

doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-62-68

Корнеосклеральная оболочка глаза: возможности оценки биомеханических свойств в норме и при патологии

Е. Н. Иомдина¹С. Ю. Петров²А. А. Антонов²И. А. Новиков²И. А. Пахомова²Арчаков А. Ю.¹

¹ ФГБУ «Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Научно-исследовательский институт глазных болезней, Россолимо, 11А,Б, Москва, 119021, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2016; 13 (2): 62-68

В статье представлены современные методы оценки биомеханических свойств корнеосклеральной оболочки глаза, предназначенные, как для исследования патогенеза различных офтальмопатологий, так и для практического использования в клинических условиях. Показана диагностическая значимость биомеханических показателей роговицы и склеры при оценке риска осложнений и определения эффективности кераторефракционных вмешательств, для диагностики и прогноза течения кератоконуса, прогрессирующей миопии, глаукомного поражения. В клинической практике достаточно широкое применение нашел анализатор глазного ответа – Ocular Response Analyzer (ORA), позволяющий оценить два параметра, характеризующих упруго-вязкие свойства роговицы – корнеальный гистерезис (КГ) и фактор резистентности роговицы (ФРР). Снижение КГ и ФРР отмечено после эксимерлазерной хирургии, особенно у пациентов с наличием регресса рефракционного эффекта, а также при кератоконусе, что дает основание использовать эти биомеханические показатели как дополнительные диагностические критерии в оценке состояния роговицы. В то же время показано, что данные ORA отражают биомеханический отклик на воздействие воздушного импульса не только роговицы, но корнеосклеральной капсулы в целом. По-видимому, с этим связано снижение КГ у детей с прогрессирующей миопией и ослабленной опорной функцией склеры, а также у взрослых с глаукомным поражением. Высказано предположение, что низкое значение КГ является результатом ремоделирования соединительнотканного матрикса корнеосклеральной оболочки глаза и может являться независимым фактором, свидетельствующим о риске прогрессирования глаукомного процесса. Снижение КГ при первичной открытоугольной глаукоме (сравнение показателей проводилось при компенсированном внутриглазном давлении) происходит параллельно с развитием патологических структурных изменений диска зрительного нерва, ухудшением полей зрения, что свидетельствует о специфичности и чувствительности этого показателя. Дальнейшее совершенствование и внедрение в клиническую практику бесконтактных неинвазивных методов оценки биомеханического статуса роговицы и склеры позволит улучшить диагностику различных патологий глаза, в той или иной степени связанных с нарушением опорных свойств корнеосклеральной оболочки глаза.

Ключевые слова: корнеосклеральная оболочка глаза, биомеханические показатели, корнеальный гистерезис, кераторефракционная хирургия, кератоконус, миопия, глаукома

Прозрачность финансовой деятельности: работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 15-29-03843 и 15-29-03874.

Формат цитирования: Е. Н. Иомдина, С. Ю. Петров, А. А. Антонов, И. А. Новиков, И. А. Пахомов, Арчаков А. Ю. Корнеосклеральная оболочка глаза: возможности оценки биомеханических свойств в норме и при патологии. Офтальмология. 2016;13 (2): 62-68 doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-62-68

ENGLISH

The corneoscleral shell of the eye: potentials of assessing biomechanical parameters in normal and pathological conditions

E. N. Iomdina¹, S. Yu. Petrov², A. A. Antonov², I. A. Novikov², I. A. Pahomova², Archakov A. Y.

¹ Moscow Helmholtz Research Institute of Eye Diseases; Sadovaya-Chernogryazskaya str. 14/19, Moscow, Russian Federation, 105062; ² The Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11a Rossolimo str., Moscow, 119021 Russian Federation.

SUMMARY

The paper reviews modern methods of evaluating the biomechanical properties of the corneoscleral shell of the eye that can be used both in the studies of the pathogenesis of various ophthalmic pathologies and in clinical practice. The biomechanical parameters of the cornea and the sclera have been shown to be diagnostically significant in assessing the risk of complications and the effectiveness of keratorefractive interventions, in the diagnosis and the prognosis of keratoconus, progressive myopia, or glaucoma. In clinical practice, a special device, Ocular Response Analyzer (ORA), has been used on a large scale. The analyzer is used to assess two parameters that characterize viscoelastic properties of the cornea — corneal hysteresis (CH) and corneal resistance factor (CRF). Reduced levels of CH and CRF have been noted after excimer laser surgery, especially that administered to patients who demonstrate a regression in the refraction effect or suffer from keratoconus. This fact justifies the use of these biomechanical parameters as additional diagnostic criteria in the evaluation of the state of the cornea. At the same time, ORA data are shown to reflect the biomechanical response to the impact of the air pulse not only from the cornea alone but also from the whole corneoscleral capsule. This is probably the cause of reduced CH in children with progressive myopia and a weakened supportive function of the sclera, as well as such reduction in glaucomatous adult patients. It is hypothesized that a low CH value is a result of remodeling of the connective tissue matrix of the corneoscleral shell of the eye and can be an independent factor testifying to a risk of glaucoma progression. Reduced CH in primary open-angle glaucoma occurs in parallel with the development of pathological structural changes of the optic disc, and deterioration of visual fields, which is an evidence of a specific character and sensitivity of this parameter. The values were compared under compensated intraocular pressure. Further improvement of noncontact and noninvasive techniques of the assessment of the biomechanical status of the cornea and the sclera and their introduction into clinical practice will improve the diagnosis of various eye pathologies in any way related to disorders of the supporting functions of the corneoscleral shell.

