

Современные представления о роли биомеханических факторов в патогенезе и диагностике глаукомы нормального давления

Арутюнян Л.Л., д.м.н., профессор кафедры офтальмологии¹, заведующая диагностическим отделением²;
<https://orcid.org/0000-0002-9356-6526>

Анисимова С.Ю., д.м.н., профессор, врач-офтальмолог, генеральный директор²;
<https://orcid.org/0000-0003-0562-5440>

Анисимов С.И., д.м.н., профессор кафедры глазных болезней³, научный директор²;
<https://orcid.org/0000-0003-1922-4939>

Маммадова С.Ю., врач-офтальмолог², аспирант кафедры офтальмологии¹;
<https://orcid.org/0009-0006-3702-696X>

Братчук А.А., врач-офтальмолог², соискатель кафедры офтальмологии¹.
<https://orcid.org/0009-0004-2037-7494>

¹ФГБОУ ДПО РМАНПО Минздрава РФ, 125993, Российская Федерация, Москва, ул. Баррикадная, 2/1, стр.1;

²ООО Глазной центр «Восток-Прозрение», 123557, Российская Федерация, Москва, ул. П. Осипенко, 10, к. 1;

³ФГБОУ ВО «Российский университет медицины» Минздрава России, 127006, Российская Федерация, Москва, ул. Долгоруковская, 4.

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

Конфликт интересов: отсутствует.

Для цитирования: Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Анисимов С.И. и соавт. Современные представления о роли биомеханических факторов в патогенезе и диагностике глаукомы нормального давления. Национальный журнал глаукома. 2025; 24(3):76-88.

Резюме

Глаукома нормального давления (ГНД) является сложной формой первичной открытоугольной глаукомы, при которой прогрессирующее повреждение зрительного нерва происходит при нормальных показателях внутриглазного давления.

В обзоре обобщены современные представления о ключевой роли биомеханических факторов в патогенезе и диагностике ГНД. Основное внимание уделено структурно-функциональным особенностям корнеосклеральной оболочки глаза, включая роговицу и склеру, а также решетчатой пластинки (РП), которые определяют устойчивость тканей к механическому стрессу. Особое значение имеют современные методы оценки биомеханических свойств, такие как корнеальный гистерезис, динамическая тонометрия (ORA,

Corvis ST) и визуализация РП с помощью оптической когерентной томографии, которые позволяют выявлять ранние изменения, не обнаруживаемые стандартными методами.

Обзор подчеркивает необходимость дальнейших исследований для стандартизации биомеханических параметров и разработки новых диагностических подходов, включая нагрузочные пробы. Интеграция биомеханических данных в клиническую практику может улучшить раннюю диагностику ГНД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: первичная открытоугольная глаукома, глаукома нормального давления, биомеханика корнеосклеральной оболочки глаза, корнеальный гистерезис, внутриглазное давление, оптическая когерентная томография, нагрузочные пробы.

Для контактов:

Маммадова Сабина Юсифовна, e-mail: N.Sabina@mail.ru

LITERATURE REVIEW

Current concepts of the role of biomechanical factors in the pathogenesis and diagnosis of normal-tension glaucoma

ARUTYUNYAN L.L., Dr. Sci. (Med.), Professor at the Academic Department of Ophthalmology¹, Head of the Diagnostics Department²; <https://orcid.org/0000-0002-9356-6526>

ANISIMOVA S.YU., Dr. Sci. (Med.), Professor, ophthalmologist, Director²; <https://orcid.org/0000-0003-0562-5440>

ANISIMOV S.I., Dr. Sci. (Med.), Professor at the Academic Department of Eye Diseases³, Scientific Director²; <https://orcid.org/0000-0003-1922-4939>

MAMMADOVA S.YU., postgraduate student¹, ophthalmologist²; <https://orcid.org/0009-0006-3702-696X>

BRATCHUK A.A., ophthalmologist², candidate student¹. <https://orcid.org/0009-0004-2037-7494>

¹Russian Medical Academy of Continuous Professional Education, 2/1 Barricadnaya St., Moscow, Russian Federation, 125993;

²OOO Glaznoy Centr Vostok-Prozrenie, 10 Bld. 1 Poliny Osipenko St., Moscow, Russian Federation, 123007;

³Russian University of Medicine, 4 Dolgorukovskaya St., Moscow, Russian Federation, 127006.

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

Conflicts of Interest: none declared.

For citations: Arutyunyan L.L., Anisimova S.Yu., Anisimov S.I. et al. Current concepts of the role of biomechanical factors in the pathogenesis and diagnosis of normal-tension glaucoma. *Natsional'nyi zhurnal glaukoma*. 2025; 24(3):76-88.

Abstract

Normal-tension glaucoma (NTG) is a complex form of primary open-angle glaucoma characterized by progressive optic nerve damage despite normal intraocular pressure (IOP) levels.

This review summarizes current concepts regarding the key role of biomechanical factors in the pathogenesis and diagnosis of NTG. Particular emphasis is placed on the structural and functional properties of the corneoscleral shell, including the cornea and sclera, as well as the lamina cribrosa (LC), which determine tissue resistance to mechanical stress. Modern methods for assessing biomechanical properties — such as corneal hysteresis, dynamic tonometry (ORA, Corvis ST), and lamina cribrosa imaging using

optical coherence tomography — are of special importance, as they allow the detection of early changes that may not be identified with conventional diagnostic tools.

The review emphasizes the need for further research to standardize biomechanical parameters and develop novel diagnostic approaches, including stress tests. Integrating biomechanical data into clinical practice may improve the early detection of NTG.

KEYWORDS: primary open-angle glaucoma, normal-tension glaucoma, corneoscleral biomechanics, corneal hysteresis, intraocular pressure, optical coherence tomography, stress tests.

Глаукома нормального давления (ГНД) представляет собой особую клиническую разновидность первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ), при которой происходит повреждение зрительного нерва и ухудшение полей зрения, несмотря на условно нормальное значение внутриглазного давления (ВГД) [1–3, 9, 10]. При этом само понятие «нормального» уровня ВГД остается предметом дискуссий ввиду отсутствия универсальных критериев его оценки. Ключевым аспектом в решении этой проблемы представляется анализ biomechanических параметров корneosклеральной оболочки глаза. Последние данные свидетельствуют

о том, что биомеханика играет критическую и важную роль не только в механизмах развития глаукомной оптиконейропатии, но и в обеспечении точности измерения ВГД, особенно в случае глаукомы нормального давления.

Биомеханика — наука, изучающая взаимодействие сил и механических свойств живых тканей — играет важную роль в функционировании зрительной системы: это не просто теоретическая концепция, а один из ключевых элементов понимания патогенеза офтальмологических заболеваний. В офтальмологии, несмотря на значительный прогресс в понимании biomechanических процессов,

их практическое применение остаётся ограниченным [13, 23, 24]. Глаз — это сложная биомеханическая система, где баланс ВГД, упругости оболочек и гидродинамики жидкостей определяет его функцию. Нарушение этого равновесия лежит в основе многих офтальмопатологий, включающих глаукому, миопию, кератоконус, отслойку сетчатки и возрастные дегенеративные изменения [13, 68]. Тем не менее, в отличие от других медицинских дисциплин, офтальмология лишь начинает интегрировать биомеханические принципы в рутинную клиническую практику. Современные технологии уже позволяют оценивать такие параметры, как корневой гистерезис, жесткость склеры и деформационные свойства сетчатки. Однако для широкого внедрения этих методов необходимы дальнейшие исследования, стандартизация протоколов, обучение врачей интерпретации биомеханических данных.

Первые исследования биомеханических свойств глазного яблока связаны с работами профессора Э.С. Аветисова и его школы в начале 1970-х годов. В рамках изучения патогенеза прогрессирующей миопии Э.С. Аветисовым была разработана трехфакторная теория, где ключевая роль отводилась нарушению механических характеристик корнеосклеральной оболочки [13, 47]. Это принципиально новое положение потребовало разработки специальных методов исследования. Уже в 1974 году были получены первые экспериментальные данные о биомеханических параметрах склеральной ткани, что положило начало новому направлению — офтальмобиомеханике [13]. Значительный вклад в развитие этого направления внес профессор В.В. Волков, который не только поддерживал данные исследования на институциональном уровне, но и обеспечил их представление международному научному сообществу [13, 53]. Последующие исследования в данном направлении позволили углубить понимание роли биомеханических факторов в патогенезе миопии, в частности, установить взаимосвязь между структурой коллагенового матрикса склеры и ее реологическими свойствами. Эти работы заложили методологическую основу для современных исследований в области биомеханики глаза, включая разработку методов оценки ВГД. Примечательно, что многие современные методы исследования ВГД носят трансклеральный характер, а значит, их точность зависит не только от свойств роговицы, но и от биомеханических особенностей корнеосклеральной оболочки глаза. Это подчеркивает важность изучения обеих структур в комплексе.

Роговица и склера, формируя единую фиброзную оболочку глазного яблока, представляют собой морфофункционально связанные структуры, обладающие различными радиусами кривизны и выраженной гетерогенностью биомеханических свойств

[1, 5, 13, 23]. Несмотря на общее соединительнотканное происхождение из мезенхимальной ткани и схожий биохимический состав, основанный на коллагеновом матриксе, эти сегменты существенно различаются по структурной организации, что определяет их специализированные функции. Роговица, обеспечивая оптическую прозрачность и рефракцию, отличается высокой жесткостью и упорядоченным расположением коллагеновых волокон [1, 54], тогда как склера, ответственная за поддержание формы глаза и устойчивость к ВГД, демонстрирует выраженные вязкоупругие свойства [13, 23, 33].

С точки зрения микроархитектоники роговица характеризуется строго упорядоченным расположением коллагеновых фибрилл, образующих в строме гексагональные ламеллы с узким диапазоном диаметра (25–35 нм). Такая высокоорганизованная структура, дополненная специфическими протеогликанами (декорин, люмикан) и отсутствием сосудистой сети, обеспечивает уникальное сочетание прозрачности и механической прочности [5, 54]. Склера же, однако, демонстрирует менее организованное расположение коллагеновых пучков с большим диаметром фибрилл (50–160 нм) и выраженной межфибриллярной гетерогенностью, что определяет ее непрозрачность и более высокую жесткость [5, 33]. Целенаправленные исследования, проведенные Н.А. Даниловым и соавт. [56] и Е.Н. Иомдиной и соавт. [13], показали, что в 156 глаукомных глазах коллаген составляет около 50% от сухой массы ткани и около 70% от общего содержания белка [56]. Эти величины существенно превышают характерное для нормальной склеры взрослого человека содержание коллагена ($39 \pm 4\%$), приведенное в работе F. Keeley et al. [59]. Более того, прослеживается отчетливая тенденция к росту уровня коллагена в тканях и средах глаза по мере развития глаукомного процесса [57, 58].

