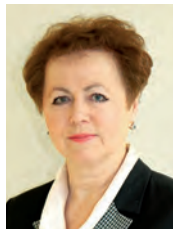


# Первые результаты оценки изменений биомеханических свойств роговицы после кераторефракционных операций



В.И. Зинченко



И.А. Мушкова



А.Н. Каримова

ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова»  
Министерства здравоохранения Российской Федерации  
Бескудниковский бульвар, 59а, Москва, 127486, Российская Федерация

## РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2026;23(2):311–318

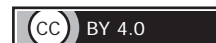
**Цель:** сравнительный анализ биомеханических последствий кераторефракционных операций (КРО) в зависимости от технологии лазерного воздействия на роговую оболочку пациентов с миопией средней степени. **Пациенты и методы.** В исследование были включены 150 пациентов (150 глаз) с миопией средней степени, которые были разделены на три группы в зависимости от КРО: группа 1 — 50 пациентов, которым проводили Femto-LASIK; группа 2 — 50 пациентов, которым проводили CLEAR с разрезом 1,5 мм; группа 3 — 50 пациентов, которым проводили CLEAR с разрезом 3,0 мм. Всем пациентам до и в различные сроки после лечения (1 неделя, 1 и 3 месяца) выполняли как стандартные, так и специализированные методы исследования органа зрения. Особое внимание уделялось изучению биомеханических свойств роговицы на приборе Corvis ST. **Результаты.** Исследование биомеханических свойств роговицы на дооперационном этапе не выявило статистически значимых различий между группами. Параметры находились в пределах нормальных значений. CCT через 3 месяца после КРО наибольших значений достигала у пациентов в группе 2, а наименьших — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). Такие показатели, как SP-A1 и ARTh, достигали наибольших значений в группе 2, а наименьших — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). Параметр IR через 1 и 3 месяца наблюдения наиболее низким был в группе 2, а наиболее высоким — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). **Заключение.** В совокупности динамика описанных изменений демонстрирует ремоделирование биомеханического профиля роговицы в послеоперационном периоде как после операции FS-LASIK, так и после CLEAR. Однако после операции CLEAR, особенно с разрезом 1,5 мм, изменения роговой оболочки были менее выраженными. Все это обуславливает необходимость детального предоперационного планирования. Ключевыми этапами такого планирования выступают: оценка исходной толщины роговицы, расчет величины остаточной стромы, учет индивидуальных биомеханических параметров и обоснованный выбор метода хирургического вмешательства, позволяющего минимизировать структурные повреждения роговицы.

**Ключевые слова:** биомеханические свойства роговицы, кераторефракционная операция, FS-LASIK, CLEAR, Corvis ST

**Для цитирования:** Зинченко В.И., Мушкова И.А., Каримова А.Н. Первые результаты оценки изменений биомеханических свойств роговицы после кераторефракционных операций. *Офтальмология*. 2026;23(2):311–318. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2026-2-311-318>

**Прозрачность финансовой деятельности:** никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

**Конфликт интересов отсутствует.**



# The First Results of Assessing Changes in the Cornea Biomechanical Properties after Keratorefractive Surgery

V.I. Zinchenko, I.A. Mushkova, A.N. Karimova

S.N. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution  
Beskudnikovskiy blvd, 59A, Moscow, 127486, Russian Federation

## ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2026;23(2):311–318

**Objective:** to conduct a comparative analysis of the biomechanical consequences of keratorefractive surgery, depending on the laser treatment technique used on the corneal stroma in patients with moderate myopia. **Materials and Methods.** The study included 150 patients (150 eyes) with moderate myopia, who were divided into three groups according to the type of keratorefractive surgery (KRO) performed: group 1 — 50 patients underwent Femto-LASIK; group 2 — 50 patients underwent CLEAR surgery with a 1.5 mm incision; group 3 — 50 patients underwent CLEAR surgery with a 3.0 mm incision. All patients underwent both standard and specialized ophthalmic examinations before surgery and at various follow-up time points (1 week, 1 month, and 3 months post-surgery). Particular emphasis was placed on assessing the biomechanical properties of the cornea using the Corvis ST device. **Results.** The pre-operative assessment of corneal biomechanical properties revealed no statistically significant differences between the groups, with all parameters falling within the normal range. At the 3-month follow-up, the central corneal thickness (CCT) was found to be highest in group 2 (CLEAR with a 1.5 mm incision) and lowest in group 1 (Femto-LASIK) ( $p < 0.05$ ). Similarly, the SP-A1 and ARTH parameters demonstrated the highest values in group 2 and the lowest in group 1 ( $p < 0.05$ ). Furthermore, the IR parameter was found to be lowest in group 2 and highest in group 1 at both the 1-month and 3-month follow-up visits ( $p < 0.05$ ). **Conclusion.** The observed dynamics of changes collectively demonstrate remodelling of the corneal biomechanical profile in the post-operative period, regardless of whether FS-LASIK or CLEAR surgery was performed. However, patients who underwent CLEAR surgery — particularly those with a 1.5 mm incision — exhibited less pronounced corneal changes. These findings underscore the critical importance of thorough pre-operative planning, which should include assessment of the initial corneal thickness, calculation of the residual stromal bed, analysis of individual biomechanical parameters, and selection of the most appropriate surgical technique to minimize corneal structural damage.

**Keywords:** biomechanical properties of the cornea, keratorefractive surgery, FS-LASIK, CLEAR, Corvis ST

**For citation:** Zinchenko V.I., Mushkova I.A., Karimova A.N. The First Results of Assessing Changes in the Cornea Biomechanical Properties after Keratorefractive Surgery. *Ophthalmology in Russia*. 2026;23(2):311–318. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2026-2-311-318>

**Financial Disclosure:** no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

**There is no conflict of interests.**

## АКТУАЛЬНОСТЬ

Миопия представляет собой рефракционную аномалию, обусловленную несоответствием между оптической силой компонентов глаза (роговицы и хрусталика) и его осевой длиной, в результате этого световые лучи фокусируются перед сетчаткой, что приводит к ухудшению восприятия удаленных объектов [1, 2]. На сегодняшний день миопия является одним из наиболее распространенных заболеваний глаз, затрагивая около 2 млрд человек в мире [3], при этом около 277 млн имеют миопию высокой степени (МВС) [2]. Прогностические модели, основанные на систематическом обзоре и метаанализе 145 исследований, указывают, что к 2050 г. миопией будет страдать около 50 % населения Земли (4 758 млн), а МВС затронет порядка 10 % жителей планеты (938 млн человек) [4, 5].