Keywords: corneoscleral shell, biomechanical parameters, corneal hysteresis, keratorefractive surgery, keratoconus, myopia, glaucoma.

For citation: E. N. Iomdina¹, S. Yu. Petrov², A. A. Antonov², I. A. Novikov², I. A. Pahomova², Archakov A. Y. The corneoscleral shell of the eye: potentials of assessing biomechanical parameters in normal and pathological conditions. *Ophthalmology in Russia*. 2016;13 (2): 62-68 doi: 10.18008/1816-5095-2016-2-62-68

Financial Disclosure: This work was supported by grants RFBR 15-29-03874 and 15-29-03843.

Ophthalmology in Russia. 2016; 13 (2): 62-68

В последние десятилетия было установлено, что биомеханические свойства корнеосклеральной оболочки глаза оказывают влияние на результаты измерения внутриглазного давления (ВГД), а также играют определенную роль в патогенезе некоторых заболеваний глаза, в частности, прогрессирующей миопии, глаукомы, кератоконуса и других кератэктазий [1]. В том числе показано, что изменения механических свойств склеры влияют на деформацию решетчатой пластинки, формирование глаукомной экскавации диска зрительного нерва и скорость прогрессирующего ухудшения зрительных функций при глаукоме [2-4]. В связи с этим оценка биомеханических показателей роговицы и склеры может быть необходимой для самых разных аспектов клинической практики — проведения тонометрии [5, 6], назначения ортокератологической коррекции [7], лечения травм фиброзной оболочки [8], выполнения кераторефракционных операций [9, 10], диагностики и лечения миопии [11], кератоконуса [12], глаукомного поражения [13] и др. Каждый из этих аспектов связан с реакцией склеры и роговицы на механическое воздействие, например, на ВГД и его изменения.

Биомеханические исследования изолированной склеральной ткани позволили описать ее вязко-эласти-

ческие свойства, выявить анизотропию (различие в реакции на механическую нагрузку, приложенную в разных направлениях) и неоднородность, т.е. регионарную вариабельность не только ее толщины, но и биомеханических свойств [1, 11, 14-16]. Кроме того, биомеханические исследования показали, что модуль упругости (а также предел прочности) изолированной склеральной ткани меняется не только по областям склеральной оболочки, но и в зависимости от возраста в пределах 5,0-40,0 МПа [1, 11]. Аналогичный возрастной разброс этого параметра (53-208 кГ/см²) был отмечен в работе А. Arciniegas [17], а также Д.Ф. Иванова, которые обнаружили весьма существенную разницу в механической прочности склеры новорожденных и взрослых в переднем сегменте (2,6 кГ/мм² и 3,1 кГ/мм², соответственно) и в области заднего полюса глаза (0,246 кГ/мм² и 0,552 кГ/мм², соответственно).

Однако необходимо подчеркнуть, что результаты механических испытаний образцов изолированной склеры или роговицы не могут полностью соответствовать реальным характеристикам этих тканей в естественных условиях.

Для характеристики механических свойств корнеосклеральной оболочки в клинике давно используют коэффициент, связывающий изменение ВГД с соот-

ветствующим ему изменением объема глазного яблока, который принято называть коэффициентом ригидности (КР) глаза [1]. КР вычисляют по уравнениям J. Friedenwald [18]. Именно этот показатель лег в основу метода тонографии. По расчетам J. Friedenwald, величина КР примерно, постоянна в популяции, составляя для людей среднего возраста при любом ВГД выше 5 мм рт. ст. — 0,021 мм рт. ст./мкл. Эти данные совпадают с полученными В.В. Страховым и В.В. Алексеевым значениями $KP = 0,0214 \pm 0,0005$ мм рт. ст./мкл для здоровых глаз [19]. По другим данным КР в диапазоне физиологических значений ВГД в среднем составляет для нормального глаза 0,0126 мм рт. ст./мкл, достоверно увеличиваясь с возрастом [20]. Однако многие авторы считают, что КР не остается постоянной величиной и существенно зависит от уровня ВГД [21].

В клинической практике КР рассчитывают с помощью дифференциальной тонометрии, в первую очередь, для того, чтобы определить величину истинного ВГД. В России также применяется методика эластотонометрии по Филатову-Кальфа, позволяющая определить КР, но из-за сложности ее выполнения и неоднозначности интерпретации результатов она используется достаточно редко.

В.В. Страхов и В.В. Алексеев предложили метод динамической ригидометрии, использующий коэффициент E_0 , величина которого не зависит от уровня ВГД и позволяет получить прижизненное представление о совокупности свойств склеры: прочности, растяжимости, остаточной деформации, объединенных понятием ригидности [19]. Зарегистрированное повышение уровня ригидности и снижение эластичности склеральной ткани при первичной открытоугольной глаукоме (ПОУГ), значительно превосходящее инволюционные изменения уже в самом начале заболевания, авторы связывают со склеротическими и дегенеративными процессами в склеральной соединительной ткани, что, по их мнению, может иметь патогенетическое значение.

