

Исследование биомеханических свойств роговицы на приборе CORVIS ST (Oculus, Германия) у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом

В.Д. Антонюк, Т.С. Кузнецова

Клиника микрохирургии глаза ОКДЦ ПАО «Газпром», Москва

РЕФЕРАТ

Цель. Оценить биомеханические свойства роговицы с помощью прибора CORVIS ST (Oculus, Германия) у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом с интактной роговицей и у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом, которым была выполнена эксимерлазерная коррекция зрения (ЭЛКЗ) с применением фемтолазера или микрокератома.

Материал и методы. Всего обследованы 65 пациентов в возрасте от 18 до 56 лет с миопией и миопическим астигматизмом разной степени, которым планировалась ЭЛКЗ, и пациенты после лазерной коррекции зрения в разные сроки от 5 сут. до 5 лет. Из дополнительных методов обследования всем пациентам проводилось измерение биомеханических свойств роговицы на приборе CORVIS ST (Oculus, Германия).

Результаты. У пациентов после выполнения ЭЛКЗ меняются показатели биомеханических свойств роговицы, а именно – показате-

ли, описывающие жесткость и эластичность, а также меняются показатели внутриглазного давления (ВГД).

Заключение. Биомеханические свойства роговицы, такие как жесткость и эластичность, возможно оценить с помощью прибора CORVIS ST (Oculus, Германия). После ЭЛКЗ миопии и миопического астигматизма жесткость и эластичность роговицы уменьшаются. Показатель значения (ВГД) у пациентов после эксимерлазерной коррекции миопии и миопического астигматизма уменьшается, что связано с уменьшением толщины роговицы, но не связано с истинным снижением ВГД в глазу.

Ключевые слова: биомеханические свойства роговицы, эксимерлазерная коррекция зрения, фемтолазерная коррекция зрения, миопия, миопический астигматизм. ■

Авторы не имеют финансовых или имущественных интересов в упомянутых материале и методах.

Офтальмохирургия. 2020;4: 20–28.

ABSTRACT

Investigation of corneal biomechanical properties using the CORVIS ST device (Oculus, Germany) in patients with myopia and myopic astigmatism

V.D. Antonuk, T.S. Kuznetsova

Gazprom Eye Microsurgery Clinic, Moscow

Purpose. To evaluate the corneal biomechanical properties using the CORVIS ST device (Oculus, Germany) in patients with myopia and myopic astigmatism with intact cornea as well as in patients with myopia and myopic astigmatism who underwent excimer laser refractive surgery using femtolasers or microkeratome.

Material and methods. Totally the study included 65 patients aged 18 years to 56 years with myopia and myopic astigmatism of various degrees were examined. They were scheduled for excimer laser refractive surgery after laser refractive surgery in different periods from 5 days to

5 years. Among the additional methods of examination, all patients were measured the biomechanical properties of the cornea using a CORVIS ST device (Oculus, Germany).

Results. After excimer laser refractive surgery performing for myopia and myopic astigmatism correction, indicators of the corneal biomechanical properties, namely indicators describing stiffness and elasticity were changed, as well as IOP indicators.

Conclusion. The biomechanical properties of the cornea, such as stiffness and elasticity, can be assessed using the CORVIS ST device

(Oculus, Germany). After excimer laser vision correction of myopia and myopic astigmatism, corneal stiffness and elasticity decreases. IOP value in patients after excimer laser correction of myopia and myopic astigmatism decreases. It is associated with a decrease in corneal thickness but is not associated with a true decrease in IOP.

Key words: *biomechanical properties of the cornea, refractive surgery, excimer laser vision correction, femtolasers vision correction, myopia, myopic astigmatism.* ■

No author has a financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2020;4: 20–28.

АКТУАЛЬНОСТЬ

Возможности развития цифровых технологий позволяют посмотреть на уже известные факты о строении органов и тканей с другой стороны, а в некоторых случаях – подтвердить или опровергнуть гипотезы о строении и функционировании живых систем, выдвинутые учеными-исследователями прошлого века. Вопрос о биомеханике глаза в целом и его отдельных тканей интересовал и интересует офтальмологов по сегодняшний день. Для обеспечения наилучшего рефракционного эффекта и минимизации ближайших и отдаленных осложнений эксимерлазерной и фемтолазерной коррекции зрения аметропий необходимо учитывать биомеханические параметры роговицы, в частности ее вязкоэластичность. Моделирование изменений биомеханических свойств роговой оболочки после указанных выше операций, ее напряженно-деформированного состояния в зависимости от различных исходных данных и методики вмешательства, а также изменения коэффициента запаса прочности роговицы после изменения ее толщины и других анатомо-геометрических показателей легли в основу многочисленных исследований и явились стимулом для создания новых диагностических приборов [1–3]. Один из последних девайсов, помогающих более глубоко понимать основные упруго-прочностные показатели этой уникальной ткани в норме и после фемтолазерного и эксимерлазерного воздействия, – анали-

затор биомеханических свойств роговицы, совмещенный с тонометром и пахиметром, – CORVIS ST (Oculus, Германия).

