

Возможности гистологического исследования в изучении достаточности насыщения роговицы раствором рибофлавина при проведении частичной дезэпителизации

Е.Г. Солодкова^{1,2}✉, С.Б. Измайлова³, И.Н. Захаров⁴, В.П. Фокин², С.В. Балалин^{1,2},
В.Л. Загребин¹, Е.В. Лобанов², В.Х. Лэ⁴

¹ Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия

² Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Волгоградский филиал, Волгоград, Россия

³ Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Москва, Россия

⁴ Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Проведен сравнительный анализ насыщения роговицы раствором рибофлавина при стандартной, модифицированной и трансэпителиальной методиках кросслинкинга роговичного коллагена на 15 свиных кадаверных глазах с помощью гистологического метода исследования. Результаты исследования подтвердили необходимость проведения дезэпителизации роговицы для обеспечения достаточности насыщения роговицы раствором рибофлавина. Частичная дезэпителизация в области кератоконуса допустима при проведении ультрафиолетового кросслинкинга роговичного коллагена (УФ-КРК), поскольку, по результатам гистологического метода исследования, отмечается распространение раствора рибофлавина в строму роговицы под интактный эпителий.

Ключевые слова: рибофлавин, кросслиндинг роговичного коллагена, математическое моделирование

ORIGINAL RESEARCHES

Original article

doi: <https://doi.org/10.19163/1994-9480-2024-21-4-56-62>

Possibilities of histological examination in studying the adequacy of corneal saturation with riboflavin solution during partial deepithelization

E.G. Solodkova^{1,2}✉, S.B. Izmailova³, I.N. Zakharov⁴, V.P. Fokin², S.V. Balalin^{1,2},
V.L. Zagrebin¹, E.V. Lobanov², V.H. Le⁴

¹ Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia

² Eye Microsurgery named after Academician S.N. Fedorov, Volgograd branch, Volgograd, Russia

³ Eye Microsurgery named after Academician S.N. Fedorov, Moscow, Russia

⁴ Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

Abstract. A comparative analysis of corneal saturation with riboflavin solution during standard, modified and transepithelial techniques of corneal collagen crosslinking on 15 porcine cadaveric eyes using the histologic method of investigation was carried out. The results of the study confirmed the need for corneal de-epithelialization to ensure sufficient saturation of the cornea with riboflavin solution. Partial de-epithelization in the area of keratoconus is admissible at carrying out ultraviolet crosslinking of corneal collagen (UV-CXL), because, according to the results of the histological method of research, there is a spreading of riboflavin solution into the corneal stroma under the intact epithelium.

Keywords: riboflavin, corneal collagen crosslinking, mathematical modeling

Кератоконус является прогрессирующим, невоспалительным, двусторонним (но обычно асимметричным) заболеванием роговицы, которое характеризуется истончением, ослаблением и эктазией ее парааксиальных зон, что приводит к искажению роговичной поверхности [1].

Для лечения начальных стадий кератоконуса применяется ультрафиолетовый кросслиндинг роговичного коллагена (УФ-КРК), разработанный в конце 1990-х гг.

группой авторов из Дрезденского университета, обеспечивающий образование новых ковалентных связей между волокнами коллагена роговицы при фотополимеризации ее стромальных волокон за счет комбинированного воздействия фотосенсибилизатора – 0,1%-го раствора рибофлавина и ультрафиолетового излучения с длиной волны 365 нм [2]. Кросслиндинг роговичного коллагена выполняется путем полной механической дезэпителизации зоны роговицы диаметром 7–9 мм, что обеспечивает

глубокое проникновение рибофлавина в строму роговицы [3]. Главный недостаток классической методики УФ-КРК состоит в длительном и сложном периоде реабилитации, обусловленном обширной зоной дезэпителизированной роговицы и выраженным болевым синдромом в раннем послеоперационном периоде. По настоящее время исследователями ведется поиск возможных путей усовершенствования классической методики УФ-КРК, чтобы улучшить переносимость операции пациентами, повысить ее эффективность [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Основным направлением научного поиска по оптимизации классической методики кросслинкинга на в настоящее время является изучение биомеханических свойств роговицы, а также клиническое подтверждение идеи локального изменения биомеханических свойств роговицы при развитии кератоконуса [10]. Возможность оценить биоме-

ханику роговицы *in vivo* в центральной оптической зоне появилась с внедрением в клиническую практику пневмотонометров с функцией анализа, возникающей под действием воздушного импульса деформации роговицы [11, 12, 13, 14, 15, 16]. Исследование биомеханики иных зон роговицы осуществимо только с помощью математической модели роговицы, построенной на основе метода конечных элементов [17, 18, 19, 20, 21, 22]. В Клинике Волгоградского филиала разработана персонализированная топографически и томографически ориентированная локальная методика УФ-КРК, заключающаяся в определении на основе математического моделирования распределения интенсивностей напряжений и деформаций в объеме роговицы у пациента с кератоконусом, определении положения и размеров ослабленной области роговицы (рис. 1 а, б).