Современные биомеханические исследования последних лет выявили существенные различия в деформационных характеристиках роговицы и склеры [11, 13, 23, 31, 33, 57]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что модуль упругости роговицы в центральной зоне составляет 0,3–1,5 МПа, тогда как аналогичный показатель для склеры варьирует в диапазоне 3–10 МПа, демонстрируя выраженную регионарную специфичность с увеличением значений от экватора к заднему полюсу [13]. Важно отметить, что обе ткани характеризуются выраженной анизотропией механических свойств и нелинейной зависимостью напряжения от деформации, однако природа этих феноменов принципиально различна: в роговице она обусловлена преимущественно ламеллярной организацией коллагена, тогда как в склере — сложной трехмерной архитектурой перекрещивающихся коллагеновых пучков.

Эти фундаментальные различия в биомеханике корнеосклеральной оболочки подчеркивают необходимость разработки точных методов оценки их упругих свойств. В этом контексте особый интерес представляет недавно продемонстрированная возможность применения бриллюэновской микроскопии для трехмерного картирования модуля упругости роговицы с высоким пространственным разрешением [45, 46, 62]. Этот оптический метод основан на анализе рассеяния света на упругих тепловых колебаниях среды, что позволяет бесконтактно определять ее механические характеристики. Бриллюэновская микроскопия является неинвазивной и не приводит к структурной или механической деформации роговицы. Спектроскопия Бриллюэна уже давно применяется для характеристики материалов и мониторинга окружающей среды. Первая спектроскопия Бриллюэна биологических тканей была продемонстрирована в начале 1980-х годов, где были получены спектры Бриллюэна хрусталика и роговицы в отдельных точках пространства со временем интеграции от 10 минут до 1 часа [45]. Современные технологические достижения позволили значительно усовершенствовать этот метод, открыв новые перспективы для детального изучения пространственного распределения механических свойств глазных тканей в норме и при различных патологиях.

Теоретические работы О.В. Светловой, И.Н. Кошица и соавт. с конца 90-х годов развивают концепцию старения и повышения ригидности корнеосклеральной оболочки глаза как важного звена в патогенезе ПОУГ [69, 70]. На основе этой концепции авторами были предложены инновационные принципы регуляции оттока и продукции водянистой влаги, включая теорию «механизма дыхания склеры», а также разработаны новые подходы к гипотензивной терапии, направленные на модуляцию биомеханических свойств склеры. Эти исследования заложили фундамент для понимания роли склеральной ригидности в патогенезе глаукомы, однако, многие аспекты требуют дальнейшего изучения. В частности, остается дискуссионным вопрос о наличии различий в биомеханических свойствах корнеосклеральной оболочки при ПОУГ и ГНД. Можно предположить, что именно такие различия могут существенно влиять на получаемые тонометрические показатели, маскируя развитие глаукомного поражения, особенно на ранних стадиях заболевания. Это объясняет клинические наблюдения прогрессирования повреждения зрительного нерва, характерное для ГНД, при формально нормальных цифрах ВГД [8, 31, 32, 37, 41, 42, 67].

Ограниченное число доступных методов исследования существенно затрудняет объективную оценку этих параметров в клинической практике. Особую актуальность эта проблема приобретает при изучении ГНД, где биомеханические характе-

ристики тканей играют ключевую патогенетическую роль [8, 11, 14, 17, 18, 23]. При ГНД, несмотря на статистически нормальные показатели ВГД, наблюдается прогрессирующая нейродегенерация сетчатки и атрофия зрительного нерва [1–3, 8]. Одним из ключевых факторов патогенеза ГНД считается снижение механической ригидности склеры и решетчатой пластинки (РП) зрительного нерва, что приводит к нарушению их устойчивости даже к физиологическим уровням внутриглазного давления [13, 23, 24, 26, 28, 33, 42, 57].

Экспериментальные исследования свидетельствуют о том, что у пациентов с ГНД склера обладает повышенной податливостью, что способствует трансмиссии давления на решетчатую пластинку и последующей компрессии аксонов ганглиозных клеток [3, 28, 30–33]. При этом роговица, несмотря на свою относительную жесткость, также может вносить вклад в патологический процесс: снижение ее биомеханической устойчивости коррелирует с аномальными показателями ВГД при тонометрии, что затрудняет точную диагностику [48, 63, 64, 67, 70].

Особое значение в этом контексте приобретает анализ вязкоупругих свойств корнеосклеральных структур. Как показывают исследования, роговица характеризуется значительным гистерезисом (энергопотерей при циклической деформации), что клинически проявляется в показателях корнеального гистерезиса (англ. CH, corneal hysteresis) [12, 38, 39]. Склеры, напротив, демонстрирует меньшую зависимость механических параметров от скорости деформации, но большую подверженность долговременной ползучести под действием постоянной нагрузки [25, 26, 33]. Эти различия имеют непосредственное клиническое значение, особенно в контексте патофизиологии глаукомы, где изменения биомеханики обеих структур играют ключевую роль в развитии оптической нейропатии. В современной офтальмологии возможность прижизненной оценки вязко-эластических свойств фиброзной оболочки глаза стала реальностью с появлением двух ключевых диагностических систем — ORA (Ocular Response Analyzer) и Corvis ST [57, 71, 72]. Эти технологии принципиально различаются по своим методическим подходам, но дополняют друг друга в комплексной оценке биомеханики глаза. «Пионером» в этой области стал анализатор глазного ответа (ORA), введенный в офтальмологическую практику в 2005 году. Этот инновационный бесконтактный тонометрический комплекс реализует принцип динамической пневмотонометрии, анализируя ответную деформацию роговицы на стандартизированный воздушный импульс [57]. Его ключевое преимущество — одновременная оценка двух важнейших биомеханических параметров: CH и фактора резистентности роговицы (англ. CRF, corneal resistance factor), которые рассчитываются

по разнице значений ВГД в моменты первой и второй аппланации. Однако важно учитывать, что эти показатели отражают не только свойства роговицы, но и, опосредованно, биомеханику склеры и других внутриглазных структур.

Согласно исследованиям С.Э. Аветисова и соавт. [11, 61, 67], у пациентов с ГНД отмечаются достоверно более низкие показатели СН по сравнению с нормой и ПОУГ, что авторы интерпретируют как снижение жесткости корнеосклеральной оболочки. Однако в литературе существует противоположная трактовка: большинство исследований [13, 76] рассматривают уменьшение СН как признак повышения ригидности. Подтверждение сниженных значений СН при ГНД было получено в работе Park et al. [77], где была выявлена корреляция гистерезиса со структурными изменениями диска зрительного нерва и решетчатой пластинки. Эти данные согласуются с гипотезой [12, 78] о том, что СН отражает биомеханические свойства всей корнеосклеральной оболочки, а его снижение свидетельствует о нарушении механических характеристик при различных формах глаукомы.

Более совершенную методику предлагает система Corvis ST (Oculus, Германия), в которой используется высокоскоростная Шеймпфлюг-камера (до 4300 кадров в секунду). Эта технология позволяет получить более точную информацию о вязкоупругих характеристиках роговицы: визуализировать полный цикл деформации роговицы, анализировать амплитуду и скорость деформации, оценивать временные параметры фазы конусообразования и рассчитывать интегральные показатели жесткости [71, 72, 74].

Особую ценность Corvis ST продемонстрировал в диагностике ГНД. На основе анализа пяти ключевых параметров был разработан Дрезденский биомеханический фактор — эффективный скрининговый инструмент для этой патологии [13, 74]. Многочисленные исследования подтвердили, что у пациентов с глаукомой наблюдается характерное снижение деформируемости роговицы, которое сохраняется даже после корректировки по ВГД и центральной толщине роговицы [57, 63, 71].

Этот биомеханический феномен, регистрируемый Corvis ST, коррелирует с ключевым патофизиологическим процессом — механической деформацией РП. Согласно современным представлениям, ключевую роль в развитии характерной экскавации зрительного нерва играет длительная механическая деформация коллагеновых структур решетчатой пластинки склеры [52].

Важно отметить, что у пациентов с ГНД при нормальных цифрах ВГД, решетчатая пластинка может подвергаться избыточной деформации из-за сниженной жесткости склеры, что приводит к компрессии аксонов ганглиозных клеток, нарушению их трофики и последующей гибели [41, 52].

Структурные особенности РП также играют значительную роль в предрасположенности к глаукоме: более тонкая и пористая РП (что часто обусловлено генетическими факторами) менее устойчива к механическому воздействию ВГД, что повышает риск нейродегенерации [52]. Современные методы визуализации, такие как спектральная оптическая когерентная томография (ОКТ), оснащенная модулем увеличенной глубины изображения, позволили измерять параметры решетчатой пластинки, в частности, ее толщину. Исследования Park H. et al. показали, что толщина РП у больных ГНД ($175,1 \pm 22,6$ мкм) достоверно меньше, чем у здоровых лиц ($348,14 \pm 723,41$ мкм) и пациентов с ПОУГ ($237,82 \pm 40,32$ мкм). Авторы полагают, что у пациентов с ПОУГ, особенно с ГНД, измерение толщины РП по диагностической значимости сопоставимо с оценкой толщины слоя нервных волокон сетчатки СНВС [97]. Аналогичные результаты получили K. Omodaka et al. (2015), обнаружившие статистически значимые различия толщины РП у здоровых ($282,6 \pm 20,6$ мкм), пациентов с ПОУГ ($261,4 \pm 15,8$ мкм) и ГНД ($232,6 \pm 33,3$ мкм) [80].

В исследовании Арутюнян Л.Л. и соавт. [81] выявлены значимые различия в морфометрических параметрах РП при ГНД. Сканирование диска зрительного нерва и макулярной зоны всех пациентов проводили в режимах ОКТ Disk+Macula 3D и Disk Raster (Optopol Revo 60 OCT), рассчитывали глубину РП и толщину преламинарного слоя нервных волокон (ПСНВ) занимающая область между внутренней пограничной мембраной и решетчатой пластинкой. ПСНВ, в отличие от СНВС, отражает биомеханические изменения в области ДЗН, обусловленные воздействием внутриглазного давления (ВГД) или индивидуальными особенностями архитектоники РП. Его оценка приобретает особую диагностическую ценность при ГНД, где структурная уязвимость ПСНВ и РП может играть патогенетическую роль независимо от уровня ВГД. У пациентов с ГНД глубина РП была меньше нормы при I стадии и составила 350 ± 62 мкм ($p < 0,418$), а при II и III стадиях — 416 ± 51 мкм ($p < 0,818$) и 431 ± 43 мкм ($p < 0,539$), соответственно [81]. Авторы отмечают, что изучение этих параметров способствует лучшему пониманию патогенеза оптической нейропатии при ГНД, открывает новые возможности в дифференциальной диагностике и прогнозировании течения глаукомного процесса.

Следует учитывать, что РП является динамической структурой, а разброс данных в разных исследованиях может объясняться различиями в определении её границ при ОКТ-исследованиях, а также влиянием суточных колебаний ВГД, что подчеркивает важность стандартизации времени измерений [82]. Тем не менее, морфометрические параметры РП остаются значимыми критериями оценки риска возникновения глаукомы [82]. Это подтверждается

исследованием Волкова В.В. и соавт., выявивших у больных ГНД достоверно большую глубину РП при меньшей её толщине по сравнению со здоровыми лицами. Эти же авторы в своем исследовании, в котором измеряли и сравнивали толщину и глубину РП, ширину субарахноидального пространства зрительного нерва у больных ГНД и у здоровых, выявили, что в первом случае глубина РП при меньшей ее толщине была достоверно больше, чем у здоровых [14].

