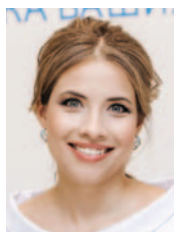


Предсказуемость рефракционного эффекта при выполнении лазерной коррекции зрения. Определяющие факторы. Обзор литературы

Э.Н. Эскина^{1,2}А.В. Белогурова²В.А. Паршина²М.Х. Мовсесян²

¹ Академия постдипломного образования ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий Федерального медико-биологического агентства»
Волоколамское шоссе, 91, Москва, 125371, Российская Федерация

² Офтальмологическая клиника «Сфера»
ул. Старокачаловская, 10, Москва, 117628, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2023;20(1):41–52

В настоящее время рефракционная хирургия с использованием современных лазерных систем для коррекции различных видов аметропии является одной из наиболее широко распространенных и выполняемых во всем мире операций. Большое значение имеет получение рефракционных результатов, сопоставимых с ожидаемыми как для пациента, так и для самого хирурга. Однако в ряде случаев может иметь место отклонение рефракционного результата от запланированного, а в отдаленном периоде после операции выявляется регресс рефракционного эффекта, что в конечном счете может привести к неудовлетворенности пациента. Для того чтобы избежать подобных ситуаций, необходимо четкое понимание факторов риска, которые могут привести к данным явлениям, и соответственно их учет при планировании оперативного вмешательства. В настоящее время факторы риска регресса и факторы, которые могут повлиять на отклонение рефракционного результата, разделяются на 2 группы и активно изучаются как отечественными, так и зарубежными исследователями. Учитывая актуальность проблемы точного планирования и достижения стабильных рефракционных результатов, в последнее время активно разрабатываются и внедряются различные номограммы. Цель номограмм — компенсировать влияние различных факторов с помощью введения корректировок, которые могут быть применены на этапе планирования операции. Номограммы считаются надежными и эффективными инструментами повышения предсказуемости рефракционной хирургии, но большей частью являются результатом работы рефракционного хирурга. Цель обзора — анализ данных мировой литературы для выяснения факторов риска регресса и факторов, влияющих на отклонение рефракционного результата от запланированного, а также анализ уже имеющихся номограмм, разработанных для улучшения планирования и прогнозирования результатов лазерных рефракционных операций.

Ключевые слова: номограммы, регресс рефракционного эффекта, лазерная коррекция, прогнозирование результатов, предсказуемость результатов, биомеханика роговицы

Для цитирования: Эскина Э.Н., Белогурова А.В., Паршина В.А., Мовсесян М.Х. Предсказуемость рефракционного эффекта при выполнении лазерной коррекции зрения. Определяющие факторы. Обзор литературы. *Офтальмология*. 2023;20(1):41–52. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2023-1-41-52>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах

Конфликт интересов отсутствует

Predictability of the Refractive Effect after Laser Correction. Determining Factors. Review

E.N. Eskina^{1,2}, A.V. Belogurova², V.A. Parshina², M.Kh. Movsesian²

¹ Academy of Postgraduate Education of Federal Medical-Biological Agency
Volokolamskoye highway, 91, Moscow, 125371, Russian Federation

² Ophthalmological Clinic “Sphere”
Starokachalovskaya str., 10, Moscow, 117628, Russian Federation

**E.N. Eskina, A.V. Belogurova, V.A. Parshina, M.Kh. Movsesian**Contact information: Movsesian Marina Kh. marina.movsesyan@sfe.ru**Predictability of the Refractive Effect after Laser Correction. Determining Factors. Review**

ABSTRACT**Ophthalmology in Russia. 2023;20(1):41–52**

Currently, refractive surgery using modern laser systems for the correction of various types of ametropia is one of the most widespread and performed operations worldwide. It is important to obtain refractive results comparable to those expected, both for the patient and for the surgeon himself. However, in some cases, there may be a deviation of the refractive result from the planned one, and in the late period after the operation, a regression of the refractive effect is detected, which, ultimately, may cause patient dissatisfaction. In order to avoid these situations, it is necessary to have a clear understanding of the risk factors that can lead to these phenomena, and, accordingly, take them into account during planning a surgical intervention.

Currently, risk factors for regression and factors that can affect the deviation of the refractive result are divided into 2 groups and are actively studied by both Russian and foreign researchers.

Given the relevance of the problem of accurate planning and achieving stable refractive results, various nomograms have been actively developed and implemented recently. The purpose of nomograms is to compensate the influence of various factors by introducing adjustments that can be applied at the planning of the operation. Nomograms are considered reliable and effective tools to increase the predictability of refractive surgery, but, for the most part, are the result of the work of a refractive surgeon. The purpose of this review is to analyze the world literature to determine the risk factors for regression and factors affecting the deviation of the refractive result from the planned one, as well as to analyze the existing nomograms designed to improve the planning and prediction of the results of laser refractive surgery.

Keywords: nomograms, myopic regression, laser correction, prediction of results, predictability of results, corneal biomechanics

For citation: Eskina E.N., Belogurova A.V., Parshina V.A., Movsesian M.H. Predictability of the Refractive Effect after Laser Correction. Determining Factors. Review. *Ophthalmology in Russia*. 2023;20(1):41–52. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2023-1-41-52>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned

There is no conflict of interests

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время рефракционные операции с использованием современных лазерных систем для коррекции различных видов аметропии являются наиболее широко распространенными и выполняемыми в офтальмологии [1]. Методы лазерной рефракционной хирургии включают: фоторефракционную кератэктомию (ФРК / трансэпителиальная ФРК), лазерный кератомилез с фемтосопровождением — ФемтоЛАСИК (FemtoLASIK — Femto Laser-Assisted In Situ Keratomileusis) и операции по типу лентикулярной хирургии, подразумевающие создание роговичной лентикулы в стромальных слоях и ее удаление через микроразрез [1].