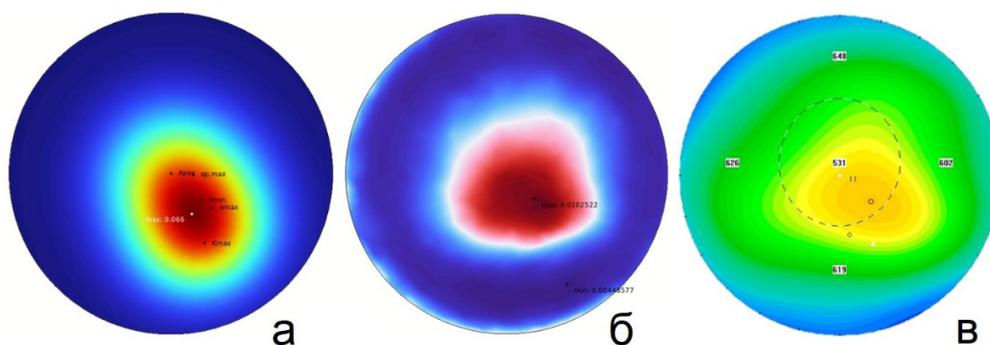


Рис. 1. Компьютерная модель роговицы с кератоконусом:

а – распределение коэффициента снижения жесткости роговицы, б – распределение интенсивности деформации роговицы, в – карта пахиметрии пациента

Обозначение границ искомой зоны кератоконуса при проведении персонализированной методики УФ-КРК обеспечивается топографически-ориентированной дезэпителизацией в режиме частичной фототерапевтической кератэктомии (ФТК) с помощью эксимерного лазера [23]. Насыщение роговицы раствором рибофлавина выполняется как и при стандартной методике кросслинкинга. Воздействие УФ-облучением осуществляют как на участок дезэпителизированной роговицы в области кератоконуса, где получают максимальное насыщение фотосенсибилизатором и происходит стандартный ультрафиолетовый кросслиндинг, так и на перифокальную зону недеэпителизированной роговицы, где происходит трансэпителиальный ультрафиолетовый кросслиндинг с более поверхностным эффектом (рис. 2).

Одним из условий, обеспечивающих безопасность и эффективность проведения операции УФ-КРК, является достижение достаточного уровня насыщения роговицы раствором рибофлавина как в толщине роговицы, так и по площади. В ходе экспериментального этапа работы был применен гистологический метод исследования достаточности насыщения роговицы раствором рибофлавина [24],

позволяющий оценить морфологические изменения в строме роговицы при проведении стандартной и модифицированной методики ультрафиолетового кросслинкинга роговичного коллагена.



Рис. 2. Этап УФ-облучения при проведении модифицированной методики кросслинкинга роговичного коллагена

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Оценить достаточность насыщения роговицы 0,1%-м раствором рибофлавина «Декстралинк» с помощью гистологического метода исследования при выполнении модифицированной методики кросслинкинга роговичного коллагена в сравнении со стандартной методикой.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводилось на 15 свиных каверных глазах (давность забора – 2 часа). Кадаверные глаза были распределены в 3 группы: 1-я группа (5 глаз) – глаза, подвергшиеся модифицированной методике Уф-КРК, 2-я группа (5 глаз) – глаза, подвергши-

еся стандартной методике Уф-КРК, в 3-ю группу вошли 5 интактных глаз, где насыщение 0,1%-м раствором рибофлавина и дальнейшее УФ-облучение проходило без предварительной дезэпителизации.

В ходе эксперимента каждый глаз помещали в держатель, для создания необходимого уровня тургора глазного яблока, после чего в 1-й группе проводили эксимерлазерную абляцию зоной диаметром 5,0 мм круглой формы на глубину 20 мкм эпителиального слоя, под контролем интраоперационной on-line пахиметрии (опция эксимерного лазера Schwind – Amaris 1050), во 2-й группе эпителий удаляли механически в центральной оптической зоне диаметром 8 мм, в 3-й группе дезэпителизация не проводилась (рис. 3).