Особое внимание исследователей сосредоточено на изучении эластиновых волокон РП, которые обеспечивают её эластичность и адаптацию к колебаниям ВГД. Работы Hernandez M. et al., изучавших экспериментальную глаукомную оптикопатию у обезьян, показали, что при глаукоме развивается компенсаторный эластоз, проявляющийся образованием аморфных агрегатов эластина, что нарушает податливость РП, вовлеченной в глаукомный процесс [83]. Дополнительным фактором является возрастное увеличение перекрестных сшивок эластина (десмозина и изодесмозина), снижающее эластичность ткани. Исследования Quigley H. et al. с использованием трансмиссионной электронной микроскопии продемонстрировали диссоциацию эластических волокон от других соединительнотканых элементов при прогрессировании глаукомы, что нарушает устойчивость РП к хроническому повышенному ВГД [84].

Экспериментальные данные свидетельствуют о сложной динамике биомеханических изменений. Так, Girard M. et al. полагают, что биомеханические свойства склеры в области заднего полюса играют определенную роль в патогенезе глаукомы [85, 86, 87]. При продолжительном подъеме ВГД происходит увеличение жесткости склеры, при этом, как считают авторы, повышается устойчивость ДЗН к губительному действию давления [86], однако, на начальном этапе в некоторых глазах может наблюдаться, наоборот, повышенная податливость склеры. Эти биомеханические изменения являются, по-видимому, следствием ремоделирования ее экстрацеллюлярного матрикса. Результаты Thornton I. et al. подтверждают увеличение жесткости склеры, в частности, ее перипапиллярной зоны и РП, в ответ на повышенное ВГД [88].

Таким образом, с одной стороны, эксперименты демонстрируют увеличение жесткости склеральной ткани при повышении ВГД, а с другой — искусственное повышение жесткости корнеосклеральной оболочки с помощью кросслинкинга способствует уменьшению эластичности и прогиба РП и снижению демпфирующих свойств корнеосклеральной оболочки в целом. Действительно, эксперименты показывают, что изменение биомеханических свойств корнеосклеральной капсулы взаимосвязано с изменением ВГД. Так, на основании данных, полученных с помощью спектральной интерферометрии при обследовании обезьян с индуцированной

ПОУГ, была создана 3D-модель склеры [86], которая позволила выявить увеличение жесткости склеральной ткани при длительном подъеме ВГД. Эксперимент, проведенный на глазах свиней, также показал увеличение жесткости перепапиллярной склеры и РП при повышении ВГД [88].

Sigal I. et al., изучая биомеханические свойства ДЗН путем моделирования, определили, что деформация РП зависит больше от прочности и толщины склеры, а также диаметра склерального канала, нежели от прочности РП и формы экскавации. В дальнейших работах, анализируя характер изменений ДЗН в ответ на повышение ВГД, авторы оценили около 20 биомеханических параметров, из которых выделили 5 наиболее важных: упругость склеры, радиус глазного яблока, упругость РП, ВГД и толщину склеры. При вводе этих параметров в созданную ими биомеханическую модель удалось показать, что воздействие ВГД на ДЗН опосредовано изменением биомеханических свойств склеры [89].

Эти параметры были подтверждены не только в моделях, но и в экспериментах на энуклеированных глазах различных животных. Множество работ с использованием энуклеированных человеческих глаз установили, что склера представляет собой нелинейный в плане свойств материал, проявляющий реакцию повышения жесткости при растяжении, поскольку извитые коллагеновые фибриллы постепенно набираются для того, чтобы выдерживать нагрузку [41, 101–106]. Эти исследования также подтвердили, что склера обладает вязкоупругостью и значительным гистерезисом. Они показали, что склера обладает значительной механической анизотропией, которая варьируется в зависимости от анатомического положения, что согласуется с региональными микроструктурными вариациями в структуре внеклеточного матрикса. Кроме того, тестирование на полосках склеры выявило важные биомеханические изменения фиброзной оболочки глаза при старении, глаукоме и близорукости.

Понимание биомеханических свойств склеры требует точных методов измерения. В своём исследовании Battaglia S. и Kamm R. использовали относительно простой, изготовленный на заказ пневматический индентор и оптический датчик смещения, способный обеспечивать субмикронное разрешение. Однако коммерческий выпуск первого АСМ-прибора примерно пять лет спустя сделал возможным проведение более сложных исследований наноиндентирования. Braunsman S. et al. при исследовании эластичности в криопрепаратах решетчатой пластинки и перипапиллярной склеры в глазах с псевдоэкзофалиативным синдромом сообщили о заметном размягчении тканей ДЗН, что, возможно, делает такие глаза более уязвимыми к глаукомному поражению [90]. Позже Leung L.K. et al. измерили реакцию склеры на нагрузку и смещение в глазах свиней *ex vivo* в зависимости от ВГД с помощью

универсальной машины для тестирования на вдавливание в сочетании с цифровым однообъективным зеркальным фотоаппаратом, оснащенным стереомикроскопом. Они обнаружили, что жесткость склеры положительно коррелирует с ВГД [91].

Современные методы исследования позволили установить, что хроническое повышение ВГД вызывает не только изменение жесткости склеры, но и структурные деформации, такие как искривление задней поверхности роговицы и расширение склерального канала [92, 93]. Girard et al. оценили тангенциальный модуль склеры (показатель жесткости склеры) в глазах обезьян, у которых было вызвано хроническое повышение ВГД. Они обнаружили, что тангенс угла механических потерь уменьшается на самых ранних стадиях повышения ВГД, но увеличивается на более поздних стадиях [86, 87]. Возрастное уменьшение скручивания коллагена, вероятно, является одним из механизмов, лежащих в основе возрастного уплотнения склеры.

Sigal I. et al., используя компьютерное моделирование, разработали модели задних полюсов человеческого глаза с учётом геометрии конкретного глаза, чтобы исследовать деформацию увеального тракта, вызванную ВГД [89, 94, 95]. Они обнаружили, что жесткость склеры является наиболее важным параметром материала для определения биомеханического воздействия на РП, что соответствует результатам, полученным с помощью общих моделей [89, 95]. Norman et al. разработали модели человеческого глаза, в которых роговично-склеральные оболочки, характерные для конкретного образца, сочетаются с общими моделями ДЗН, чтобы определить влияние формы и размера глаза на биомеханику ДЗН [96].

Наряду с толщиной РП, ключевым параметром для диагностики ПОУГ, включая ГНД, является глубина её залегания. В литературе данный параметр обозначается как «глубина решетчатой пластинки». Этот параметр определяется как перпендикуляр, опущенный от центра линии, соединяющей конечные точки мембраны Бруха, до передней поверхности РП [26]. Так, R.L. Furlanetto et al., измеряя глубину РП, пришли к заключению, что при ПОУГ РП смещена кзади, то есть расположена глубже от плоскости мембраны Бруха по сравнению с положением в здоровых глазах (438 ± 102 и 353 ± 170 мкм, соответственно; $p < 0,03$) [97, 98]. Li L. et al. в своем исследовании также подтверждают, что глубина залегания РП у пациентов с ПОУГ высокого ($538,8 \pm 96,8$ мкм) и нормального ($403,8 \pm 185,4$ мкм) давления была больше, чем у здоровых ($336,4 \pm 57,9$ мкм), и эти различия имеют высокую степень достоверности ($p < 0,01$) [107].

При интерпретации этих данных необходимо учитывать значительную физиологическую вариативность параметра. По данным зарубежных и отечественных исследователей глубина РП у здоровых

может значительно варьировать и в среднем составлять $402,06 \pm 01,46$ мкм, $367,31 \pm 87,00$ мкм, $336,4 \pm 57,9$ мкм, а диапазон колебаний составлял от 193,08 до 826,81 мкм [14, 28, 99].

Помимо статических морфометрических характеристик, таких как глубина РП, не менее важным диагностическим аспектом является динамика изменений структур ДЗН (толщины преламинарной ткани). В частности, исследования демонстрируют, что преламинарная ткань обладает выраженной способностью изменять свою толщину в ответ на колебания ВГД. В исследовании Арутюнян Л.Л. и соавт. [99] сравнивали толщину преламинарного слоя нервных волокон (ПСНВ) и глубину РП у пациентов с разными стадиями ПОУГ. Было обнаружено, что толщина ПСНВ снижается уже на ранних стадиях глаукомы. На I стадии ПОУГ значения толщины ПСНВ и ПСНВмин были достоверно ниже, чем в контроле: 205 ± 94 мкм и 158 ± 106 мкм против 334 ± 187 мкм и 238 ± 203 мкм соответственно ($p < 0,04$), что может быть следствием компенсаторных изменений склеры и РП в ответ на повышение ВГД. Корреляционный анализ связи толщины ПСНВ и ПСНВмин с биомеханическими и структурными параметрами глаукомных пациентов показал статистически значимую отрицательную связь толщины ПСНВ и ПСНВмин от стадии ПОУГ, что делает этот параметр диагностически значимым для выявления ранних структурных изменений при развитии ГОН [99]. При повышенном ВГД наблюдается значительное истончение этой структуры, в то время как после хирургического снижения давления отмечается ее утолщение [100]. Авторы выдвинули гипотезу о том, что преламинарная ткань выполняет важную буферную функцию, действуя как естественный амортизатор, который защищает аксоны ганглиозных клеток от механического стресса, вызванного колебаниями ВГД. Однако следует подчеркнуть, что данное исследование было ограничено изучением только пациентов с ПОУГ. Вопрос о возможных различиях в поведении преламинарной ткани при других формах глаукомы, таких как ГНД, остается открытым [100].

Выявленные динамические изменения напрямую связаны с биомеханическими свойствами склеры. Примечательно, что значительные деформации диска зрительного нерва и нервных тканей в меньшей степени зависят от прямого действия ВГД на внутреннюю поверхность диска, чем от опосредованного воздействия офтальмотонуса на склеру [13, 31, 97]. Именно поэтому индивидуальные вариации механических свойств склеры рассматриваются как важные факторы риска развития глаукомы, определяющие тяжесть патологического процесса [13]. Изучение этих биомеханических закономерностей стимулировало разработку диагностических методик, искусственно моделирующих условия механической нагрузки.

Эти патогенетические концепции о роли биомеханики получили развитие в клинических методах диагностики. Существенный вклад в развитие этого направления внесли, прежде всего, отечественные ученые, которыми была разработана серия диагностических нагрузочных и разгрузочных проб, направленных для уточнения диагноза у пациентов с подозрением на глаукому [4, 6, 7, 15, 16, 22]. Эти функциональные тесты, основанные на изучении реакции ВГД в ответ на различные провокационные воздействия, получили широкое признание в отечественной офтальмологической практике [6, 7]. Сегодня не прекращается поиск эффективных нагрузочных проб. Однако в современных исследованиях нагрузочных проб остается нерешенной принципиальная проблема — отсутствие данных о влиянии кератотопографических параметров роговицы на точность измерения ВГД при его индуцированном повышении у пациентов с глаукомой. Хотя ряд авторов изучали изменения топографии роговицы при индуцированной офтальмогипертензии, эти работы не рассматривали специфику ГНД. Между тем, подобные исследования могли бы не только повысить точность диагностики, но и раскрыть новые аспекты патогенеза ГНД, особенно в сочетании с вакуум-компрессионными тестами.