Важное значение имеет получение рефракционных результатов, сопоставимых с ожидаемыми как для пациента, так и для самого хирурга. Однако в ряде случаев может иметь место отклонение рефракционного результата от ожидаемого, а в отдаленном послеоперационном периоде может наблюдаться регресс полученного результата, что в итоге может привести к неудовлетворенности пациента. В соответствии с этим важно понимать, какие именно факторы могут обуславливать возникновение вышеуказанных ситуаций [2–4].

Регресс рефракционного результата после лазерной хирургии отражает динамическое смещение полученного рефракционного результата в сторону исходной рефракции. Причинами рефракционного регресса могут быть изменения на уровне роговицы, на уровне хрусталика или касающиеся осевой длины глаза [4–7].

В настоящее время факторы риска, приводящие к регрессу, активно изучаются как отечественными, так и зарубежными учеными. Ряд исследователей выделяют среди них степень близорукости, наличие гиперплазии эпителия, стромальных изменений роговицы, глубину проводимой абляции, корнеосклеральную ригидность,

осевое прогрессирующее близорукости. Отмечена взаимосвязь регресса рефракционного результата с диаметром планируемой оптической зоны [4, 8].

Отклонение рефракционного результата — это отсутствие достижения целевого рефракционного эффекта, которое определяется несоответствием между полученной клинической рефракцией и запланированной.

В свою очередь, рефракционный результат может зависеть от таких факторов, как состояние окружающей среды, операционной (влажность, температура, атмосферное давление), параметры настройки лазерной системы, параметры расчетов операции, опыт оперирующего хирурга (скорость выполнения определенных этапов операции), расовая принадлежность пациента, степень аметропии, биомеханические свойства роговицы и т. д. [2–10]. Чтобы компенсировать вышеуказанные различия и отклонения, а также получить ожидаемый результат, важно правильно прогнозировать, планировать и выполнить операцию. С этой целью активно разрабатываются и внедряются различные номограммы [1–3]. Цель номограммы — компенсировать влияние вышеуказанных факторов с помощью введения корректировок, которые могут быть применены на этапе планирования операции для получения оптимального ожидаемого и стабильного результата. Номограммы считаются надежными и эффективными инструментами повышения предсказуемости рефракционной хирургии. Их разработка происходит после точного анализа предоперационных и послеоперационных данных о пациентах на основе нескольких факторов, способствующих изменчивости [1–3].

Цель настоящего обзора — провести анализ литературы для выяснения факторов риска регресса и отклонения рефракционного результата от запланированного, а также поиск и анализ номограмм, разработанных

для правильного планирования и прогнозирования результатов операции. Ниже рассмотрены более детально факторы риска и номограммы для различных методов лазерной коррекции зрения.

ЛЕНТИКУЛЯРНАЯ РЕФРАКЦИОННАЯ ХИРУРГИЯ

В данном разделе приведены результаты анализа литературы по факторам, влияющим на послеоперационный рефракционный результат и рефракционный регресс после проведения лазерной коррекции миопии с помощью лентиккулярной хирургии, а именно касающихся возраста, степени аметропии, толщины лентикулы и КЭПа, биомеханических особенностей роговицы и т.д.

А. Возраст и пол

Значимого влияния возраста пациента на рефракционный результат не выявлено. Однако, согласно исследованию W. Sekundo, K.S. Kunert [8], каждому десятилетии увеличения возраста соответствует примерно 0,10 дптр недокоррекции. Интересно, что в случае с эксимерлазерной коррекцией, наоборот, может наблюдаться гиперкоррекция с увеличением возраста [9]. В исследовании J.Ø. Hjortdal, A.H. Vestergaard и соавт. возраст пациента был наиболее важным предиктором недостаточной коррекции — на 0,012 дптр на каждый год прибавки возраста. Женский пол был достоверным прогностическим фактором для недостаточной коррекции на 0,085 дптр [3, 9] (табл. 1).

Б. Степень аметропии

При оценке степени прогнозируемости результатов после лентиккулярных методов лазерной коррекции одним из первых возникает вопрос о влиянии степени корригируемой миопии и астигматизма на рефракционный результат. Результаты многих исследований доказывают, что зависимость от степени миопии или одновременно наличия астигматизма при этом подходе практически отсутствует. J.Ø. Hjortdal, A.H. Vestergaard и соавт. было рассчитано, что среднее несоответствие между достигнутым и планируемым результатом недокоррекции сферического эквивалента (СЭ) составляет 0,25 дптр, что предлагается учитывать при расчетах параметров операции и прибавлять к планируемому объему [11, 12]. Известно, что средняя преломляющая сила роговицы индивидуальна для каждого глаза и имеет диапазон 37,0–48,0 дптр, чаще всего составляя 42,0–43,0 дптр. От центра к периферии роговица уплощается неравномерно в разных меридианах. У пациентов с более крутой роговицей также

выявляется небольшая недостаточная коррекция, соответствующая примерно 0,04 дптр на диоптрию возрастающей кривизны [12]. Хотя влияние кривизны роговицы невелико, но авторы рекомендуют также учитывать его при планировании операции и корректировать объем операции на 0,25 дптр при очень крутой (увеличение) или очень плоской (уменьшение) роговице [12]. В исследовании Gang Liang и соавт. показано влияние предоперационного сферозэквивалента на предсказуемость рефракционного результата. Ими было предложено использовать уравнение линейной регрессии как номограмму для оценки прогнозирования рефракционного эффекта:

Целевая коррекция СЭ с учетом номограммы = Целевая коррекция СЭ — $(0,259 + 0,113 \times \text{СЭ предоперационный})$.

