Вестник офтальмологии
2025, Т. 141, №6, с. 145–152
https://doi.org/10.17116/oftalma2025141061145

Russian Annals of Ophthalmology
2025, vol. 141, №6, pp. 145–152
https://doi.org/10.17116/oftalma2025141061145

Исследование биомеханических свойств роговичной лентикулы при миопии и миопическом астигматизме после фемтолазерной коррекции по технологии CLEAR

© Т.С. КУЗНЕЦОВА[1, 2], В.Д. АНТОНЮК[1], Р.Р. ФАЙЗРАХМАНОВ[2], А.С. ЕРОФЕЕВ[3], В.С. КОЛМОГОРОВ[3, 4]

[1]Клиника микрохирургии глаза ОКДЦ ПАО «Газпром», Москва, Россия;
[2]Институт усовершенствования врачей ФГБУ «Национальный медико-хирургический центр им. Н.И. Пирогова» Минздрава России, Москва, Россия;
[3]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Россия;
[4]ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель исследования. Изучить локальные механические свойства с определением модуля Юнга (мЮ) роговичной лентикулы (РЛ) (фрагмента стромального слоя) посредством сканирующей ион-проводящей микроскопии (СИПМ) у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом, перенесших фемтолазерную лентикулярную коррекцию роговицы по технологии CLEAR.

Материал и методы. В исследование вошли 19 пациентов от 21 года до 48 лет, из них 11 (58%) мужчин и 8 (42%) женщин (38 глаз), у которых было извлечено 34 лентикулы. Участники были разделены на 2 группы: 1-я группа — пациенты в возрасте 26–36 лет, 2-я — в возрасте 41–48 лет. Срок исследования извлеченной лентикулы составлял от 6 до 10 ч после операции. Дооперационные, интра- и послеоперационные характеристики были следующими: сферический компонент от –1,75 до –8,25 дптр, цилиндрический — от –0,0 до –1,75 дптр, центральная толщина роговицы — 511–607 мкм, толщина удаленной лентикулы — 78–159 мкм, индекс PTA — 33,1–47,1, глубина залегания задней поверхности лентикулы — 288–402 мкм.

Результаты. В 1-й группе значения мЮ фибрилл средних слоев стромы роговицы (на глубине от 302 до 402 мкм) составили от 128,7 до 920 Па, во 2-й (на глубине от 288 до 377 мкм) — от 252,2 до 641,1 Па.

Заключение. Впервые исследованы биомеханические свойства фибрилл средней стромы роговицы, описанные с помощью мЮ *in vivo*. Показатели упругости были выше для группы лентикул пациентов в возрасте 21–36 лет по сравнению с таковыми для группы пациентов 41–48 лет.

Ключевые слова: *биомеханические свойства лентикулы, миопия, фемтолазерная лентикулярная коррекция (CLEAR).*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Кузнецова Т.С. — https://orcid.org/0000-0003-4024-6817
Антонюк В.Д. — https://orcid.org/0009-0003-3099-0658
Файзрахманов Р.Р. — https://orcid.org/0000-0002-4341-3572
Ерофеев А.С. — https://orcid.org/0000-0002-6631-821X
Колмогоров В.С. — https://orcid.org/0000-0002-7135-8910
Автор, ответственный за переписку: Кузнецова Татьяна Сергеевна — e-mail: tskuznetsova2013@gmail.com

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Кузнецова Т.С., Антонюк В.Д., Файзрахманов Р.Р., Ерофеев А.С., Колмогоров В.С. Исследование биомеханических свойств роговичной лентикулы при миопии и миопическом астигматизме после фемтолазерной коррекции по технологии CLEAR. *Вестник офтальмологии*. 2025;141(6):145–152. https://doi.org/10.17116/oftalma2025141061145

Investigation of the biomechanical properties of corneal lenticules in myopia and myopic astigmatism after femtosecond laser vision correction with the CLEAR technique

© T.S. KUZNETSOVA[1, 2], V.D. ANTONUK[1], R.R. FAYZRAKHMANOV[2], A.S. EROFEEV[3], V.S. KOLMOGOROV[3, 4]

[1]Eye Microsurgery Clinic of OKDC PJSC Gazprom, Moscow, Russia;
[2]Institute for Advanced Training of Physicians of the Pirogov National Medical and Surgical Center, Moscow, Russia;
[3]National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia;
[4]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

ABSTRACT

Purpose. This study aimed to investigate the local mechanical properties and determine the Young's modulus (Y) of corneal lenticules (stromal layer fragments) using scanning ion-conductance microscopy (SICM) in patients with myopia and myopic astigmatism who underwent femtosecond laser surgery using the corneal lenticule extraction for advance refractive correction (CLEAR) technique.