Литература

1. Национальное руководство по глаукоме: для практикующих врачей. 4-е изд., испр. и доп. Под ред. Егорова Е.А., Еричева В.П. М: ГЭОТАР-Медиа 2019; 384.
<https://doi.org/10.33029/9704-5442-8-GLA-2020-1-384>.
2. Chen M.J. Normal tension glaucoma in Asia: Epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and management. *Taiwan J Ophthalmol* 2020; 10(4):250-254.
https://doi.org/10.4103/tjo.tjo_30_20.
3. Jacky W.L., Poemen P.C., XiuJuan Z., Li J. C., Jost B.J. Latest Developments in Normal-Pressure Glaucoma: Diagnosis, Epidemiology, Genetics, Etiology, Causes and Mechanisms to Management. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 2019; 8(6):457-468.
<https://doi.org/10.1097/01.APO.0000605096.48529.9c>
4. Водовозов А.М. Толерантное и интолерантное внутриглазное давление при глаукоме. Волгоград: 1991; 160.
5. Национальное руководство по офтальмологии под ред. С.Э. Аветисова, Е.А. Егорова, Л.К. Мошетоной, В.В. Нероева, Х.П. Тахчиди. М: ГЭОТАР-Медиа 2008; 19-25.
6. Устинова Е.И. Методы ранней диагностики глаукомы. М: Медицина 1966; 190.
7. Волков В.В., Сухинина Л.Б., Тер Андриасов Э.Л. Компрессионно-периметрическая проба в экспресс-диагностике глаукомы и пре-глаукомы. Глаукома: Сборник научных трудов. Алма-Ата, 1980; 5:43-52.
8. Петров С.Ю. Современный взгляд на глаукому нормального давления. *Вестник офтальмологии* 2020; 136(6):57-64.
<https://doi.org/10.17116/oftalma202013606157>
9. Tham Y., Li X., Wong T., Quigley H., Aung T., Cheng C. 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>.
10. Нестеров А.П., Алябьева Ж.Ю. Нормотензивная глаукома: современный взгляд на патогенез, диагностику, клинику и лечение. *Глаукома* 2005; 3:66-75.

Заключение

Обобщая представленные данные, следует отметить, что структурно-биомеханические изменения корнеосклеральной оболочки играют ключевую роль в патогенезе глаукомы. Однако, несмотря на накопленные данные, структурно-биомеханические свойства корнеосклеральной оболочки при ГНД требуют более широкого изучения — как в сравнении с нормой, так и с другими формами глаукомы (таких как ПОУГ), а также в рамках отдельных патогенетических и клинических аспектов. Перспективными направлениями являются разработка новых нагрузочных проб и неинвазивных методов исследования, а также сравнительный анализ биомеханических изменений при разных формах глаукомы. Особый научный и клинический интерес представляет изучение динамики кератотопографических и структурно-биомеханических параметров в условиях контролируемого индуцированного подъема ВГД. Подобные исследования могут способствовать выявлению новых ранних диагностических маркеров ГНД. Проведение этих исследований представляется крайне важным для более углубленного понимания патогенеза ГНД и совершенствования методов ее диагностики и лечения.

References

1. *Natsionalnoe rukovodstvo po glaukome dlya praktikuyuschikh vrachei* [National guidance of glaucoma for practitioners]. 4rd edition, updated and enhanced. Egorov E.A., Eriчев V.P., eds. Moscow, GEOTAR-Media Publ., 2019. 384 p.
<https://doi.org/10.33029/9704-5442-8-GLA-2020-1-384>.
2. Chen M.J. Normal tension glaucoma in Asia: Epidemiology, pathogenesis, diagnosis, and management. *Taiwan J Ophthalmol* 2020; 10(4):250-254.
https://doi.org/10.4103/tjo.tjo_30_20.
3. Jacky W.L., Poemen P.C., XiuJuan Z., Li J. C., Jost B.J. Latest Developments in Normal-Pressure Glaucoma: Diagnosis, Epidemiology, Genetics, Etiology, Causes and Mechanisms to Management. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 2019; 8(6):457-468.
<https://doi.org/10.1097/01.APO.0000605096.48529.9c>
4. Vodovozov A.M. *Tolerantnoe i intolerantnoe vnutriglaznoe davlenie pri glaukome* [Tolerant and intolerant intraocular pressure in glaucoma]. Volgograd, 1991. 160 p.
5. National Ophthalmology Guidelines: Avetisov S.E., Egorov E.A., Moshetova L.K., Neroev V.V., Takhchidi Kh.P., eds. Moscow, GEOTAR-Media, 2008. 19-25 pp.
6. Ustinova E.I. Methods for early glaucoma diagnostics. Moscow, Meditsina Publ., 1966. 190 p.
7. Volkov V.V., Suhinina L.B., Ter-Andriasov E.L. Compression-perimeter probe in express diagnosis of glaucoma and pre-glaucoma. Glaucoma: Collection of scientific articles. Alma-Ata, 1980, 5:43-52.
8. Petrov S.Yu. Modern view on normal-tension glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2020; 136(6):57-64.
<https://doi.org/10.17116/oftalma202013606157>
9. Tham Y., Li X., Wong T., Quigley H., Aung T., Cheng C. 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>.
10. Nesterov A.P., Alyabieva Zh.Yu. Normal-tension glaucoma: current perspectives on pathogenesis, diagnosis, clinical presentation and treatment. *Glaucoma* 2005; 3:66-75.

11. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Исследование биомеханических свойств роговицы у пациентов с нормотензивной и первичной открытоугольной глаукомой. *Вестник офтальмологии* 2008; 124(5):14-16.
12. Иомдина Е.Н., Арутюнян Л.Л., Катаргина Л.А., Киселева О.А., Филиппова О.М. Взаимосвязь корнеального гистерезиса и структурно-функциональных параметров зрительного нерва при разных стадиях первичной открытоугольной глаукомы. *Российский офтальмологический журнал* 2009; 2(3):17-23.
13. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. Под редакцией В.В. Нероева. М: Реал Тайм 2015; 208.
14. Волков В.В., Симакова И.Л., Куликов А.Н., Харакозов А.С., Сулейманова А.Р., Филиппов И.А. Новые морфометрические критерии в изучении патогенеза глаукомы нормального давления. *Вестник офтальмологии* 2020; 136(2):49-55. <https://doi.org/10.17116/oftalma202013602149>
15. Волков В.В., Сухинина Л.Б., Устинова Е.И. Глаукома, преглаукома, офтальмогипертензия. М: Медицина 1985; 216.
16. Макашова Н.В., Васильева А.Е. Биомеханические параметры фиброзной оболочки глаза на фоне проведения разгрузочных проб при первичной открытоугольной глаукоме. *Вестник офтальмологии* 2017; 133(4):31-36. <https://doi.org/10.17116/oftalma2017133431-36>
17. Нестеров А.П., Алябьева Ж.Ю., Лаврентьев А.В. Глаукома нормального давления: гипотеза патогенеза. *Вестник офтальмологии* 2003; 119(2):3-6.
18. Григорьева Е.Г., Абаймов М.А., Сайфуллина И.А. Некоторые аспекты патогенеза глаукомы нормального давления. *Вестник офтальмологии* 2003; 119(3):8-11.
19. Lestak J., Pitrova S., Nutterova E., Bartosova L. Normal tension vs high tension glaucoma: an overview. *Cesk Slov Oftalmol* 2019; 75(2):55-59.
20. Нероев В.В., Михайлова Л.А. Офтальмологическая заболеваемость в России. В кн. Офтальмология. Национальное руководство под ред. С.Э. Аветисова, Е.А. Егоров, Л.К. Мошечевой, Х.П. Тахчиди. М: ГЭОТАР-Медиа 2018; 15-19.
21. Kim K.E., Park K.H. Update on the Prevalence, Etiology, Diagnosis, and Monitoring of Normal-Tension Glaucoma. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 2016; 5(1):23-31. <https://doi.org/10.1097/APO.0000000000000177>.
22. Волков В.В., Сухинина Л.Б., Тер-Андрасов Э.Л. О применении вакуума в компрессионно-периметрической пробе при диагностике глаукомы. *Вестник офтальмологии* 1981; 2: 22-25.
23. Иомдина Е.Н., Петров С.Ю., Антонов А.А. и др. Корнеосклеральная оболочка глаза: возможности оценки биомеханических свойств в норме и при патологии. *Офтальмология* 2016; 13(2):62-68. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2016-2-62-68>
24. Safa B.N., Wong C.A., Ha J., Ethier C.R. Glaucoma and biomechanics. *Curr Opin Ophthalmol* 2021; 33(2):80-90. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000829>.
25. Иомдина Е.Н., Игнатъева Н.Ю., Данилов Н.А. и др. Биохимические и структурно-биомеханические особенности матрикса склеры человека при первичной открытоугольной глаукоме. *Вестник офтальмологии* 2011; 6:10-14.
26. Иомдина Е.Н., Киселева О.А., Якубова Л.В., Хозиев Д.Д. Решетчатая пластинка склеры при глаукоме: биомеханические особенности и возможности их клинического контроля. *Российский офтальмологический журнал* 2018; 11(3):76-83. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-76-83>
27. Курышева Н.И., Ким В.Ю., Ким В.Е., Плиева Х.М. Значение структуры решетчатой мембраны склеры в диагностике и лечении глаукомы. Ремоделирование коллагена решетчатой мембраны и пути терапевтического воздействия на него. *Вестник офтальмологии* 2023; 139(4):121-126. <https://doi.org/10.17116/oftalma202313904112>
28. Seo J.H., Kim T.W., Weinreb R.N. Lamina cribrosa depth in healthy eyes. *Invest Ophthalmol* 2014; 55(3):1241-1251. <https://doi.org/10.1167/iov.13-12536>
29. Lee S.H., Kim T.W., Lee E.J., Girard M.J., Mari J.M. Diagnostic Power of Lamina Cribrosa Depth and Curvature in Glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2017; 58 (2): 755-762. <https://doi.org/10.1167/iov.16-20802>
30. Quigley H.A., Hohman R.M., Addicks E.M., et al. Morphologic changes in the lamina cribrosa correlated with neural loss in open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1983; 95:673-691.
11. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Investigation of corneal biomechanical properties in patients with normal-tension and primary open-angle glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2008; 124(5):14-16.
12. Iomdina E.N., Arutunyan L.L., Katargina L.A., Kiseleva O.A., Filipova O.M. Interrelation between corneal hysteresis and structural functional parameters of the optic nerve in different stages of primary open angle glaucoma. *Russian ophthalmological Journal* 2009; 2(3):17-23.
13. Iomdina E.N., Bauer S.M., Kotlyar K.E. Biomehanika glaza: teoreticheskie aspekty i klinicheskie prilozheniya [Biomechanics of the Eye: Theoretical Aspects and Clinical Applications]. Edited by V.V. Neroev. Moscow, Real Time Publ., 2015. 208 p.
14. Volkov V.V., Simakova I.L., Kulikov A.N., Harakozov A.S., Sulejmanova A.R., Filippov I.A. New morphometric criteria in the study of the pathogenesis of normal pressure glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2020; 136(2):49-55. <https://doi.org/10.17116/oftalma202013602149>
15. Volkov V.V., Sukhinina L.B., Ustinova E.I. Glaukoma, preglaukoma, oftalmogipertenziya [Glaucoma, pre-glaucoma, ocular hypertension]. Moscow, Meditsina Publ., 1985. 216 p.
16. Makashova, N. V., Vasilyeva, A. E. Biomechanical parameters of the fibrous tunic of the eye during unloading tests in primary open-angle glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2017; 133(4):31-36. <https://doi.org/10.17116/oftalma2017133431-36>
17. Nesterov A.P., Aliab'eva Z.Yu, Lavrent'ev A.V. Normal-pressure glaucoma: a hypothesis of pathogenesis. *Russian Annals of Ophthalmology* 2003; 119(2):3-6.
18. Grigoreva E.G., Abaimov M.A., Saifullina I.A. Certain aspects of the etiology of normal-pressure glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2003; 119(3):8-11.
19. Lestak J., Pitrova S., Nutterova E., Bartosova L. Normal tension vs high tension glaucoma: an overview. *Cesk Slov Oftalmol* 2019; 75(2):55-59.
20. Neroev V. V., Mikhailova L. A. Ophthalmic morbidity in Russia. In: *Ophthalmology: National guidelines*. S.E. Avetisov, E.A. Egorov, L.K. Moshetova, Kh.P. Takchidi, eds. Moscow, GEOTAR-Media, 2018. 15-19.
21. Kim K.E., Park K.H. Update on the Prevalence, Etiology, Diagnosis, and Monitoring of Normal-Tension Glaucoma. *Asia Pac J Ophthalmol (Phila)* 2016; 5(1):23-31. <https://doi.org/10.1097/APO.0000000000000177>.
22. Volkov V.V., Suhinina L.B., Ter-Andriasov E.L. On vacuum application in the compression perimetry probe in glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 1981; 2:22-25.
23. Iomdina E.N., Petrov S.Yu., Antonov A.A. et al. The corneoscleral shell of the eye: potentials of assessing biomechanical parameters in normal and pathological conditions. *Ophthalmology in Russia* 2016; 13(2):62-68. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2016-2-62-68>
24. Safa B.N., Wong C.A., Ha J., Ethier C.R. Glaucoma and biomechanics. *Curr Opin Ophthalmol* 2021; 33(2):80-90. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000829>.
25. Iomdina E.N., Ignatyeva N.Yu., Danilov N.A., et al. Biochemical, structural and biomechanical features of the human scleral matrix in primary open-angle glaucoma. *Russian Annals of Ophthalmology* 2011; 6:10-14.
26. Iomdina E.N., Kiseleva O.A., Yakubova L.V., Khoziev D.D. Lamina cribrosa in glaucoma: biomechanical properties and possibilities of their clinical control. *Russian Ophthalmological Journal* 2018; 11(3):76-83. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-76-83>
27. Kurysheva, N. I., Kim, V. Y., Kim, V. E., Plieva, Kh. M. The role of the scleral lamina cribrosa structure in glaucoma diagnosis and treatment: Collagen remodeling of the lamina cribrosa and therapeutic intervention pathways. *Russian Annals of Ophthalmology* 2023; 139(4): 121-126. <https://doi.org/10.17116/oftalma202313904112>
28. Seo J.H., Kim T.W., Weinreb R.N. Lamina cribrosa depth in healthy eyes. *Invest Ophthalmol* 2014; 55(3):1241-1251. <https://doi.org/10.1167/iov.13-12536>
29. Lee S.H., Kim T.W., Lee E.J., Girard M.J., Mari J.M. Diagnostic Power of Lamina Cribrosa Depth and Curvature in Glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2017; 58 (2): 755-762. <https://doi.org/10.1167/iov.16-20802>
30. Quigley H.A., Hohman R.M., Addicks E.M., et al. Morphologic changes in the lamina cribrosa correlated with neural loss in open-angle glaucoma. *Am J Ophthalmol* 1983; 95:673-691.