ЦЕЛЬ

Оценить биомеханические свойства роговицы с помощью прибора CORVIS ST (Oculus, Германия) у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом с интактной роговицей и у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом, которым была выполнена эксимерлазерная коррекция зрения с применением фемтолазера и микрокератома.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В клинике микрохирургии глаза ОКДЦ ПАО «Газпром» в марте 2020 г. были обследованы 65 пациентов (121 глаз) с миопией и миопическим астигматизмом разной степени. Возраст пациентов составил от 18 до 56 лет. В 1-ю группу вошли пациенты (31 человек, 54 глаза) без каких-либо оперативных вмешательств на роговице, без подозрения на кератоконус; средний возраст – $32,51 \pm 1,14$ года. Во 2-ю группу вошли пациенты (34 человека, 67 глаз) после эксимерлазерной коррекции зрения с механическим и фемтолазерным формированием роговичного лоскута; средний возраст – $28,98 \pm 0,93$ года. Критерии исключения: подзрение на кератоконус, кератоконус, любые оперативные вмешательства на роговице в анамнезе, наличие катаракты, глаукомы, дистрофических заболеваний роговицы. Таким обра-

зом, в данное обследование вошли пациенты, которым планировалась эксимерлазерная коррекция зрения, и пациенты после лазерной коррекции зрения в разные сроки от 5 сут. до 5 лет. В предоперационном периоде проводилось стандартное обследование для «рефракционного» пациента. Из дополнительных методов обследования всем пациентам проводилось измерение биомеханических свойств роговицы на приборе CORVIS ST (Oculus, Германия), одним доктором в утренние часы с 9.00 до 12.00. Данный прибор анализирует реакцию роговицы на воздушный импульс тонометра с помощью новой ультрабыстрой Шаймпфлюг-камеры, способной работать со скоростью 4 300 кадров в секунду и производить детальную оценку биомеханических свойств роговицы, измерять внутриглазное давление (ВГД) и толщину роговицы. На *рисунке 1* представлен профиль роговицы в момент воздействия воздушного импульса.

ВГД, измеренное данным прибором, рассчитано с учетом реальной толщины роговицы и биомеханических свойств роговицы, что особенно важно для пациентов после рефракционных операций. Уникальный отчет о биомеханических свойствах роговицы, разработанный профессором Vinciguerra, позволяет проводить комплексный скрининг на кератоконус. Уникальная особен-

Для корреспонденции:

Кузнецова Татьяна Сергеевна, к.м.н.,
врач-офтальмолог
ORCID ID: 0000-0003-4024-6817
E-mail: tskuznetsova2013@gmail.com

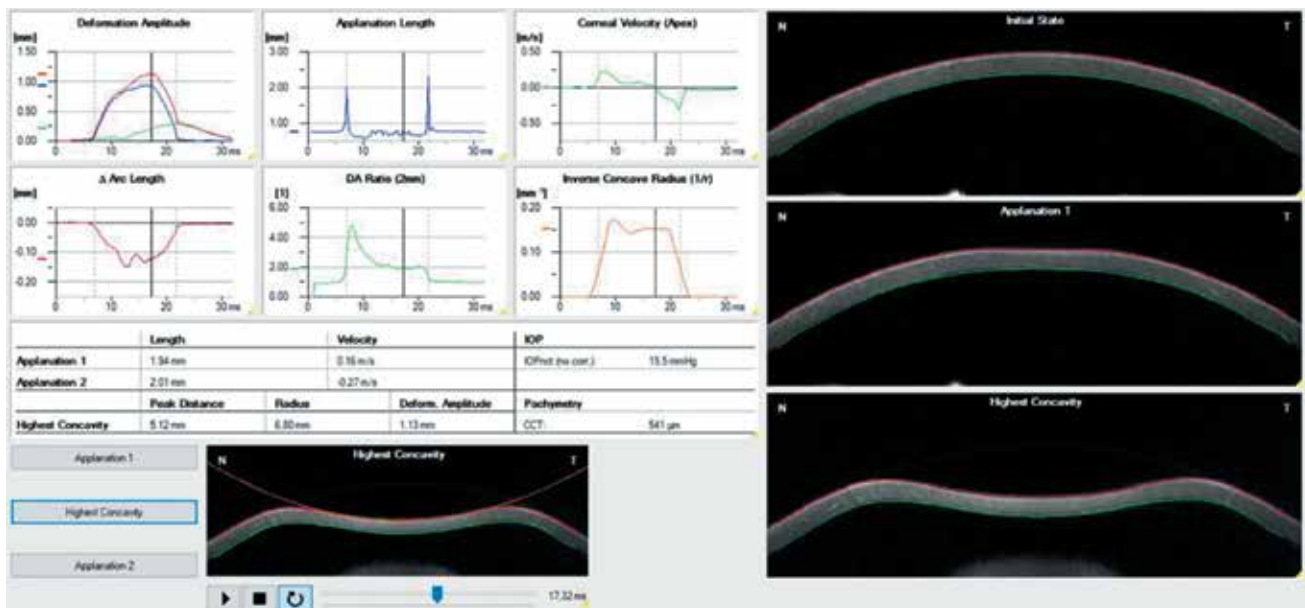


Рис. 1. Вид роговицы в момент проведения измерения биомеханических свойств на приборе CORVIS ST (Oculus, Германия)

Fig. 1. View of the cornea at the time of measurement of biomechanical properties on the device CORVIS ST (Oculus, Germany)

