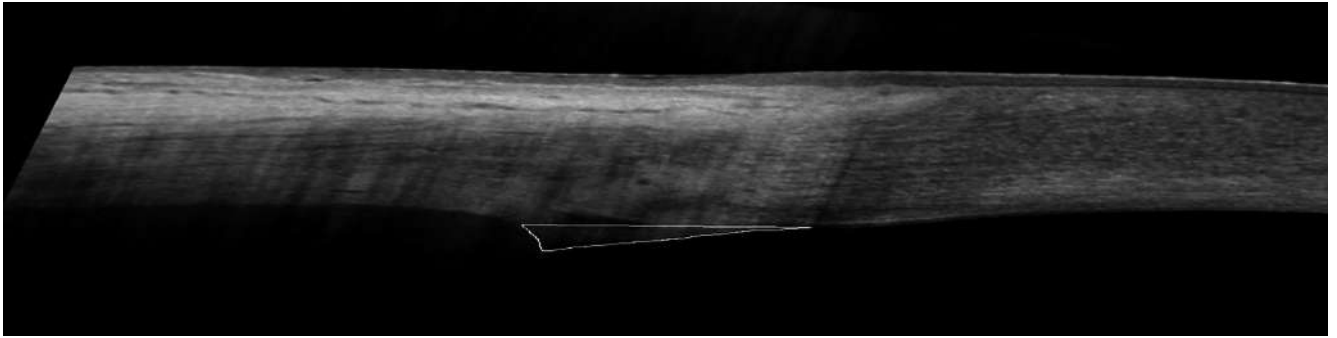


Рис. 4. Схема проведения морфометрии трабекулярной сети.

Fig. 4. Scheme of trabecular meshwork morphometry.

Таблица 1. Общая характеристика пациентов опытной и контрольной группы.

Table 1. General characteristics of patients in the study and control groups.

Параметр Parameter	Опытная группа Study group	Контрольная группа Control group	p
Возраст, лет Age, years	71 (63; 78)	66 (60; 72)	0,084
Аксиальная длина, мм Axial length, mm	24,03 (23,3; 25,98)	24,01 (23,37; 24,44)	0,167
ВГД, мм рт.ст. IOP, mm Hg	18 (15; 22)	15 (13; 18)	0,002

прямоугольные области (сегменты) длиной 2,5 мм, 2,0 мм, 1,5 мм, 1,0 мм и 0,5 мм (прямоугольники 2–6 соответственно, на рис. 3); верхняя граница прямоугольных областей — эпителий конъюнктивы, нижняя — цилиарное тело (рис. 3, прямоугольники 2–5) или граница шлеммова канала (рис. 3, прямоугольник 6). Для каждого из сегментов определяли оптическую плотность ткани и ее неоднородность. В предварительном исследовании на 30 сканах распределение пикселей по яркости не соответствовало нормальному ни в одной из используемых для исследования областей, поэтому в качестве меры оптической плотности выбрана медианная яркость пикселей в выделенной области, в качестве меры неоднородности ткани — межквартильный размах.

Контуры среза трабекулярной сети обводили вручную. Для выделенной области определяли оптическую плотность ткани и ее неоднородность (рис. 4). В предварительном исследовании на 30 сканах распределение пикселей по яркости не соответствовало нормальному ни в одной из используемых для исследования областей, поэтому в качестве меры оптической плотности выбрана медианная яркость пикселей в выделенной области, в качестве меры неоднородности ткани — межквартильный размах.

Статистический анализ проводили в программе STATISTICA 7.0. Для определения нормальности распределения выборок использовали критерий Шапиро – Уилка. Данные, соответствующие нормальному распределению, представлены как $M \pm \sigma$; не соответствующие таковому — как медиана (нижний квартиль; верхний квартиль). Для сравнения двух групп использовали t-критерий Стьюдента для независимых выборок (для нормально распределенных данных), U-критерий Манна – Уитни (для данных, не распределенных нормально). Сравнение нескольких групп проводили с помощью критерия Краскелла – Уоллиса. Для выявления корреляций использовался коэффициент корреляции Спирмена. Значение $p < 0,05$ считали статистически значимым.