Еще в 70-е годы А.П. Нестеров определил, что интерпретация результатов исследования механических свойств корнеосклеральной оболочки глаза осложнена присущей ей упруго-вязкой реакцией на деформацию, то есть изменением деформации в зависимости от времени воздействия [21]. Это обосновывает необходимость динамического измерения ВГД и вязко-эластических свойств роговицы и склеры.

В качестве возможных подходов к опосредованному определению биомеханических свойств роговицы в условиях живого глаза использовали оптическую интерферометрию, позволяющую оценивать незначительные изменения размеров глаза, по которым отслеживается отношение «напряжение-деформация» [22]. Этот метод пока применяли лишь на глазах макак-резус [23]. Был предложен технически сложный метод

двухимпульсной голографической интерферометрии, для которой необходим интерферометрический отражатель, располагающийся на акриловой контактной линзе. Этот метод показал, что центральная зона нормальной роговицы в физиологических условиях характеризуется практически линейной зависимостью «напряжение-деформация» и модулем упругости, составляющим примерно 10,3 МПа [24, 25]. Разрабатывались методы, основанные на механической спектроскопии, акустической эластографии [26], микроскопии с применением бриллюэновского эффекта рассеяния света [27], специализированной магнитно-резонансной томографии [28], но все эти методики далеки от возможности применения в широкой клинической практике.

Для получения численных значений модуля упругости роговицы использовали приборы, позволяющие измерять магнитоэлектрические параметры биологических тканей, а затем пересчитывали их в величины модуля упругости [29]. Метод фотоупругости по А.И. Журавлеву (1996) выявил, что фотоупругие свойства роговицы характерно изменяются при различных офтальмопатологиях, причем перераспределение напряжений в роговице может рассматриваться как интегральный показатель изменений в биомеханической системе глаза в целом. Информативным расчетным методом оценки распределения напряжений в роговице, особенно после корнеальных вмешательств, является кератотензотопография, основу которой составляет кератотопография (обработка рефракционной кератотопограммы), данные пневмотонометрии и оптической или акустической пахиметрии [30].

Для клинической оценки биомеханических свойств склеральной оболочки глаза был разработан метод офтальмомеханографии и специальное устройство — офтальмомеханограф (ОМГ), позволяющий в циклическом режиме задавать силу, воздействующую на участок склеры, и независимо измерять его смещение (прогиб), т.е. получить непрерывную зависимость «напряжение-деформация» [1, 11]. Было разработано программное обеспечение ОМГ, дающее возможность задавать рабочие параметры (величину, скорость и продолжительность нагружения и разгрузки, число циклов и их конфигурацию), а также анализировать полученные данные, которые в виде диаграммы выводятся на экран.

Определение остаточной деформации склеры после двух последовательных циклов нагружения позволяет установить соотношение между показателями ее упругости и вязкости у данного пациента. Исследуют доступный верхненааружный участок склеры, расположенный в пределах потенциально наиболее уязвимой при миопии экваториальной области. Результаты клинического использования данной методики показали, что диаграммы обследованных детей и подростков с миопией отличаются от нормы по целому ряду

количественных и качественных параметров (форма гистерезисных петель, их взаиморасположение, площадь), характеризующих соотношение упругих и пластических свойств склеральной оболочки глаза данного пациента. Эти данные объективно свидетельствуют об изменении биомеханических свойств склеры в процессе развития миопии [11].

Получаемые с помощью ОМГ биомеханические показатели могли служить объективным диагностическим и прогностическим критерием для выбора лечебной тактики, в частности, для решения вопроса о целесообразности укрепления склеры при миопии. Однако в настоящее время эта методика не применяется для серийных исследований, так как офтальмомеханограф существует только в виде испытательного макета.

Идея определения биомеханических показателей корнеосклеральной оболочки глаза на основе оценки соотношения ее упругих и вязких свойств, реализованная в офтальмомеханографе, была позже использована для создания серийного прибора — анализатора глазного ответа — Ocular Response Analyzer (ORA, Reichert, USA). Работа этого прибора основана на бесконтактной (пнеumo-) тонометрии, сочетающейся с оптоэлектронной системой отслеживания формы роговицы в центральной зоне, что позволяет определить, в частности, две биомеханические характеристики, отражающие вязкоэластические свойства ткани роговицы — корнеальный гистерезис и фактор резистентности роговицы [31-33]. Данные эмпирические показатели, предложенные авторами метода, определяют путем расчета на основе двух значений ВГД, соответствующих двум фазам изменения формы роговицы под воздействием воздушного импульса — момента ее первой и второй апланации. Вследствие вязкоупругих свойств тканей глаза значения этих давлений различаются между собой. С помощью прибора получают графическую зависимость давления от времени воздействия на роговицу воздушного импульса (корнеограмму) и определяют упомянутые выше показатели. Следует заметить, однако, что с точки зрения биомеханики, на измеряемые с помощью ORA параметры роговицы, несомненно, влияют биомеханические свойства склеры и других внутриглазных структур [1]. Тем не менее, в последние годы этот метод активно используется в клинической практике.

Исследователи установили, что анализ показателей биомеханики роговицы, наряду с оценкой клинически значимых факторов риска кератэктазии, может повысить надежность идентификации пациентов, входящих в группу риска по развитию эктатических изменений после кераторефракционной хирургии [34]. Показано, что КГ и ФРР весьма полезны в этом отношении, если их правильно анализировать и интерпретировать. Предлагаются также другие специфические параметры корнеограмм, полученных с помощью ORA, ассоции-

рованные с факторами риска.