Material and methods. The study included 19 patients aged 21—48 years, comprising 11 men (58%) and 8 women (42%) (38 eyes), from whom 34 lenticules were extracted. Participants were divided into two groups: group 1 — patients aged 26—36 years, and group 2 — patients aged 41—48 years. The analysis of extracted lenticules was performed 6—10 hours postoperatively. The preoperative, intraoperative, and postoperative parameters were as follows: spherical equivalent from –1.75 to –8.25 D, cylindrical component from –0.0 to –1.75 D, central corneal thickness 511—607 μm, lenticule thickness 78—159 μm, percentage of tissue altered (PTA) index 33.1—47.1, and posterior lenticule surface depth 288—402 μm.
Results. In group 1, the Young's modulus values of stromal fibrils (at a depth of 302—402 μm) ranged from 128.7 to 920 Pa, whereas in group 2 (depth 288—377 μm), the values ranged from 252.2 to 641.1 Pa.
Conclusion. For the first time, the biomechanical properties of the fibrils in the middle stroma were studied *in vivo* and described using the Young's modulus. Elasticity was higher in the lenticules extracted from patients aged 21—36 years than in those from patients aged 41—48 years.

Keywords: *biomechanical properties of the lenticules, myopia, femtosecond laser lenticular correction (CLEAR).*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Kuznetsova T.S. — https://orcid.org/0000-0003-4024-6817
Antonuk V.D. — https://orcid.org/0009-0003-3099-0658
Fayzrakhmanov R.R. — https://orcid.org/0000-0002-4341-3572
Erofeev A.S. — https://orcid.org/0000-0002-6631-821X
Kolmogorov V.S. — https://orcid.org/0000-0002-7135-8910
Corresponding author: Kuznetsova T.S. — e-mail: tskuznetsova2013@gmail.com

TO CITE THIS ARTICLE:
Kuznetsova TS, Antonuk VD, Fayzrakhmanov RR, Erofeev AS, Kolmogorov VS. Investigation of the biomechanical properties of corneal lenticules in myopia and myopic astigmatism after femtosecond laser vision correction with the CLEAR technique. *Russian Annals of Ophthalmology = Vestnik oftal'mologii*. 2025;141(6):145–152. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/oftalma2025141061145

Фемтолазерная лентикулярная коррекция миопии и миопического астигматизма постепенно становится ведущей технологией в кераторефракционной хирургии. Извлекаемая в результате операции роговичная лентикула (РЛ) (фрагмент стромального слоя) чаще всего утилизируется. Однако ее изучение может стать ключом к пониманию биомеханических свойств роговицы *in vivo*. Кроме того, лентикулы являются потенциальным донорским материалом для лечения кератоконуса, коррекции гиперметропии, гиперметропического астигматизма, пресбиопии. В многочисленных работах описываются лентикулы, сформированные и извлеченные в результате применения технологии SMILE (Small Incision Lenticula Extraction) [1–7]. Ряд публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов содержат описание методов и результатов исследования таких свойств РЛ, как форма, диаметр, толщина, прозрачность, рефракционная сила, упругость (после предварительной дегидратации и криоконсервации для создания глазного банка). Другие работы посвящены изучению характеристик и качества поверхности стромы роговицы и лентикулы после ее экстракции *ex vivo* (на свиных глазах) с проведением электронной сканирующей микроскопии и гистологического исследования [8–12].

Цель исследования — изучить локальные механические свойства РЛ (с определением модуля Юнга) (мЮ) посредством сканирующей ион-проводящей микроскопии (СИПМ) у пациентов с миопией и миопическим астигматизмом, перенесших фемтолазерную лентикулярную коррекцию по технологии CLEAR.

Материал и методы

В клинике микрохирургии глаза ОКДЦ ПАО «Газпром» в период с августа по ноябрь 2024 г. 19 пациентам (11 (58%) мужчин и 8 (42%) женщин; 38 глаз), с миопией и миопическим астигматизмом, выполнена операция CLEAR на платформе фемтосекундного лазера LDV Z8 (Ziemer, Германия; программное обеспечение SW5835) с извлечением лентикул. Возраст пациентов варьировал от 21 года до 48 лет (31,0±8,99 года).

Исследование проведено в соответствии с этическими принципами, установленными Хельсинкской декларацией Всемирной медицинской ассоциации, а также с нормами регионального и международного права. Все участники предоставили соответствующее письменное информированное добровольное согласие.

Изучение биомеханических свойств лентикул осуществлено на базе научно-исследовательской лаборатории биофизики ФГАОУ ВО «НИТУ МИСИС» (Москва).

В исследование включено 34 лентикулы. Дооперационные характеристики были следующими: сферический компонент от –1,75 до –8,25 (–4,53±1,87) дптр, цилиндрический компонент от –0,0 до –1,75 (–0,72±0,47) дптр; центральная толщина роговицы (ЦТР) — 511,0–607,0 (555,9±24,2) мкм, толщина «сар» — 100,0–110,0 (108,2±3,87) мкм, диаметр оптической зоны — 6,2–7,0 (6,77±0,19) мм. Интра- и послеоперационные характеристики: толщина удаленной лентикулы — 78–159 (116,9±22,2) мкм, остаточная тол-

Таблица. 1. **Диагностические данные пациентов обеих групп до операции (*M*±σ)**
Table 1. **Diagnostic data of patients of both groups before surgery (*M*±σ)**

Группа	Возраст, годы	Sph, дптр	Cyl, дптр	ВГД, мм рт. ст.	Результат пахиметрии, мкм	ПЗО, мм	ПЭК, кл/мм³
1-я	26,3±4,3	–4,44±1,73	–0,77±0,42	18,1±2,5	559,9±24,58	25,37±0,89	2875,7±126,7
2-я	44,2±2,6	–4,78±2,24	–0,63±0,58	19,2±1,9	546,1 ±21,11	26,13±0,42	2802,0±208,7

Примечание. Sph — сферический компонент, Cyl — цилиндрический компонент.