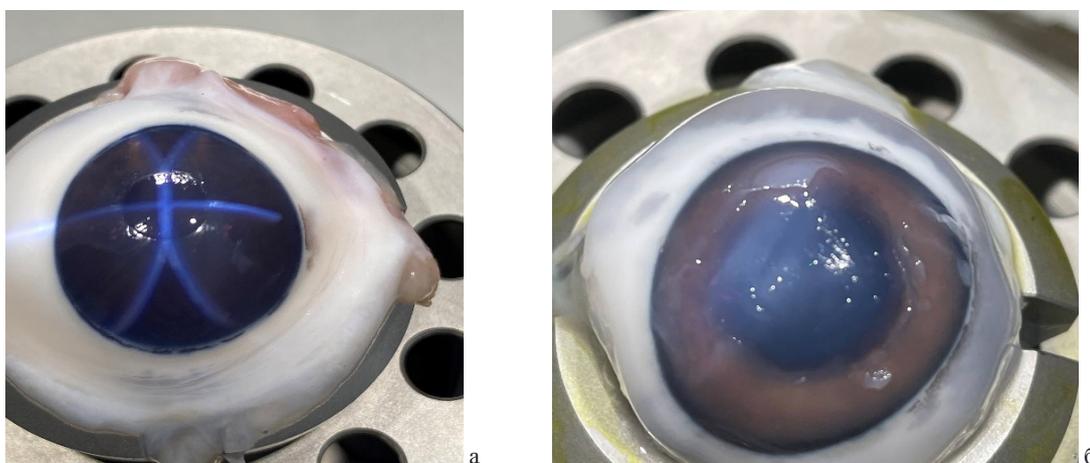


Рис. 3. Фото роговиц свиных кадаверных глаз после проведения частичной эксимерлазерной (а) и полной механической (б) дезэпителизации

Далее, во всех группах осуществлялось насыщение роговицы 0,1%-м раствором рибофлавина на декстране Т500 «Декстралинк» путем инстилляций каждые 2 мин в течение 30 мин (рис. 4), затем проводил-

ся этап УФ облучения в течение 10 мин мощностью 18 мВт/см², после чего роговицы изолировались и погружались для фиксации в 10%-й раствор забуференного формалина на 2 дня.

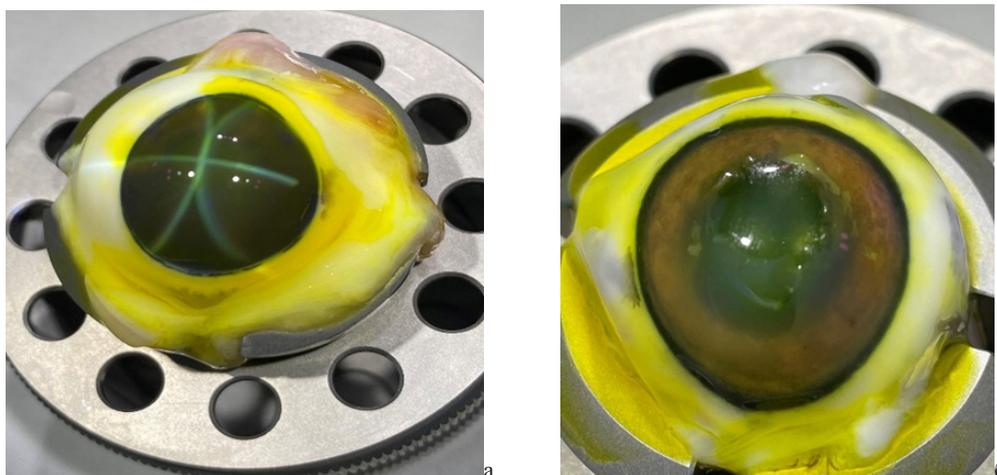


Рис. 4. Фото роговиц свиных кадаверных глаз на этапе насыщения роговицы раствором рибофлавина после проведения частичной эксимерлазерной (а) и полной механической (б) дезэпителизации

Для дальнейшего гистологического исследования проводилось обезвоживание роговиц в возрастающей концентрации спиртов, просветление в ксилоле и заливка в парафин. Изготовление срезов проводилось на ротационном микрократоме Leica 2160 (Германия). Серийные поперечные срезы роговицы помещались на предметные стекла с poly-L-Lysin (Menzel-Glaser).

При окраске по Ван Гизону срезы перекрашивались в свежеприготовленном гематоксилине Вейгерта с выдержкой в нем 3–5 мин, после чего промывались в двух порциях водопроводной воды, ввиду обильного отхождения краски, окрашивались в пикрофуксине 2–3 мин, прополаскивались в воде в течение 5–10–15 с, проводились через 96°-й спирт с выдержкой в нем 1–2–3 мину и просветлялись в карбол-ксилоле с заключением в балзам.