В современной клинической практике отсутствует стандартизированный подход к ведению пациентов с миопией, однако разработан ряд стратегий ее коррекции и контроля. Среди них имеются оптические методы: применение мультифокальных контактных линз, очков с дефокусировкой для коррекции миопии, а также ортокератология.

Наиболее радикальным способом остается проведение кераторефракционных операций (КРО). Стремительное развитие технологий рефракционной коррекции способствовало росту популярности лазерной хирургии роговицы как метода лечения миопии: ее отличают высокая предсказуемость результата и минимальная инвазивность. В настоящее время в офтальмохирургии наиболее часто применяются следующие вмешательства [6–8]: трансэпителиальная фоторефракционная кератэктомия; лазерный кератомилез *in situ* (laser-assisted in situ keratomileusis — LASIK), в том числе с применением фемтосекундного лазера (ФСЛ) — FS-LASIK; рефракционная экстракция лентикулы, к которой относятся операции по удалению лентикулы через малый разрез роговицы (small incision lenticule extraction — SMILE), процедура извлечения лентикулы роговицы для усовершенствованной рефракционной коррекции (corneal lenticule extraction for advanced refractive correction — CLEAR), а также методика SmartSight.

Известно, что любая КРО влечет за собой нарушение структурной целостности роговицы: в случае применения интрастромальных методик происходит

В.И. Зинченко, И.А. Мушкова, А.Н. Каримова

Контактная информация: Зинченко Валерия Ивановна [zin4enko.lera@mail.ru](mailto:zin4enko.lera@mail.ru)

Первые результаты оценки изменений биомеханических свойств роговицы...

формирование роговичного лоскута либо лентикулы, тогда как при использовании поверхностных методик происходит удаление эпителиального слоя вместе с частью передней стромы. Все это неизбежно приводит к модификации биомеханических свойств роговицы, что имеет принципиальное значение для полноценной работы оптической системы глаза [9, 10].

Возможность определения биомеханических свойств роговицы *in vivo* имеет большое клиническое значение, поскольку она может помочь оптимизировать ряд процедур лечения и управления, которые взаимодействуют или оказывают механическое воздействие на глаз [11]. В современной клинической практике биомеханические свойства роговицы оценивают с помощью специализированных диагностических приборов. Одним из ключевых инструментов является анализатор реакции глаза (ORA) производства Reichert Ophthalmic Instruments (Буффало, Нью-Йорк, США). Наряду с ним широко применяется динамический анализатор Шаймпфлюга — прибор Corvis ST (Oculus; Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Германия), позволяющий визуализировать роговицу и комплексно анализировать ее морфологические и биомеханические параметры [12]. Оба прибора — ORA и Corvis ST — функционируют по сходному принципу: они регистрируют реакцию роговицы на воздействие кратковременного воздушного импульса. На основании характера этой реакции устройства косвенно определяют ключевые биомеханические характеристики роговицы, такие как упругость, жесткость и вязкоэластические свойства [13].

Основными параметрами, которые рассчитывают при помощи данных методик, являются следующие [14, 15]: центральная толщина роговицы (CCT), ВГД с учетом биомеханических свойств (bIOP), время аппланации (AT), длина аппланации (AL), амплитуда деформации (Deformation Amplitude, DA), длина прогиба (Peak Distance, PD), обратное значение вписанного радиуса кривизны роговицы (Inverse Concave Radius, ICR), отношение величины в апексе и на расстоянии 2 мм (DA Ratio 2), относительная толщина роговицы по Амброзио (Ambrosio Relational Thickness, ARTh), интегрированный радиус (Integrated Radius, IR), биомеханический индекс Corvis (CBI), параметр жесткости (Stiffness Parameter, SP-A1). На основе численного моделирования методом конечных элементов, имитирующего реакцию роговицы на ВГД и воздушный поток Corvis ST, также был разработан индекс напряжения-деформации (Stress-Strain Index, SSI), который не зависит от ВГД и CCT, но достоверно коррелирует с возрастом ( $p < 0,01$ ). Поскольку возраст тесно связан с жесткостью роговицы, SSI косвенно отражает биомеханические свойства ткани [11].

В ряде научных работ отмечается, что операция CLEAR демонстрирует определенные преимущества в плане сохранения биомеханической целостности ро-

говицы в послеоперационном периоде по сравнению с методом FS-LASIK. Однако объем имеющихся данных пока ограничен, а полученные результаты требуют дополнительной верификации. Именно поэтому настоящее исследование было направлено на подтверждение или опровержение ранее выявленных тенденций — это позволит сформировать более обоснованные клинические рекомендации и повысить безопасность кераторефракционных вмешательств.

**Цель данной работы** — сравнительный анализ биомеханических последствий кераторефракционных вмешательств в зависимости от технологии лазерного воздействия на роговую оболочку пациентов с миопией средней степени.

## ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

В исследование были включены 150 пациентов (150 глаз) с миопией средней степени (МСС), кератометрией в диапазоне 41,0–44,0 диоптрий (D), толщиной роговицы более 500 мкм, бинокулярным характером зрения и отсутствием противопоказаний к лазерной коррекции. Все пациенты были разделены на три группы в зависимости от КРО: группа 1 — 50 пациентов (50 глаз) с МСС, которым проводили КРО по технологии Femto-LASIK на фемтосекундном лазере FEMTO LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems AG, Швейцария); группа 2 — 50 пациентов (50 глаз) с МСС, которым проводили КРО по технологии CLEAR с разрезом 1,5 мм на эксимерном лазере WaveLight EX 500 (Alcon, США); группа 3 — 50 пациентов (50 глаз) с МСС, которым проводили КРО по технологии CLEAR с разрезом 3,0 мм на эксимерном лазере WaveLight EX 500 (Alcon, США). Все вмешательства выполняли в отделе лазерной рефракционной хирургии ФГАУ НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. академика С.Н. Федорова» Минздрава России в период с 2024 по 2025 г. Срок послеоперационного наблюдения составил 3 месяца.

Всем пациентам до и в различные сроки после лечения (1 неделя, 1 и 3 месяца) выполняли как стандартные, так и специализированные методы исследования органа зрения: визометрию и рефрактометрию, в том числе с циклоплегией, кератометрию, тонометрию, aberрометрию на приборе Topcon KR-1W (Wavefront Analyzer, Япония), конфокальную микроскопию на приборе Heidelberg Retina Tomograph (HRT3) с роговичным модулем (Германия), кератотопографию на приборе Pentacam AXL (OCULUS Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Германия), а также исследовали биомеханические свойства роговицы на приборе Corvis ST (OCULUS Optikgeräte GmbH, Wetzlar, Германия). В сравнительный анализ были включены следующие параметры роговой оболочки: Applanation Length 1, Applanation Length 2, Applanation Velocity 1, Applanation Velocity 2, Deformation Amplitude, Peak Distance, Radius, CBI, DA Ratio, CCT, IOPnc, bIOP, SP-A1, ARTh, IR, CCT.

Статистическую обработку результатов проводили с расчетом *t*-критерия Стьюдента и точного критерия Фишера с помощью программ Microsoft Excel 2010 и Statistica 10.1 (StatSoft, США). Различия между выборками считали достоверными при  $p < 0,05$ , доверительный интервал 95 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование биомеханических свойств роговицы на дооперационном этапе не выявило статистически значимых различий между группами. Из таблицы 1 следует, что параметры находились в пределах нормальных значений. При планировании КРО особенно важно учитывать такие показатели, как CCT, SP-A1, ARTh, DA Ratio, CBI и Radius, так как они в большей степени отражают общую жесткость и эластичность роговицы, влияя на выбор методики операции.

Анализ плотности нервных волокон поверхностного сплетения на  $\text{мм}^2$  по данным конфокальной микроскопии у пациентов до КРО показал, что у всех пациентов с МСС в трех группах данный показатель был в пределах нормы, статистически значимых различий не наблюдалось ( $p > 0,05$ ): группа 1 —  $115,49 \pm 25,15$  волокон/ $\text{мм}^2$ ; группа 2 —  $117,28 \pm 23,87$  волокон/ $\text{мм}^2$ ; группа 3 —  $113,35 \pm 27,65$  волокон/ $\text{мм}^2$ .

**Таблица 1.** Результаты расчета биомеханических свойств роговицы на приборе Corvis ST у пациентов трех групп на дооперационном этапе

**Table 1.** The results of calculating the cornea biomechanical properties using the Corvis ST device in patients of three groups at the preoperative stage

Исследуемые параметры Investigated parameters	Группа 1 Group 1 (n = 50)	Группа 2 Group 2 (n = 50)	Группа 3 Group 3 (n = 50)	Статистически значимые различия Statistically significant differences, <i>p</i>
Applanation Length 1 (мм, mm)	2,21 ± 0,12	2,26 ± 0,11	2,20 ± 0,15	>0,05
Applanation Length 2 (мм, mm)	2,11 ± 0,16	2,12 ± 0,25	2,11 ± 0,21	>0,05
Applanation Velocity 1 (м/с, m/s)	0,13 ± 0,01	0,14 ± 0,02	0,13 ± 0,02	>0,05
Applanation Velocity 2 (м/с, m/s)	-0,24 ± 0,06	-0,25 ± 0,05	-0,24 ± 0,06	>0,05
Deform. Amplitude	1,03 ± 0,07	1,01 ± 0,11	1,03 ± 0,11	>0,05
Peak Distance (мм, mm)	4,96 ± 0,11	4,87 ± 0,11	4,92 ± 0,11	>0,05
Radius (мм, mm)	7,46 ± 0,48	7,49 ± 0,52	7,45 ± 0,52	>0,05
DA Ratio	3,86 ± 0,21	3,96 ± 0,30	3,87 ± 0,24	>0,05
CCT (мкм, mcm)	540,92 ± 26,62	560,12 ± 41,42	547,21 ± 36,42	>0,05
IOПс (мм рт. ст., mmHg)	18,12 ± 0,34	18,25 ± 0,45	17,67 ± 0,37	>0,05
biOP (мм рт. ст., mmHg)	18,19 ± 0,76	18,28 ± 0,67	18,19 ± 0,69	>0,05
SP-A1	114,0 ± 10,95	119,0 ± 13,15	117,0 ± 12,65	>0,05
ARTh	558,76 ± 112,15	566,12 ± 103,15	543,42 ± 110,17	>0,05
IR	7,61 ± 0,46	7,78 ± 0,48	7,66 ± 0,62	>0,05
CBI	0,21 ± 0,11	0,19 ± 0,12	0,19 ± 0,11	>0,05

Через 1 неделю после КРО статистически значимые различия между тремя группами пациентов отмечались при анализе показателей SP-A1, ARTh, IR и CCT — именно они наиболее чувствительны к изменениям после операции и определяют безопасность и эффективность КРО (табл. 2).