Результаты

Опытная и контрольная группы значимо не отличались по полу ($p=0,065$ — критерий χ^2), возрасту ($p=0,084$ — U-критерий Манна – Уитни) и аксиальной длине ($p=0,167$ — U-критерий Манна – Уитни). Внутриглазное давление (ВГД) было значимо выше в группе глаукомы ($p=0,002$ — U-критерий Манна – Уитни). Характеристики обеих групп представлены в табл. 1.

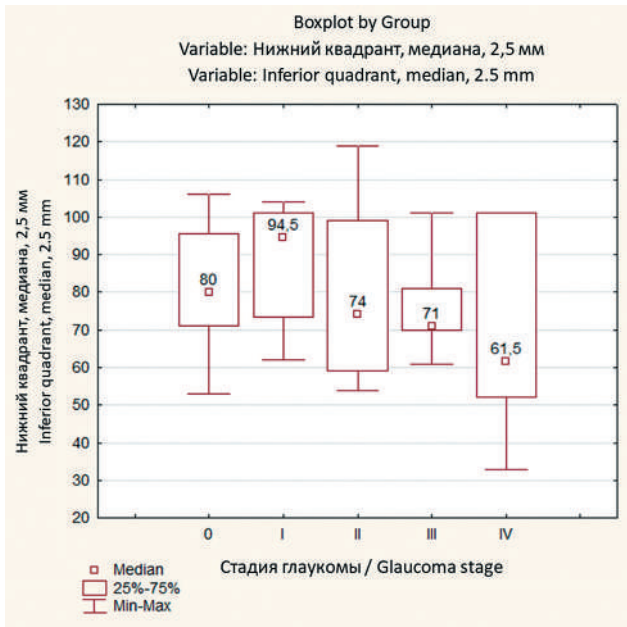


Рис. 5. Медиана яркости пикселей в нижнем квадранте перилимбальной склеры на расстоянии 2,5 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в зависимости от стадии глаукомы.

Fig. 5. Median pixel brightness in the inferior quadrant of the perilimbal sclera at a distance of 2.5 mm from the point of the Schlemm's canal closest to the cornea, depending on glaucoma stage.

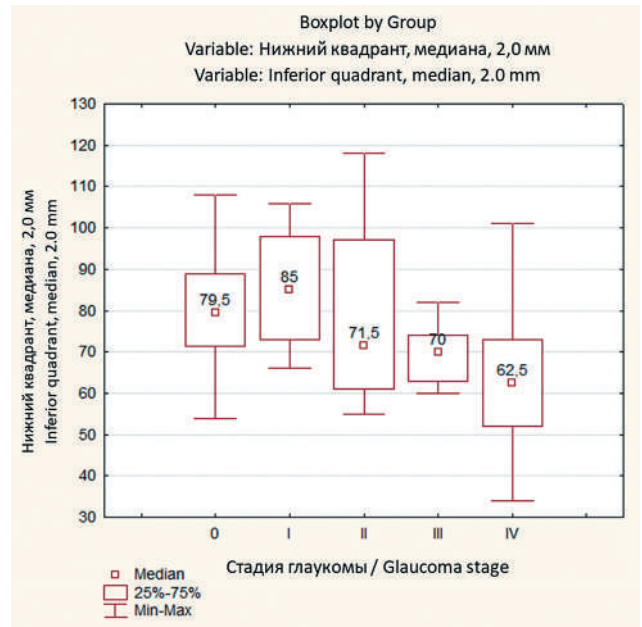


Рис. 6. Медиана яркости пикселей в нижнем квадранте перилимбальной склеры на расстоянии 2,0 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в зависимости от стадии глаукомы.

Fig. 6. Median pixel brightness in the inferior quadrant of the perilimbal sclera at a distance of 2.0 mm from the point of the Schlemm's canal closest to the cornea, depending on glaucoma stage.