Пикрофуксин обладает дифференцирующим действием (за счет пикриновой кислоты) по отношению к железному гематоксилину, почему и допускается перекрашивание последним. Качество окраски контролируется под микроскопом, для чего срез повторно извлекают из пикрофуксина и быстро прополаскивают в воде.

Срезы окрашивались по Ван Гизону для визуализации плотности и ориентации коллагеновых волокон в строме роговицы. Сравнивались результаты гистологического исследования интактных роговиц, а также подвергнутых стандартной и модифицированной методикам кросслинкинга роговичного коллагена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В первой группе в эксперименте полностью удался передний эпителий роговицы в зоне диаметром 8,0 мм. В препаратах роговицы, окрашенных по Ван Гизону, при полном отсутствии эпителия наблюдалось сохранение боуменовой мембраны в виде поверхностной гомогенной пластинки, в поверхностной строме – разобщение пучков коллагеновых волокон, появление обширных сливных межламеллярных лакунарных пространств между передней и средней стромой. При этом в толще средней и задней стромы наблюдались явления отека, инфильтрации ткани (рис. 5).

Во второй группе, где проводилась ограниченная по диаметру эксимерлазерная дезэпителизация на глубину $2/3$ эпителиального слоя с последующим механическим удалением оставшейся $1/3$ эпителия, визуализировались как дезэпителизованные участки, так и зоны с сохраненным эпителием, где определялась слоистость его строения от рядов кубических до плоских клеток без элементов ороговения (рис. 6). При окраске по Ван Гизону видно, что такие участки дезэпителизации дали возможность пройти раствору рибофлавина в строму роговицы на всю ее глубину, что отразилось в появлении лакунарных пространств на всей площади поперечного среза роговицы до десцеметовой

мембраны. Коллагеновые волокна при этом сохранили однонаправленность ориентации параллельно поверхности роговицы. Наибольшее разрыхление передней стромы роговицы отмечалось в проекции зоны дезэпителизации. Однако аналогичная картина с появлением большого количества лакунарных пространств между волокнами коллагена наблюдалась и под сохранным эпителием, что говорит о наличии межламеллярного распространения раствора рибофлавина на область, превышающую по размерам зону дезэпителизации, что подтверждает целесообразность проведения дезэпителизации только в зоне кератоконуса и осуществления ультрафиолетового облучения как в зоне полной дезэпителизации, так и перифокально с захватом роговицы с сохранным эпителием.

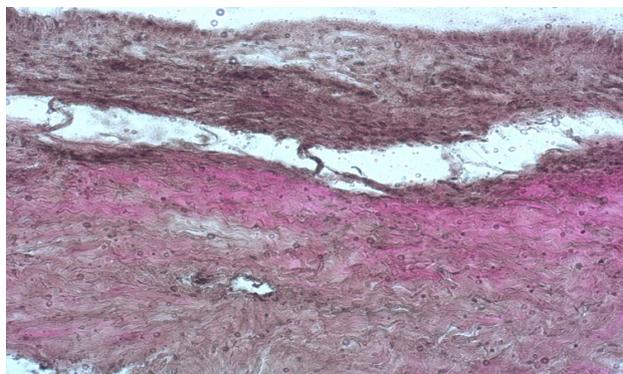


Рис. 5. Роговица свиного кадаверного глаза после полной механической дезэпителизации, окраска по Ван Гизону, об. $\times 10$

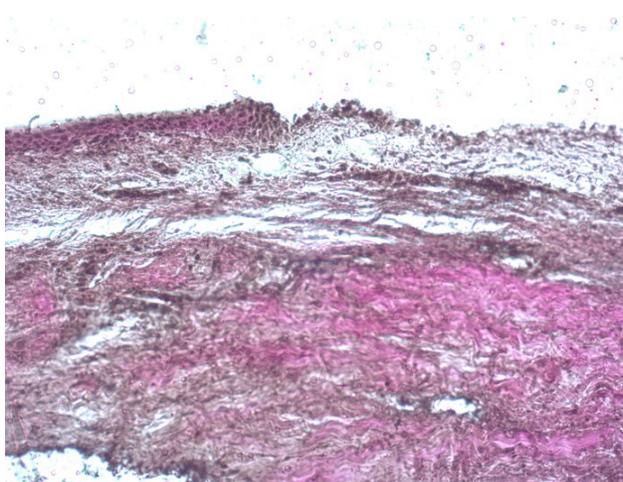


Рис. 6. Роговица свиного кадаверного глаза после проведения частичной эксимерлазерной дезэпителизации, окраска по Ван Гизону, об. $\times 10$

В группе интактных роговиц в препаратах визуализировались как сохранный эпителий с единичными мелкими зонами десквамации поверхностных слоев клеток, боуменова мембрана и стромальный слой с явлениями отека и набухания, но без наличия лаку-

между волокнами коллагена, что говорит о том, что интактный эпителий препятствует проникновению раствора рибофлавина в строму роговицы (рис. 7).