Как следует из таблицы 2, центральная толщина роговицы через 1 неделю после проведения операции Femto-LASIK была достоверно ниже по сравнению с группами пациентов, которым проводили операцию по технологии CLEAR ( $p < 0,05$ ). Параметр жесткости роговицы SP-A1 наиболее высоким был в группе 2 ( $p < 0,05$ ), что свидетельствует о том, что после проведения КРО по технологии CLEAR с разрезом 1,5 мм жесткость роговицы остается наиболее высокой. Параметр ARTh, отражающий эластичность роговицы, также был достоверно выше у пациентов в группе 2 ( $p < 0,05$ ). При этом показатель IR, характеризующий распределение жесткости по поверхности роговицы, был наименьшим также в группе 2 ( $p < 0,05$ ), что свидетельствует о достоверно лучшем сохранении жесткости роговой оболочки после КРО по технологии CLEAR с разрезом 1,5 мм.

Анализ плотности нервных волокон поверхностного сплетения через 1 неделю после КРО показал, что данный

**Таблица 2.** Результаты расчета биомеханических свойств роговицы на приборе Corvis ST у пациентов трех групп через 1 неделю после операции

**Table 2.** The results of calculating the cornea biomechanical properties on the Corvis ST device in patients of three groups 1 week after surgery

Исследуемые параметры Investigated parameters	Группа 1 Group 1 (n = 50)	Группа 2 Group 2 (n = 50)	Группа 3 Group 3 (n = 50)	Статистически значимые различия Statistically significant differences, <i>p</i>
Applanation Length 1 (мм, mm)	2,11 ± 0,11	2,16 ± 0,10	2,11 ± 0,11	>0,05
Applanation Length 2 (мм, mm)	2,02 ± 0,15	1,92 ± 0,15	1,93 ± 0,19	>0,05
Applanation Velocity 1 (м/с, m/s)	0,15 ± 0,07	0,24 ± 0,12	0,26 ± 0,15	>0,05
Applanation Velocity 2 (м/с, m/s)	-0,27 ± 0,05	-0,25 ± 0,06	-0,26 ± 0,06	>0,05
Deform. Amplitude	1,12 ± 0,09	1,07 ± 0,10	1,08 ± 0,11	>0,05
Peak Distance (мм, mm)	5,06 ± 0,21	4,97 ± 0,19	5,02 ± 0,18	>0,05
Radius (мм, mm)	6,96 ± 0,48	6,89 ± 0,41	6,91 ± 0,32	>0,05
DA Ratio	3,98 ± 0,11	4,02 ± 0,05	3,97 ± 0,04	>0,05
CCT (мкм, mcm)	492,12 ± 29,62	501,62 ± 31,82	499,91 ± 27,92	<0,05
IOПс (мм рт. ст., mmHg)	16,12 ± 0,25	16,85 ± 0,25	16,67 ± 0,67	>0,05
biOP (мм рт. ст., mmHg)	16,19 ± 0,36	16,98 ± 0,37	16,19 ± 0,79	>0,05
SP-A1	96,01 ± 8,65	109,0 ± 10,85	104,13 ± 9,95	<0,05
ARTh	152,54 ± 21,15	201,34 ± 13,84	176,88 ± 21,57	<0,05
IR	10,21 ± 0,36	9,93 ± 0,26	10,06 ± 0,31	<0,05
CBI	0,31 ± 0,11	0,29 ± 0,07	0,30 ± 0,08	>0,05

**Таблица 3.** Результаты расчета биомеханических свойств роговицы на приборе Corvis ST у пациентов трех групп через 1 месяц после операции

**Table 3.** The results of calculating the cornea biomechanical properties on the Corvis ST device in patients of three groups 1 month after surgery

Исследуемые параметры Investigated parameters	Группа 1 Group 1 (n = 50)	Группа 2 Group 2 (n = 50)	Группа 3 Group 3 (n = 50)	Статистически значимые различия Statistically significant differences, p
Applanation Length 1 (мм, mm)	2,14 ± 0,09	2,26 ± 0,10	2,21 ± 0,09	>0,05
Applanation Length 2 (мм, mm)	2,02 ± 0,11	1,91 ± 0,13	1,94 ± 0,18	>0,05
Applanation Velocity 1 (м/с, m/s)	0,15 ± 0,09	0,22 ± 0,12	0,23 ± 0,15	>0,05
Applanation Velocity 2 (м/с, m/s)	-0,27 ± 0,05	-0,25 ± 0,06	-0,26 ± 0,06	>0,05
Deform. Amplitude	1,12 ± 0,10	1,07 ± 0,12	1,08 ± 0,11	>0,05
Peak Distance (мм, mm)	5,01 ± 0,19	4,98 ± 0,18	5,00 ± 0,16	>0,05
Radius (мм, mm)	7,06 ± 0,18	6,83 ± 0,81	6,90 ± 0,72	>0,05
DA Ratio	3,98 ± 0,11	4,02 ± 0,05	3,97 ± 0,04	>0,05
ССТ (мкм, mcm)	491,87 ± 28,62	502,82 ± 29,82	498,91 ± 28,92	<0,05
IOПс (мм рт. ст., mmHg)	16,82 ± 0,55	16,85 ± 0,41	16,97 ± 0,68	>0,05
blOP (мм рт. ст., mmHg)	16,19 ± 0,36	16,98 ± 0,37	16,19 ± 0,79	>0,05
SP-A1	97,21 ± 8,15	113,13 ± 11,25	109,53 ± 9,45	<0,05
ARTh	157,24 ± 19,85	207,24 ± 11,44	187,18 ± 20,27	<0,05
IR	10,11 ± 0,26	9,83 ± 0,16	10,09 ± 0,28	<0,05
CBI	0,29 ± 0,10	0,25 ± 0,06	0,25 ± 0,08	>0,05

показатель достоверно ниже был у пациентов после операции FS-LASIK — 65,23 ± 7,85 волокон/мм<sup>2</sup>, наибольшие значения были отмечены после операции CLEAR с разрезом 1,5 мм — 90,96 ± 15,32 волокон/мм<sup>2</sup>, в группе 3 показатель был равен 86,15 ± 12,15 волокон/мм<sup>2</sup> ( $p < 0,05$ ).