Было изучено влияние операций ЛАСИК и ФРК на биомеханические свойства роговицы, оцениваемые с помощью ORA [35]. Установлено, что послеоперационное снижение значений КГ и ФРР происходит у всех пациентов, независимо от метода операции. Более того, исходный (дооперационный) уровень этих показателей не восстанавливается даже через 2 года после вмешательства. У пациентов с исходной миопией высокой степени КГ после ЛАСИК составил 83,6% от дооперационного значения, ФРР еще меньше — всего 68,1%; а после ФРК эти показатели, особенно ФРР, восстановились даже в несколько меньшем объеме: КГ — до 80,1%; ФРР до 61,5% [35]. Эти данные качественно совпали с результатом другого исследования, которое также показало существенно большее снижение ФРР, чем КГ, после ФРК у пациентов с миопией высокой степени [1].

Исследование биомеханических показателей роговицы целесообразно включить в стандарт обследования пациентов с миопией и миопическим астигматизмом перед проведением эксимерлазерной операции, поскольку значения КГ и ФРР у пациентов с миопией различной степени могут быть критерием выбора метода коррекции. Так, пациентам с миопией слабой и средней степени с изначально низкими значениями КГ и ФРР (меньше 7,5 мм рт. ст. и 6,8 мм рт. ст., соответственно), по мнению В.В. Нероева, целесообразнее проводить эксимерлазерную коррекцию зрения по методике ФРК [35]. Пациентам с миопией высокой степени целесообразнее проводить эксимерлазерную коррекцию зрения по методике ЛАСИК, поскольку в этом случае риск регресса рефракционного эффекта и послеоперационного развития кератэктазии ниже. К этим выводам близки результаты работы D. Uthoff [36], в которой показано, что через 3 мес. после ЛАСИК у пациентов с наличием регресса рефракционного эффекта снижение КГ и ФРР выражено несколько сильнее, чем у пациентов со стабильной послеоперационной рефракцией.

Выявлено, что после эксимерлазерной коррекции гиперметропии методом ЛАСИК кератэктазия встречается гораздо реже, чем при миопии, несмотря на то, что эта операция менее предсказуема в отношении биомеханических последствий. Причиной, по-видимому, является удаление роговичной ткани преимущественно в парацентральной зоне, которая при гиперметропии изначально характеризуется большей толщиной [37, 38]. Кроме того, при всех видах роговичной миопической коррекции величина механических напряжений в центре роговицы увеличивается, а при гиперметропической коррекции — уменьшается.

Таким образом, обследование пациентов с аномалиями рефракции с помощью ORA может быть полезным для контроля биомеханических свойств роговицы

в контексте кераторефракционной хирургии, а уточнение и оптимизация параметров этого прибора является в этом отношении весьма перспективным направлением дальнейших исследований.

Клинические исследования показывают, что данные ORA могут быть полезны для диагностики кератоконуса. У пациентов с этим заболеванием, подтвержденным данными кератотопографии, КГ и ФРР оказались достоверно ниже, чем у здоровых лиц, а также у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом без признаков кератоконуса [12, 39-41]. По мере прогрессирования процесса кератэктазии КГ и ФРР, как показано в исследовании [41], достоверно снижаются, при этом значения ФРР коррелируют с уровнем сферических аберраций, особенно при далекозашедших стадиях кератоконуса, поэтому авторы предлагают использовать эти биомеханические показатели как дополнительные диагностические критерии в оценке состояния роговицы при данном заболевании.

Однако другие авторы указывают, что на результаты оценки биомеханических свойств роговицы с помощью ORA существенное влияние оказывает величина ВГД и толщина роговицы [39, 42-45], что несколько снижает диагностические возможности метода. Кроме того, исследование проводится в центральной зоне роговицы диаметром приблизительно 3 мм, хотя начальные изменения при кератоконусе могут локализоваться и ближе к периферии [46]. Скрининговая программа ORA вычисляет также индекс кератоконуса, разделяя исследуемые глаза на 5 категорий: здоровые, с подозрением на кератоконус, с начальным, развитым и далекозашедшим кератоконусом. Однако диагностическая специфичность данного метода недостаточно высока, что вносит ограничения в использование ORA как единственного метода для объективного выявления раннего кератоконуса [46, 47].

Как было указано выше, есть основания полагать, что показатели ORA отражают биомеханический отклик на воздействие воздушного импульса не только роговицы, но и корнеосклеральной капсулы в целом. Так, клинические исследования детей и подростков с различной рефракцией с использованием ORA показали, что значения КГ закономерно снижаются по мере усиления рефракции и роста переднезадней оси глаза, и при миопии средней и высокой степени этот показатель достоверно ниже, чем у детей аналогичного возраста с эмметропией и гиперметропией [48]. Эти результаты свидетельствуют о том, что КГ может быть использован, в том числе, и для оценки состояния опорной функции склеры [48]. При этом достоверной корреляции между ФРР и клинической рефракцией у детей и подростков не обнаружено.

Возможность клинической оценки биомеханических свойств корнеосклеральной оболочки глаза привлекла внимание и глаукоматологов. Оказалось,

что в группе пациентов с глаукомой среднее значение КГ значительно ниже, а разброс показателей шире — по сравнению с показателями людей без какой-либо офтальмопатологии [48-51] [52-54]. По данным А. Котеша, ФРР описывает ВГД-независимую биомеханическую особенность роговицы, которая в норме увеличивается с ее толщиной и уменьшается с возрастом пациента [31].