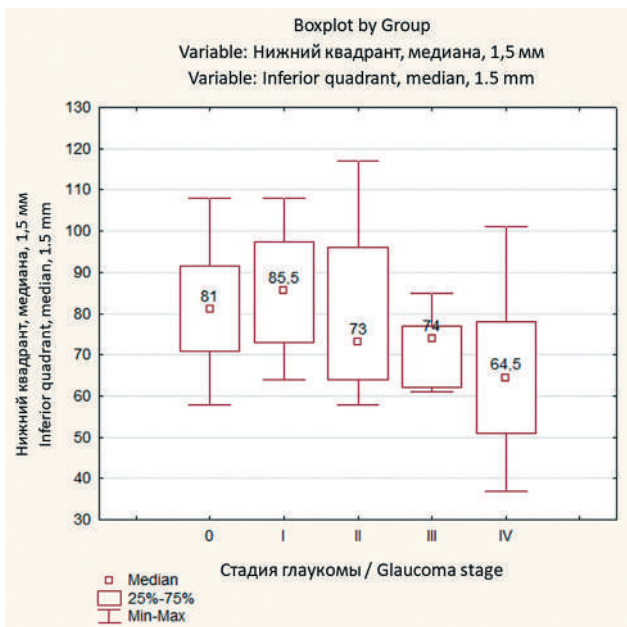


Рис. 7. Медиана яркости пикселей в нижнем квадранте перилимбальной склеры на расстоянии 1,5 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в зависимости от стадии глаукомы.

Fig. 7. Median pixel brightness in the inferior quadrant of the perilimbal sclera at a distance of 1.5 mm from the point of the Schlemm's canal closest to the cornea, depending on glaucoma stage.

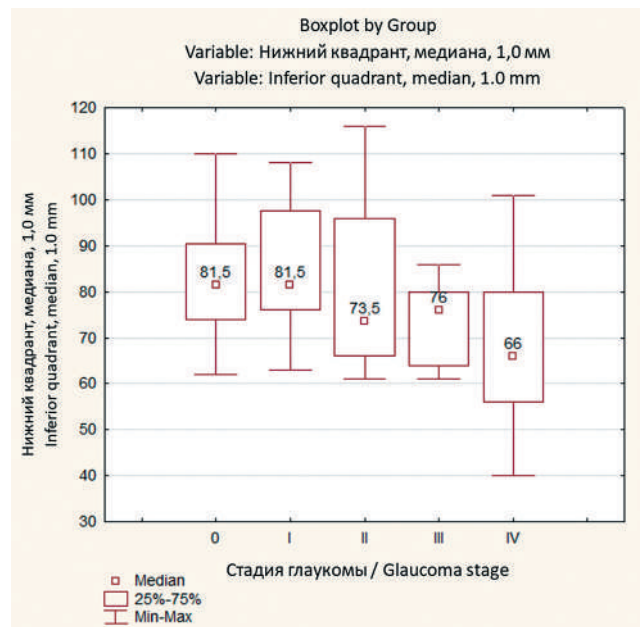


Рис. 8. Медиана яркости пикселей в нижнем квадранте перилимбальной склеры на расстоянии 1,0 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в зависимости от стадии глаукомы.

Fig. 8. Median pixel brightness in the inferior quadrant of the perilimbal sclera at a distance of 1.0 mm from the point of the Schlemm's canal closest to the cornea, depending on glaucoma stage.

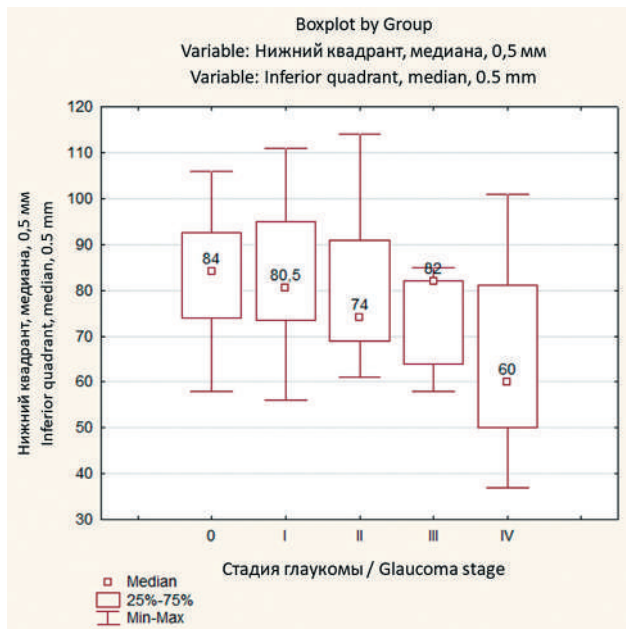


Рис. 9. Медиана яркости пикселей в нижнем квадранте перилимбальной склеры на расстоянии 0,5 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в зависимости от стадии глаукомы.