ность этого отчета – наличие четких цифровых критериев оценки состояния роговицы и референтной базы. А также сочетание двух алгоритмов скрининга кератоконуса – метода Belin–Ambrósio и профессора Vinciguerra в рамках одного программного продукта (Pentacam HP, соединенный с CORVIS ST) – еще больше повышают точность диагностики кератоконуса. Как показали в своих исследованиях профессор Roberts и Dupps из Кливлендской офтальмологической клиники, изменение биомеханических свойств роговицы является первичным при эктазии, в то время как изменение топографии роговицы вторично и его можно причислить к механизму компенсации. Поэтому прибор CORVIS ST, измеряя именно биомеханические свойства роговицы, дает возможность наиболее ранней диагностики кератоконуса, в том числе таких субклинических форм, как form-fruste, suspect. В нашем исследовании мы использовали не полную версию прибора CORVIS ST (Oculus, Германия), без возможности оценить показатель CBI у пациентов после операций на роговице. Индекс CBI (Corvis biomechanical

index) сочетает в себе биомеханические свойства и данные пахиметрической прогрессии, что делает возможным обнаружить или заподозрить эктазию. Значение данного показателя указано в цифрах от 1 до 100 и представлено в цветовой шкале, где «зеленый цвет» означает норму, «красный цвет» указывает на слабость биомеханических свойств роговицы и высокую степень наличия кератоконуса.

Таким образом, оценка биомеханических свойств роговицы проводилась по основным параметрам и коэффициентам, с учетом требования производителя к получаемым снимкам с качеством QS: «ОК». Из исследования исключались данные измерений биомеханических свойств роговицы с низким качеством QS: model deviation, lost images, lost points и др. Эксимерлазерная коррекция выполнялась на ротационно-сканирующем эксимерном лазере NIDEK NAVEX QUEST, все оперативные вмешательства были выполнены одним хирургом. Для формирования роговичного лоскута при технологии LASIK использовался полуавтоматический ротационный электрический микрокератом

Moria M2, при технологии Femto LASIK применялся фемтосекундный лазер FEMTO LDV Z8 швейцарской компании Zimmer. Статистическая обработка результатов исследования проводилась с использованием прикладной компьютерной программы Statistica 7.0 (StatSoft Inc., США) на основе применения стандартных параметрических методов оценки среднего и ошибки среднего значения показателя ($M \pm m$). При этом анализ выполнялся по стандартным показателям каждого пациента. Сравнение показателей между группами выполнялось на основании стандартного параметрического t-критерия Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Значение CBI у пациентов с интактной роговицей было $0,03 \pm 0,007$ и находилось в «зеленой зоне» цветовой шкалы. Во 2-й группе данный индекс не определяли, так как он не был активирован в программном обеспечении той версии прибора CORVIS ST (Oculus, Германия), который нами использовался. Нам были доступны 4 от-

чета: IOP/Pachy, Dynamic Corneal Response, Vinciguerra Screening Report, Biomechanical/Tomographic Assessment (ARV). В отчете Dynamic Corneal Response представлены графики и цифровые значения биомеханических свойств роговицы, а также видео изменения роговицы под воздействием пучка воздуха (рис. 1).

График 1 Deformation Amplitude показывает амплитуду деформации роговицы по времени с учетом и без учета движения глаза. Этим параметром можно косвенно оценить «мягкость» роговицы. График 2 Applanation Length (график апланации роговицы) определяет длину апланации в миллиметрах – описывает уплощение роговицы. Чаще всего центрация апланации совпадает с апексом роговицы. График 3 Corneal Velocity (Apex) показывает скорость движения роговицы в точке апекса в вертикальном направлении. Значения «+» указывают движение роговицы внутрь глаза, «-» – наоборот, движение снаружки. То есть это составляющая, по которой можно говорить о способности роговицы прогибаться и выгибаться. Для клиницистов будет более полезна интерпретация этого параметра как «упругость» роговицы. График 4 Arc Length – длина арки при вдавливании. Определяет длину арки в \varnothing 7 мм от апекса, что можно использовать косвенно для описания «эластичности» роговицы, т.е. ее способности к растяжению. График 5 DA Ratio (2 мм) указывает на соотношение амплитуд смещения роговицы в центре и в 2-миллиметровой зоне от апекса и позволяет судить о степени «жесткости» роговицы. Чем жестче роговица, т.е. более устойчива к деформациям, тем меньше разброс значений «центр – 2-миллиметровая зона». Очень большой пик, указывающий на соотношение деформации в центре и на периферии в 2-миллиметровой зоне, говорит о том, что в центре роговица очень растянута. Что, в свою очередь, косвенно указывает на такой параметр, как эластичность ткани. График 6 Inverse Concave Radius

(1/r) – обратное значение вписанного радиуса кривизны роговицы. Чем меньше вдавливание (т.е. «жесткая» роговица), тем больше радиус, значит обратное значение этого радиуса меньше, что, в свою очередь, соответствует относительно низкому «плато» на графике. Более высокое расположение «плато» у «мягкой» роговицы, чем у более «жесткой» роговицы (обратное значение радиуса больше → значение радиуса меньше (большая кривизна) → больше вдавливание → роговица мягче). При кроссликинге мы ожидаем, что плато «упадет». При «жесткой» роговице точка пересечения пологих частей графика с условными вертикальными пунктирными линиями, соответствующими апланации 1 и 2, находится ниже, по сравнению с мягкими роговицами. На рисунке 2 и на рисунке 3 представлены отчеты Dynamic Corneal Response у одного и того же пациента до и после выполнения эксимерлазерной коррекции зрения. Формирование роговичного лоскута было выполнено с помощью микрокератома Moria M2.