Таблица. 2. **Хирургические параметры лентикул пациентов обеих групп (*M*±σ)**
Table 2. **Surgical parameters of lenticules in both groups (*M*±σ)**

Группа	Толщина «сар», мкм	Диаметр оптической зоны, мм	Толщина лентикулы, мкм	Индекс PTA, %	Глубина задней поверхности лентикулы, мкм
1-я	108,33±3,8	6,8±0,17	117,75±23,42	40,4±3,78	333,83±28
2-я	108,0±4,22	6,75±0,24	115,0±19,96	40,93±4,15	323,1±32,7

Таблица. 3. **Показатели толщины эпителия роговицы (в мкм) у пациентов обеих групп до операции (*M*±σ)**
Table 3. **Corneal epithelial thickness (μm) in patients of both groups before surgery (*M*±σ)**

Группа	Толщина центральной зоны, мкм	S1	I1	N1	T1	S2	I2	N2	T2
1-я	52,0±2,5	50,7±2,2	53,2±2,5	51,6±2,4	51,13±2,4	49,5±1,9	54,25±2,3	52,3±1,9	51,3±2,6
2-я	54,4±0,97	52,7±0,95	55,0±2,5	53,4±1,3	52,7±0,5	53,2±1,7	56,0±3,43	54,2±0,63	54,3±1,1

Примечание. S — superior, I — inferior, N — nasal, T — temporal.

щина роговицы — 392–512 (438,9±31,1) мкм, индекс PTA (the percentage of tissue altered) — 33,1–47,1 (40,6±3,83), глубина залегания задней поверхности лентикулы — 288–402 (330,7±29,38) мкм.

После извлечения каждую лентикулу помещали в раствор для хранения роговицы Борзенка–Мороз при температурном режиме 5–8 °С. Срок исследования лентикул составлял от 6 до 10 ч после операции. Сформированы 2 группы лентикул: 1-я группа — полученные у пациентов в возрасте 20–36 лет, 2-я — у пациентов 41–48 лет. Соответствующие данные представлены в **табл. 1** и **2**.

Всем пациентам проводили оптическую когерентную томографию (ОКТ) роговицы в режиме Corneal map для оценки толщины и равномерности эпителиального слоя. Результаты представлены в **табл. 3**.

Сканирование топографии и определение жесткости методом СИПМ осуществляли с помощью сканирующего ион-проводящего микроскопа ICAPPIC (ICAPPIC Ltd., Великобритания; ООО «Нанопрофайлинг», Россия). Сканирующую платформу устанавливали на инвертированном оптическом микроскопе Nikon Ti-2 (Nikon, Япония). Внутри нанокапилляра, предварительно заполненного раствором Хэнкса и помещенного в держатель, устанавливали Ag/AgCl-электрод с целью создания ионного тока, для измерения величины которого нанокапилляр подводили к поверхности раствора Хэнкса. Диапазон размеров нанокапилляров от 45—50 нм проводил ток 1900—2200 пА. Сканирование проводили в растворе Хэнкса; чашку Петри помещали на сканирующую платформу, расположенную внутри камеры Фарадея в целях изоляции от внешних электрических шумов.

Процесс сканирования осуществляли в режиме «hopping mode» с амплитудой перемещения по оси *Z* 2000 нм. Расстояние между измеряемыми точками поверхности было равным 250 нм, количество пикселей в одном кадре — 256×256. Скорость нагружения нанокапилляра к поверхности составила 100 мкм/с; при приближении его острия к поверхности образца на расстояние, сопоставимое с радиусом нанокапилляра, наблюдалось снижение тока. Сканирование выполнялось посредством регистрации падения ионного тока, проходящего через острие нанокапилляра при подаче электрического напряжения между двумя Ag/AgCl-электродами. Расстояние между измеряемыми зонами задней поверхности роговичной лентикулы было равным ~0,5 мм, глубина деформации 300–500 нм, размер одного кадра — 45×45 мкм (45 000 нм) **(рис. 1)**.

Падение ионного тока на 0,5% от исходной величины соответствовало координатам топографии клеток. В ходе сканирования нанокапилляр достигал падения ионного тока на 2%. Координаты по оси *Z* при падении ионного тока на 1–2% от исходного значения соответствовали величине деформации поверхности клеток ε **(рис. 2)**.

Далее путем вычитания кривой падения тока на недеформируемом субстрате определяли истинную