На основании исследований, проведенных с использованием ORA, некоторые авторы высказали предположение, что низкое значение КГ является независимым фактором возникновения и прогрессирования глаукомного процесса [42, 48, 55, 56]. По их мнению, низкое значение КГ — результат «корнеального ремоделирования» при глаукомном процессе, а повышение ФРР наблюдается в результате снижения эластичности роговицы под воздействием повышенного ВГД. ФРР и КГ являются показателями кумулятивного эффекта эластичного и вязкого сопротивления, оказываемого деформируемой поверхностью роговицы под воздействием воздушной струи, и отражают общую резистентность корнеосклеральной оболочки глаза [1, 35]. В частности, низкие показатели ФРР свидетельствуют о снижении, по сравнению с нормой, резистентности роговицы [35]. Результаты обследования пациентов с ПОУГ с помощью ORA показали, что биомеханические параметры корнеосклеральной оболочки глаза при ПОУГ отличаются от параметров, полученных при обследовании здоровых добровольцев аналогичных возрастных групп. Снижение КГ при ПОУГ (сравнение показателей проводилось при компенсированном ВГД) происходит параллельно с развитием патологических структурных изменений ДЗН, ухудшением полей зрения, что свидетельствует о специфичности и чувствительности этого показателя [42, 48]. При асимметрии глаукомного процесса КГ оказывается ниже на худшем глазу [42, 57]. Надо при этом иметь в виду, что КГ отрицательно коррелирует с величиной ВГД, поэтому сравнение групп пациентов по этому параметру надо проводить только при значениях ВГД, находящихся статистически в одном диапазоне [58]. Подтверждением адекватности КГ как показателя жесткости склеры могут служить прямые измерения податливости переднеэкваториального отдела склеры глаукомных глаз с помощью тонометра Шиотца, которые показали повышение жесткости склеры по мере развития ПОУГ.

В то же время необходимо подчеркнуть, что не все исследователи рассматривают КГ, как независимый риск-фактор развития глаукомы [59].

Возможно, более точную информацию о механических показателях корнеосклеральной оболочки глаза предоставляет прибор CorVis (Oculus, Германия), в котором деформация роговицы под воздействием воздушного импульса отслеживается с помощью высоко-

скоростной Шеймпflug камеры [60, 61]. Разрабатывается и испытывается в клинике еще один перспективный метод — окулярная эластография (Ocular elastography) [62]. Исследования глаз с различной клинической рефракцией, проведенные с помощью этого метода, выявили различия в биомеханических показателях пациентов с миопией и эметропией, что свидетельствует о его потенциальной информативности. Очевидно, в выявленные отличия вносили вклад не столько нарушенные механические свойства роговицы, сколько склеры, поскольку именно эта оболочка глаза характеризуется сниженной опорной функцией при про-

грессирующей миопии [11].