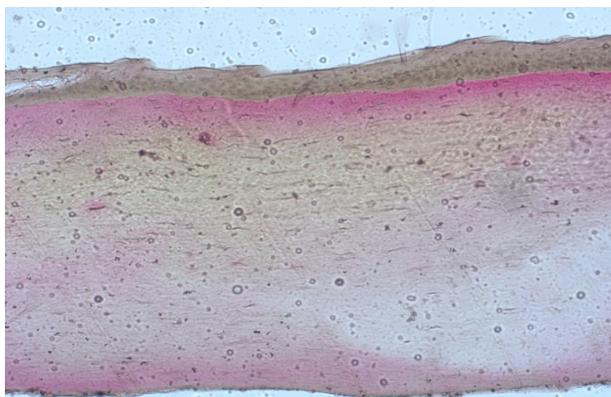


Рис. 7. Интактная роговица свиного кадаверного глаза, окраска по Ван Гизону, об. $\times 10$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение гистологических методов исследования позволило доказать достаточность насыщения роговицы раствором рибофлавина при выполнении модифицированной методики в сравнении со стандартной методикой кроссликинга роговичного коллагена, что определяет безопасность модифицированной методики УФ-КРК. Также гистологический метод исследования позволяет обосновать необходимость проведения деэпителизации роговицы для обеспечения достаточности насыщения роговицы раствором рибофлавина. Частичная деэпителизация в области кератоконуса допустима при проведении УФ-КРК, поскольку, по результатам гистологического метода исследования, отмечается распространение раствора рибофлавина в строму роговицы под интактный эпителий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фейнбаум К. Современные аспекты этиопатогенеза и лечения кератоконуса. *Офтальмохирургия*. 2011;3:80–83.
2. Spoerl E., Wollensak G., Seiler T. Increased Resistance of Crosslinked Cornea against Enzymatic Digestion. *Current Eye Research*. 2004;29(1):35–40. doi: 10.1080/02713680490513182.
3. Wollensak G., Spoerl E., Seiler T. Riboflavin/Ultraviolet-A Induced Collagen – Crosslinking for the Treatment of Keratoconus. *American Journal of Ophthalmology*. 2003;135:620–627. doi: 10.1016/s0002-9394(02)02220-1.
4. Малюгин Б.Э., Измайлова С.Б., Шацких А.В. и др. Экспериментальное обоснование эффективности различных методов доставки рибофлавина в строму роговицы как начального этапа выполнения УФ-кроссликинга. *Офтальмохирургия*. 2014;1:24–29.
5. Борискина Л.Н., Блинкова Е.С., Солодкова Е.Г. Способ лечения кератоконуса. Патент РФ. № 2556791. Заявл. 09.06.2014. Оpubл. 20.07.2015. Бюл. 2015; 20.
6. Sinha Roy A., Dupps W.Jr. Patient-specific computational modeling of keratoconus progression and differential responses to collagen cross-linking. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2011;52:9174–9187. doi: 10.1167/iovs.11-7395.
7. Seiler T.G., Fischinger I., Koller T. et al. Customized corneal cross-linking: one-year results. *American Journal of Ophthalmology*. 2016;166:14–21. doi: 10.1016/j.ajo.2016.02.029
8. Shetty R., Pahuja N., Roshan T., Deshmukh R., Francis M., Ghosh A., PhD, Roy S. Customized corneal cross-linking using different UVA beam profiles. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(10):676–682. doi: 10.3928/1081597X-20170621-07
9. Cassagne M., Pierné K., Galiacy S.D. et al. Customized topography-guided corneal collagen cross-linking for keratoconus. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(5):290–297. doi: 10.3928/1081597X-20170201-02
10. Roberts C.J., Dupps W.Jr. Biomechanics of corneal ectasia and biomechanical treatments. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2014;40:991–998. doi: 10.1016/j.jcrs.2014.04.013.
11. Ambrosio R.Jr., Lopes B.T., Faria-Correia F. et al. Integration of Scheimpflug-based corneal tomography and biomechanical assessments for enhancing ectasia detection. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(7):434–444. doi: 10.3928/1081597X-20170426-02/
12. Joda A.A., Shervin M.M., Kook D., Elsheikh A. Development and validation of a correction equation for Corvis tonometry. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical*. 2016;19:943–953. doi: 10.1080/10255842.2015.1077515.
13. Luce D.A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2005;31(1):156–162. doi: 10.1016/j.jcrs.2004.10.044.
14. Roberts C.J., Mahmoud A.M., Bons J.P. et al. Introduction of two novel stiffness parameters at interpretation of air puff-induced biomechanical deformation response parameters with a dynamic Scheimpflug analyser. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(4):266–273. doi: 10.3928/1081597X-20161221-03.
15. Izquierdo L., Gilani F., Henriquez M. et al. Independent population validation of the Belin/Amblyo enhanced ectasia display: Implications for keratoconus studies and screening. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases*. 2014;3(1):1–8. doi: 10.5005/jp-journals-10025-1069.
16. Vinciguerra R., Elsheikh A., Roberts C.J. et al. Influence of pachymetry and intraocular pressure on dynamic corneal response parameters in healthy patients. *Journal of Refractive Surgery*. 2016;32:550–561. doi: 10.3928/1081597X-20160524-01.
17. Louise P. G. E., Marcella Q.S., Bernardo T.L., et al. A.Jr. Biomechanical diagnostics of the cornea. *Eye Vis (Lond)*. 2020;5:7–9. doi: 10.1186/s40662-020-0174-x.
18. Ambrosio R.Jr., Nogueira L.P., Caldas D.L., et al. Evaluation of corneal shape and biomechanics before LASIK. *International Ophthalmology Clinics*. 2011;51:11–38. doi: 10.1097/IIO.0b013e31820f1d2d.
19. Штейн А.А., Моисеева И.Н., Любимов Г.А. Математическая модель роговицы глаза с учетом экспоненциальной