Fig. 9. Median pixel brightness in the inferior quadrant of the perilimbal sclera at a distance of 0.5 mm from the point of the Schlemm's canal closest to the cornea, depending on glaucoma stage.

Сравнение показателей оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры (межквартильный размах и медиана яркости пикселей в сегментах длиной 2,5 мм, 2,0 мм, 1,5 мм, 1,0 мм и 0,5 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала) показало, что межквартильный размах в сегментах длиной 2,0 мм и 1,5 мм в височном квадранте статистически значимо ниже в группе глаукомы по сравнению с контрольной группой. В сегменте длиной 2,0 мм этот показатель в группе глаукомы составил 57,5 (50,5; 71,5), в контрольной — 70 (59,5; 74,5) ($p=0,045$ — U-критерий Манна – Уитни); в сегменте длиной 1,5 мм в группе глаукомы — 56 (47; 69), в контрольной — 64 (55,5; 72) ($p=0,046$ — U-критерий Манна – Уитни). Различия всех остальных параметров оптической плотности в височном и других квадрантах были статистически не значимы.

При сравнении показателей оптической плотности и неоднородности среза трабекулярной сети выявлено, что медиана яркости пикселей в нижнем квадранте статистически значимо больше в группе глаукомы по сравнению с контрольной группой ($p=0,017$ — U-критерий Манна – Уитни). Различия во всех остальных параметрах оказались статистически не значимы.

При сравнении показателей оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры по стадиям глаукомы выявлены статистически значимые различия только для медианы яркости пикселей в сегментах длиной 2,5 мм, 2,0 мм, 1,5 мм, 1,0 мм и 0,5 мм от ближайшей к роговице точки шлеммова канала в нижнем квадранте (соответственно, $p=0,034$; $p=0,013$; $p=0,024$; $p=0,035$; $p=0,04$ — критерий Краскелла – Уоллиса): отмечен тренд на снижение этого показателя по мере прогрессирования глаукомы (рис. 5–9). Различия остальных показателей морфометрии перилимбальной склеры — медианы яркости пикселей в височном, носовом и верхнем квадрантах, а также межквартильного размаха во всех квадрантах — статистически значимо не отличались в зависимости от стадии глаукомы.

При сравнении медианы и межквартильного размаха яркости пикселей среза трабекулярной сети по стадиям глаукомы не выявлено значимых различий ни в одном из параметров во всех квадрантах.

Не выявлено статистически значимой корреляции ни одного из параметров оптической плотности и неоднородности перилимбальной склеры с уровнем ВГД. Медиана яркости пикселей в каждом из квадрантов имела статистически значимую слабую отрицательную корреляцию с возрастом. Межквартильный размах яркости пикселей перилимбальной склеры в височном (только на расстоянии 2,5 мм) и нижнем квадрантах (на расстоянии 2,0 мм, 1,5 мм, 1,0 мм и 0,5 мм) имел статистически значимую слабую положительную корреляцию с возрастом. Межквартильный размах яркости пикселей во всех квадрантах, кроме носового, имел статистически значимую слабую отрицательную корреляцию с аксиальной длиной (табл. 2).

Не выявлено статистически значимой корреляции параметров оптической плотности и неоднородности среза трабекулярной сети с аксиальной длиной глаза ни в одном из квадрантов. Медиана и межквартильный размах яркости пикселей среза трабекулярной сети в нижнем квадранте имели статистически значимую слабую положительную корреляцию с уровнем ВГД. Медиана яркости пикселей среза трабекулярной сети в верхнем квадранте статистически значимо отрицательно коррелировала с возрастом. Корреляции других параметров с ВГД и возрастом были статистически не значимы (табл. 3).

Обсуждение

Наше исследование показало, что при ПОУГ увеличивается оптическая плотность ткани трабекулярной сети в нижнем квадранте глаза и этот показатель положительно коррелирует с уровнем ВГД. Вероятно, это является отражением дистрофических

Таблица 2. Корреляции показателей оптической плотности перилимбальной склеры с ВГД, аксиальной длиной и возрастом; значимые корреляции показаны жирным шрифтом.

Table 2. Correlations of perilimbal scleral optical density with IOP, axial length, and age; significant correlations are in bold.