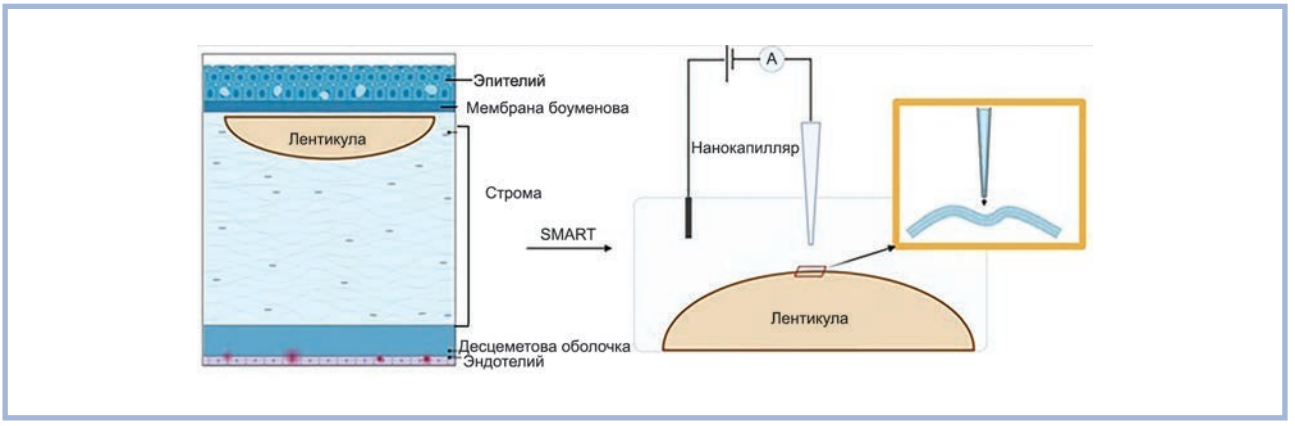

Рис. 1. **Схема сканирования задней поверхности роговичной лентикулы методом сканирующей ион-проводящей микроскопии.**
Fig. 1. **Scheme for scanning the posterior surface of the corneal lenticule using the scanning ion-conductance microscopy method.**

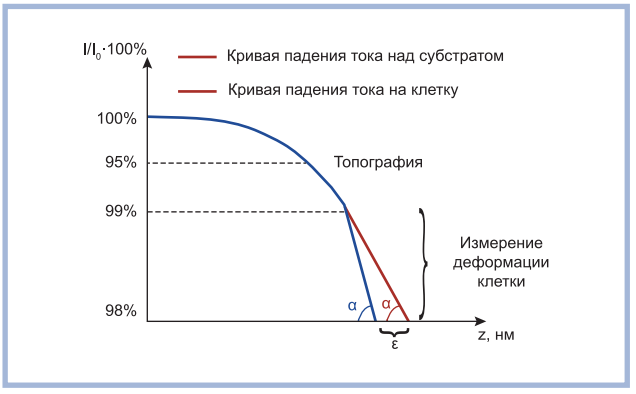

Рис. 2. **Кривые падения ионного тока на клетку и над субстратом.**
Fig. 2. **Curves of ionic current drop on the cell and over the substrate.**

деформацию поверхности клетки. Затем для оценки модуля Юнга применяли теоретическую модель, описываемую в следующем виде:

$$E = P\left(\frac{Ssub}{Scell} - 1\right)^{-1},$$

где E — мЮ (Па), P — приложенное давление (Па), *Ssub* и *Scell* — наклон кривой на субстрате и клетке соответственно.

Обработку полученных данных проводили с использованием программного обеспечения Image Viewer и Origin Lab.

Известно, что роговица благодаря регулярности строения 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 переплетающих пластин. Вследствие этого напряженно-деформированное состояние ткани роговицы определяется прежде всего механическими свойствами самих волокнистых структур, их особой архитектоникой и взаиморасположением, внутри- и межмолекулярными связями, а также биохимическим составом. Фибриллы имеют характерную исчерченность с интервалом 64 нм. Диаметр фибрилл передних и задних стромальных пластин одинаков и равен 22 (27—35) нм. Расстояние между фибриллами также приблизительно одинаковое: 43,2 нм в передних слоях и 45,6 нм — вблизи десцеметовой (задней пограничной) оболочки, при этом с возрастом оно уменьшается. Толщина одной пластины составляет от 1,5 до 2,5 мкм, ширина — от 9 до 260 мкм. Число коллагеновых пластин увеличивается от 300 в центральных участках роговицы до 500 на периферии. Таким образом, исследование с помощью сканирующего ион-проводящего микроскопа позволяет оценивать упругость роговицы на уровне фибрилл.

Результаты

Результаты СИПМ представлены в виде карты топографии исследуемого участка роговицы *in vivo* и мЮ в этой области **(рис. 3)**.

В ходе работы впервые получены значения мЮ комплекса «фибрилл-межфибриллярного матрикса» средней стромы роговицы у пациентов 21—48 лет **(рис. 4, а, б)**.

В процессе исследования отмечены особенности проведения измерений в исследуемых группах. Лентикулы пациентов старше 40 лет нуждались в более частой коррекции положения, так как были более «вязкими» и при приближении нанокапилляра могли смещаться в сторону, чего не наблюдалось при исследовании лентикул в более молодой возрастной группе. При транспортировке были повреждены 4 лентикулы, исключенные из исследования. В 1-й группе полученные значения мЮ варьировали в диапазоне 128,7—920,0 Па, во 2-й — в диапазоне

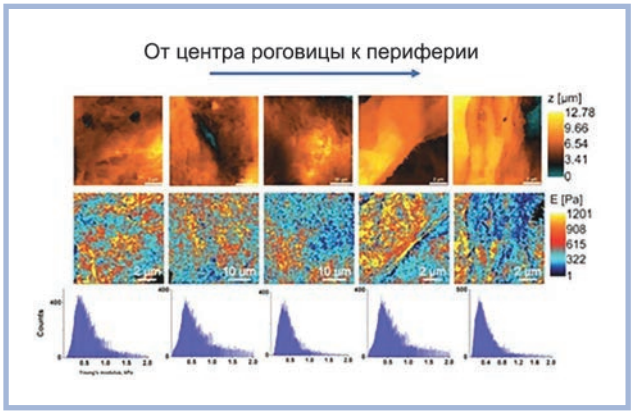

Рис. 3. **Результаты сканирующей ион-проводящей микроскопии: топография участка задней поверхности лентикулы и карта значений модуля Юнга.**

Fig. 3. **Scanning ion-conductance microscopy results: topography of the posterior lenticule surface and Young's modulus map.**

252,2–641,1 Па. Эти показатели были достаточно низкими и сопоставимыми с таковыми для мягких гидрогелей [13].