нелинейности ее упругих свойств при условии геометрической малости деформаций. *Российский журнал биомеханики*. 2019;23(3):375–390.

20. Abyaneh M.H., Wildman R.D., Ashcroft I.A., Ruiz P.D. A hybrid approach to determining cornea mechanical properties in vivo using a combination of nano-indentation and inverse finite element analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;27:239–248. doi: 10.1016/j.jmbbm.2013.05.016.

21. Pandolfi A. Cornea modelling. *Eye and Vision*. 2020;7:2. doi: 10.1186/s40662-019-0166-x.

22. Никитин И.С., Журавлев А.Б., Ирошников Н.Г. и др. Механико-математическая модель интрастромальной коррекции формы роговицы глаза при кератоконусе. *Российский журнал биомеханики*. 2017;21:404–417. doi: 10.15593/RZhBiomeh/2017.4.07.

23. Солодкова Е.Г., Малюгин Б.Э., Фокин В.П. и др. Анализ результатов модифицированной персонализированной топографически и томографически ориентированной методики ультрафиолетового кросслинкинга роговичного коллагена. *Вестник офтальмологии*. 2023;3:5–14. doi: 10.17116/oftalma20231390315.

24. Бикбов М.М., Шевчук Н.Е., Халимов Н.Б., Зайнуллина Н.Б. Экспериментальное исследование насыщенности роговицы и влаги передней камеры фотосенсибилизаторами. *VII Российский общенациональный офтальмологический форум: сборник научных трудов научно-практической конференции с международным участием*. 2014;2:401–405.

REFERENCES

1. Feinbaum K. Modern aspects of etiopathogenesis and treatment of keratoconus. *Oftal'mokhirurgiya = Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2011;3:80-83 (In Russ.).

2. Spoerl E., Wollensak G., Seiler T. Increased Resistance of Crosslinked Cornea against Enzymatic Digestion. *Current Eye Research*. 2004;29(1):35–40. doi: 10.1080/02713680490513182.

3. Wollensak G., Spoerl E., Seiler T. Riboflavin/Ultraviolet-A Induced Collagen – Crosslinking for the Treatment of Keratoconus. *American Journal of Ophthalmology*. 2003;135:620–627. doi: 10.1016/s0002-9394(02)02220-1.

4. Malyugin B.E., Izmailova S.B., Shatskikh A.V. et al. Experimental substantiation of the effectiveness of different methods of riboflavin delivery to the corneal stroma as the initial step of UV-crosslinking. *Oftal'mokhirurgiya = Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery*. 2014;1:24–29. (In Russ.).