31. Roberts M.D., Sigal I.A., Liang Y., Burgoyne C.F., Downs J.C. Changes in the biomechanical response of the optic nerve head in early experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2010; 51(11):5675-5684. <https://doi.org/10.1167/iov.10-5411>
32. Quigley H.A., Addicks E.M. Regional differences in the structure of the lamina cribrosa and their relation to glaucomatous optic nerve damage. *Arch Ophthalmol* 1981; 99(1):137-143.
33. Boote C., Sigal A., Grytz R., Yi Hua Y., Nguyen T, Michael J A Girard. Scleral structure and biomechanics. *Prog Retin Eye Res* 2019; 74:100773. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2019.100773>
34. Nguyen C, Cone FE, Nguyen TD, Coudrillier B, Pease ME, Steinhart MR, Oglesby EN, Jefferys JL, Quigley HA. Studies of scleral biomechanical behavior related to susceptibility for retinal ganglion cell loss in experimental mouse glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013; 54(3):1767-1780. <https://doi.org/10.1167/iov.12-10952>
35. Girard MJ, Dupps WJ, Baskaran M, Scarcelli G, Yun SH, Quigley HA, Sigal IA, Strouthidis NG. Translating ocular biomechanics into clinical practice: current state and future prospects. *Curr Eye Res* 2015; 40(1):1-18. <https://doi.org/10.3109/02713683.2014.914543>
36. Korneva A, Kimball EC, Jefferys JL, Quigley HA, Nguyen TD. Biomechanics of the optic nerve head and peripapillary sclera in a mouse model of glaucoma. *J R Soc Interface* 2020; 17(173):20200708. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0708>
37. Robert A Clark, Soh Youn Suh, Joseph Caprioli, JoAnn A Giacon, Kourros Nouri-Mahdavi, Simon K Law, Laura Bonelli, Anne L Coleman, Joseph L Demer. Adduction-Induced Strain on the Optic Nerve in Primary Open Angle Glaucoma at Normal Intraocular Pressure. *Curr Eye Res* 2020; 46(4):568-578. <https://doi.org/10.1080/02713683.2020.1817491>
38. Carolina N Susanna, Alberto Diniz-Filho, Fábio B Daga, Bianca N Susanna, Feilin Zhu, Nara G Ogata, Felipe A Medeiros. A Prospective Longitudinal Study to Investigate Corneal Hysteresis as a Risk Factor for Predicting Development of Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2018; 187:148-152. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2017.12.018>
39. Deol M, Taylor DA, Radcliffe, NM. Corneal hysteresis and its relevance to glaucoma. *Cur Opin Ophthalmol* 2015; 26(2):96-102. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000130>
40. Hong Y, Shoji N, Morita T, Hirasawa K, Matsumura K, Kasahara M, et al. Comparison of corneal biomechanical properties in normal tension glaucoma patients with different visual field progression speed. *International J Ophthalmol* 2016; 9(7):973-978. <https://doi.org/10.18240/ijo.2016.07.06>
41. Shin J, Lee JW, Kim EA, Caprioli J. The effect of corneal biomechanical properties on rebound tonometer in patients with normal-tension glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2015; 159(1):144-154. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.10.007>
42. Morita T, Shoji N, Kamiya K, Fujimura F, Shimizu K. Corneal biomechanical properties in normal-tension glaucoma. *Acta Ophthalmol* 2012; 90(1):48-53. <https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.2011.02242.x>
43. D Pensyl, M Sullivan-Mee, M Torres-Monte, K Halverson, C Qualls. Combining corneal hysteresis with central corneal thickness and intraocular pressure for glaucoma risk assessment. *Eye (Lond)* 2012; 26(10):1349-1356. <https://doi.org/10.1038/eye.2012.164>
44. Pierscionek B.K., Asejczyk-Widlicka M., Schachar R.A. The effect of changing intraocular pressure on the corneal and scleral curvatures in the fresh porcine eye. *Brit J Ophthalmol* 2007; 91(6):801-803. <https://doi.org/10.1136/bjo.2006.110221>
45. Giuliano Scarcelli, Sabine Kling, Elena Quijano, Roberto Pineda, Susana Marcos, Seok Hyun Yun. Brillouin Microscopy of Collagen Crosslinking: Noncontact Depth-Dependent Analysis of Corneal Elastic Modulus. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013; 54(2):1418-1425. <https://doi.org/10.1167/iov.12-11387>
46. Scarcelli G, Yun SH. Brillouin optical microscopy of the human eye in vivo. *Opt Express* 2012; 20(8):9197-9202. <https://doi.org/10.1364/OE.20.009197>
47. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Патология роговицы. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии. 2009; 138(4):30-33.
48. Аветисов С.Э., Осипян Г.А., Абукеримова А.К., Акованцева А.А., Ефремов Ю.М., Фролова А.А., Котова С.Л., Тимашев П.С. Экспериментальные исследования биомеханических свойств роговицы. *Вестник офтальмологии* 2022; 138(3):124-131. <https://doi.org/10.17116/ofthalma202213803112>
31. Roberts M.D., Sigal I.A., Liang Y., Burgoyne C.F., Downs J.C. Changes in the biomechanical response of the optic nerve head in early experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2010; 51(11):5675-5684. <https://doi.org/10.1167/iov.10-5411>
32. Quigley H.A., Addicks E.M. Regional differences in the structure of the lamina cribrosa and their relation to glaucomatous optic nerve damage. *Arch Ophthalmol* 1981; 99(1):137-143.
33. Boote C., Sigal A., Grytz R., Yi Hua Y., Nguyen T, Michael J A Girard. Scleral structure and biomechanics. *Prog Retin Eye Res* 2019; 74:100773. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2019.100773>
34. Nguyen C, Cone FE, Nguyen TD, Coudrillier B, Pease ME, Steinhart MR, Oglesby EN, Jefferys JL, Quigley HA. Studies of scleral biomechanical behavior related to susceptibility for retinal ganglion cell loss in experimental mouse glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013; 54(3):1767-1780. <https://doi.org/10.1167/iov.12-10952>
35. Girard MJ, Dupps WJ, Baskaran M, Scarcelli G, Yun SH, Quigley HA, Sigal IA, Strouthidis NG. Translating ocular biomechanics into clinical practice: current state and future prospects. *Curr Eye Res* 2015; 40(1):1-18. <https://doi.org/10.3109/02713683.2014.914543>
36. Korneva A, Kimball EC, Jefferys JL, Quigley HA, Nguyen TD. Biomechanics of the optic nerve head and peripapillary sclera in a mouse model of glaucoma. *J R Soc Interface* 2020; 17(173):20200708. <https://doi.org/10.1098/rsif.2020.0708>
37. Robert A Clark, Soh Youn Suh, Joseph Caprioli, JoAnn A Giacon, Kourros Nouri-Mahdavi, Simon K Law, Laura Bonelli, Anne L Coleman, Joseph L Demer. Adduction-Induced Strain on the Optic Nerve in Primary Open Angle Glaucoma at Normal Intraocular Pressure. *Curr Eye Res* 2020; 46(4):568-578. <https://doi.org/10.1080/02713683.2020.1817491>
38. Carolina N Susanna, Alberto Diniz-Filho, Fábio B Daga, Bianca N Susanna, Feilin Zhu, Nara G Ogata, Felipe A Medeiros. A Prospective Longitudinal Study to Investigate Corneal Hysteresis as a Risk Factor for Predicting Development of Glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2018; 187:148-152. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2017.12.018>
39. Deol M, Taylor DA, Radcliffe, NM. Corneal hysteresis and its relevance to glaucoma. *Cur Opin Ophthalmol* 2015; 26(2):96-102. <https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000130>
40. Hong Y, Shoji N, Morita T, Hirasawa K, Matsumura K, Kasahara M, et al. Comparison of corneal biomechanical properties in normal tension glaucoma patients with different visual field progression speed. *International J Ophthalmol* 2016; 9(7):973-978. <https://doi.org/10.18240/ijo.2016.07.06>
41. Shin J, Lee JW, Kim EA, Caprioli J. The effect of corneal biomechanical properties on rebound tonometer in patients with normal-tension glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2015; 159(1):144-154. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.10.007>
42. Morita T, Shoji N, Kamiya K, Fujimura F, Shimizu K. Corneal biomechanical properties in normal-tension glaucoma. *Acta Ophthalmol* 2012; 90(1):48-53. <https://doi.org/10.1111/j.1755-3768.2011.02242.x>
43. D Pensyl, M Sullivan-Mee, M Torres-Monte, K Halverson, C Qualls. Combining corneal hysteresis with central corneal thickness and intraocular pressure for glaucoma risk assessment. *Eye (Lond)* 2012; 26(10):1349-1356. <https://doi.org/10.1038/eye.2012.164>
44. Pierscionek B.K., Asejczyk-Widlicka M., Schachar R.A. The effect of changing intraocular pressure on the corneal and scleral curvatures in the fresh porcine eye. *Brit J Ophthalmol* 2007; 91(6):801-803. <https://doi.org/10.1136/bjo.2006.110221>
45. Giuliano Scarcelli, Sabine Kling, Elena Quijano, Roberto Pineda, Susana Marcos, Seok Hyun Yun. Brillouin Microscopy of Collagen Crosslinking: Noncontact Depth-Dependent Analysis of Corneal Elastic Modulus. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013; 54(2):1418-1425. <https://doi.org/10.1167/iov.12-11387>
46. Scarcelli G, Yun SH. Brillouin optical microscopy of the human eye in vivo. *Opt Express* 2012; 20(8):9197-9202. <https://doi.org/10.1364/OE.20.009197>
47. Avetisov S. E., Bubnova I. A., Antonov A. A. Corneal pathology: Investigation of the influence of corneal biomechanical properties on tonometry indicators. *Russian Annals of Ophthalmology* 2009; 138(4), 30-33.
48. Avetisov S.E., Osipyan G.A., Abukerimova, A.K., Akovantseva A.A., Efremov, Y.M., Frolova A.A., Kotova S.L., Timashev P.S. Experimental studies of corneal biomechanical properties. *Russian Annals of Ophthalmology* 2022; 138(3):124-131. <https://doi.org/10.17116/ofthalma202213803112>