Через 1 и 3 месяца после КРО статистически значимые различия между тремя группами пациентов также отмечались при анализе показателей SP-A1, ARTh, IR и ССТ (табл. 3 и 4). При этом все показатели у пациентов всех трех групп находились в пределах нормальных значений.

Как следует из таблиц 3 и 4, ССТ через 1 и 3 месяца после КРО наибольших значений достигала у пациентов в группе 2, а наименьших — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). Такие показатели, как SP-A1 и ARTh, достигали наибольших значений в группе 2, а наименьших — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). Параметр IR через 1 и 3 месяца наблюдения наиболее низким был в группе 2, а наиболее высоким — в группе 1 ( $p < 0,05$ ). Представленные различия свидетельствуют о том, что биомеханические свойства роговицы после КРО по технологии CLEAR с разрезом 1,5 мм изменялись в меньшей степени, сохраняя достаточно высокую жесткость и эластичность, в то время как после операции Femto-LASIK биомеханика роговицы претерпевала более значительные изменения.

Анализ плотности нервных волокон поверхностного сплетения через 1 и 3 месяца после КРО также показал,

**Таблица 4.** Результаты расчета биомеханических свойств роговицы на приборе Corvis ST у пациентов трех групп через 1 месяц после операции

**Table 4.** The results of calculating the cornea biomechanical properties on the Corvis ST device in patients of three groups 3 months after surgery

Исследуемые параметры Investigated parameters	Группа 1 Group 1 (n = 50)	Группа 2 Group 2 (n = 50)	Группа 3 Group 3 (n = 50)	Статистически значимые различия Statistically significant differences, p
Applanation Length 1 (мм, mm)	2,15 ± 0,10	2,25 ± 0,09	2,22 ± 0,10	>0,05
Applanation Length 2 (мм, mm)	2,01 ± 0,10	1,92 ± 0,12	1,95 ± 0,14	>0,05
Applanation Velocity 1 (м/с, m/s)	0,14 ± 0,10	0,28 ± 0,11	0,21 ± 0,18	>0,05
Applanation Velocity 2 (м/с, m/s)	-0,27 ± 0,05	-0,25 ± 0,06	-0,26 ± 0,06	>0,05
Deform. Amplitude	1,13 ± 0,09	1,06 ± 0,11	1,07 ± 0,12	>0,05
Peak Distance (мм, mm)	5,02 ± 0,18	4,96 ± 0,15	4,97 ± 0,17	>0,05
Radius (мм, mm)	7,06 ± 0,18	6,83 ± 0,81	6,90 ± 0,72	>0,05
DA Ratio	3,89 ± 0,12	4,03 ± 0,11	3,97 ± 0,07	>0,05
ССТ (мкм, mcm)	490,67 ± 29,62	502,52 ± 27,82	499,21 ± 27,92	<0,05
IOПс (мм рт. ст., mmHg)	16,29 ± 0,45	16,75 ± 0,31	16,87 ± 0,38	>0,05
blOP (мм рт. ст., mmHg)	16,37 ± 0,26	16,78 ± 0,27	16,29 ± 0,69	>0,05
SP-A1	95,81 ± 5,95	117,63 ± 10,15	111,33 ± 10,45	<0,05
ARTh	156,14 ± 29,85	212,84 ± 12,34	191,28 ± 28,17	<0,05
IR	10,41 ± 0,16	9,63 ± 0,46	10,01 ± 0,18	<0,05
CBI	0,30 ± 0,11	0,24 ± 0,05	0,25 ± 0,05	>0,05

**Таблица 5.** Анализ плотности нервных волокон поверхностного сплетения по данным конфокальной микроскопии у пациентов трех групп через 1 и 3 месяца после операции

**Table 5.** Analysis of the superficial plexus nerve fibres density using confocal microscopy data in patients from three groups at 1 and 3 months postsurgery

Исследуемые параметры Investigated parameters	Группа 1 Group 1 (n = 50)	Группа 2 Group 2 (n = 50)	Группа 3 Group 3 (n = 50)	Статистически значимые различия Statistically significant differences, p
Плотность нервных волокон поверхностного сплетения через 1 месяц, волокон/мм <sup>2</sup> Density of the nerve fibers superficial plexus after 1 month, fibers/mm <sup>2</sup>	81,09 ± 7,15	99,62 ± 9,45	98,03 ± 8,23	<0,05
Плотность нервных волокон поверхностного сплетения через 3 месяца, волокон/мм <sup>2</sup> Density of the superficial plexus nerve fibers after 3 month, fibers/mm <sup>2</sup>	83,97 ± 3,09	106,01 ± 7,17	103,45 ± 6,33	<0,05

что РО по технологии CLEAR с разрезом 1,5 мм сохраняет данный показатель достоверно на более высоком уровне в сравнении с FS-LASIK и CLEAR с разрезом 3,0 мм. Подробный анализ представлен в таблице 5.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Конструкция оптической зоны роговицы представляет собой ключевой параметр хирургического планирования, обладающий двойственным эффектом: с одной стороны, увеличение оптической зоны способно снизить периферические аберрации при расширении зрачка (в частности, в условиях пониженной освещенности), с другой — влечет за собой более значительную потерю роговичной ткани, что может приблизить параметры вмешательства к биомеханическим пределам роговицы [16]. При этом в современной клинической практике вариативность подходов к формированию оптической зоны в рамках различных хирургических методик пока не позволила выработать единый оптимизированный протокол [6].

Так, операция FS-LASIK предполагает послойное удаление ткани роговицы с целью достижения оптимальной преломляющей силы, обеспечивающей фокусировку световых лучей на сетчатке [17]. В ходе вмешательства ФСЛ формирует тонкий поверхностный лоскут роговицы диаметром около 8 мм, который затем приподнимается для обеспечения доступа к средним слоям стромы. При коррекции миопии эксимерный лазер осуществляет абляцию ткани с точностью до 0,25 мкм за один импульс, объем удаляемой ткани определяется степенью рефракционного нарушения, при этом рекомендуется не превышать 40 % от центральной толщины роговицы. По завершении коррекции формы роговицы лоскут возвращают в исходное положение, где он фиксируется за счет адгезивных свойств коллагена без необходимости наложения швов.