Показатель / Parameter	ВГД / IOP	Аксиальная длина / Axial length	Возраст / Age
Височный квадрант, межквартильный размах яркости пикселей / Temporal quadrant, interquartile range of pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,323 (p<0,05)	r=0,217 (p<0,05)
2,0 мм/мм	p>0,05	r=-0,224 (p<0,05)	p>0,05
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
Височный квадрант, медиана яркости пикселей / Temporal quadrant, median pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,235 (p<0,05)
2,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
Носовой квадрант, межквартильный размах яркости пикселей / Nasal quadrant, interquartile range of pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
2,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
Носовой квадрант, медиана яркости пикселей / Nasal quadrant, median pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,268 (p<0,05)
2,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,277 (p<0,05)
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,239 (p<0,05)
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
Нижний квадрант, межквартильный размах яркости пикселей / Inferior quadrant, interquartile range of pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,26 (p<0,05)	p>0,05
2,0 мм/мм	p>0,05	r=-0,29 (p<0,05)	r=0,27 (p<0,05)
1,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,279 (p<0,05)	r=0,31 (p<0,05)
1,0 мм/мм	p>0,05	r=-0,273 (p<0,05)	r=0,34 (p<0,05)
0,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,289 (p<0,05)	r=0,38 (p<0,05)
Нижний квадрант, медиана яркости пикселей / Inferior quadrant, median pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,24 (p<0,05)
2,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,22 (p<0,05)
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,25 (p<0,05)
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,24 (p<0,05)
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,24 (p<0,05)
Верхний квадрант, межквартильный размах яркости пикселей / Superior quadrant, interquartile range of pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,248 (p<0,05)	p>0,05
2,0 мм/мм	p>0,05	r=-0,271 (p<0,05)	p>0,05
1,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,316 (p<0,05)	p>0,05
1,0 мм/мм	p>0,05	r=-0,309 (p<0,05)	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	r=-0,236 (p<0,05)	p>0,05
Верхний квадрант, медиана яркости пикселей / Superior quadrant, median pixel brightness			
2,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,28 (p<0,05)
2,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,25 (p<0,05)
1,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	r=-0,22 (p<0,05)
1,0 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05
0,5 мм/мм	p>0,05	p>0,05	p>0,05

Таблица 3. Корреляция показателей оптической плотности среза трабекулярной сети с ВГД, аксиальной длиной и возрастом; значимые корреляции показаны жирным шрифтом.

Table 3. Correlations of trabecular meshwork optical density with IOP, axial length, and age; significant correlations are in bold.

Показатель / Parameter	ВГД IOP	Аксиальная длина Axial length	Возраст Age
Межквартильный размах яркости пикселей, височный квадрант <i>Interquartile range of pixel brightness, temporal quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Медиана яркости пикселей, височный квадрант <i>Median pixel brightness, temporal quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Межквартильный размах яркости пикселей, носовой квадрант <i>Interquartile range of pixel brightness, nasal quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Медиана яркости пикселей, носовой квадрант <i>Median pixel brightness, nasal quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Межквартильный размах яркости пикселей, нижний квадрант <i>Interquartile range of pixel brightness, inferior quadrant</i>	$r=0,269$ ($p<0,05$)	$p>0,05$	$p>0,05$
Медиана яркости пикселей, нижний квадрант <i>Median pixel brightness, inferior quadrant</i>	$r=0,23$ ($p<0,05$)	$p>0,05$	$p>0,05$
Межквартильный размах яркости пикселей, верхний квадрант <i>Interquartile range of pixel brightness, superior quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Медиана яркости пикселей, верхний квадрант <i>Median pixel brightness, superior quadrant</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$r=-0,357$ ($p<0,05$)
Межквартильный размах яркости пикселей, среднее по 4 квадрантам <i>Interquartile range of pixel brightness, 4-quadrant average</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$
Медиана яркости пикселей, среднее по 4 квадрантам <i>Median pixel brightness, 4-quadrant average</i>	$p>0,05$	$p>0,05$	$p>0,05$

изменений данной зоны. Так, при патоморфологических исследованиях у пациентов с ПОУГ в трабекулярной сети выявляются отложения межклеточного матрикса, пигментных гранул, псевдоэксфолиаций, продуктов тканевого распада — под действием силы тяжести они откладываются преимущественно в её нижней части. Из-за этого снижается ее проницаемость, увеличивается сопротивление оттоку, что приводит к повышению ВГД [9].