Эффективность данной номограммы была показана в исследовании, сравнивающем рефракционные результаты у двух групп. В первой группе при планировании не учитывалась предложенная номограмма, а во второй — учитывалась. В группе 2 предсказуемость рефракционной ошибки составила 86,21 % в пределах 0,50 дптр и 97,83 % в пределах 1,00 дптр по сравнению с показателями первой группы — 70,25 и 95,90 % соответственно. Использование данной номограммы позволило значительно уменьшить вариабельность послеоперационного СЭ. Тем не менее эффективность и безопасность проведенного вмешательства существенно не различались в двух группах через 3 месяца после операции [3].

Таким образом, пациенты старше 40 лет находятся в группе риска и требуют предельного внимания при планировании операции. Вопрос влияния степени аметропии достаточно спорный, многие расходятся во мнениях, но все же большинство исследований показывает, что чем выше степень аметропии, тем меньше точность прогнозирования послеоперационных результатов, при этом разрабатываются и внедряются различные номограммы.

В. Влияние показателей параметров операции (КЭП, толщина лентикулы)

Актуален вопрос создания и применения различных номограмм в зависимости от толщины КЭПа с целью повышения предсказуемости и получения отличных рефракционных результатов [13]. I. Jun, D. Kang и соавт. изучали влияние толщины КЭПа на предсказуемость рефракционных результатов. Проведено сравнение клинических результатов и биомеханических изменений роговицы у двух групп пациентов с толщиной КЭПа 120

Таблица 1. Влияние возраста на рефракционный результат при лентиккулярной хирургии

Table 1. Effect of age on refractive result in lenticular surgery

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Отсутствие взаимосвязи с возрастом / No relationship with age	Увеличение риска недокоррекции у пациентов старше 40 лет / Increased risk of undercorrection in patients older 40 years
G. Liang и соавт. [3]	2017	195		+
J.Ø. Hjortdal, A.H. Vestergaard и соавт. [12]	2012	670		+
Kim и соавт. [13]	2014	447	-	

и 140 мкм. Согласно результатам, средняя острота зрения без коррекции вдаль, индексы безопасности и эффективности, а также рефракционная предсказуемость были сопоставимы в обеих группах [14]. Авторами были созданы различные номограммы, в которых учитывалась толщина КЭПа, с использованием уравнения регрессии. Величина поправки по сферическому эквиваленту была следующей:

$$(D) = -0,588 + (1,019 \times \text{дооперационная сфера}) + (0,003 \times \text{возраст}) \text{ — для КЭПа толщиной 120 мкм,}$$

$$(D) = -0,986 + (1,015 \times \text{дооперационная сфера}) \text{ — для КЭПа толщиной 140 мкм.}$$

Толщина лентикулы, необходимая для достижения такой же степени рефракционной коррекции, была больше в группе с более толстым КЭПом, даже несмотря на то что их соответствующие предоперационные показатели СЭ были сопоставимы. Тем не менее послеоперационный СЭ также был сопоставим между двумя группами:

в группе с толщиной КЭПа 120 мкм СЭ = $0,01 \pm 0,15$ (от $-0,25$ до $0,25$),

в группе с толщиной КЭПа 140 мкм СЭ = $0,05 \pm 0,18$ (от $-0,38$ до $0,38$) [14].

Послеоперационные значения аберраций высшего порядка (АВП) были меньше в группе с толщиной КЭПа 120 мкм, в которой общее среднеквадратичное значение (RMS/a) аберраций высшего порядка и сферических аберраций роговицы составило $0,48 \pm 0,31$ и $0,26 \pm 0,10$, тогда как в группе с толщиной КЭПа 140 мкм — $0,53 \pm 0,16$ и $0,34 \pm 0,13$ соответственно. Данные результаты показывают выраженную клинически значимую разницу между двумя группами, что, по мнению авторов, может быть связано с тонким КЭПом, меньшей толщиной лентикулы и большей остаточной толщиной роговицы. Большая толщина лентикулы в случае с увеличенным КЭПом может быть связана с повышенной индукцией аберраций высшего порядка роговицы и большим изменением биомеханики роговицы, связанным с более тонким остаточным стромальным ложем [13].

Ранее аналогичное исследование по изучению влияния толщины КЭПа при коррекции аномалий рефракции провели Guell и соавт. Оценка результатов проводилась у пациентов с толщиной КЭПа 130, 140, 150 и 160 мкм. Была использована номограмма с учетом толщины КЭПа для компенсации любых возможных потерь энергии. Авторы увеличивали коррекцию СЭ на 3 % на каждые 10 мкм увеличения толщины КЭПа в 130 мкм и примерно на 10 % применительно к КЭПу 160 мкм. Никаких существенных различий не наблюдалось среди групп. Послеоперационный СЭ составил $-0,10 \pm 0,60$, $-0,15 \pm 0,27$, $-0,12 \pm 0,23$, и $-0,17 \pm 0,25$ для КЭПа 130, 140, 150 и 160 мкм соответственно [15].

Ex vivo исследование I.B. Damgaard, A. Ivarsen и соавт. показало, что недокоррекция у пациентов с миопией средней степени в первой группе, в которой КЭП был

запланирован толщиной 110 мкм, составила 3,5 % и в группе с толщиной КЭПа 160 мкм — 11 %. У пациентов с миопией высокой степени показатели были выше. Поскольку эпителий роговицы был удален до проведения операции, то лентикула была создана в гораздо более глубокой части стромы роговицы по сравнению с запланированной глубиной, что тоже могло послужить причиной недокоррекции [15, 16].