Операция CLEAR представляет собой современный метод фемтосекундной лазерной офтальмохирургии, предназначенный для коррекции близорукости и астигматизма. В отличие от LASIK, при которой верхний слой роговицы удаляется или отслаивается для доступа к стромальному слою, CLEAR сохраняет целостность поверхностных слоев: лазер формирует два тонких слоя в строме, создавая дисковидный фрагмент роговичной ткани (лентиккулу), которая затем удаляется через малый разрез [18, 19]. Операцию можно выполнить с помощью двух низкоэнергетических лазерных платформ: FEMTO LDV Z8 и FEMTO Z8 NEO (Ziemer Group, Швейцария) [18–20].

Ключевая особенность операции CLEAR — применение индивидуального асферического профиля резекции по значению Q, направленного на минимизацию изменений асферичности роговицы. Такой подход позволяет сохранить предоперационное значение Q, снизить послеоперационные изменения формы роговицы и уменьшить сферические аберрации при сохранении предсказуемости оптической зоны [19, 21]. Объем удаляемой ткани при CLEAR — также индивидуальный параметр, который рассчитывается на основе предоперационных измерений (рефракция, толщина роговицы, диаметр

оптической зоны). Толщина лентиккулы обычно составляет 100–120 мкм, а ее диаметр коррелирует с размером оптической зоны (в среднем 6–7 мм). Микроразрез для извлечения лентиккулы имеет размер 2–3 мм, в некоторых случаях — до 1 мм [22].

Операция CLEAR обладает рядом существенных преимуществ в сравнении с иными методами рефракционной экстракции лентиккулы. В частности, она позволяет минимизировать образование стромального газа в ходе вмешательства. Кроме того, методика дает возможность повторно центрировать зону фемтодиссекции без прерывания вакуумного контакта, что обеспечивает более точную центрацию по зрительной оси и эффективную корректировку циклоторсии [18, 23]. Еще одним важным достоинством CLEAR является формирование лентиккулы с исключительно гладкой поверхностью. Это способствует проведению плавной диссекции, исключая дополнительную травматизацию роговицы и снижая риск интра- и послеоперационных осложнений [20, 24].

Однако любая, даже наиболее современная и щадящая КРО так или иначе влечет за собой изменение биомеханических характеристик роговицы, которые критически важны для функционирования оптической системы глаза: они обеспечивают корректную дифракцию света, поддерживают форму роговицы при колебаниях внутриглазного давления и защищают глаз от механических воздействий [9, 10]. Хирургическое вмешательство нарушает структурную целостность роговицы: при интрастромальных методиках формируется лоскут или лентиккула, при поверхностных — удаляется эпителий и часть передней стромы. Это приводит к снижению модуля упругости, изменению распределения механических напряжений и уменьшению общей прочности фиброзной оболочки. В результате возникают предпосылки для ряда послеоперационных осложнений, наиболее распространенные из которых — индуцирование АВП, кератэктазии, нестабильность рефракционного результата, изменения роговичного астигматизма, ошибки измерения внутриглазного давления (ВГД), синдром сухого глаза [25, 26].

Было показано, что операция FS-LASIK способна индуцировать сферические и коматические аберрации вследствие изменения биомеханической структуры роговицы. Это обусловлено двумя ключевыми факторами: формированием роговичного лоскута и повышенной крутизной края в зоне разреза [27, 28]. По данным литературы, проведение FS-LASIK приводит к уменьшению изгибной жесткости роговицы, что напрямую связано с удалением стромальной ткани и изменением ее архитектоники [29]; изменению распределения напряжений, когда в зоне абляции и на границе с интактной тканью возникают области повышенного напряжения; снижению общей прочности роговицы на 15–20 % [30]; непосредственным изменениям в биомеханических параметрах.

В исследованиях Э.В. Бойко и соавт. продемонстрировано, что после выполнения операции FS-LASIK наблюдается изменение ряда биомеханических показателей роговицы: увеличиваются значения DA ratio, PD и ICR, одновременно снижается SP-A1, что свидетельствует о снижении жесткости роговицы [31]. В другой работе тех же авторов проведен анализ биомеханических параметров роговицы у пациентов с миопией до и после FS-LASIK с использованием прибора Corvis ST, оценивались показатели bIOP, IOP0, DA, DA ratio, ICR, CCT, SP-A1, PD5 и индекс CBI [32]. Результаты выявили статистически значимые послеоперационные изменения: снижение IOP0 и SP-A1, уменьшение CCT, а также рост DA ratio, ICR и PD. Совокупность этих изменений подтверждает снижение жесткости роговицы после выполнения FS-LASIK.

Проведение CLEAR, по данным литературы, приводит к следующим биомеханическим изменениям роговой оболочки [22, 33]: снижению модуля упругости и прочности роговицы из-за удаления части стромальных слоев; изменению распределения механических напряжений в роговице; отсутствию роговичного лоскута, как при FS-LASIK, снижает риск дислокации тканей, но создает новые зоны напряжения в области микро-разреза и вокруг лентикулы; изменению топографической стабильности, когда роговица становится более податливой к внешним воздействиям, что потенциально может привести к регрессии коррекции или нестабильности рефракционного результата.