Полученные результаты продемонстрировали отсутствие статистической значимой разницы (дисперсионный анализ One-Way ANOVA) между величинами мЮ в обеих группах. Такой факт можно объяснить тем, что патологические изменения при миопии происходят в областях высоких деформаций [14], в то время как в случае СИПМ глубина деформации составила 300–400 нм.

Кроме того, изучена зависимость измеренного мЮ и толщины лентикулы. Анализ продемонстрировал наличие корреляции, для которой характерно снижение мЮ с увеличением толщины лентикулы как для 1-й, так и для 2-й группы **(рис. 5, а, б)**.

Обсуждение

Разработка фемтолазерных лентикулярных технологий открыла новые возможности для исследования биомеханических свойств стромальных тканей человека с использованием извлеченных лентикул. Изучение локальных механических свойств РЛ имеет важное значение для определения основных механизмов развития миопии и прогнозирования успеха рефракционной хирургии. Роговица обеспечивает ~70% рефракционной силы глаза, поэтому ее свойства крайне важны при коррекции рефракции. Во-первых, стромальную ткань можно исследовать с помощью прямых механических методов сразу после ее забора у пациента (в отличие от исследований донорских или животных глаз или косвенных измерений). Во-вторых, лентикулы рассматриваются как донорский материал для использования в тканевой инженерии роговицы, что требует наличия информации об их механической пригодности. Y. Xiang и соавт. [15] изучали механические свойства лентикул с помощью одноосных испытаний на растяжение. В этой работе возраст пациентов значительно варьировал и не указывалась информация о степени миопии. В более позднем исследовании Y. Song и соавт. [14] обнаружены корреляции между косвенными показателями, полученными с помощью прибора CORVIS ST (Oculus, Германия) и непосредственно измеряемой эластичностью роговицы. Однако указанные методики позволяют проводить измерения преимущественно на макроуровне, что не дает возможности обнаруживать патологические наноизменения РЛ.

С целью изучения биомеханических свойств роговицы *in vivo* предложены различные подходы,

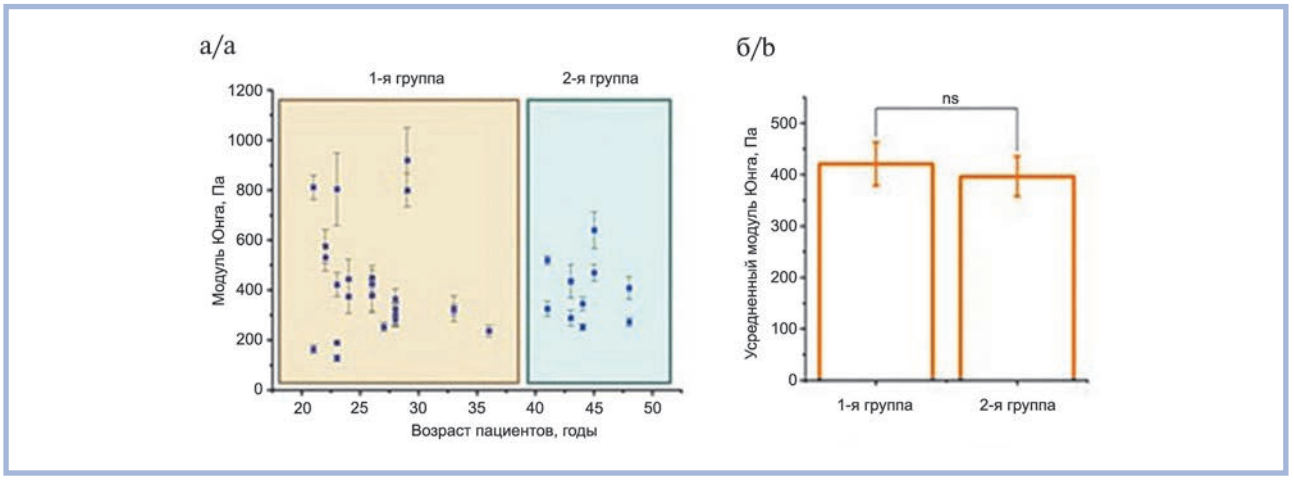

Рис. 4. **Значения модуля Юнга лентикул.**

а — распределение значений модуля Юнга единичных лентикул; б — усредненные значения модуля Юнга лентикул в обеих группах (дисперсионный анализ One-Way ANOVA). ns — значения недостоверны.