Влияние КЭПа на рефракционный результат также было изучено в работе Э.Н. Эскиной и соавт. Исследователи выявили, что толщина КЭПа у пациентов с тонкой роговицей может оказывать влияние на изменение кривизны задней поверхности роговицы. По данным авторов, небольшая толщина роговицы (477–500 мкм) не влияла на эффективность проведенной операции. Согласно результатам регрессионного анализа у пациентов с тонкой роговицей увеличение объема удаляемой ткани приводит к нелинейному увеличению радиуса кривизны задней поверхности роговицы (Radius flat (Rf) back и Radius steep (Rs) back). Увеличение толщины КЭПа у пациентов с тонкой роговицей изменяет (Rs) back и, возможно, увеличивает заднюю элевацию роговицы. В то же время меньшая толщина КЭПа приводит к лучшим послеоперационным значениям МКОЗ [17].

I. Jun и соавт. обнаружили, что при толщине КЭПа 140 мкм возникает больше изменений биомеханических показателей роговицы, чем при толщине 120 мкм, однако без существенной разницы в эффективности или предсказуемости результатов. Однако более высокая толщина КЭПа может усилить аберрации высокого порядка и повлиять на удовлетворенность пациента качеством зрения, о чем также было указано выше [14] (табл. 2).

Таким образом, большинство исследователей сходятся во мнении, что при толщине КЭПа более 120 мкм имеется риск недокоррекции, а также увеличения аберраций высшего порядка, что влечет за собой снижение качества зрения. Поэтому авторы рекомендуют увеличивать толщину КЭПа только в случаях особой необходимости.

Г. Толщина лентикулы и биомеханические изменения

Как известно, коррекция близорукости при лентикулярных методах осуществляется путем формирования и экстракции интрастромальной лентикулы. Следовательно, ее толщина, точность ее формирования, а также изменения в ответ на удаление являются одними из ключевых факторов для достижения точности процедуры. Исследования показали, что существуют различия между значениями толщины прогнозируемой и реально полученной лентикулы [18, 19]. Так, Reinstein и соавт. [18] обнаружили, что толщина лентикулы, предварительно запланированная на лазерной системе VISUMAX (Carl Zeiss), была на 8 мкм больше, чем толщина полученной лентикулы, измеренная в послеоперационном периоде с помощью ультразвукового метода через 3 месяца после операции. Погрешности измерений были исключены. Luft и соавт. [19] также обнаружили, что прогнозируемая

Таблица 2. Сводный анализ данных, касающихся влияния толщины КЭПа**Table 2.** Summary analysis of the cap thickness data

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Изученный фактор Studying factor						Вывод / Conclusion
			КЭП / CAP110	КЭП / CAP 120	КЭП / CAP 130	КЭП / CAP 140	КЭП / CAP 150	КЭП / CAP 160	
I. Jun и соавт. [13]	2021	150		+		+			КЭП 140 мкм больше приводит к изменению биомеханических показателей и увеличивает число аберраций высшего порядка, чем 120 мкм A CAP of 140 μ m leads to a change in biomechanical parameters more and increases the number of higher-order aberrations (HOAs) than 120 μ m
J.L. Guell и соавт. [15]	2015	47			+	+	+	+	На каждые 10 мкм увеличения толщины КЭПа от 130 мкм требуется увеличение СЭ объема операции на 3 % с целью избежать недокоррекции For every 10 μ m increase in the thickness of the CAP from 130 μ m, is required to increase the SE of the operation volume by 3 % in order to avoid undercorrection
I.B. Damgaard, Ivarsen и соавт. [16]	2018	32	+					+	Толщина КЭПа 160 мкм сопровождалась большей вероятностью недокоррекции, особенно у пациентов с высокой степенью миопии. Однако толщина КЭПа 110 мкм приводила к меньшим биомеханическим изменениям, но разница статистически недостоверна The cap thickness of 160 μ m was accompanied by a greater probability of undercorrection, especially in patients with a high myopia. However, the CAP thickness of 110 μ m led to smaller biomechanical changes, but the difference is not statistically significant
Э.Н. Эскина и соавт. [17]	2022			+		+			У пациентов с тонкой роговицей увеличение толщины КЭПа приводит к большим изменениям задней поверхности роговицы и рискам кератоктазии In patients with thin corneas, an increase in the thickness of the cap leads to large changes in the posterior surface of the cornea and risks of keratoectasia

толщина лентикулы больше, чем достигнутая, особенно при коррекции более высоких степеней миопии. Однако срок наблюдения в данном исследовании был больше и составил один год [20]. В обоих исследованиях авторы пришли к выводу, что причиной разницы в толщине лентикулы могут быть биомеханические изменения, происходящие в строме в ответ на лазерное воздействие. Одним из возможных механизмов является то, что коллагеновые пластинки, расслоенные лазером между остаточным стромальным слоем и КЭПом, могут скручиваться, сокращаться и тем самым вызывать расширение пространства [18, 19]. При сравнении рефракционного результата наблюдалась в среднем недокоррекция примерно в $-0,78$ дптр, что может объясняться именно разницей в достигнутой толщине лентикулы, особенно потому, что $-0,78$ дптр примерно соответствуют разнице в глубине запланированной и полученной лентикулы, которая составляет 9 мкм. Однако для точного объяснения необходимы дальнейшие, более расширенные исследования [18].