Показано, что при открытоугольной глаукоме снижается неоднородность перилимбальной склеры в височном квадранте, а по мере прогрессирования заболевания отмечается тенденция к снижению ее оптической плотности в нижнем квадранте. При этом наблюдаемые на ОКТ переднего сегмента глаза изменения перилимбальной склеры не оказывают влияния на уровень ВГД. Эти результаты согласуются с данными патоморфологических исследований: при ПОУГ в области УПК отмечается облитерация просвета коллекторных каналов [10], что может приводить к снижению неоднородности ткани. Для поздних стадий ПОУГ также характерна дегенерация коллагена перилимбальной склеры,

дилатация интрасклеральных сосудов, разволокнение ткани с появлением лакун [11], что может проявляться как снижение оптической плотности ткани. Дистальные пути оттока водянистой влаги (коллекторные каналы и интрасклеральное сосудистое сплетение) ответственны лишь за небольшую часть сопротивления: согласно расчетам, чтобы ВГД увеличилось на 10 мм рт.ст., пропускная способность дистальных путей оттока должна снизиться в 135 раз, что явно не соответствует гистологическим исследованиям глаз с открытоугольной глаукомой [9]. В связи с этим, значимая корреляция между выявляемыми на ОКТ изменениями перилимбальной склеры у пациентов с открытоугольной глаукомой и величиной ВГД маловероятна.

Выявлено, что с возрастом происходит снижение оптической плотности трабекулярной сети в верхнем квадранте. Патоморфологические исследования показали, что с возрастом отмечаются прогрессирующее накопление межклеточного матрикса в трабекулярной сети и потеря ее клеток [12, 13]. Обнаруженный нами факт можно объяснить тем, что под действием силы тяжести остатки клеток

из верхней части трабекулярной сети могут оседать в ее нижележащих отделах. В других квадрантах (височном, носовом и нижнем) снижение оптической плотности трабекулярной сети, ассоциированное с возрастной потерей клеток, может «компенсироваться» накоплением межклеточного матрикса, из-за чего данный показатель может значимо не меняться.

Наше исследование выявило, что с возрастом снижается оптическая плотность перилимбальной склеры во всех квадрантах, однако ее неоднородность увеличивается в височном и нижнем квадрантах. Возможно, эти изменения объясняются дегенеративными изменениями — отложением жировых глобул между коллагеновыми волокнами склеры, снижением числа эластических волокон, а также тем, что коллагеновые волокна склеры становятся с возрастом более отличными по размеру, неоднородными [14].

Наконец, выявлено, что с увеличением аксиальной длины неоднородность перилимбальной склеры во всех квадрантах, кроме носового, уменьшается. При патоморфологическом исследовании глаз пациентов с миопией высокой степени отмечается истончение коллагеновых волокон склеры [15]. При миопии слабой степени изменения менее выражены: происходит преимущественно расщепление коллагеновых фибрилл на более мелкие частицы [16]. Вероятно, по мере увеличения аксиальной длины истонченных коллагеновых волокон становится больше в процентном соотношении, и, за счет этого, когда они начинают преобладать, структурно склеральная ткань становится более однородной, ее неоднородность уменьшается.

Литература

1. Kang J.M., Tanna A.P. Glaucoma. *Med Clin North Am* 2021; 105(3): 493-510. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2021.01.004>
2. Bikbov M.M., Gilmanshin T.R., Zainullin R.M., et al. Prevalence and associated factors of glaucoma in the Russian Ural Eye and Medical Study. *Sci Rep* 2020; 10(1):20307. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77344-z>
3. Tham Y.-C., Li X., Wong T.Y., et al. Global Prevalence of Glaucoma and Projections of Glaucoma Burden through 2040: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11):2081-2090. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2014.05.013>
4. Fujimoto J.G., Pitris C., Boppart S.A., Brezinski M.E. Optical Coherence Tomography: An Emerging Technology for Biomedical Imaging and Optical Biopsy. *Neoplasia* 2000; 2(1-2):9-25. <https://doi.org/10.1038/sj.neo.7900071>
5. Popescu D.P., Choo-Smith L.-P., Flueraru C., et al. Optical Coherence Tomography: Fundamental Principles, Instrumental Designs and Biomedical Applications. *Biophys Rev* 2011; 3(3):155. <https://doi.org/10.1007/s12551-011-0054-7>
6. Hong J., Xu J., Wei A., et al. Spectral-Domain Optical Coherence Tomographic Assessment of Schlemm's Canal in Chinese Subjects with Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmology* 2013; 120(4):709-715. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2012.10.008>
7. Wang F., Shi G., Li X., et al. Comparison of Schlemm's Canal's Biological Parameters in Primary Open-Angle Glaucoma and Normal Human Eyes with Swept Source Optical. *J Biomed Opt* 2012; 17(11):116008. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.11.116008>