На наш взгляд, дальнейшее совершенствование и внедрение в клиническую практику бесконтактных неинвазивных методов оценки биомеханического статуса роговицы и склеры позволит улучшить диагностику различных патологий глаза, в той или иной степени связанных с нарушением опорных свойств корнеосклеральной оболочки глаза.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ: 15-29-03843 и 15-29-03874.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Iomdina E.N., Bauer S.M., Kotlyar K.E. [Biomechanics of eyes: theoretical aspects and clinical applications] *Biomehanika glaza: teoreticheskie aspekty i klinicheskie prilozheniya*. Moscow: Real'noe vremya; 2015. (in Russ.).
2. Eilaghi A., Flanagan J.G., Simmons C.A., Ethier C.R. Effects of scleral stiffness properties on optic nerve head biomechanics. *Ann Biomed Eng* 2010;38 (4):1586-1592.
3. Sigal I.A., Flanagan J.G., Ethier C.R. Factors influencing optic nerve head biomechanics. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46 (11):4189-4199.
4. Sigal I.A., Flanagan J.G., Tertinegg I., Ethier C.R. Finite element modeling of optic nerve head biomechanics. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2004;45 (12):4378-4387.
5. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. [The study of the effect of the corneal biomechanical properties on the intraocular pressure measurement]. *Issledovanie vliyaniya biomekhanicheskikh svoystv rogovitsy na pokazateli tonometrii [Sibirskii nauchnyi meditsinskii zhurnal]. The Siberian Scientific Medical Journal*. 2009;29 (4):30-33. (In Russ.).
6. Orsengo G.J., Pye D.C. Determination of the true intraocular pressure and modulus of elasticity of the human cornea in vivo. *Bull Math Biol* 1999;61 (3):551-572.
7. Swarbrick H.A. Orthokeratology review and update. *Clin Exp Optom* 2006;89 (3):124-143.
8. Uchio E., Ohno S., Kudoh J., Aoki K., Kislewicz L.T. Simulation model of an eyeball based on finite element analysis on a supercomputer. *Br J Ophthalmol* 1999;83 (10):1106-1111.
9. Alastrue V., Calvo B., Pena E., Doblare M. Biomechanical modeling of refractive corneal surgery. *J Biomech Eng* 2006;128 (1):150-160.
10. Roberts C. Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery. *J Refract Surg* 2002;18 (5):S589-592.
11. Iomdina E.N. [Biomechanical and biochemical disturbances in the sclera of progressive myopia and methods of their correction] *Biomekhanicheskie i biokhimicheskie narusheniya sklery pri progressivnykh blizorukosti i metody ikh korrektsii*. In: Avetisov S.E., Kashchenko T.P., Shamshinova A.M. Visual functions and their correction in children. Moscow: Meditsina; 2006. p. 163-183. (in Russ.).
12. Pinero D.P., Alio J.L., Barraquer R.I., Michael R., Jimenez R. Corneal biomechanics, refraction, and corneal aberrometry in keratoconus: an integrated study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010;51 (4):1948-1955.
13. Quigley H.A. The contribution of the sclera and lamina cribrosa to the pathogenesis of glaucoma: Diagnostic and treatment implications. *Prog Brain Res* 2015;220:59-86.
14. Eilaghi A., Flanagan J.G., Tertinegg I., Simmons C.A., Wayne Brodland G., Ross Ethier C. Biaxial mechanical testing of human sclera. *J Biomech* 2010;43 (9):1696-1701.
15. Elsheikh A., Geraghty B., Alhasso D., Knappett J., Campanelli M., Rama P. Regional variation in the biomechanical properties of the human sclera. *Exp Eye Res* 2010;90 (5):624-633.
16. Girard M.J., Downs J.C., Bottlang M., Burgoyne C.F., Suh J.K. Peripapillary and posterior scleral mechanics—part II: experimental and inverse finite element characterization. *J Biomech Eng* 2009;131 (5):051012.
17. Arciniegas A., Amaya L.E. Mechanical behavior of the sclera. *Ophthalmologica* 1986;193 (1-2):45-55.
18. Friedenwald J.S. Contribution to the theory and practice of tonometry. *American Journal of Ophthalmology* 1937; (20):985-1024.
19. Strakhov V.V., Alekseev V.V. [Dynamic rigidometry] *Dinamicheskaya rigidometriya*. [Annals of Ophthalmology]. *Vestnik oftalmologii*. 1995;1:18-20. (in Russ.).
20. Pallikaris I.G., Kymionis G.D., Ginis H.S., Kounis G.A., Tsilimbaris M.K. Ocular rigidity in living human eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2005;46 (2):409-414.
21. Nesterov A.P., Bunin A.Ya., Katsnel'son L. A. [Intraocular pressure. Physiology and pathology] *Vnutriglaznoe davlenie. Fiziologiya i patologiya*. Moscow: Nauka; 1974. (in Russ.).
22. Brubaker R.F., Ezekiel S., Chin L., Young L., Johnson S.A., Beeler G.W. The stress-strain behavior of the corneoscleral envelope of the eye. I. Development of a system for making in vivo measurements using optical interferometry. *Exp Eye Res* 1975;21 (1):37-46.
23. Brubaker R.F., Johnson S.A., Beeler G.W. The stress-strain behavior of the corneoscleral envelope of the eye. II. In vivo measurements in rhesus monkey eyes. *Exp Eye Res* 1977; 24 (5):425-435.
24. Forster W., Kasprzak H., von Bally G., Busse H. [Qualitative analysis of the elasticity of the bovine cornea by holographic interferometry]. *Klin Monbl Augenheilkd* 1992;200 (1):54-59.
25. Smolek M. Elasticity of the bovine sclera measured with real-time holographic interferometry. *Am J Optom Physiol Opt* 1988;65 (8):653-660.
26. Nguyen T.M., Aubry J.F., Touboul D., Fink M., et al. Monitoring of cornea elastic properties changes during UV-A/riboflavin-induced corneal collagen cross-linking using supersonic shear wave imaging: a pilot study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2012;53 (9):5948-5954.
27. Scarcelli G., Besner S., Pineda R., Yun S.H. Biomechanical characterization of keratoconus corneas ex vivo with Brillouin microscopy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55 (7):4490-4495.
28. Ho L.C., Sigal I.A., Jan N.J., Squires A., et al. Magic angle-enhanced MRI of fibrous microstructures in sclera and cornea with and without intraocular pressure loading. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014;55 (9):5662-5672.
29. Jayasuriya A.C., Ghosh S., Scheinbeim J.I., Lubkin V., Bennett G., Kramer P. A study of piezoelectric and mechanical anisotropies of the human cornea. *Biosens Bioelectron* 2003;18 (4):381-387.
30. Anisimov S.I., Anisimova S.Yu., Smotrich E.A., Zavgorodnyaya T.S., Zolotarevskii K.A. [Keratotenozotopografiya — new diagnostic possibilities for studying the biomechanical properties of the cornea] *Keratotenozotopografiya — novye diagnosticheskie vozmozhnosti izucheniya biomekhanicheskikh svoystv rogovitsy*. [Ophthalmology]. *Oftalmologiya*. 2011;8 (4):13-17. (in Russ.).
31. Kotecha A., Elsheikh A., Roberts C.R., Zhu H., Garway-Heath D.F. Corneal thickness- and age-related biomechanical properties of the cornea measured with the ocular response analyzer. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2006;47 (12):5337-5347.
32. Luce D.A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *J Cataract Refract Surg* 2005;31 (1):156-162.
33. Shah S., Laiquzzaman M., Cunliffe I., Mantry S. The use of the Reichert ocular response analyser to establish the relationship between ocular hysteresis, corneal resistance factor and central corneal thickness in normal eyes. *Cont Lens Anterior Eye* 2006;29 (5):257-262.
34. Roy A.S., Shetty R., Kummel M.K. Keratoconus: a biomechanical perspective on loss of corneal stiffness. *Indian J Ophthalmol* 2013;61 (8):392-393.
35. Neroev V.V., Khandzhyan A.T., Manukyan I.V. [Assessment of influence of eksimerlazerney keratorefraktsionnykh operations of LASIK and FRK on biomechanical properties of a cornea] *Otsenka vliyaniya eksimerlazerneykh keratorefraktsion-*