Applanation Length 1 – апланация роговицы в направлении внутрь глаза, в сторону хрусталика. Applanation Length 2 – апланация роговицы в обратном направлении, в сторону от хрусталика. Applanation Velocity 1 – скорость прогиба роговицы внутрь глаза, по которой можно косвенно предположить, насколько роговица вязкая. Applanation Velocity 2 – скорость возврата роговицы в исходное положение. Чем выше скорость, тем степень упругости роговицы выше. Peak Distance (PD) – пиковая дистанция, описывает расстояние между двумя наивысшими точками роговицы (темпоральной и назальной) при выгибе во время наибольшего вдавливания. Если роговица очень «мягкая» (вся вдавливается), значение параметра PD будет больше, т.е. будет действовать в обратном направлении, будет тянуть вниз. Если роговица «жесткая», значение параметра PD будет меньше, так как меньше степень прогиба. Radius (R) – радиус вписанной роговицы в

вогнутую поверхность. Чем больше радиус, тем больше жесткость, тем ниже плато на графике 6. Это обратные величины. Deform. Amplitude – значение максимального вдавливания роговицы. Данный параметр имеет смысл сравнивать у одного и того же пациента в динамике, а не между пациентами. CCT – центральная толщина роговицы (мкм). IOP и IOP correct – ВГД без учета и с учетом биомеханических свойств роговицы соответственно. Значения этих показателей представлены в таблице 1.

Оценивая полученные результаты, нужно уточнить, что делать выводы о жесткости или мягкости, эластичности и упругости роговицы по отдельно взятому параметру было бы неправильно. Поэтому мы формируем описательные характеристики, синонимичные биомеханическим свойствам, как попытку разбить количественный анализ, состоящий из нескольких нумерических параметров и выдающий математически обоснованный результат (диагноз), на составляющие его компоненты с целью выявления их отдельного вклада (например, статистического) в общий анализ и отдельной способности к диагностике эктазии, а также формирования качественных характеристик (мягкость, жесткость, упругость) и диапазона их значений, что имеет клиническое применение. В нашем исследовании мы не получили статистически достоверной разницы по таким показателям, как Applanation Length 1, Applanation Velocity 1 и Applanation Velocity 2, между группами. По остальным параметрам выявляется статистически значимая разница. Peak Distance (PD) – по этому параметру выявлена достоверная разница между группами, которая показала, что до оперативного вмешательства роговица имела меньшее значение параметра PD, а после формирования роговичного лоскута с помощью фемтолазера или микрокератома Moria M2 с последующей эксимерлазерной абляцией поверхностных слоев стромы роговицы значе-

OCULUS Corvis® ST - Dynamic Corneal Response

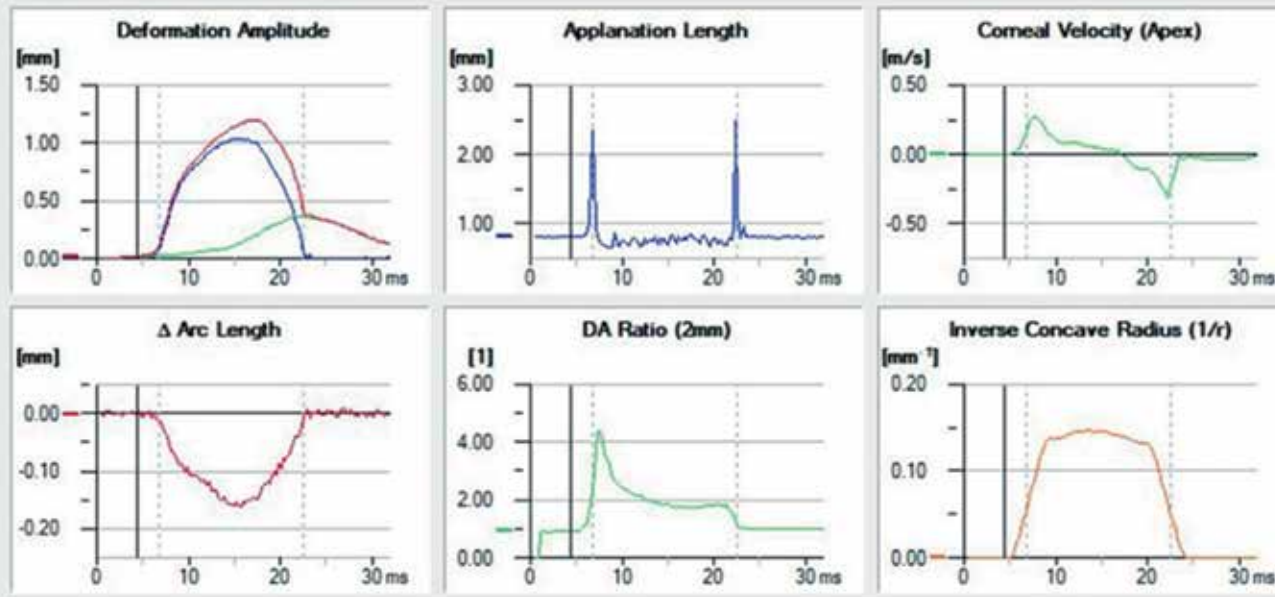
Name: Lobastov, Alexandr

ID: 81609

Exam. Date: 10.03.2020

Time: 09:25:27

Info: Befor SL



	Length	Velocity	IOP
Applanation 1	2.11 mm	0.16 m/s	IOPnct (no corr.): 12.0 mmHg
Applanation 2	2.03 mm	-0.27 m/s	
	Peak Distance	Radius	Deform. Amplitude
Highest Concavity	5.35 mm	7.12 mm	1.20 mm
			Pachymetry
			CCT: 542 μm