49. Светикова Л.А., Иомдина Е.Н., Киселева О.А. Биомеханические и биохимические особенности корнеосклеральной капсулы глаза при первичной открытоугольной глаукоме. *Российский офтальмологический журнал* 2013; 2:105-112.
50. Burgoyne C.F., Downs J.C., Bellezza A.J., et al. The optic nerve head as a biomechanical structure: a new paradigm for understanding the role of IOP related stress and strain in the pathophysiology of glaucomatous optic nerve head damage. *Prog Retin Eye Res* 2005; 24(1):39-73. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2004.06.001>
51. Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Морозова Ю.С., Анисимов С.И. Биометрические и морфометрические параметры решетчатой пластинки у пациентов с разными стадиями первичной открытоугольной глаукомы. *Национальный журнал глаукома* 2021; 20(3):11-19.
52. Киселева О.А., Иомдина Е.Н., Якубова Л.В., Хозиев Д.Д. Решетчатая пластинка склеры при глаукоме: биомеханические особенности и возможности их клинического контроля. *Российский офтальмологический журнал* 2018; 11(3):76-83. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-76-83>
53. Котляр К.Е., Волков В.В., Светлова О.В., Смольников Б.А. Биомеханическая модель взаимодействия аккомодационной и дренажной регуляторных систем глазного яблока человека. Нижний Новгород: 1996; 101-102.
54. Фисенко Н.В. Роговица: анатомо-функциональные особенности, новые методы прижизненной диагностики патологических состояний. *Журнал анатомии и гистопатологии* 2022; 11(2):78-86.
55. Волков В.В. Существенный элемент глаукоматозного процесса, не учитываемый в клинической практике. *Офтальмологический журнал* 1976; 7:500-504.
56. Данилов Н.А., Игнатиева Н.Ю., Иомдина Е.Н. Исследование склеры глаукомных глаз с помощью физико-химического анализа. *Биофизика* 2011; 56:520-526.
57. Арутюнян Л.Л. Роль вязкоэластических свойств глаза в определении давления цели и оценке развития глаукоматозного процесса. Автореф. дисс. канд. мед. наук. М: 2009.
58. Avila G.G. Collagen metabolism in human aqueous humor from primary open-angle glaucoma. *Arch Ophthalmol* 1995; 113(10):1319-1323. <https://doi.org/10.1001/archoph.1995.011001001319039>
59. Keeley F.W., Morin J.D., Vesele S. Characterization of collagen from normal human sclera. *Exp Eye Res* 1984; 39(5):533-542. [https://doi.org/10.1016/0014-4835\(84\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0014-4835(84)90053-8)
60. Zeng G., Millis A.J.T. Differential regulation of collagenase and stromelysin mRNA in late passage cultures of human fibroblasts. *Exp Cell Res* 1996; 222(1):150-156. <https://doi.org/10.1006/excr.1996.0019>
61. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. К вопросу о нормальных значениях биомеханических параметров фиброзной оболочки глаза. *Глаукома* 2021; 3:5-11.
62. Scarcelli G., Kling S., Quijano E., Pineda R., Marcos S., Yun S.H. Brillouin microscopy of collagen crosslinking: noncontact depth-dependent analysis of corneal elastic modulus. *Invest Ophthalmol* 2013; 54(2):1418-1425. <https://doi.org/10.1167/iiov.12-11387>
63. 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.
64. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Биомеханические свойства роговицы: клиническое значение, методы исследования, возможности систематизации подходов к изучению. *Вестник офтальмологии* 2010; 126(6):3-7.
65. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Исследование влияния биомеханических свойств роговицы на показатели тонометрии. *Бюллетень Сибирского отделения Российской академии медицинских наук* 2009; 29(4):30-33.
66. Аветисов С.Э., Бубнова И.А., Антонов А.А. Возрастные изменения биомеханических свойств фиброзной оболочки глаза. *Глаукома* 2013; 3(2):10-15.
67. Аветисов С.Э., Мамиконян В.Р., Завалишин Н.Н., Нениюков А.К. Экспериментальное исследование механических характеристик роговицы и прилегающих участков склеры. *Офтальмологический журнал* 1988; 4:233-237.
68. Акопян А.И., Еричев В.П., Иомдина Е.Н. Ценность биомеханических параметров глаза в трактовке развития глаукомы, миопии и сочетанной патологии. *Глаукома* 2008; 1:9-14.
69. Светлова О.В., Кошиц И.Н., Рябцева А.А., Макаров Ф.Н., Засеева М.В., Мустаца В.Ф. Роль ригидности фиброзной оболочки глаза и флуктуации склеры в ранней диагностике открытоугольной глаукомы. *Офтальмологический журнал* 2010; 6:76-88.
49. Svetikova L. A., Iomdina E. N., Kiseleva O. A. Biomechanical and biochemical features of the corneoscleral eye capsule in primary open-angle glaucoma. *Russian Ophthalmological Journal* 2013; 2:105-112.
50. Burgoyne C.F., Downs J.C., Bellezza A.J., et al. The optic nerve head as a biomechanical structure: a new paradigm for understanding the role of IOP related stress and strain in the pathophysiology of glaucomatous optic nerve head damage. *Prog Retin Eye Res* 2005; 24(1):39-73. <https://doi.org/10.1016/j.preteyeres.2004.06.001>
51. Arutyunyan L.L., Anisimova S.Yu., Morozova Yu.S., Anisimov S.I. Biometric and morphometric parameters of the lamina cribrosa in patients with different stages of primary open-angle glaucoma. *National Journal glaucoma* 2021; 20(3):11-19.
52. Kiseleva O. A., Iomdina E. N., Yakubova L. V., Khoziev D. D. The scleral lamina cribrosa in glaucoma: Biomechanical features and possibilities of their clinical monitoring. *Russian Ophthalmological Journal* 2018; 11(3):76-83. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2018-11-3-76-83>
53. Kotlyar K.E., Volkov V.V., Svetlova O.V., Smolnikov B.A. Biomechanicheskaya model' vzaimodeystviya akkomodatsionnoy i drenazhnoi regulatorynykh system glaznogo yabloka [Biomechanical model of interaction between accommodative and drainage regulatory systems of the human eyeball]. Nizhny Novgorod, 1996. 101-102 pp.
54. Fisenko N.V. Cornea: Anatomical and functional features, new methods of in vivo diagnosis of pathological conditions. *Journal of Anatomy and Histopathology* 2022; 11(2):78-86.
55. Volkov V.V. Sushchestvennyi element glaukomatoznogo protsessa, ne uchityvaemyi v klinicheskoi praktike. *Russian Ophthalmological Journal* 1976; 7:500-504.
56. Danilov N.A., Ignatieva N.Yu., Iomdina E.N. Study of sclera in glaucomatous eyes using physicochemical analysis. *Biofizika* 2011; 56:520-526.
57. Arutyunyan L.L. The role of viscoelastic properties of the eye in target pressure determination and evaluation of glaucomatous process development. Abstract of Candidate of Medical Sciences dissertation. Moscow, 2009.
58. Avila G.G. Collagen metabolism in human aqueous humor from primary open-angle glaucoma. *Arch Ophthalmol* 1995; 113(10):1319-1323. <https://doi.org/10.1001/archoph.1995.011001001319039>
59. Keeley F.W., Morin J.D., Vesele S. Characterization of collagen from normal human sclera. *Exp Eye Res* 1984; 39(5):533-542. [https://doi.org/10.1016/0014-4835\(84\)90053-8](https://doi.org/10.1016/0014-4835(84)90053-8)
60. Zeng G., Millis A.J.T. Differential regulation of collagenase and stromelysin mRNA in late passage cultures of human fibroblasts. *Exp Cell Res* 1996; 222(1):150-156. <https://doi.org/10.1006/excr.1996.0019>
61. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov, A.A. On the question of normal values of biomechanical parameters of the fibrous tunic of the eye. *Glaukoma* 2021; 3:5-11.
62. Scarcelli G., Kling S., Quijano E., Pineda R., Marcos S., Yun S.H. Brillouin microscopy of collagen crosslinking: noncontact depth-dependent analysis of corneal elastic modulus. *Invest Ophthalmol* 2013; 54(2):1418-1425. <https://doi.org/10.1167/iiov.12-11387>
63. Eremina M.V., Eriчев V.P., & Yakubova L.V. Influence of central corneal thickness on intraocular pressure in normal and glaucomatous eyes. *Glaukoma* 2006; 4:78-83.
64. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. Corneal biomechanical properties: Clinical significance, research methods, and possibilities of systematizing study approaches. *Russian Annals of Ophthalmology* 2010; 126(6):3-7.
65. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. The study of the corneal biomechanical properties on the intraocular pressure measurement. *Bulletin of Siberian branch of Russian Academy of Medical Sciences* 2009; 29(4):30-33.
66. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov, A.A. Age-related changes in biomechanical properties of the fibrous tunic of the eye. *Glaukoma* 2013; 3(2):10-15.
67. Avetisov S.E., Mamikonyan V.R., Zavalishin N.N., Nenyukov A.K. Experimental study of mechanical characteristics of the cornea and adjacent scleral areas. *Russian Ophthalmological Journal* 1988; 4:233-237.
68. Akopyan A.I., Eriчев V.P., Iomdina, E.N. Value of ocular biomechanical parameters in interpreting the development of glaucoma, myopia, and combined pathology. *Glaukoma* 2008; 1:9-14.
69. Koshits I.N., Svetlova O.V., Ryabtseva A.A., Makarov F.N., Zaseeva M.V., Mustyatsa V. F. The role of rigidity of the eye fibrous coat and scleral fluctuation in the early diagnosis of open-angle glaucoma. *Oftal'mologicheskij zhurnal* 2010; 6:76-88.