В данном исследовании было установлено, что после проведения FS-LASIK и CLEAR через 3 месяца у всех

пациентов в той или иной степени снижались такие показатели, как CCT, SP-A1 и ARTh, при этом повышался IR. Все это свидетельствует о том, что любая КРО приводит к существенным изменениям в биомеханических свойствах роговицы, в первую очередь — к снижению ее общей жесткости и изменению пространственного распределения механических напряжений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В совокупности динамика описанных изменений демонстрирует remodelирование биомеханического профиля роговицы в послеоперационном периоде как после операции FS-LASIK, так и после CLEAR. Однако после операции CLEAR, особенно с разрезом 1,5 мм, изменения роговой оболочки менее выражены. Все это обуславливает необходимость детального предоперационного планирования. Ключевыми этапами такого планирования выступают: оценка исходной толщины роговицы, расчет остаточной стромы, учет индивидуальных биомеханических параметров и обоснованный выбор метода хирургического вмешательства, позволяющего минимизировать структурные повреждения роговицы. Операция CLEAR с меньшим размером разреза обеспечивает более эффективное сохранение плотности нервных волокон по сравнению с методикой FS-LASIK.

## УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Зинченко В.И. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, написание текста;  
Мушкова И.А. — существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, написание текста, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации;  
Каримова А.Н. — редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Biswas S, El Kareh A, Qureshi M, Lee DMX, Sun CH, Lam JSH. The influence of the environment and lifestyle on myopia. *J Physiol Anthropol.* 2024;43(1):7. doi: 10.1186/s40101-024-00354-7.
- Baird PN, Saw SM, Lanca C, Guggenheim JA, Smith Iii EL, Zhou X. Myopia. *Nat Rev Dis Primers.* 2020;6(1):99. doi: 10.1038/s41572-020-00231-4.
- Wolffsohn JS, Whayeb Y, Logan NS, Weng R. International Myopia Institute Ambassador Group. IMI-Global Trends in Myopia Management Attitudes and Strategies in Clinical Practice-2022 Update. *Invest Ophthalmol Vis Sci.* 2023;64(6):6. doi: 10.1167/iovs.64.6.6.
- Holden BA, Fricke TR, Wilson DA, Jong M, Naidoo KS, Sankaridurg P. Global prevalence of myopia and high myopia and temporal trends from 2000 through 2050. *Ophthalmol.* 2016;123(5):1036–1042. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.01.006.
- Sankaridurg P, Tahhan N, Kandel H, Naduvilath T, Zou H, Frick KD. IMI Impact of Myopia. *Investig. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2021;62:2. doi: 10.1167/iovs.62.5.2.
- Chen W, Yang Z. Comparison of visual quality and optical zones after TransPRK, SMILE, and FS-LASIK myopia correction procedures. *BMC Ophthalmol.* 2025;25(1):527. doi: 10.1186/s12886-025-04358-4.
- Liu S, Zhou X, Zhao Y. Comparison of predictability in central corneal thickness reduction after SMILE and FS-LASIK for high myopia correction. *Ophthalmol Ther.* 2023;12(1):549–559.
- Kanclerz P, Khoramnia R. Flap thickness and the risk of complications in mechanical microkeratome and femtosecond laser in situ keratomileusis: a literature review and statistical analysis. *Diagnostics.* 2021;11(9):1588.
- Guo H, Hosseini-Moghaddam SM, Hodges W. Corneal biomechanical properties after SMILE versus FLEX, LASIK, LASEK, or PRK: a systematic review and meta-analysis. *BMC Ophthalmol.* 2019;19(1):167. doi: 10.1186/s12886-019-1165-3.
- Bao F, Lopes BT, Zheng X, Ji Y, Wang J, Elsheikh A. Corneal Biomechanics Losses Caused by Refractive Surgery. *Curr Eye Res.* 2023;48(2):137–143. doi: 10.1080/02713683.2022.2103569.
- Eliasy A, Chen KJ, Vinciguerra R, Lopes BT, Abass A, Vinciguerra P, Ambrósio R Jr, et al. Determination of Corneal Biomechanical Behavior in-vivo for Healthy Eyes Using CorVis ST Tonometry: Stress-Strain Index. *Front Bioeng Biotechnol.* 2019;7:105. doi: 10.3389/fbioe.2019.00105.
- Gui Y, Wang S, He Y, Zhang S, Zhang Y. Progress of corneal morphological examination combined with biomechanical examination in preoperative screening for keratorefractive surgery. *Indian J Ophthalmol.* 2023;71(6):2369–2378. doi: 10.4103/ijo.1377\_22.
- Wu Y, Guo LL, Tian L, Xu ZQ, Li Q, Hu J, Huang YF, Wang LQ. Comparative analysis of the morphological and biomechanical properties of normal cornea and keratoconus at different stages. *Int Ophthalmol.* 2021;41(11):3699–3711. doi: 10.1007/s10792-021-01929-4.
- Lee H, Kang DSY, Ha BJ, Choi JY, Kim EK, Seo KY, Kim TI. Biomechanical Properties of the Cornea Using a Dynamic Scheimpflug Analyzer in Healthy Eyes. *Yonsei Med J.* 2018;59(9):1115–1122. doi: 10.3349/ymj.2018.59.9.1115.
- Yang K, Xu L, Fan Q, Zhao D, Ren S. Repeatability and comparison of new Corvis ST parameters in normal and keratoconus eyes. *Sci Rep.* 2019;9:15379. doi: 10.1038/s41598-019-51502-4.
- Azor JA, Vega F, Armengol J, Millan MS. Optical Assessment and Expected Visual Quality of Four Extended Range of Vision Intraocular Lenses. *J Refract Surg.* 2022;38(11):688–697. doi: 10.3928/1081597X-20220926-01.
- Lee JK, Chuck RS, Park CY. Femtosecond laser refractive surgery: small-incision lenticule extraction vs. femtosecond laser-assisted LASIK. *Curr Opin Ophthalmol.* 2015;26(4):260–264. doi: 10.1097/ICU.0000000000000158.
- Izquierdo L, Sossa D, Ben-Shaul O, Henriquez MA. Corneal lenticule extraction assisted by a low-energy femtosecond laser. *J Cataract Refract Surg.* 2020;46(9):1217–1221. doi: 10.1097/j.jcrs.0000000000000236.
- Leccisotti A, Fields SV, De Bartolo G. Refractive Corneal Lenticule Extraction With the CLEAR Femtosecond Laser Application. *Cornea.* 2023;42(10):1247–1256. doi: 10.1097/ICO.00000000000003123.
- Wang M, Zhang F, Copruz CC, Han L. First experience in small incision lenticule extraction with the femto LDV Z8 and lenticule evaluation using scanning electron microscopy. *J Ophthalmol.* 2020;2020:6751826.
- Järvenpää JJ. Q-value individualized CLEAR lenticule extraction preserves corneal asphericity and minimizes spherical aberration while maintaining optical zone predictability. *Sci Rep.* 2025;15(1):30470. doi: 10.1038/s41598-025-16271-3.
- Аждарова ЛВ, Шевчук МА, Костенев СВ, Слонимский АЮ, Громова ЕГ, Уянаева АА, Мургазалиева ПК. Первый клинический опыт рефракционной