- nykh operatsii LASIK i FRK na biomekhanicheskie svoystva rogovitsy. [Ophthalmology]. *Oftal'mologiya*. 2009;6 (1):24-29. (In Russ.).
36. Uthoff D., Hebestedt K., Duncker G., Sickenberger H. [Multicentric study regarding assessment of the driving ability of LASIK and orthokeratology patients compared with conventionally corrected persons]. *Klin Monbl Augenheilkd* 2013;230 (3):255-264.
 37. de Medeiros F.W., Sinha-Roy A., Alves M.R., Wilson S.E., Dupps W.J., Jr. Differences in the early biomechanical effects of hyperopic and myopic laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2010;36 (6):947-953.
 38. Qazi M.A., Roberts C.J., Mahmoud A.M., Pepose J.S. Topographic and biomechanical differences between hyperopic and myopic laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 2005;31 (1):48-60.
 39. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. [Corneal biomechanics: clinical importance, evaluation, possibilities of sistemization of examination approaches]. Biomekhanicheskie svoystva rogovitsy: klinicheskoe znachenie, metody issledovaniya, vozmozhnosti sistematizatsii podkhodov k izucheniyu [Annals Ophthalmology]. *Vestnik oftal'mologii* 2010;126 (6):3-7. (In Russ.).
 40. Fontes B.M., Ambrosio Junior R., Jardim D., Velarde G.C., Nose W. Ability of corneal biomechanical metrics and anterior segment data in the differentiation of keratoconus and healthy corneas. *Arq Bras Oftalmol* 2010;73 (4):333-337.
 41. Shah S., Laiquzzaman M. Comparison of corneal biomechanics in pre and post-refractive surgery and keratoconic eyes by Ocular Response Analyser. *Cont Lens Anterior Eye* 2009;32 (3):129-132.
 42. Arutyunyan L.L. [Role of biomechanical properties of an eye in determination of target pressure] Rol' biomekhanicheskikh svoystv glaza v opredelenii tselevogo davleniya. [Glaucoma]. *Glaukoma* 2007;6 (3):60-67. (In Russ.).
 43. Touboul D., Benard A., Mahmoud A.M., Gallois A., Colin J., Roberts C.J. Early biomechanical keratoconus pattern measured with an ocular response analyzer: curve analysis. *J Cataract Refract Surg* 2011;37 (12):2144-2150.
 44. Strakhov V.V., Alekseev V.V. [Influence of the central thickness of a cornea on the level of intraocular pressure in norm and at glaucoma] Vliyaniye tsentral'noi tolshchiny rogovitsy na uroven' vnutriglaznogo davleniya v norme i pri glaukome. [Glaucoma]. *Glaukoma* 2006;4:78-83. (In Russ.).
 45. Elichev V.P., Eremina M.V., Yakubova L.V., Aref'eva Yu.A. [The analyzer of biomechanical properties of an eye in an assessment viscous elasticheskikh properties of a cornea in healthy eyes] Analizator biomekhanicheskikh svoystv glaza v otsenke vyazko-elasticheskikh svoystv rogovitsy v zdorovykh glazakh. [Glaucoma]. *Glaukoma* 2007;1:11-15. (In Russ.).
 46. Fontes B.M., Ambrosio R., Jr., Salomao M., Velarde G.C., Nose W. Biomechanical and topographic analysis of unilateral keratoconus. *J Refract Surg* 2010;26 (9):677-681.
 47. Schweitzer C., Roberts C.J., Mahmoud A.M., Colin J., Maurice-Tison S., Kerautret J. Screening of forme fruste keratoconus with the ocular response analyzer. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010;51 (5):2403-2410.
 48. Iomdina E.N., Arutyunyan L.L., Katargina L.A. et al. [Interrelation of a corneal hysteresis and structurally functional parameters of an optic nerve at different stages of primary open-angle glaucoma] Vzaimosvyaz' korneal'nogo gisteretisa i strukturno-funktsional'nykh parametrov zritel'nogo nerva pri raznykh stadiyakh pervichnoi otkrytougol'noi glaukomy. [Annals of Ophthalmology]. *Rossiiskii oftal'mologicheskii zhurnal* 2009;2 (3):17-23. (In Russ.).
 49. Arutyunyan L.L., Elichev V.P., Filippova O.M., Akopyan A.I. [Vyazkoelastichesky properties of a cornea at primary open-angle glaucoma] Vyazkoelasticheskie svoystva rogovitsy pri pervichnoi otkrytougol'noi glaukome. [Glaucoma]. *Glaukoma* 2007;1:62-65. (In Russ.).
 50. Hommer A., Fuchsjager-Mayrl G., Resch H., Vass C., Garhofer G., Schmetterer L. Estimation of ocular rigidity based on measurement of pulse amplitude using pneumotonometer and fundus pulse using laser interferometry in glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2008;49 (9):4046-4050.
 51. Schroeder B., Hager A., Kutschan A., Wiegand W. [Measurement of viscoelastic corneal parameters (corneal hysteresis) in patients with primary open angle glaucoma]. *Ophthalmologie* 2008;105 (10):916-920.
 52. Avetisov S.E., Novikov I.A., Bubnova I.A., Antonov A.A., Sipliviy V.I. Determination of corneal elasticity coefficient using the ORA database. *Journal of Refractive Surgery* 2010;26 (7):520-524.
 53. Avetisov S.E., Petrov S.Yu., Bubnova I.A., Antonov A.A. Avetisov K.S. [Impact of the central thickness of the cornea on the results of tonometry (a review of literature)]. Vliyaniye tsentral'noi tolshchiny rogovitsy na rezul'taty tonometrii (obzor literatury) [Annals Ophthalmology]. *Vestnik oftal'mologii* 2008;124 (5):1-7. (In Russ.).
 54. Avetisov S.E., Bubnova I.A., Antonov A.A. [Investigation of the biomechanical properties of the cornea in patients with normotensive and primary open-angle glaucoma]. Issledovanie biomekhanicheskikh svoystv rogovitsy u patsientov s normotenzivnoi i pervichnoi otkrytougol'noi glaukomoj [Annals Ophthalmology]. *Vestnik oftal'mologii* 2008;124 (5):14-16. (In Russ.).
 55. Ang G.S., Bochmann F., Townend J., Azuara-Blanco A. Corneal biomechanical properties in primary open angle glaucoma and normal tension glaucoma. *J Glaucoma* 2008;17 (4):259-262.
 56. Medeiros F.A., Weinreb R.N. Evaluation of the influence of corneal biomechanical properties on intraocular pressure measurements using the ocular response analyzer. *J Glaucoma* 2006;15 (5):364-370.
 57. Anand A., De Moraes C.G., Teng C.C., Tello C., Liebmann J.M., Ritch R. Corneal hysteresis and visual field asymmetry in open angle glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2010;51 (12):6514-6518.
 58. Sun L., Shen M., Wang J., Fang A., et al. Recovery of corneal hysteresis after reduction of intraocular pressure in chronic primary angle-closure glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2009;147 (6):1061-1066,1066 e1061-1062.
 59. Carbonaro F., Hysi P.G., Fahy S.J., Nag A., Hammond C.J. Optic disc planimetry, corneal hysteresis, central corneal thickness, and intraocular pressure as risk factors for glaucoma. *Am J Ophthalmol* 2014;157 (2):441-446.
 60. Hong J., Xu J., Wei A., Deng S.X., et al. A new tonometer-the Corvis ST tonometer: clinical comparison with noncontact and Goldmann applanation tonometers. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2013;54 (1):659-665.
 61. Huseynova T., Waring G.O., Roberts C., Krueger R.R., Tomita M. Corneal biomechanics as a function of intraocular pressure and pachymetry by dynamic infrared signal and Scheimpflug imaging analysis in normal eyes. *Am J Ophthalmol* 2014;157 (4):885-893.
 62. Li J., Wang S., Manapuram R.K., Singh M., et al. Dynamic optical coherence tomography measurements of elastic wave propagation in tissue-mimicking phantoms and mouse cornea in vivo. *J Biomed Opt* 2013;18 (12):121503.