Рис. 2. Данные отчета Dynamic Corneal Response прибора CORVIS ST (Oculus, Германия) пациента N, 35 лет, до выполнения эксимерлазерной коррекции зрения

Fig. 2. Data from the Dynamic Corneal Response report for CORVIS ST (Oculus, Germany) patient N, 35 years, before performing excimer laser vision correction

ния показателя PD увеличились, что подтверждает изменение эластичности ткани. Radius (R) – в 1-й группе показатель больше (R=7,22 мм), чем во 2-й (R=6,22 мм), что указывает на большую жесткость интактной роговицы. Deform. Amplitude – значение максимального вдавливания роговицы больше 2-й группе. Данный параметр имеет смысл сравнивать у одного и того же пациента в динамике, а не между пациентами. CCT – центральная толщина роговицы (мкм). IOP и IOP соггест – ВГД без учета и с учетом биомеханических свойств роговицы соответственно. Данные представлены в *таблице 2*.

Учитывая большой разброс в диапазоне нормального значения ВГД и ВГД скорректированного, было бы неправильно сравнивать этот показатель между 1-й и 2-й группами. Но следует отметить, что показатели ВГД в группе пациентов с толщиной роговицы более 540 мкм были выше, чем у пациентов с толщиной роговицы менее 460 мкм. Это подтверждает достаточно изученный факт зависимости измерения ВГД от толщины роговицы. Мы не получили статистически достоверной разницы в показателях ВГД без учета и с учетом биомеханических свойств роговицы в 1-й группе. Возможно, это связано

с небольшим количеством исследований. Статистически достоверная разница показателя ВГД была выявлена во 2-й группе. Значение скорректированного ВГД было выше, чем без учета влияния биомеханических свойств роговицы. Корреляционная зависимость между показателями толщины роговицы и ВГД, измеренного без учета и с учетом биомеханических свойств роговицы, представлена в *таблице 3*.

SP-A1 – уникальный параметр жесткости, описывается в виде формулы силы, деленной на смещение роговицы. Таким образом, SP-A1 определено конечным значением

OCULUS Corvis® ST - Dynamic Corneal Response

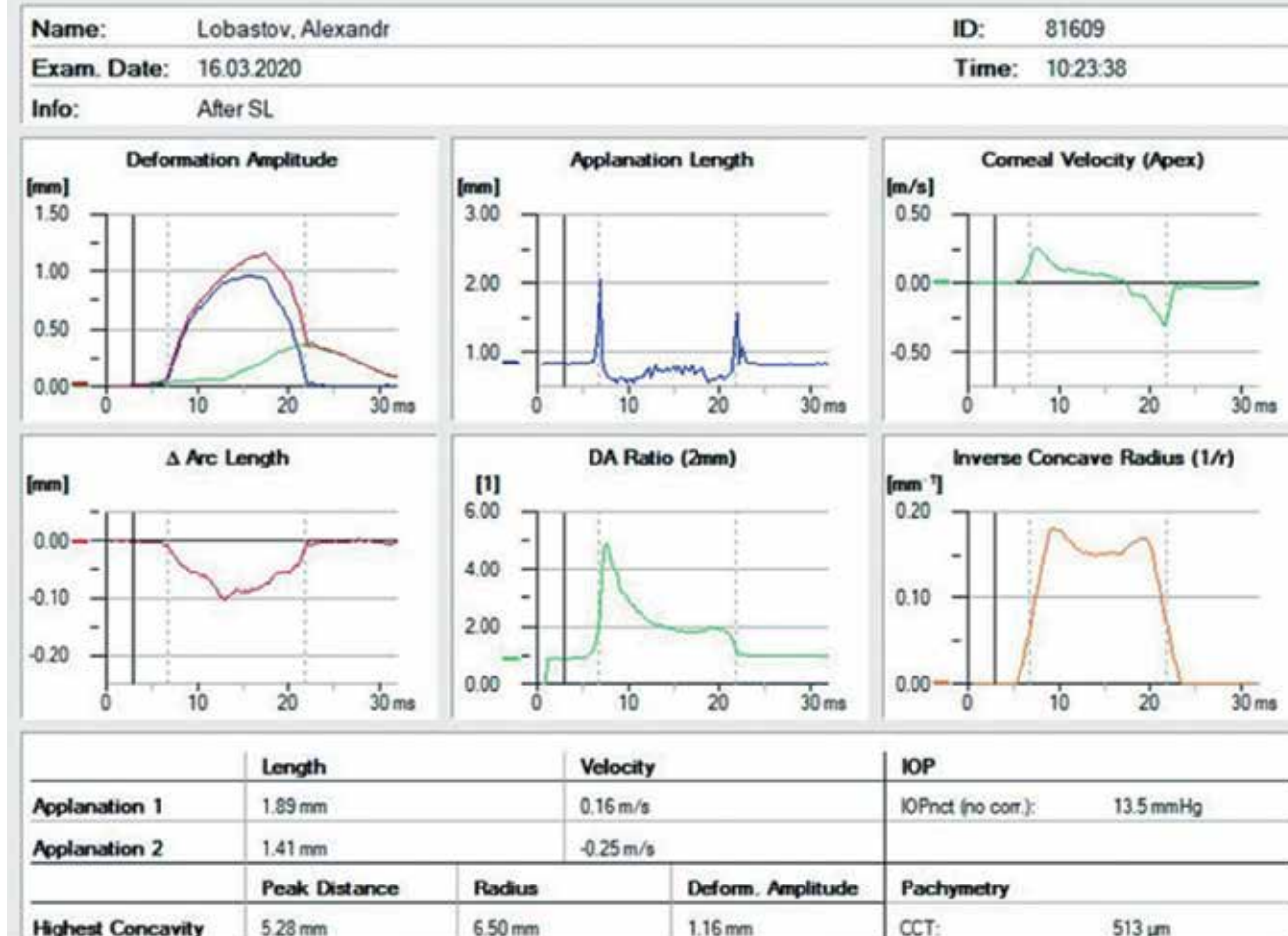


Рис. 3. Данные отчета Dynamic Corneal Response прибора CORVIS ST (Oculus, Германия) пациента N, 35 лет, на 5-е сутки после выполнения эксимерлазерной коррекции зрения