Fig. 4. **Young's modulus values of the studied lenticules.**

a — distribution of Young's modulus values for individual lenticules; b — mean Young's modulus values of lenticules in both groups (One-Way ANOVA). ns — non-significant values.

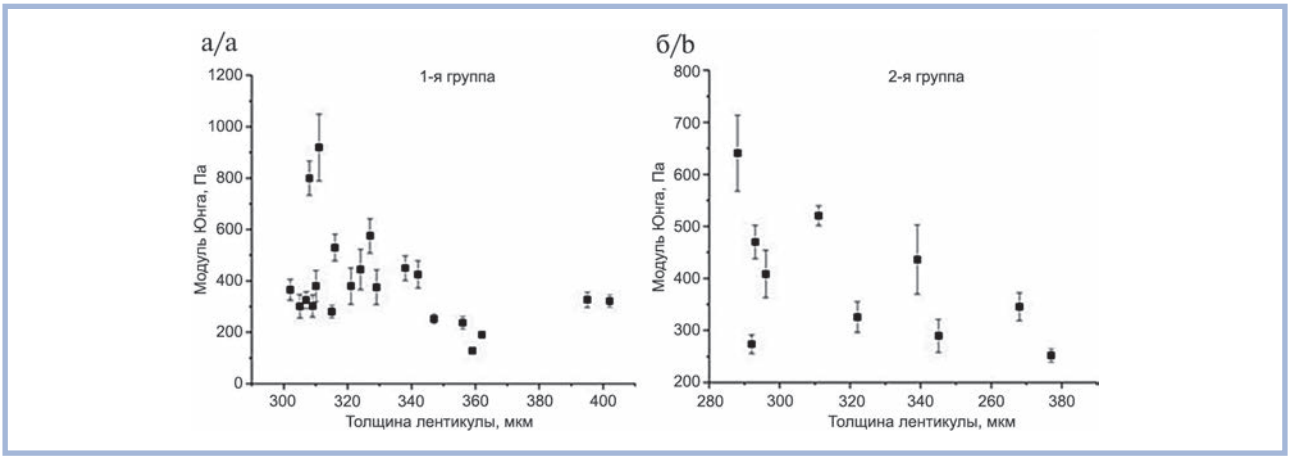

Рис. 5. **Зависимость значения модуля Юнга от толщины лентикулы.**

а — в 1-й группе; б — во 2-й группе.

Fig. 5. **Dependence of Young's modulus values on lenticule thickness.**

a — group 1; b — group 2.

включая микроскопию Бриллюэна, оптическую когерентную эластографию и ультразвуковую эластографию. Микроскопия Бриллюэна — бесконтактный метод, позволяющий определять вязкоупругие свойства биообразцов, используя маломощный лазерный луч ближнего инфракрасного диапазона для определения продольного модуля упругости или механической сжимаемости ткани путем анализа спектра отраженного сигнала. Преимущество методики заключается в том, что с ее помощью можно создать полную 3D-карту всей роговицы без прямого контакта. Клинические данные также показали наличие биомеханических изменений после сшивания роговицы у пациентов с кератоконусом. Микронное пространственное разрешение и высокая чувствительность позволяют отображать внутриклеточный модуль и различать механические свойства ядра и цитоплазмы, а также обнаруживать изменения, вызванные возмущениями отдельных клеточных компонентов. В опубликованных работах имеются данные об изучении биомеханических и иных характеристик роговицы посредством количественной оценки частотных сдвигов по Бриллюэну. Многочисленные исследования показали, что этот способ может выявлять крайне незначительные изменения толщины роговицы и ее биомеханики при кератоконусе с высоким уровнем специфичности и чувствительности. Однако ограничения микроскопии Бриллюэна могут заключаться в длительности процедуры исследования использования и колебаниях точности в зависимости от состояния гидратации роговицы. Перспективные технологии, по-видимому, ориентированы на комбинацию ОКТ и микроскопии Бриллюэна [16–18].

Наиболее широкое применение в исследованиях роговицы как в норме, так и после лазерного воздействия нашла атомно-силовая микроскопия (АСМ) [19, 20]. Лентикулы, полученные при SMILE-операциях, использовались для изучения нормальной роговичной стромы при различных условиях гидратации в работе D. Xia и соавт. [22]. Характеристики поверхностей таких лентикул изучены I.B. Damgaard и соавторами с точки зрения их применения при трансплантации роговицы [4]. Следует отметить, что форма лентикулы при различных технологиях отличается. В случае CLEAR формируются плосковыпуклые лентикулы в отличие от SMILE-лентикул с более выпуклым профилем передней поверхности.

В доступной литературе мы не встретили публикаций с описанием исследования биомеханических свойств РЛ, сформированных при использовании технологии CLEAR, с помощью СИПМ — относительно нового уникального и перспективного метода, в наибольшей степени способствующего решению поставленной нами задачи. СИПМ позволяет изучать морфологию, топографию и определять локальные механические свойства биообразцов и биологических систем (в том числе клеток и тонких структур) в физиологических условиях с высоким разрешением, что подтверждено результатами предыдущих работ [13, 21]. При помощи метода можно получать топографические изображения клеток в условиях, приближенных к физиологическим, обеспечивая неинвазивное воздействие. Наконец, СИПМ является идеальным инструментом для изучения эффектов различных лекарственных средств в отношении живых клеток в эксперименте [13, 21].