Одним из исследований, также оценивших влияние разности между прогнозируемой и полученной толщиной лентикулы на точность рефракционного результата, является работа Fang Wu и соавт. [20]. Согласно результатам этого исследования, планируемая толщина лентикулы была больше достигнутой на 16 мкм, что могло послужить причиной недокоррекции. Кроме того, было показано, что увеличение сферической рефракционной коррекции по номограмме на 10 % является целесообразным, чтобы компенсировать потерю послеоперационной стромальной редукции, которая также была близка к 10 %. Рекомендовано при скрининге пациентов на возможность проведения лазерной лентикулярной хирургии вычитать 10 % из прогнозируемой толщины лентикулы, чтобы точнее рассчитать остаточную

толщину стромы роговицы, тем самым избежать отказа пациентам в проведении операции ввиду недостаточной остаточной толщины роговицы [20, 21].

Другое исследование продемонстрировало, что больший объем операции и толщина лентикулы, соответственно, значительно коррелировали с более выраженными сдвигами рефракционного эффекта в сторону недокоррекции миопии, о чем сообщается во многих исследованиях [21–23]. В предыдущей работе N. Romito, L. Trinh и соавт. более крутая средняя кривизна роговицы была связана с недокоррекцией миопии на 0,25 дптр [22]. Как сообщают Ganesh и соавт. [24], большее пространство между КЭПом и остаточным стромальным ложем (интерфейс), образующееся после удаления лентикулы, способствует сдвигу задней части роговицы, что повышает вероятность регресса. Более того, воздействие лазера в более глубоких стромальных слоях роговицы также может способствовать изменению биомеханики роговицы и приводит к регрессу рефракционного эффекта. Известно также, что высокая степень корректируемой аметропии, увеличенная оптическая зона обычно приводят к гиперплазии и ремоделированию эпителия, что, в свою очередь, обуславливает регресс [25–27] (табл. 3).

Влияние эпителия на рефракционный регресс будет рассмотрено чуть ниже в разделах FemtoLASIK и трансФРК.

Таким образом, была показана важность совпадения планируемой и получаемой толщины лентикулы и точность ее формирования. Исследователи считают, что глубина залегания лентикулы влияет на точность ее формирования, что подтверждает рекомендации не планировать толщину КЭП более 120 мкм. Увеличенная толщина лентикулы способствует биомеханическим

Таблица 3. Сводный анализ данных по влиянию толщины лентикулы на различные факторы**Table 3.** Summary analysis of data on the effect of lenticule thickness on various factors

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Разница планируемой/достигнутой толщины лентикулы / Difference in planned /achieved lenticular thickness	Влияние толщины лентикулы на: Influence of lenticular thickness on:		
				Недокоррекцию рефракционного результата / Undercorrection of the refractive result	Биомеханические изменения / Biomechanical changes	Примечание / Notes
Reinstein и соавт. [18]	2014	70	+ планируемая больше достигнутой planned was more than achieved	+	+	
Luft и соавт. [19]	2017	42	+, особенно при миопии высокой степени (планируемая меньше достигнутой) Especially in high myopia (planned was less than achieved)	-	+	Несмотря на выявленную разницу в толщине лентикулы, влияния на рефракционный результат выявлено не было Despite the revealed difference in the thickness of the lenticule, no effect on the refractive result was detected
Fang Wu и соавт. [20]	2020	184	+ планируемая больше достигнутой Planned was more than achieved	+	+	
D. Wang и соавт. [21]	2018	190	+ планируемая больше достигнутой, особенно у миопии высокой степени Planned was more than achieved, Especially in high myopia	-		
N. Romito и соавт. [22]	2020	60	+ планируемая больше достигнутой Planned was more than achieved	+	-	Рекомендовано при планировании закладывать гиперкоррекцию на 10 % Recommended to plan hypercorrection by 10 %

изменениям, приводящим к миопическому регрессу. Поэтому многими авторами активно предлагаются номограммы с поправками для предупреждения миопического сдвига в дальнейшем. Так, для упрощения процесса планировании операции Э.Н. Эскиной, К. Давтян была разработана номограмма по алгоритму выбора параметров операции, позволяющему учитывать необходимые факторы, обеспечивающие безопасность операции и достижение стабильного рефракционного результата [28].

TRANS PRK

Фоторефракционная кератэктомия (ФРК) — методика коррекции зрения с помощью эксимерного лазера. При трасэпителиальной ФРК (трансФРК) эпителий удаляют не вручную, а с помощью лазера при абляции. Несмотря на то что уже проведено множество исследований, направленных на улучшение работы эксимерного лазера и достижение точных результатов, вопросы предупреждения факторов, влияющих на точность планирования операции, по-прежнему остаются актуальными [29–32]. Механизм процесса прогрессирования миопии после эксимерлазерной коррекции достаточно сложен и включает в себя структурные и биомеханические изменения не только роговицы, но и склеры. С целью увеличения точности прогнозирования результатов и вероятности рефракционного регресса исследуются такие факторы, как степень близорукости и астигматизма, размер оптической зоны (меньше 6,0 мм), глубина абляции, нестабильная фиксация взгляда во время абляции, использование цитостатиков и т. д. [29–31].

А. Возраст

Если говорить о влиянии пола и расовой принадлежности на регресс рефракционного результата,

то такая взаимосвязь не найдена. Влияние возраста на прогнозирование и стабильность рефракционного результата остается дискуссионным [29–33]. Некоторые исследователи, среди них R. Hanna, M. Mimouni и соавт., считают, что возраст старше 40 лет является фактором риска миопического регресса, так как в сравнительном ретроспективном анализе случаи регресса чаще встречались у этой возрастной категории. В то же время при поиске причин не стоит забывать о возможности развития или наличия ядерной миопизирующей катаракты в отдаленные сроки после операции [31–33] (табл. 4).