Fig. 3. Data from the Dynamic Corneal Response report of the CORVIS ST device (Oculus, Germany) of patient N, 35 years, on day 5 after excimer laser vision correction

давления, разделенным на амплитуду прогиба в точке A1. В 1-й группе данные SP-A1 составили 120,66, во 2-й – 99,66, что можно расценить как снижение жесткости роговицы после лазерного воздействия.

ОБСУЖДЕНИЕ

Ригидность глаза – характеристика, описывающая сопротивление всего глазного яблока изменению формы при внешних воздействиях, зависит как от биомеханических свойств структур глаза (склеры, роговицы, хориоидеи, сетчатки и т.д.),

так и от их морфологии, а также от объема глазного яблока, ВГД, кровяного давления, кровенаполнения/эластичности кровеносных сосудов и характера нагрузки. Необходимо отличать такие понятия, как ригидность корнеосклеральной оболочки глаза, эластичность склеры, эластичность роговицы и т.д., от понятия ригидность глаза [4]. Упругость (синоним эластичность, растяжимость роговицы) – свойство ткани роговицы при изменении формы или объема оказывать влияющей на нее силе механическое сопротивление и принимать после ее спада исходную форму. Вязкость роговицы – сопро-

тивление, оказываемое тканью роговицы движению отдельных слоев без нарушения связи в структуре. Мягкость и жесткость являются самыми простыми показателями – насколько в целом проседает роговица (деформация, вдавливание). По ригидности глаза все же пытаются косвенно судить о механических свойствах материала корнеосклеральной оболочки, а для этого концепция ригидности слишком многофакторна. Многие биометрические параметры глазного яблока могут быть в настоящее время с хорошей точностью измерены современными диагностическими приборами (на-

Таблица 1

Показатели биомеханических свойств роговицы в обеих группах (M±m)

Table 1

Indicators of corneal biomechanical properties in both groups (M±m)

Параметр Parameter	Без операции (M±m) Without surgery (M±m)	После операции (M±m) After surgery (M±m)	p (t-критерий Стьюдента) p (t-test)
Applanation Length 1	2,23±0,04	2,06±0,04	>0,05
Applanation Length 2	1,99±0,05	1,67±0,04	<0,05
Applanation Velocity 1	0,14±0,002	0,14±0,001	>0,05
Applanation Velocity 2	-0,24±0,004	-0,24±0,003	>0,05
Peak Distance	5,08±0,036	5,29±0,029	<0,05
Radius	7,22±0,09	6,22±0,08	<0,05
Deform.Amplitude	1,05±0,01	1,09±0,01	<0,05
CCT	547,78±3,49	458,62±4,93	<0,05
SP-A1	120,66±2,36	99,66±2,12	<0,05

Таблица 2

Показатели ВГД в обеих группах без учета и с учетом биомеханических свойств роговицы (скорректированное)

Table 2

IOP indicators in both groups without taking into account and taking into account the biomechanical properties of the cornea (corrected)

До операции Before surgery		p (t-критерий Стьюдента) p (t-test)	После операции After surgery		p (t-критерий Стьюдента) p (t-test)
ВГД, мм рт.ст. (M±m) IOP, mm Hg (M±m)	ВГД скорректированное, мм рт.ст. (M±m) Corrected IOP, mm Hg (M±m)		ВГД, мм рт.ст. (M±m) IOP, mm Hg (M±m)	ВГД скорректированное, мм рт.ст. (M±m) Corrected IOP, mm Hg (M±m)	
15,92±0,3	15,52±0,28	>0,05	13,39±0,19	15,38±0,18	<0,05

пример, толщина роговицы – с помощью пахиметрии, толщина склеры – с помощью ультразвука или оптической когерентной томографии (ОКТ), длина передне-задней оси – с помощью лазерной биометрии). В то же время надежного метода непосредственной оценки биомеханических характеристик корнеосклеральной оболочки глаза пока не существует. Создание такого метода было бы весьма важно, поскольку могло бы существенно продвинуть как исследователей, так и клиницистов в решении многих проблем офтальмологии, связанных с биомеха-

никой глаза. Как же все-таки можно охарактеризовать биомеханические свойства роговицы? Что нужно знать и понимать клиническому врачу и практикующему рефракционному хирургу о биомеханике глаза, и роговицы в частности, чтобы предвидеть рефракционный регресс после эксимерлазерной коррекции зрения миопии и миопического астигматизма? На какую часть вопросов могут дать ответы уже имеющиеся современные приборы ORA, Reichert, США, CORVIS ST (Oculus, Германия), учитывая, что они работают в разных системах координат,

где CORVIS ST предлагает применять свои данные клинически без отсылки к вязкости и гистерезису.