70. Светлова О.В., Кошиц И.Н., Панкратов Р.М., Макаровская О.В., Засеева М.В. Взаимосвязь внутриглазного давления с инволюционными колебаниями ригидности глаза. *Вестник офтальмологии* 2024; 140(3):11-18.
<https://doi.org/10.17116/oftalma202414003111>
71. Salvétat ML, Zeppieri M, Tosoni C, Felletti M, Grasso L, Brusini P. Corneal Deformation Parameters Provided by the Corvis-ST Pachy-Tonometer in Healthy Subjects and Glaucoma Patients. *Glaucoma* 2015; 24(8):568-574.
<https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000133>.
72. Ji C, Yu J, Li T, Tian L, Huang Y, Wang Y, Zheng Y. Dynamic curvature topography for evaluating the anterior corneal surface change with Corvis ST. *Biomed Eng Online* 2015; 4:14:53.
<https://doi.org/10.1186/s12938-015-0036-2>.
73. Lee R, Chang RT, Wong IY, Lai JS, Lee JW, Singh K. Novel Parameter of Corneal Biomechanics That Differentiate Normals From Glaucoma. *Glaucoma* 2016; 25(6):603-609.
<https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000284>.
74. Tian L, Wang D, Wu Y, Meng X, Chen B, Ge M, Huang Y. Corneal biomechanical characteristics measured by the CorVis Scheimpflug technology in eyes with primary open-angle glaucoma and normal eyes. *Acta Ophthalmol* 2016; 94(5):317-324.
<https://doi.org/10.1111/aos.12672>.
75. Medeiros FA, Meira-Freitas D, Lisboa R, Kuang TM, Zangwill LM, Weinreb RN. Corneal hysteresis as a risk factor for glaucoma progression: a prospective longitudinal study. *Ophthalmology* 2013; 120(8):1533-1540.
<https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2013.01.032>.
76. Zimprich L, Diedrich J, Bleeker A, Schweitzer J.A. Corneal Hysteresis as a biomarker of glaucoma: current insights. *Clin Ophthalmol* 2020; 14:2255-2264.
<https://doi.org/10.2147/OPHT.S236114>
77. Park K., Shin J., Lee J. Relationship between corneal biomechanical properties and structural biomarkers in patients with normal-tension glaucoma: a retrospective study. *BMC Ophthalmol* 2018; 18:7.
<https://doi.org/10.1186/s12886-018-0673-x>
78. Wells A.P., Garway-Heath D.F., Poostchi A., et al. Corneal hysteresis but not corneal thickness correlates with optic nerve surface compliance in glaucoma patients. *Invest Ophthalmol* 2008; 49:3262-3268.
<https://doi.org/10.1167/iovs.07-1556>
79. Park L.H.Y, Lee N.Y., Choi J.A., Park C.K. Measurement of scleral thickness using swept-source optical coherence tomography in patients with open-angle glaucoma and myopia. *Am J Ophthalmol* 2014; 157(4):876-884.
<https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.01.007>
80. Omodaka K., Horii T., Takahashi S., Kikawa T., Matsumoto A., Yukihiro Shiga Y., Maruyama K., Yuasa T., Akiba M., Nakazawa T. 3D Evaluation of the Lamina Cribrosa with Swept-Source Optical Coherence Tomography in Normal Tension Glaucoma. *PLoS One* 2015; 10(4):e0122347.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122347>
81. Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Анисимов С.И., Нагиева С.Ю. Морфометрические параметры решетчатой пластинки у пациентов с глаукомой нормального давления. *Современные технологии в офтальмологии* 2024; 1(4):87-88.
<https://doi.org/10.25276/2312-4911-2024-4-87-88>
82. Quigley H, Arora K, Idrees S, et al. Biomechanical responses of lamina cribrosa to intraocular pressure change assessed by optical coherence tomography in glaucoma eyes. *Invest Ophthalmol* 2017; 58(5):2566-2577.
<https://doi.org/10.1167/iovs.16-21321>
83. Hernandez M.R. Increased elastin expression in astrocytes of the lamina cribrosa in response to elevated intraocular pressure. *Invest Ophthalmol* 2001; 42(10):2303-2314.
84. Quigley H.A., Brown A., Dorman -Pease M.A. Alterations in elastin of the optic nerve head in human and experimental glaucoma. *Br J Ophthalmol* 1991; 75:552-557.
85. Girard M.J.A., Downs J.C., Burgoyne C.F. et al. Scleral Biomechanics in Glaucoma. XIX Biennial ISER Meeting. Montreal. 2010: 155.
86. Girard M.J.A., Suh J.-K.F., Bottlang M. et al. Biomechanical Changes in the Sclera of Monkey Eyes Exposed to Chronic IOP. *Invest Ophthalmol* 2011; 52(8):5656-5669.
87. Girard M.J., Suh J.K., Bottlang M., Burgoyne C.F., Downs J.C. Scleral biomechanics in the aging monkey eye. *Invest Ophthalmol* 2009; 50:5226-5237.
<https://doi.org/10.1167/iovs.08-3363>.
88. Thornton I.L., Dupps W.J., Roy A.S., Krueger R.R. Biomechanical Effects of Intraocular Pressure Elevation on Optic Nerve/Lamina Cribrosa before and after Peripapillary Scleral Collagen Cross-Linking. *Invest Ophthalmol* 2009; 50(3):1227-1233.
<https://doi.org/10.1167/iovs.08-1960>.
70. Svetlova O.V., Koshits I.N., Pankratov, R.M., Makarovskaya O.V., Zaseeva, M.V. Relationship between intraocular pressure and involutonal fluctuations of ocular rigidity. *Russian Annals of Ophthalmology* 2024; 140(3):11-18.
<https://doi.org/10.17116/oftalma202414003111>
71. Salvétat ML, Zeppieri M, Tosoni C, Felletti M, Grasso L, Brusini P. Corneal Deformation Parameters Provided by the Corvis-ST Pachy-Tonometer in Healthy Subjects and Glaucoma Patients. *Glaucoma* 2015; 24(8):568-574.
<https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000133>.
72. Ji C, Yu J, Li T, Tian L, Huang Y, Wang Y, Zheng Y. Dynamic curvature topography for evaluating the anterior corneal surface change with Corvis ST. *Biomed Eng Online* 2015; 4:14:53.
<https://doi.org/10.1186/s12938-015-0036-2>.
73. Lee R, Chang RT, Wong IY, Lai JS, Lee JW, Singh K. Novel Parameter of Corneal Biomechanics That Differentiate Normals From Glaucoma. *Glaucoma* 2016; 25(6):603-609.
<https://doi.org/10.1097/IJG.0000000000000284>.
74. Tian L, Wang D, Wu Y, Meng X, Chen B, Ge M, Huang Y. Corneal biomechanical characteristics measured by the CorVis Scheimpflug technology in eyes with primary open-angle glaucoma and normal eyes. *Acta Ophthalmol* 2016; 94(5):317-324.
<https://doi.org/10.1111/aos.12672>.
75. Medeiros FA, Meira-Freitas D, Lisboa R, Kuang TM, Zangwill LM, Weinreb RN. Corneal hysteresis as a risk factor for glaucoma progression: a prospective longitudinal study. *Ophthalmology* 2013; 120(8):1533-1540.
<https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2013.01.032>.
76. Zimprich L., Diedrich J., Bleeker A., Schweitzer J.A. Corneal Hysteresis as a biomarker of glaucoma: current insights. *Clin Ophthalmol* 2020; 14:2255-2264.
<https://doi.org/10.2147/OPHT.S236114>
77. Park K., Shin J., Lee J. Relationship between corneal biomechanical properties and structural biomarkers in patients with normal-tension glaucoma: a retrospective study. *BMC Ophthalmol* 2018; 18:7.
<https://doi.org/10.1186/s12886-018-0673-x>
78. Wells A.P., Garway-Heath D.F., Poostchi A., et al. Corneal hysteresis but not corneal thickness correlates with optic nerve surface compliance in glaucoma patients. *Invest Ophthalmol* 2008; 49:3262-3268.
<https://doi.org/10.1167/iovs.07-1556>
79. Park L.H.Y, Lee N.Y., Choi J.A., Park C.K. Measurement of scleral thickness using swept-source optical coherence tomography in patients with open-angle glaucoma and myopia. *Am J Ophthalmol* 2014; 157(4):876-884.
<https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.01.007>
80. Omodaka K., Horii T., Takahashi S., Kikawa T., Matsumoto A., Yukihiro Shiga Y., Maruyama K., Yuasa T., Akiba M., Nakazawa T. 3D Evaluation of the Lamina Cribrosa with Swept-Source Optical Coherence Tomography in Normal Tension Glaucoma. *PLoS One* 2015; 10(4):e0122347.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122347>
81. Arutyunyan L.L., Anisimova S.Y., Anisimov S. I., Nagieva S.Y. Morphometric parameters of the lamina cribrosa in patients with normal-tension glaucoma. *Sovremennye Tekhnologii v Oftal'mologii* 2024; 1(4):87-88.
<https://doi.org/10.25276/2312-4911-2024-4-87-88>
82. Quigley H, Arora K, Idrees S, et al. Biomechanical responses of lamina cribrosa to intraocular pressure change assessed by optical coherence tomography in glaucoma eyes. *Invest Ophthalmol* 2017; 58(5):2566-2577.
<https://doi.org/10.1167/iovs.16-21321>
83. Hernandez M.R. Increased elastin expression in astrocytes of the lamina cribrosa in response to elevated intraocular pressure. *Invest Ophthalmol* 2001; 42(10):2303-2314.
84. Quigley H.A., Brown A., Dorman -Pease M.A. Alterations in elastin of the optic nerve head in human and experimental glaucoma. *Br J Ophthalmol* 1991; 75:552-557.
85. Girard M.J.A., Downs J.C., Burgoyne C.F. et al. Scleral Biomechanics in Glaucoma. XIX Biennial ISER Meeting. Montreal. 2010: 155.
86. Girard M.J.A., Suh J.-K.F., Bottlang M. et al. Biomechanical Changes in the Sclera of Monkey Eyes Exposed to Chronic IOP. *Invest Ophthalmol* 2011; 52(8):5656-5669.
87. Girard M.J., Suh J.K., Bottlang M., Burgoyne C.F., Downs J.C. Scleral biomechanics in the aging monkey eye. *Invest Ophthalmol* 2009; 50:5226-5237.
<https://doi.org/10.1167/iovs.08-3363>.
88. Thornton I.L., Dupps W.J., Roy A.S., Krueger R.R. Biomechanical Effects of Intraocular Pressure Elevation on Optic Nerve/Lamina Cribrosa before and after Peripapillary Scleral Collagen Cross-Linking. *Invest Ophthalmol* 2009; 50(3):1227-1233.
<https://doi.org/10.1167/iovs.08-1960>.