В отличие от АСМ СИПМ использует ионный ток через нанокапилляр, что минимизирует механическое воздействие на мягкие ткани. Проведенные ранее исследования демонстрируют, что обратная связь по ионному току позволяет определять точки регистрации поверхности образца зондом без силового воздействия на поверхность по сравнению с АСМ. Таким образом, метод делает возможным визуализацию в жид-

кости при поверхностных фибриллярных структур лентикул и с получением карты распределения значений мЮ с высоким разрешением при малых величинах наноиндентации (испытания материала посредством вдавливания в поверхность образца специального инструмента — зонда) поверхностных структур.

Посредством СИМП нам удалось получить впервые данные о биомеханических свойствах фибрилл средних слоев роговичной стромы на глубине в среднем 59,0±3,8% (от 52,9 до 66,9%) от значения толщины передней поверхности роговицы *in vivo*, описанные с помощью мЮ. В ходе проведения исследования возник целый ряд вопросов, которые предстоит решить в ближайшем будущем. Тем не менее данная работа посвящена безусловно перспективному направлению в изучении биомеханических свойств как отдельных роговичных слоев, так и роговицы в целом.

Выводы

Таким образом, основные результаты работы можно определить как следующие:

1. Впервые проведено исследование биомеханических свойств фибрилл средней стромы роговицы и описание их с помощью мЮ.
2. Показатели мЮ роговичных фибрилл составили в среднем 413,7 ±192,3 (от 128,7 до 919,7) Па: в 1-й группе пациентов 20–36 лет 420,7±216,6, во 2-й группе 41–48 лет — 396,4±123,5 Па.
3. Проведенный анализ зависимости измеренного модуля Юнга и толщины лентикулы продемонстрировал наличие корреляции, для которой характерно снижение мЮ с увеличением толщины лентикулы в обеих группах.

Участие авторов:
Концепция и дизайн исследования: Кузнецова Т.С.
Сбор и обработка материала: Кузнецова Т.С., Колмогоров В.С.
Статистическая обработка: Кузнецова Т.С.
Написание текста: Кузнецова Т.С., Колмогоров В.С.
Редактирование: Антонюк В.Д., Файзрахманов Р.Р., Ерофеев А.С.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Liu J, Shen D, Sun XY, Zhou K, Wang YN, Wei W. Short term clinical observation of keratoconus treated with stromal lenticule addition keratoplasty combined with corneal collagen cross-linking. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi (Chinese Journal of Ophthalmology)*. 2023;59(10):832–837. (In Chin.). https://doi.org/10.3760/cma.j.cn112142-20221204-00621
2. Zhao J, Shang J, Zhao Y, Fu D, Zhang X, Zeng L, Xu H, Zhou X. Epikeratophakia using small-incision lenticule extraction lenticule addition combined with corneal crosslinking for keratoconus. *J Cataract Refract Surg*. 2019;45(8):1191–1194. https://doi.org/10.1016/j.jcrs.2019.03.010
3. Zhang J, Zhou Y. Small incision lenticule extraction (SMILE) combined with allogeneic intrastromal lenticule inlay for hyperopia with astigmatism. *PLoS One*. 2021;16(9):e0257667. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257667
4. Damgaard IB, Ivarsen A, Hjortdal J. Biological lenticule implantation for correction of hyperopia: an ex vivo study in human corneas. *J Refract Surg*. 2018;34(4):245-252. https://doi.org/10.3928/1081597X-20180206-01
5. Li Meng, Li Meiyan, Sun L, Ni K, Zhou X. Predictive formula for refraction of autologous lenticule implantation for hyperopia correction. *J Refract Surg*. 2017;33(12):827- 833. https://doi.org/10.3928/1081597X-20171016-01
6. Костенев С.В., Борзенок С.А., Ли В.Г., Носиров П.О. Применение лентикулярной ткани в рефракционной хирургии роговицы. *Офтальмохирургия*. 2021;1:68–72. Kostenev SV, Borzenok SA, Lee VG, Nosirov PO. The use of lenticular tissue in corneal refractive surgery. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery=Oftal'mokhirurgiya*. 2021;1:68-72. (In Russ.). https://doi.org/10.25276/0235-4160-2021-1-68-72
7. Долбилкин А.А., Юрьева Т.Н., Лозовская Е.А., Никифоров С.Б. Тектоническая кератопластика с применением децеллюляризированных стромальных лентикул при тканевых дефектах роговицы: предварительные результаты. *Офтальмохирургия*. 2025;1(143):6-17. Dolbilkin AA, Iureva TN, Lozovskaya EA, Nikiforov SB. Tectonic keratoplasty using decellularized stromal lenticules in corneal tissue defects: preliminary results. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery=Oftal'mokhirurgiya*. 2025;1(143):6-17. (In Russ.). https://doi.org/10.25276/0235-4160-2025-1-6-17
8. Борзенок С.А., Костенев С.В., Дога А.В., Ли В.Г., Островский Д.С., Хубецова М.Х. Разработка оптимальных условий криоконсервации тканеинженерных роговичных конструкций. *Офтальмохирургия*. 2022; 1:13–18. Borzenok SA, Kostenev SV, Doga AV, Li VG, Ostrovskiy DS, Khubetsova MK. Development optimal conditions for cryopreservation of tissue-engineered corneal constructs. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery=Oftal'mokhirurgiya*. 2022;1:13-18. (In Russ.). https://doi.org/10.25276/0235-4160-2022-1-13-18
9. Nanavaty MA, Naveed H, Ashena Z, Mukhija R. Ex-vivo study on the surface quality of corneal lenticule and stroma after low energy femtosecond laser lenticule extraction. *Sci Rep*. 2022;12(1):10034. https://doi.org/10.1038/s41598-022-13468-8
10. Зиятдинова О.Ф., Расческов А.Ю. Интрастромальная имплантация донорской роговичной лентикулы при развитой стадии кератоконуса. *Современные технологии в офтальмологии*. 2019;5:277–280. Ziiatdinova O.F., Rascheskov A.Y. The ihtrastromal lenticule implantation for advanced keratoconus. *Modern technologies in ophthalmology=Sovremennye tekhnologii v oftal'mologii*. 2019;5:277–280. (In Russ.). https://doi.org/10.25276/2312-4911-2019-5-277-280
11. Mirshahi A et al. PLoS ONE 2021;16(5):e0251549. https://doi.org/10.1371
12. Kolmogorov VS, Erofeev AS, Woodcock E, Efremov YM, Iakovlev AP, Savin NA, Alova AV, Lavrushkina SV, Kireev II, Prelovskaya AO, Sviderskaya EV, Scaini D, Klyachko NL, Timashev PS, Takahashi Y, Salikhov SV, Parkhomenko YN, Majouga AG, Edwards CRW, Novak P, Korchev YE, Gorelkin PV. Mapping mechanical properties of living cells at nanoscale using intrinsic nanopipette-sample force interactions. *Nanoscale*. 2021;13(13):6558–6568. https://doi.org/10.1039/d0nr08349f
13. Tikhonova TN, Efremov YuM, Kolmogorov VS, Iakovlev AP, Sysoev NN, Timashev PS, Fadeev VV, Tivtikyan AS, Salikhov SV, Gorelkin PV, Korchev YE, Erofeev AS, Shirshin EA. Mechanical properties of soft hydrogels: assessment by scanning ion-conductance microscopy and atomic force microscopy. *Soft Matter*. 2024;20(47):9464–9474. https://doi.org/10.1039/D4SM00966E
14. Song Y, Wu D, Shen M, Wang L, Wang C, Cai Y, Xue C, Cheng GPM, Zheng Y, Wang Y. Measuring Human Corneal Stromal Biomechanical Prop-