Роговица, благодаря своему регулярному строению, характеризуется прозрачностью и высокой преломляющей способностью. Основная часть роговой оболочки – строма – сформирована параллельно расположенными (на расстоянии 20–40 нм друг от друга) коллагеновыми фибриллами, а также связующим веществом. Фибриллы, действующие как нагруженные опорные элементы, уложены, в свою очередь, в 300–500 переплетающихся пластин [5, 6].

Таблица 3

Коэффициент парной корреляции по Пирсону между толщиной роговицы и ВГД/ВГД скорректированным

Table 3

Correlation coefficient according to Pirson between corneal thickness and IOP/corrected IOP

До операции Before surgery		После операции After surgery	
Пахиметрия/ВГД, мм рт.ст. Pachymetry (μm)/IOP, mm Hg	Пахиметрия/ВГД скорректированное, мм рт.ст. Pachymetry (μm)/Corrected IOP, mm Hg	Пахиметрия/ВГД, мм рт.ст. Pachymetry (μm)/IOP, mm Hg	Пахиметрия/ВГД скорректированное, мм рт.ст. Pachymetry (μm)/Corrected IOP, mm Hg
0,055	-0,31	0,32	-0,18
Прямая очень слабая взаимосвязь Direct very weak relationship	Обратная слабая взаимосвязь Inverse weak relationship	Прямая слабая взаимосвязь Direct weak relationship	Обратная очень слабая взаимосвязь Inverse very weak relationship

Тем самым напряженно-деформированное состояние ткани роговицы определяется прежде всего механическими свойствами самих волокнистых структур, их взаиморасположением и особой архитектурной, внутри- и межмолекулярными связями, а также биохимическим составом [7, 8]. Кроме того, важную роль в формировании биомеханического статуса роговицы играют ее макропараметры (геометрическая форма и размеры, толщина, радиусы кривизны), характеризующиеся значительными колебаниями в зависимости от пола, возраста, общей преломляющей способности глаза (клинической рефракции) и т.п. Поэтому при построении биомеханических моделей, описывающих напряженное состояние роговицы и включающих область ее перехода в склеру: лимбальную зону (например, моделей радужно-роговичного угла), нужно учитывать достаточно большое число параметров, отражающих гетерогенность, анизотропность и асимметричность роговицы, а также воздействие на нее ВГД и глазодвигательных мышц. Информативным расчетным методом оценки распределения напряжений в роговице, особенно после корневальных вмешательств, является кератотензотопография, основу которой составляет кератотопогра-

фия (обработка рефракционной кератотопограммы), данные пневмотонометра и оптическая или акустическая пахиметрия. Разрабатывается и испытывается еще один перспективный метод – окулярная эластография (Ocular elastography). Исследования глаз с различной клинической рефракцией, проведенные с помощью этого метода, выявили различия в биомеханическом профиле роговицы пациентов с миопией и эметропией, что свидетельствует о его потенциальной информативности. В последние годы в клинической практике активно используется метод, позволяющий оценить ВГД с учетом механических параметров роговицы, – анализатор глазного ответа: прибор ORA (Ocular Response Analyzer, США). Метод основан на пневматической тонометрии, сочетающейся с оптоэлектронной системой отслеживания формы роговицы в центральной зоне, что позволяет определить, в частности, две биомеханические характеристики, отражающие вязкоэластические свойства ткани роговицы: корневальный гистерезис (КГ) и фактор резистентности роговицы (ФРП) [9]. Следует заметить, однако, что, с точки зрения биомеханики, на измеряемые с помощью ORA параметры роговицы, несомненно, влияют биомеха-

нические свойства склеры и других внутриглазных структур. Влияние операций LASIK и фоторефракционной кератэктомии на биомеханические свойства роговицы, оцениваемые с помощью ORA, было изучено в работе [10, 11]. Оказалось, что послеоперационное снижение значений КГ и ФРП происходит у всех пациентов, независимо от метода операции [12]. Более того, исходный (дооперационный) уровень этих показателей не восстанавливается даже через 2 года после вмешательства. В то же время в работе указывается, что использование ORA для оценки результатов кросслинкинга не всегда оказывается информативным, поскольку изменение эластичности роговицы может маскировать изменение ее вязкости, в результате КГ остается на исходном уровне, хотя по другим параметрам обработанная роговица оценивается как более жесткая. Возможно, более надежным в этом отношении может оказаться использование прибора CORVIS (Oculus, Германия) [13–15]. Полученные нами данные подтверждают, что с помощью этого прибора возможно оценивать, насколько меняется жесткость и эластичность роговицы после формирования роговичного лоскута с помощью фемтолазера или микрокератома с последующей эксимерла-

зерной абляцией поверхностных слоев стромы роговицы. Нам представляется перспективным применение этого прибора в клинической практике рефракционного хирурга для формирования российской референтной базы, необходимой как для точного отбора пациентов на лазерную коррекцию зрения, так и для прогнозирования риска возникновения рефракционного регресса и его степени, а также для скрининга глаукомы у пациентов после таких лазерных вмешательств на роговице в отдаленном послеоперационном периоде. Более глубокое исследование биомеханических свойств роговицы даст возможность объяснить, что «толстые» (более 600 мкм) роговицы бывают «рыхлыми», а ультратонкие (450–470 мкм) оказываются достаточно вязкоупругими, чтобы сохранять высокий рефракционный результат после фемтолазерной коррекции зрения. Позволит получить более точную диагностику скрытых форм кератоконуса или «слабых», «вязких», неупругих, неэластичных роговиц, которые после лазерного воздействия дают вторичные кератэктазии, создать новую классификацию на основе биомеханических свойств роговицы, которая поможет рефракционному хирургу привести эксимерлазерную коррекцию к еще более высоким и стабильным результатам.