- лентиккулярной хирургии CLEAR через разрез 1,0 мм. Офтальмохирургия. 2025;3:50.
- Azhdarova LV, Shevchuk MA, Kostenev SV, Slonimsky AY, Gromova EG, Uyanayeva AA, Murtazaliev PK. The first clinical experience of CLEAR refractive lenticular surgery through a 1.0 mm incision. *Ophthalmosurgery*. 2025;3:50. doi: 10.25276/0235-4160-2025-3-50-58.
23. Pajic B, Cvejic Z, Pajic-Eggspuehler B. Cataract surgery performed by high frequency LDV Z8 femtosecond laser: Safety, efficacy, and its physical properties. *Sensors (Basel)*. 2017;17:1429. doi: 10.3390/s17061429.
24. Riau AK, Liu YC, Lwin NC, Ang HP, Tan NY, Yam GH. Comparative study of nJ- and  $\mu$ J-energy level femtosecond lasers: evaluation of flap adhesion strength, stromal bed quality, and tissue responses. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2014;55(5):3186–3194. doi: 10.1167/iov.14-14434.
25. Rajabpour M, Kangari H, Pesudovs K. Refractive error and vision related quality of life. *BMC Ophthalmol*. 2024;24(1):83. doi: 10.1186/s12886-024-03350-8.
26. Малюгин БЭ, Солодкова ЕГ, Балалин СВ, Куликов ВС, Лобанов ЕВ. Оценка изменений биомеханических свойств роговицы при кератэктазиях. Современные технологии в офтальмологии. 2021;5(40):179–187. doi: 10.25276/2312-4911-2021-5-179-187.
27. Wu Y, Huang Y, Wang SH, Wang GQ, Yu AM, Zhao SZ. Comparative study of objective visual quality between FS-LASIK and SMART in myopia. *Int J Ophthalmol*. 2022 Mar 18;15(3):502–509. doi: 10.18240/ijo.2022.03.20.
28. Ahmed HM, Salem NM, Al-Atabany W. Impact of post-refractive surgeries on corneal biomechanics — a review. *J Clin Eng*. 2021;46(4):177–188. doi: 10.1097/JCE.0000000000000482.
29. Куликова ИЛ, Пикусова СМ, Авершина ЛА. Изменение напряженно-деформированного состояния роговицы после коррекции гиперметропии методами LASIK и FS-LASIK. Современные проблемы науки и образования. 2021;2:196. doi: 10.17513/spno.30658.
- Kulikova IL, Pikusova SM, Avershina LA. Changes in the stress-strain state of the cornea after hyperopia correction using LASIK and FS-LASIK. *Modern Problems of Science and Education*. 2021;2:196. doi: 10.17513/spno.30658.
30. Драчева ТВ. Морфофункциональные и биомеханические изменения роговицы после эксимерлазерной коррекции зрения по методике LASIK. Научное обозрение. Педагогические науки. 2019;4-4:27–30.
- Dracheva TV. Morphofunctional and biomechanical changes in the cornea after excimer laser vision correction using the LASIK technique. *Scientific review. Pedagogical sciences*. 2019;4-4:27–30.
31. Бойко ЭВ, Того ЕС, Суев АА, Качанов АБ, Литвин ИБ. Непосредственная оценка изменений биомеханических свойств роговицы после проведения операций ReLEx SMILE и FemtoLASIK. Вестник офтальмологии. 2023;139(3):41–48.
- Boyko EV, Togo ES, Suetov AA, Kachanov AB, Litvin IB. Direct assessment of changes in biomechanical properties of the cornea after ReLExSMILE and FemtoLASIK surgeries. *Annals of ophthalmology*. 2023;139(3):41–48. doi: 10.17116/oftalma202313903141.
32. Бойко ЭВ, Того ЕС, Литвин ИБ, Качанов АБ. Оценка изменений биомеханических свойств роговицы после проведения операции FemtoLASIK. Современные технологии в офтальмологии. 2021;5(40):121–125. doi: 10.25276/2312-4911-2021-5-121-125.
33. Чупров АД, Каныкова ЮВ, Трубников ВА. Влияние кераторефракционных операций CLEAR и FEMTO-LASIK на биомеханические параметры роговицы у пациентов с миопией в динамике. Современные проблемы науки и образования. 2023;4:124.
- Chuprov AD, Kanyukova YuV, Trubnikov VA. The influence of keratorefractive surgeries CLEAR and FEMTO-LASIK on biomechanical parameters of the cornea in patients with myopia in dynamics. *Modern problems of science and education*. 2023;4:124. doi: 10.17513/spno.32886.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинченко Валерия Ивановна  
врач-офтальмолог, аспирант

Мушкова Ирина Альфредовна  
доктор медицинских наук, заведующая отделом  
лазерной рефракционной хирургии

Каримова Аделя Насибуллаевна  
кандидат медицинских наук, научный сотрудник отдела лазерной  
рефракционной хирургии

## ABOUT THE AUTHORS

Zinchenko Valeria I.  
ophthalmologist, postgraduate

Mushkova Irina A.  
MD, head of the Laser Refractive Surgery Department

Karimova Adelya N.  
PhD, researcher of the Laser Refractive Surgery Department