Б. Степень близорукости и астигматизма

Многие исследования, среди них выполненные Rokro и др., доказывают, что существует взаимосвязь между степенью близорукости и возможностью послеоперационного регресса¹. А именно, степень предоперационной аметропии пропорциональна вероятности регресса [31]. Некоторые исследователи не отмечают взаимосвязь между миопическим регрессом и предоперационным значением астигматизма¹ [33]. Однако это контрастирует с данными J.B. Randleman и соавт., которыми было показано, что астигматизм выше 1,00 дптр является фактором риска повторной лазерной коррекции вследствие регресса рефракционного эффекта [34].

Как и с лентикулярными методами лазерной коррекции, при проведении трансФРК у пациентов возрастной группы старше 40 лет увеличивается риск развития миопического регресса. Высокая степень аметропии, а также наличие у пациента астигматизма более 1,0 дптр увеличивает вероятность миопического сдвига.

¹ Эскина Э.Н., Оценка и прогнозирование результатов фоторефракционной кератэктомии: автореф. дисс. ... д-ра мед. наук: 14.00.08. М., 2002. 45 с.

Таблица 4. Общий анализ данных по влиянию возраста и степени аметропии на прогнозирование и регресс рефракционного результата**Table 4.** General analysis of data on the influence of age and degree of ametropia on the prediction and regression of the refractive result

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Возраст > 40 лет / Age > 40 years	Степень близорукости / Level of myopia	Астигматизм / Astigmatism
M. Naderi, S. Sabour и соавт. [29]	2018	293	-		
Pokroy и соавт. [31]	2017	9699	+	+	+ >3,5 дптр / D
R. Hanna, M. Mimouni и соавт. [32]	2020	51	+		
S.F. Mohammadi, P. Nabovati и соавт. [33]	2015	158	-	+ >5,0 дптр / D	-
J.B. Randleman и соавт. [35]	2009	785	-	-	+ >1,0 дптр / D
S.A. Lim и соавт. [6]	2016	62		+	
Э.Н. Эскина	2002	1453		+	+

Таблица 5. Сводный анализ данных по изучению влияния остроты зрения на вероятность регресса**Table 5.** Summary analysis of data on the study of the impact of visual acuity on the likelihood of regression

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Оптическая зона (O3/OZ) < 6,0 мм / mm	Оптическая зона (O3/OZ) > 6,5 мм / mm	Оптическая зона (O3/OZ) > 7,0 мм / mm	Фиксация взора / Vision fixation
Pokroy и соавт. [31]	2017	9699	Размер оптической зоны не влияет OZ does not affect	-	-	
M. Naderi, S. Sabour и соавт. [29]	2018	293	-			-
S.F. Mohammadi, P. Nabovati и соавт. [33]	2015	158	+			+ в т.ч. увеличение АВП Including HOAs increase
Seo и соавт. [37].	2004	38	+ в т.ч. увеличение АВП Including HOAs increase			
Dae Hwan Shin, Yong Woo Lee и соавт. [38]	2020	95	+ в т.ч. увеличение АВП Including HOAs increase			

Примечание: + влияет, – не влияет.

Note: + influences, – does not influence.

В. Влияние параметров операции (оптическая зона)

В исследовании M. Naderi, S. Sabour и соавт. [29] не было обнаружено связи между размером оптической зоны и рефракционным регрессом, что противоречит мнению S.F. Mohammadi, P. Nabovati и соавт. [33], которые в ретроспективном анализе факторов риска миопического регресса отметили, что пациенты с миопией средней степени с оптической зоной менее 6,0 мм имеют большую вероятность регресса. Однако существует необходимость ограничения диаметра оптической зоны, поскольку увеличенная зона требует большей глубины абляции, что, в свою очередь, повышает вероятность неблагоприятного воздействия на заживление послеоперационного ложа и повышает риск развития субэпителиальной фиброплазии. В то же время чем больше глубина абляции, тем меньше остаточная толщина стромы роговицы [33–36]. Увеличение оптической зоны также является фактором риска возникновения гиперплазии эпителия и, следовательно, миопического регресса, о чем будет указано ниже [35, 38]. Seo и соавт. сравнили коэффициенты АВП после ФРК у двух групп пациентов с оптической зоной 6,0 и 6,5 мм. В этом исследовании показатель RMS АВП в группе с большей зоной (6,5 мм) был меньше, чем в группе с оптической зоной 6,0 мм [37]. Аналогичное исследование, но с более длительным

периодом наблюдения в 12 месяцев, проведенное Dae Hwan Shin, Yong Woo Lee, подтвердило данное наблюдение. При измерении в одинаковых условиях в сроки 3, 6, 12 месяцев значение АВП было меньше в группе с оптической зоной 6,5 мм [38] (табл. 5).

Исследования показывают, что большинство авторов рекомендуют планировать оптическую зону не менее 6,0 мм, так как это позволяет избежать увеличения aberrаций высшего порядка, субэпителиальную фиброплазию, гиперплазию эпителия, биомеханические изменения и кератоктазию роговицы.