Выводы

Биомеханические свойства роговицы, такие как жесткость и эластичность, возможно оценить с по-

мощью прибора CORVIS ST (Oculus, Германия). Жесткость определяется напрямую, причем множеством способов по отдельности и выдавая единый общий параметр SP-A1. Эластичность описывается опосредованно.

После эксимерлазерной коррекции зрения миопии и миопического астигматизма жесткость и эластичность роговицы уменьшаются. Значение показателя SP-A1 в группе пациентов без оперативного вмешательства составило 120,66, а в группе после рефракционных операций – 99,66.

Значение показателя ВГД у пациентов после эксимерлазерной коррекции миопии и миопического астигматизма уменьшается, что связано с уменьшением толщины роговицы, но не связано с истинным снижением ВГД в глазу. В 1-й группе при значении пахиметрии 547,78±3,49 мм рт.ст. средние показатели ВГД были 15,92±0,3 мм рт.ст. без учета биомеханических свойств роговицы и 15,52±0,28 мм рт.ст. с учетом биомеханических свойств роговицы, а во 2-й группе при данных пахиметрии 458,62±4,93 мм рт.ст. показатели ВГД составили 13,39±0,19 и 15,38±0,18 мм рт.ст. соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Frings A, Linke SJ, Bauer EL, Druchkiv V, Katz T, Steinberg J. Effects of laser in situ keratomileusis (LASIK) on corneal biomechanical measurements with the Corvis ST tonometer. *Clin Ophthalmol*. 2015;9: 305–311. doi: 10.2147/OPTH.S76491
2. Dupps WJ Jr. Biomechanical modeling of corneal ectasia. *J Refract Surg*. 2005;21(2): 86–90. doi: 10.3928/1081-597x-20070101-19
3. Kymionis GD, Diakonis VF, Kounis G, et al. Ocular rigidity evaluation after photorefractive keratectomy: an experimental study. *J Refract Surg*. 2008;24(2): 173–177. doi: 10.3928/1081597x-20080201-08

4. Иомдина Е.Н., Бауэр С.М., Котляр К.Е. Биомеханика глаза: теоретические аспекты и клинические приложения. Под ред. Нероева В.В. М.: «Реал Тайм»; 2015. [Iomdina EN, Bauer SM, Kotlyar KE. Biomechanika glaza: teoreticheskie aspekty i klinicheskie prilozheniya. Pod red. Neroeva V.V. M.: Real Taim; 2015. (In Russ.)]

5. Buzard KA. Introduction to biomechanics of the cornea. *Refract Corneal Surg*. 1992;8: 127–138.

6. Edmund C. Corneal topography and elasticity in normal and keratoconic eyes. *Acta Ophthalmol (Copenh.)*. 1989;193(Suppl): 1–36.

7. Boote C, Dennis S, Huang Y, Quantock AJ, Meek KM. Lamellar orientation in human cornea in relation to mechanical properties. *J Struct Biol*. 2005;149: 1–6. doi: 10.1016/j.jsb.2004.08.009

8. Borcharding MS, Blacic LJ, Sittling RA, Bizzell J, Breen M, Weinstein HG. Proteoglycans and collagen fiber organization in human corneal scleral tissue. *Exp Eye Res*. 1975;21: 59–70. doi: 10.1016/0014-4835(75)90057-3

9. Shan S, Laiquzzaman M, Cunliffe I, Mantry S. The use of the reihert ocular response analyzer 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. doi: 10.1016/j.clae.2006.09.006

10. Манукян И.В. Комплексная оценка структуры и биомеханических свойств роговицы для выбора оптимального метода эксимерлазерной коррекции миопии и миопического астигматизма. Автореф. дис. ... канд. мед. наук. М.; 2009. [Manukyan IV. Kompleksnaya otsenka struktury i biomekhanicheskikh svoystv rogovitsy dlya vybora optimal'nogo metoda eksimerlazernoi korektsii miopii i miopicheskogo astigmatizma. Avtoref. dis. ... kand. med. nauk. M.; 2009. (In Russ.)]

11. Нероев В.В., Ханджян А.Т., Манукян И.В. Оценка влияния эксимерлазерных кераторефракционных операций ЛАСИК и ФРК на биомеханические свойства роговицы. *Офтальмология*. 2009;6(1): 24–29. [Neroev VV, Khandzhyan AT, Manukyan IV. Otsenka vliyaniya eksimerlazernykh keratorefraktsionnykh operatsii LASIK i FRK na biomekhanicheskie svoystva rogovitsy. *Oftalmologiya*. 2009;6(1): 24–29. (In Russ.)]

12. Almeida FB, Braz F, Pereira C, Filipe HP, Maia-Sco J. Corneal biomechanical and tonometric correlations after myopic LASIK. *Congress of the European Society of Ophthalmology (SOE)*. 2013 June 8–11. Copenhagen, Denmark: Abstract Book; 2013.

13. Huseynova T, Waring GO VI, Roberts C, Krueger RR, 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: 885–893. doi: 10.1016/j.ajo.2013.12.024

14. Hong J, Xu J, Wei A, 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. doi: 10.1167/iov.12-10984

15. Fang L, Wang Y, Yang R, et al. Effects of the LASIK flap thickness on corneal biomechanical behavior: a finite element analysis. *BMC Ophthalmol*. 2020;20(1): 67. doi: 10.1186/s12886-020-01338-8

Поступила 13.05.2020