Заключение

Оптическая плотность и неоднородность перилимбальной склеры и трабекулярной сети, выявляемые с помощью ОКТ, различаются в норме и при ПОУГ. Отдельные показатели меняются в зависимости от стадии глаукомы и коррелируют с уровнем ВГД. Поскольку выявленные в нашем исследовании изменения перилимбальной склеры и трабекулярной сети согласуются с данными патоморфологических исследований, а ОКТ переднего сегмента глаза является неинвазивной, бесконтактной и относительно доступной технологией, параметры оптической плотности и неоднородности структур угла передней камеры глаза потенциально можно использовать в клинической практике. Представляется перспективным применение данных показателей в совокупности с другими параметрами (размеры структур угла передней камеры, показатели ОКТ ДЗН, демографические характеристики и др.) для разработки моделей — в том числе с применением искусственного интеллекта — с целью прогноза развития и течения заболевания. Необходимы дальнейшие исследования на большей когорте пациентов.

Участие авторов:

Концепция и дизайн исследования: Першин К.Б., Пашинова Н.Ф., Цыганков А.Ю., Панов А.А.
Сбор и обработка материала: Панов А.А.
Статистическая обработка: Панов А.А.
Написание статьи: Панов А.А., Цыганков А.Ю.
Редактирование: Першин К.Б., Пашинова Н.Ф., Цыганков А.Ю.

References

1. Kang J.M., Tanna A.P. Glaucoma. *Med Clin North Am* 2021; 105(3): 493-510. <https://doi.org/10.1016/j.mcna.2021.01.004>
2. Bikbov M.M., Gilmanshin T.R., Zainullin R.M., et al. Prevalence and associated factors of glaucoma in the Russian Ural Eye and Medical Study. *Sci Rep* 2020; 10(1):20307. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77344-z>
3. Tham Y.-C., Li X., Wong T.Y., et al. Global Prevalence of Glaucoma and Projections of Glaucoma Burden through 2040: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Ophthalmology* 2014; 121(11):2081-2090. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2014.05.013>
4. Fujimoto J.G., Pitris C., Boppart S.A., Brezinski M.E. Optical Coherence Tomography: An Emerging Technology for Biomedical Imaging and Optical Biopsy. *Neoplasia* 2000; 2(1-2):9-25. <https://doi.org/10.1038/sj.neo.7900071>
5. Popescu D.P., Choo-Smith L.-P., Flueraru C., et al. Optical Coherence Tomography: Fundamental Principles, Instrumental Designs and Biomedical Applications. *Biophys Rev* 2011; 3(3):155. <https://doi.org/10.1007/s12551-011-0054-7>
6. Hong J., Xu J., Wei A., et al. Spectral-Domain Optical Coherence Tomographic Assessment of Schlemm's Canal in Chinese Subjects with Primary Open-Angle Glaucoma. *Ophthalmology* 2013; 120(4):709-715. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2012.10.008>
7. Wang F., Shi G., Li X., et al. Comparison of Schlemm's Canal's Biological Parameters in Primary Open-Angle Glaucoma and Normal Human Eyes with Swept Source Optical. *J Biomed Opt* 2012; 17(11):116008. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.17.11.116008>