Сведения об авторах

Иомдина Елена Наумовна — д.м.н., профессор ФГБУ «Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация

Петров Сергей Юрьевич — ведущий научный сотрудник отдела глаукомы ФГБУ «НИИ глазных болезней», ФГБУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, д. 11а.

Антонов Алексей Анатольевич — ведущий научный сотрудник отдела глаукомы ФГБУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, д. 11а.

Новиков Иван Александрович — старший научный сотрудник лаборатории фундаментальных исследований ФГБУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, д. 11а.

Пахомова Наталья Андреевна — аспирант ФГБУ «НИИ глазных болезней», 119021, Российская Федерация, Москва, ул. Россолимо, д. 11а.

Арчаков Ахмед Юсупович — аспирант ФГБУ «Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца» Минздрава России, ул. Садовая-Черногрозская, 14/19, Москва, 105062, Российская Федерация

Affiliation

Iomdina Elena Naumovna — MD, professor, Moscow Helmholtz Research Institute of Eye Diseases; 14/19 Sadovaya-Chernogryazskaya str., Moscow, 105062, Russian Federation, iomdina@mail.ru

Petrov Sergei Yur'evich — PhD, The Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11a Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation, glaucomatosis@gmail.com, +7-916-607-93-26

Antonov Aleksei Anatol'evich — PhD, Senior Research Officer, The Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11a Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation, niigb.antonov@gmail.com

Novikov Ivan Aleksandrovich — Senior Research Officer, The Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11a Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation, toiaia@rambler.ru

Pakhomova Natal'ya Andreevna — Postgraduate, The Scientific Research Institute of Eye Diseases, 11a Rossolimo str., Moscow, 119021, Russian Federation, nata_050487@mail.ru

Archakov Akhmed Yusupovich — Postgraduate, Moscow Helmholtz Research Institute of Eye Diseases; 14/19 Sadovaya-Chernogryazskaya str., Moscow, 105062, Russian Federation