Г. Влияние биомеханических факторов и гиперплазии эпителия

Уменьшение остаточной толщины роговицы связано со снижением биомеханической стабильности роговицы [14, 35, 36], что с большей вероятностью может привести к послеоперационным побочным эффектам, таким как кератоктазия, и повлиять на рефракционный результат. В соответствии с этим, как было указано выше, при выборе размера оптической зоны для ФРК следует ориентироваться на ее ограничение и основывать на анализе биомеханической стабильности и других индивидуальных факторов, таких как аномалия рефракции, размер зрачка и возраст [14]. Роль гиперплазии эпителия в возникновении миопического регресса была обнаружена

ранее еще в 1990-х годах Gauthier и соавт. Был сделан вывод, что изменение толщины как субэпителиального, так и эпителиального слоя связано с регрессом, при изменении толщины на 18 мкм отмечена 1 дптр регресса при оптической зоне 5,0 мм [35]. В другом исследовании Gauthier и соавт. обнаружили, что при планировании оптической зоны 6,0 мм и более гиперплазия эпителия после ФРК была менее выражена [36]. C.P. Lohmann и J.L. Guel тоже сообщили о возможной гиперплазии эпителия как причине рефракционного регресса. Согласно этому исследованию была отмечена взаимосвязь между гиперплазией эпителия и миопическим регрессом. Вычислено, что увеличение эпителиального слоя роговицы на 10 мкм вызывает изменение рефракции на 1 дптр. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что чем меньше оптическая зона, тем больше вероятность миопического регресса [5, 35–38] (табл. 6).

Исследования не выявили связи между неустойчивой фиксацией пациентом взора во время абляции и недокоррекцией, что, однако, противоречит выводам Mohammadi и др. [34], которые отметили значительную связь между вероятностью докоррекции и стабильностью фиксации взора во время лазерной абляции. При сравнении количества индуцированных аберраций высшего порядка выявлено, что глаза с неустойчивой фиксацией взора во время лазерной абляции, контролируемой системой EyeTracking, показали на 75 % больше аберраций высшего порядка (АВП). В исследованиях на животных было показано, что наличие высоких значений индуцированных АВП сопровождается недокоррекцией [33]. Таким образом, при планировании операции следует учитывать максимально допустимую резидуальную толщину роговицы для снижения риска биомеханических изменений и, как следствие, кератэктазии. Это касается любых методов лазерной коррекции. Во время операции важен контроль за фиксацией взора и помощь пациенту, чтобы избежать риска недокоррекции.

FEMTOLASIK

Точный механизм, обуславливающий регресс рефракционного результата после FemtoLASIK, также активно изучается. Многие исследователи, в том числе W. Artini, S. Riyanto, A.S. Chayet, Chen, предполагают, что регресс рефракционного результата связан с такими факторами, как возраст, степень миопии, толщина FLAP (клапана), показатели кератометрии и предоперационный астигматизм, толщина эпителия роговицы [7, 29, 39, 41].

А. Степень аметропии

S.A. Lim и соавт. отметили, что регресс рефракционного результата обусловлен, прежде всего, степенью исходной близорукости и объемом эксимерлазерной абляции [4–6]. Известно, что при высокой степени миопии необходима большая глубина абляции, но необходимо сохранить достаточную остаточную толщину стромы, чтобы избежать риска эктазии роговицы, что следует также учитывать при прогнозировании эффекта [31]. Пациенты с увеличенной глубиной абляции имеют более высокий риск развития осложнений, таких как субэпителиальная фиброплазия роговицы, что потенциально увеличивает риск повторного лечения [40, 41].

Выявлено, что степень астигматизма, выраженная в диоптриях, является важным прогностическим фактором. Это подтверждает исследование Фелтема и соавт., которые обнаружили, что погрешность преломления $\leq -5,00$ дптр в сфере имеет более низкий риск регресса по сравнению с предоперационными значениями астигматизма $\geq -5,00$ дптр. Этот вывод также был поддержан рядом других исследований [42–44]. Y. Shapira, I. Vainer было обнаружено, что анизометропия у пациентов с миопической рефракцией и у кандидатов на операцию может значительно влиять на предсказуемость и точность коррекции. В частности, для глаз с большей степенью миопии характерна более низкая предсказуемость результатов по сравнению с контрольными контрлатеральными глазами. Кроме того, более близорукие глаза имели большую склонность к гиперкоррекции и демонстрировали более высокую вариабельность рефракционных результатов у пациентов с анизометропией по сравнению как с контрлатеральным глазом с меньшей миопией, так и с изометропическим контролем. Низкая точность коррекции более близорукого глаза у анизометропических пациентов фактически соответствовала несколько сниженной эффективности относительно остроты зрения. Авторы отмечают, что регрессионный анализ, учитывающий исходные различия, включая, в частности, величину предоперационной миопии, подтвердил независимое влияние анизометропии на предсказуемость результатов коррекции рефракции. Поэтому авторы считают, что данные результаты не следует приписывать к номограммам, используемым для коррекции высокой степени миопии [45].

Что касается прогнозируемости рефракционного результата, M.G. Tatar, F. Aylin Kantarci в своем исследовании отметили, что у пациентов с изначально

Таблица 6. Факторы риска гиперплазии эпителия. Анализ данных

Table 6. Risk factors of epithelial hyperplasia. Summary analysis of the data

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Гиперплазия эпителия / Epithelial hyperplasia	Примечание / Notes
C.P. Lohmann и J.L. Guel [5]	1998	18	+	
Gauthier и соавт. [35]	1995	100	+	При ОЗ < 5,0 мм / OZ < 5.0
Gauthier и соавт. [36]	1996	70	+	При ОЗ 6,0 мм и более / OZ < 6.0 and more
Эскина Э.Н., дисс.	2002		+	

более высокими показателями кератометрии (больше 46,0 дптр) частота повторного лечения была значительно выше ($P = 0,02$). Исследования показали, что более крутая роговица является значительным фактором риска развития эктазии роговицы после ЛАСИК. Кроме того, наличие крутой роговицы с большей вероятностью приводит к интраоперационным осложнениям, касающимся лоскута, что увеличивает вероятность повторного лечения в будущем [40] (табл. 7).