5. Boriskina L.N., Blinkova E.S., Solodkova E.G. Method of keratoconus treatment. Patent of the Russian Federation. № 2556791. Zavl. 09.06.2014. Published. 20.07.2015. Bul. 2015; 20. (In Russ.).

6. Sinha Roy A., Dupps W.Jr. Patient-specific computational modeling of keratoconus progression and differential responses to collagen cross-linking. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2011;52:9174–9187. doi: 10.1167/iovs.11-7395.

7. Seiler T.G., Fischinger I., Koller T. et al. Customized corneal cross-linking: one-year results. *American Journal of Ophthalmology*. 2016;166:14–21. doi: 10.1016/j.ajo.2016.02.029

8. Shetty R., Pahuja N., Roshan T., Deshmukh R., Francis M., Ghosh A., PhD, Roy S. Customized corneal cross-linking using different UVA beam profiles. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(10):676–682. doi: 10.3928/1081597X-20170621-07

9. Cassagne M., Pierné K., Galiacy S.D. et al. Customized topography-guided corneal collagen cross-linking for keratoconus. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(5):290–297. doi: 10.3928/1081597X-20170201-02

10. Roberts C.J., Dupps W.Jr. Biomechanics of corneal ectasia and biomechanical treatments. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2014;40:991–998. doi: 10.1016/j.jcrs.2014.04.013.

11. Ambrosio R.Jr., Lopes B.T., Faria-Correia F. et al. Integration of Scheimpflug-based corneal tomography and biomechanical assessments for enhancing ectasia detection. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(7):434–444. doi: 10.3928/1081597X-20170426-02/

12. Joda A.A., Shervin M.M., Kook D., Elsheikh A. Development and validation of a correction equation for Corvis tonometry. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical*. 2016;19:943–953. doi: 10.1080/10255842.2015.1077515.

13. Luce D.A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2005;31(1):156–162. doi: 10.1016/j.jcrs.2004.10.044.

14. Roberts C.J., Mahmoud A.M., Bons J.P. et al. Introduction of two novel stiffness parameters at interpretation of air puff-induced biomechanical deformation response parameters with a dynamic Scheimpflug analyser. *Journal of Refractive Surgery*. 2017;33(4):266–273. doi: 10.3928/1081597X-20161221-03.

15. Izquierdo L., Gilani F., Henriquez M. et al. Independent population validation of the Belin/Ambrosio enhanced ectasia display: Implications for keratoconus studies and screening. *International Journal of Keratoconus and Ectatic Corneal Diseases*. 2014;3(1):1–8. doi: 10.5005/jp-journals-10025-1069.

16. Vinciguerra R., Elsheikh A., Roberts C.J. et al. Influence of pachymetry and intraocular pressure on dynamic corneal response parameters in healthy patients. *Journal of Refractive Surgery*. 2016;32:550–561. doi: 10.3928/1081597X-20160524-01.

17. Louise P. G. E., Marcella Q.S., Bernardo T.L., et al. A.Jr. Biomechanical diagnostics of the cornea. *Eye Vis (Lond)*. 2020;5:7–9. doi: 10.1186/s40662-020-0174-x.

18. Ambrosio R.Jr., Nogueira L.P., Caldas D.L., et al. Evaluation of corneal shape and biomechanics before LASIK. *International Ophthalmology Clinics*. 2011;51:11–38. doi: 10.1097/IIO.0b013e31820f1d2d.

19. Stein A.A., Moiseeva I.N., Lyubimov G.A. Mathematical model of the cornea of the eye, taking into account the exponential nonlinearity of its elastic properties under the condition of geometric smallness of deformations. *Rossiiskii*

zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics. 2019;23(3):375–390. (In Russ.).

20. Abyaneh M.H., Wildman R.D., Ashcroft I.A., Ruiz P.D. A hybrid approach to determining cornea mechanical properties in vivo using a combination of nano-indentation and inverse finite element analysis. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2013;27:239–248. doi: 10.1016/j.jmbm.2013.05.016.

21. Pandolfi A. Cornea modelling. *Eye and Vision*. 2020;7:2. doi: 10.1186/s40662-019-0166-x.

22. Nikitin I.S., Zhuravlev A.B., Iroshnikov N.G. et al. Mechanical-mathematical model of intrastromal shape correction of the cornea in keratoconus. *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki = Russian Journal of Biomechanics*. 2017;21:404–417. (In Russ.) doi: 10.15593/RZhBiomeh/2017.4.07.