erties Using Tensile Testing Combined with Optical Coherence Tomography. *Front Bioeng Biotechnol.* 2022;10:882392. https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.882392

15. Xiang Y, Shen M, Xue C, Wu D, Wang Y. Tensile biomechanical properties and constitutive parameters of human corneal stroma extracted by SMILE procedure. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2018;85:102–108. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2018.05.042
16. Yun SH, Chernyak D. Brillouin microscopy: assessing ocular tissue biomechanics. *Curr Opin Ophthalmol.* 2018;29(4):299–305. https://doi.org/10.1097/ICU.0000000000000489
17. Nikolić M, Conrad C, Zhang J, Scarcelli G. Noninvasive Imaging: Brillouin Confocal Microscopy. *Adv Exp Med Biol.* 2018:1092:351–364. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95294-9_16
18. Loveless BA, Moin KA, Hoopes PC, Moshirfar M. The Utilization of Brillouin Microscopy in Corneal Diagnostics: A Systematic Review. *Cureus.* 2024;16(7):e65769. https://doi.org/10.7759/cureus.65769
19. Schneider L, Pellegatta S, Favaro R, Pisati F, Roncaglia P, Testa G, Nicolis SK, Finocchiaro G, d'Adda di Fagagna F. DNA damage in mammalian neural stem cells leads to astrocytic differentiation mediated by BMP2 signaling through JAK-STAT. *Stem Cell Reports.* 2013;1(2):123–138. https://doi.org/10.1016/j.stemcr.2013.06.004
20. Kukanova VS, Dzamikhova AK, Akovantseva AA, Frolova AA, Efremov YuM, Shilova TYu, Svistunov AA, Avetisov SE, Timashev PS, Kotova SL. Biomechanical properties of lenticules in the ReLEx® SMILE® minimally invasive surgery: Do the age and degree of myopia matter? *Clin Biomech (Bristol).* 2025;125:106508. https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2025.106508
21. Kolmogorov VS, Erofeev AS, Barykin EP, Timoshenko RV, Lopatukhina EV, Kozin SA, Gorbacheva LR, Salikhov SV, Klyachko NL, Mitkevich VA, Edwards CRW, Korchev YuE, Makarov AA, Gorelkin PV. Scanning Ion-Conductance Microscopy for Studying β-Amyloid Aggregate Formation on Living Cell Surfaces. *Anal Chem.* 2023;95(43):15943-15949. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c02806
22. Dan Xia, Shuai Zhang et all.Hydrated human corneal stroma revealed by quantitative dynamic atomic force microscopy at nanoscale. *ACS Nano.* 2014 Jul 22;8(7):6873-82. https://doi.org/10.1021/nn5015837

Поступила 18.07.2025
Received 18.07.2025
Принята в печать 01.09.2025
Accepted 01.09.2025