89. Sigal I.A., Flanagan J.G., Ethier C.R. Factors Influencing Optic Nerve Head Biomechanics. *Invest Ophthalmol* 2005; 46(11):4189-4199. <https://doi.org/10.1167/iovs.05-0541>.
90. Braunsman C, Hammer CM, Rheinlaender J, Kruse FE, Schaffer TE, Schlotzer-Schrehardt U, et al. Evaluation of Lamina cribrosa and Peripapillary Sclera Stiffness in Pseudoexfoliation and Normal Eyes by Atomic Force Microscopy. *Investig Ophthalmology* 2012; 53(6):2960. <https://doi.org/10.1167/iovs.11-8409>
91. Leung LK, Ko MW, Ye C, Lam DC, Leung CK. Noninvasive measurement of scleral stiffness and tangent modulus in porcine eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014; 55(6):3721-3726. <https://doi.org/10.1167/iovs.13-13674>.
92. Bellezza A.J, Hart R.T, Burgoyne C.F. The optic nerve head as a biomechanical structure: initial finite element modeling. *Invest Ophthalmol* 2000; 41:2991-3000.
93. Bellezza A.J, Rintalan C.J, Thompson H.W, Downs J.C, Hart R.T, Burgoyne C.F. Deformation of the lamina cribrosa and anterior scleral canal wall in early experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2003; 44(2):623-637. <https://doi.org/10.1167/iovs.01-1282>.
94. Sigal I.A. Interactions between geometry and mechanical properties on the optic nerve head. *Invest Ophthalmol* 2009; 50(6):2785-2795. <https://doi.org/10.1167/iovs.08-3095>.
95. Sigal I.A., Flanagan J.G., Tertinegg I., Ethier C.R. Modeling individual-specific human optic nerve head biomechanics. Part I: IOP induced deformations and influence of geometry. *Biomech Model Mechanobiol* 2009; 8(2):85-98. <https://doi.org/10.1007/s10237-008-0120-7>.
96. Norman R.E., Flanagan J.G., Sigal I.A., Rauchs S.M.K., Tertinegg I., Ethier C.R. Finite element modeling of the human sclera: Influence on optic nerve head biomechanics and connections with glaucoma. *Exp Eye Res* 2011; 93(1):4-11. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2010.09.014>.
97. Park HY, Jeon SH, Park CK. Enhanced depth imaging detects lamina cribrosa thickness differences in normal tension glaucoma and primary open angle glaucoma. *Ophthalmology* 2012;119(1):10-20. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2011.07.033>
98. Furlanetto R.L, Facio A.C Jr, Hatanaka M, Susanna Junior R. Correlation between central corneal thickness and intraocular pressure peak and fluctuation during the water drinking test in glaucoma patients. *Clinics (Sao Paulo)* 2010; 65(10):967-970. <https://doi.org/10.1590/s1807-59322010001000007>.
99. Арутюнян Л.Л., Анисимова С.Ю., Морозова Ю.С., Анисимов С.И. Биометрические и морфометрические параметры решетчатой пластинки у пациентов с разными стадиями первичной открытоугольной глаукомы. *Национальный журнал глаукома* 2021; 20(3):11-19. <https://doi.org/10.25700/2078-4104-2021-20-3-11-19>
100. Barrancos C., Rebolledo G., Oblanca N., Cabarga C., Muñoz-Negrete F.J. Changes in lamina cribrosa and prelaminar tissue after deep sclerectomy. *Eye (Lond)* 2014; 28(1):58-65. <https://doi.org/10.1038/eye.2013.238>
101. Elsheikh A. Finite-element modeling of corneal biomechanical behavior. *J Ref Surg* 2010; 26:289-300. <https://doi.org/10.3928/1081597X-20090710-01>
102. Eilaghi A, Flanagan JG, Tertinegg I, et al. Biaxial mechanical testing of human sclera. *Journal of Biomechanics* 2010; 43(9):1696-1701. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.031>
103. Geraghty B, Jones SW, Rama P, et al. Age-related variations in the biomechanical properties of human sclera. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2012; 16:181-191. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.09.003>
104. Downs J.C, Ensor M.E, Bellezza A.J. et al. Peripapillary scleral thickness in perfusion-fixed normal monkey eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2002; 43(7):2229-2235. <https://doi.org/10.1167/iovs.04-1122>
105. Phillips J.R, Khalaj M, McBrien N.A. Induced myopia associated with increased scleral creep in chick and tree shrew eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2000; 41(8):2028-2034.
106. Lari D.R., Schultz D.S., Wang A.S., Lee O.T., Stewart J.M. Scleral mechanics: comparing whole globe inflation and uniaxial testing. *Exper Eye Res* 2012; 94(1):128-135. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2011.11.017>.
107. Li Lue, Bian A., Cheng G., Zhou Qi. Posterior displacement of the lamina cribrosa in normal-tension and high-tension glaucoma. *Acta Ophthalmology*. 2016. 94(6):492-500. <https://doi.org/10.1111/aos.13012>.
89. Sigal I.A., Flanagan J.G., Ethier C.R. Factors Influencing Optic Nerve Head Biomechanics. *Invest Ophthalmol* 2005; 46(11):4189-4199. <https://doi.org/10.1167/iovs.05-0541>.
90. Braunsman C, Hammer CM, Rheinlaender J, Kruse FE, Schaffer TE, Schlotzer-Schrehardt U, et al. Evaluation of Lamina cribrosa and Peripapillary Sclera Stiffness in Pseudoexfoliation and Normal Eyes by Atomic Force Microscopy. *Investig Ophthalmology* 2012; 53(6):2960. <https://doi.org/10.1167/iovs.11-8409>
91. Leung LK, Ko MW, Ye C, Lam DC, Leung CK. Noninvasive measurement of scleral stiffness and tangent modulus in porcine eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014; 55(6):3721-3726. <https://doi.org/10.1167/iovs.13-13674>.
92. Bellezza A.J, Hart R.T, Burgoyne C.F. The optic nerve head as a biomechanical structure: initial finite element modeling. *Invest Ophthalmol* 2000; 41:2991-3000.
93. Bellezza A.J, Rintalan C.J, Thompson H.W, Downs J.C, Hart R.T, Burgoyne C.F. Deformation of the lamina cribrosa and anterior scleral canal wall in early experimental glaucoma. *Invest Ophthalmol* 2003; 44(2):623-637. <https://doi.org/10.1167/iovs.01-1282>.
94. Sigal I.A. Interactions between geometry and mechanical properties on the optic nerve head. *Invest Ophthalmol* 2009; 50(6):2785-2795. <https://doi.org/10.1167/iovs.08-3095>.
95. Sigal I.A., Flanagan J.G., Tertinegg I., Ethier C.R. Modeling individual-specific human optic nerve head biomechanics. Part I: IOP induced deformations and influence of geometry. *Biomech Model Mechanobiol* 2009; 8(2):85-98. <https://doi.org/10.1007/s10237-008-0120-7>.
96. Norman R.E., Flanagan J.G., Sigal I.A., Rauchs S.M.K., Tertinegg I., Ethier C.R. Finite element modeling of the human sclera: Influence on optic nerve head biomechanics and connections with glaucoma. *Exp Eye Res* 2011; 93(1):4-11. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2010.09.014>.
97. Park HY, Jeon SH, Park CK. Enhanced depth imaging detects lamina cribrosa thickness differences in normal tension glaucoma and primary open angle glaucoma. *Ophthalmology* 2012;119(1):10-20. <https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2011.07.033>
98. Furlanetto R.L, Facio A.C Jr, Hatanaka M, Susanna Junior R. Correlation between central corneal thickness and intraocular pressure peak and fluctuation during the water drinking test in glaucoma patients. *Clinics (Sao Paulo)* 2010; 65(10):967-970. <https://doi.org/10.1590/s1807-59322010001000007>.
99. Arutyunyan L.L., Anisimova S.Yu., Morozova Yu.S., Anisimov S.I. Biometric and morphometric parameters of the lamina cribrosa in patients with different stages of primary open-angle glaucoma. *National Journal Glaucoma* 2021; 20(3):11-19. <https://doi.org/10.25700/2078-4104-2021-20-3-11-19>
100. Barrancos C., Rebolledo G., Oblanca N., Cabarga C., Muñoz-Negrete F.J. Changes in lamina cribrosa and prelaminar tissue after deep sclerectomy. *Eye (Lond)* 2014; 28(1):58-65. <https://doi.org/10.1038/eye.2013.238>
101. Elsheikh A. Finite-element modeling of corneal biomechanical behavior. *J Ref Surg* 2010; 26:289-300. <https://doi.org/10.3928/1081597X-20090710-01>
102. Eilaghi A, Flanagan JG, Tertinegg I, et al. Biaxial mechanical testing of human sclera. *Journal of Biomechanics* 2010; 43(9):1696-1701. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.031>
103. Geraghty B, Jones SW, Rama P, et al. Age-related variations in the biomechanical properties of human sclera. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2012; 16:181-191. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2011.09.003>
104. Downs J.C, Ensor M.E, Bellezza A.J. et al. Peripapillary scleral thickness in perfusion-fixed normal monkey eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2002; 43(7):2229-2235. <https://doi.org/10.1167/iovs.04-1122>
105. Phillips J.R, Khalaj M, McBrien N.A. Induced myopia associated with increased scleral creep in chick and tree shrew eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2000; 41(8):2028-2034.
106. Lari D.R., Schultz D.S., Wang A.S., Lee O.T., Stewart J.M. Scleral mechanics: comparing whole globe inflation and uniaxial testing. *Exper Eye Res* 2012; 94(1):128-135. <https://doi.org/10.1016/j.exer.2011.11.017>.
107. Li Lue, Bian A., Cheng G., Zhou Qi. Posterior displacement of the lamina cribrosa in normal-tension and high-tension glaucoma. *Acta Ophthalmology*. 2016. 94(6):492-500. <https://doi.org/10.1111/aos.13012>.