23. Solodkova E.G., Malyugin B.E., Fokin V.P., Balalin S.V. et al. Analysis of the results of a modified personalized topographically and tomographically oriented technique of ultraviolet corneal collagen crosslinking. *Vestnik oftal'mologii = Russian Annals of Ophthalmology*. 2023;3:5–14. (In Russ.) doi: 10.17116/oftalma20231390315.

24. Bikbov M.M., Shevchuk N.E., Halimov N.B., Zainullina N.B. Experimental study of saturation of cornea and anterior chamber moisture with photosensitizers. *VII Rossiiskii obshchenatsional'nyi oftal'mologicheskii forum: sbornik nauchnykh trudov nauchno-prakticheskoi konferentsmii s mezhdunarodnym uchastiem = VII Russian national ophthalmologic forum: collection of scientific papers of scientific and practical conference with international participation*. 2014;2:401–405. (In Russ.).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Информация об авторах

Елена Геннадиевна Солодкова – кандидат медицинских наук, исполняющий обязанности директора, Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Волгоградский филиал; доцент кафедры хирургических болезней № 2, Институт непрерывного медицинского и фармацевтического образования, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; solo23el@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7786-5665>

Светлана Борисовна Измайлова – доктор медицинских наук, заведующая отделом трансплантационной и оптико-реконструктивной хирургии переднего отрезка глазного яблока, Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Москва, Россия; fgu@mntk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3516-1774>

Игорь Николаевич Захаров – доктор технических наук, заведующий кафедрой сопротивление материалов, Волгоградский государственный политехнический университет, Волгоград, Россия; sopromat@vstu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7177-7245>

Виктор Петрович Фокин – доктор медицинских наук, профессор, главный специалист организационно-методического отдела, Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Волгоградский филиал, Волгоград, Россия; fokin@isee.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2513-9709>

Сергей Викторович Балалин – доктор медицинских наук, профессор кафедры хирургических болезней № 2, Институт непрерывного медицинского и фармацевтического образования, Волгоградский государственный медицинский университет; заведующий научным отделом, Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Волгоградский филиал, Волгоград, Россия; s.v.balalin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5250-3692>

Валерий Леонидович Загребин – кандидат медицинских наук, доцент, заведующий кафедрой гистологии, эмбриологии, цитологии, Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия; vlzagrebina@volgmed.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9559-9196>

Евгений Валерьевич Лобанов – инженер отдела по ремонту и обслуживанию медицинской техники, Микрохирургия глаза имени академика С. Н. Федорова, Волгоградский филиал, Волгоград, Россия; omt@isee.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9112-3230>

Лэ Ван Хоанг – аспирант, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия; sopromat@vstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-3061>

Статья поступила в редакцию 05.06.2024; одобрена после рецензирования 22.09.2024; принята к публикации 18.11.2024.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Information about the authors

Elena G. Solodkova – Candidate of Medical Sciences, Acting Director, Academician S. N. Fedorov Eye Microsurgery, Volgograd Branch; Associate Professor of the Department of Surgical Diseases No. 2, Institute of Continuing Medical and Pharmaceutical Education, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; solo23el@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7786-5665>

Svetlana B. Izmailova – MD, Head of the Department of Transplantation and Opto-Reconstructive Surgery of the anterior segment of the eyeball, Academician S. N. Fedorov Eye Microsurgery, Moscow, Russia; fgu@mntk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3516-1774>

Igor N. Zakharov – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Materials Resistance, Volgograd State Polytechnic University, Volgograd, Russia; sopromat@vstu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7177-7245>

Viktor P. Fokin – Doctor of Medical Sciences, Professor, Chief Specialist of the Organizational and Methodological Department, Eye Microsurgery named after Academician S. N. Fedorov, Volgograd Branch, Volgograd, Russia; fokin@isee.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2513-9709>

Sergey V. Balalin – Doctor of Medical Sciences, Professor of the Department of Surgical Diseases No. 2, Institute of Continuing Medical and Pharmaceutical Education, Volgograd State Medical University; Head of the Scientific Department, Eye Microsurgery named after Academician S. N. Fedorov, Volgograd Branch, Volgograd, Russia; s.v.balalin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5250-3692>

Valery L. Zagrebina – Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Histology, Embryology, Cytology, Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia; vlzagrebina@volgmed.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9559-9196>

Evgeny V. Lobanov – Engineer of the Department for Repair and Maintenance of Medical Equipment, Academician S. N. Fedorov Eye Microsurgery, Volgograd Branch, Volgograd, Russia; omt@isee.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9112-3230>

Le Van Hoang – Postgraduate student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia; sopromat@vstu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1536-3061>

The article was submitted 05.06.2024; approved after reviewing 22.09.2024; accepted for publication 18.11.2024.