8. Li M., Luo Z., Yan X., Zhang H. Diagnostic Power of Scleral Spur Length in Primary Open-Angle Glaucoma. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2020; 258(6):1253-1260. <https://doi.org/10.1007/s00417-020-04637-4>
9. Нестеров А.П. Глаукома. М: Медицинское информационное агентство 2014; 360.
10. Teng C.C., Paton R.T., Katzin H.M. Primary Degeneration in the Vicinity of the Chamber Angle; as an Etiologic Factor in Wide-Angle Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1955; 40(5 Part 1):619-631. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(55\)91489-6](https://doi.org/10.1016/0002-9394(55)91489-6)
11. Vannas S., Teir H. Histologic Observations of the Structure of the Sclera in Glaucomatous Human Eyes. *Am J Ophthalmol* 1960; 49:411-416. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(60\)91641-x](https://doi.org/10.1016/0002-9394(60)91641-x)
12. Miyazaki M., Segawa K., Urakawa Y. Age-Related Changes in the Trabecular Meshwork of the Normal Human Eye. *Jpn J Ophthalmol* 1987; 31(4):558-569.
13. Alvarado J., Murphy C., Polansky J., Juster R. Age-Related Changes in Trabecular Meshwork Cellularity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1981; 21(5):714-727.
14. Watson P.G., Young R.D. Scleral Structure, Organisation and Disease. A Review. *Exp Eye Res*. 2004; 78(3):609-623. [https://doi.org/10.1016/s0014-4835\(03\)00212-4](https://doi.org/10.1016/s0014-4835(03)00212-4)
15. Curtin B.J., Iwamoto T., Renaldo D.P. Normal and Staphylomatous Sclera of High Myopia. An Electron Microscopic Study. *Arch Ophthalmol*. 1979; 97(5):912-915. <https://doi.org/10.1001/archophth.1979.01020010470017>
16. Матющенко А.Г. Роль эндопептидаз в изменении биомеханических свойств склеральной оболочки при аксиальном удлинении глазного яблока. *Вестник офтальмологии* 2021;137(2):102-107. <https://doi.org/10.17116/oftalma2021137021102>
8. Li M., Luo Z., Yan X., Zhang H. Diagnostic Power of Scleral Spur Length in Primary Open-Angle Glaucoma. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2020; 258(6):1253-1260. <https://doi.org/10.1007/s00417-020-04637-4>
9. Nesterov A.P. Glaucoma [Glaucoma]. Moscow, Medicinskoe informacionnoe agentstvo Publ., 2014. 360 p.
10. Teng C.C., Paton R.T., Katzin H.M. Primary Degeneration in the Vicinity of the Chamber Angle; as an Etiologic Factor in Wide-Angle Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1955; 40(5 Part 1):619-631. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(55\)91489-6](https://doi.org/10.1016/0002-9394(55)91489-6)
11. Vannas S., Teir H. Histologic Observations of the Structure of the Sclera in Glaucomatous Human Eyes. *Am J Ophthalmol* 1960; 49:411-416. [https://doi.org/10.1016/0002-9394\(60\)91641-x](https://doi.org/10.1016/0002-9394(60)91641-x)
12. Miyazaki M., Segawa K., Urakawa Y. Age-Related Changes in the Trabecular Meshwork of the Normal Human Eye. *Jpn J Ophthalmol* 1987; 31(4):558-569.
13. Alvarado J., Murphy C., Polansky J., Juster R. Age-Related Changes in Trabecular Meshwork Cellularity. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 1981; 21(5):714-727.
14. Watson P.G., Young R.D. Scleral Structure, Organisation and Disease. A Review. *Exp Eye Res*. 2004; 78(3):609-623. [https://doi.org/10.1016/s0014-4835\(03\)00212-4](https://doi.org/10.1016/s0014-4835(03)00212-4)
15. Curtin B.J., Iwamoto T., Renaldo D.P. Normal and Staphylomatous Sclera of High Myopia. An Electron Microscopic Study. *Arch Ophthalmol*. 1979; 97(5):912-915. <https://doi.org/10.1001/archophth.1979.01020010470017>
16. Matyushchenko AG. Contribution of endopeptidases to changes in scleral biomechanics in axial elongation of the eye. *Russian Annals of Ophthalmology* 2021; 137(2):102107. <https://doi.org/10.17116/oftalma2021137021102>

ФГБНУ «НИИГБ им. М.М. Краснова»
ПРЕДСТАВЛЯЕТ
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ
ПРОГРАММЫ МИРОВОГО УРОВНЯ
для практикующих офтальмологов

Запись по тел. 8 (985) 420-06-21
 или по e-mail: dpo@niigb.ru

Больше информации о курсах:

www.niigb.ru

<https://t.me/niigbkrasnova>