Таким образом, как и в случае с лентикулярной хирургией и трансФРК, пациенты с миопией высокой степени имеют больший риск недокоррекции и миопического сдвига. Кроме того, большая глубина абляции при эксимерлазерной операции увеличивает риск субэпителиальной фиброплазии, миопического регресса и кератозектазии.

Б. Ремоделирование эпителия

Одними из первых, кто изучал роль эпителия в возникновении регресса рефракционного результата, были Chayet и соавт. [41], которые отметили прогрессивное увеличение центральной толщины роговицы на глазах с рефракционным регрессом в сроки наблюдения 3 месяца. Согласно их предположению увеличение толщины роговицы играет огромную роль в развитии миопического сдвига, и в скором времени они предложили в качестве ключевого механизма, компенсирующего изменения изначального профиля роговицы, считать ремоделирование эпителия [7, 39]. Согласно теории Dierick и соавт. срабатывает внутриклеточная память эпителиальных клеток, что активирует клеточную пролиферацию. Возникающая в результате гиперплазия и ремоделирование эпителия обуславливают восстановление изначальной кривизны роговицы, что приводит к миопическому регрессу [4]. С.Р. Lohmann и J.L. Guel сообщили, что увеличение толщины эпителиального слоя роговицы на 10 мкм вызывает изменение рефракции на 1 дптр [5]. Однако есть исследования, согласно которым утолщение эпителия является универсальным явлением после ЛАСИК, но его связь с регрессом не является однозначной [4, 35].

D.Z. Reinstein и соавт. также изучали изменения эпителия у группы пациентов после ЛАСИК в сроки 1 и 3 месяца. Авторы отметили, что эпителий больше утолщается

в центре и далее в центробежном направлении, приводя к укручению профиля роговицы. Высказано предположение, что такие изменения могут частично объяснить наблюдаемый миопический сдвиг. Однако при дальнейшем наблюдении эпителий оставался стабильным на 3 и 12 мес. после операции, в то время как степень регресса увеличивалась, что показало возможность роли альтернативных факторов [47]. Напротив, A.J. Kanellopoulos и G. Asimellis обнаружили паттерн утолщения эпителия больше на периферии, чем в центре.

Таким образом, роль ремоделирования эпителия в рефракционном регрессе остается достаточно обсуждаемой темой и его точный вклад среди других биомеханических факторов роговицы, влияющих на рефракционный результат, требует дальнейшего изучения [42]. Имеются данные, позволяющие предположить, что меньшая зона абляции связана с большим регрессом после ЛАСИК при миопии [46]. При сравнении прироста толщины эпителия в 9 зонах роговицы после лентикулярной хирургии и FemtoLASIK обнаружено, что в первом случае прирост был меньше, чем при FemtoLASIK. Лентикулярные методы хирургии имели лучшую однородность, касающуюся гиперплазии эпителия роговицы, что может объяснить то, что послеоперационная сферическая аберрация при использовании лентикулярных методов была меньше, чем при FemtoLASIK [22] (табл. 8).

Таким образом, для того чтобы избежать риска возникновения гиперплазии эпителия, которая приводит впоследствии к миопическому сдвигу, следует планировать оптическую зону более 6,0 мм, особенно при большой глубине абляции, но в то же время учитывать предельно допустимый уровень остаточной толщины стромы.

В. Биомеханические изменения

M.K. Yan, J.S. Chang, а также Т.С. Кузнецова и соавт. заключили, что стабильность рефракционного результата после эксимерлазерной коррекции миопии в большей степени определяется сохранением корнеосклеральной ригидности, что зависит от исходных значений внутриглазного давления, величины переднезаднего отрезка глазного яблока и толщины роговицы в центральной оптической зоне [7, 48]. Другим механизмом, который,

Таблица 7. Сводный анализ статей, изучающих влияние степени аметропии, кератометрии и глубины абляции на рефракционный результат при FemtoLASIK

Table 7. Summary analysis of articles studying the influence of ametropia degree, keratometry and depth of ablation on the refractive result of FemtoLASIK

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Степень миопии / Myopia level	Астигматизм / Astigmatism	Кератометрия / Keratometry	Глубина абляции / Ablation depth
Л.И. Балашевич [9]	2012	44	+	+		+
W. Artini [39]	2018	316	+	+		
M.D. Tatar, F. Aylin Kantarci и соавт. [40]	2014	42	+		+	+
A.J. Kanellopoulos, G. Asimellis и соавт. [42]	2013			≥-5.00	+	
Y. Shapira, I. Vainer [45]	2016	10046	+			
Т.С. Кузнецова и соавт. [48]	2015	956	+			

Таблица 8. Роль гиперплазии эпителия в регрессе рефракционного результата**Table 8.** The role of epithelial hyperplasia in the regression of the refractive result

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Вывод / Conclusion
C.P. Lohmann, J.L. Guel и соавт. [5]	1998	18	10 мкм гиперплазии эпителия соответствуют 1 дптр регресса 10 μ m of epithelial hyperplasia correspond to 1,0 D of regression
N. Romito и соавт. [22]	2020	60	Прирост толщины эпителия у пациентов после лентикулярных методов меньше, чем после FemtoLASIK The increase in the thickness of the epithelium in patients after lenticular methods is less than after FemtoLASIK
C.A. Gauthier и соавт. [35]	1995	316	18 мкм гиперплазии эпителия соответствуют 1 дптр регресса. OZ < 6,0 мм повышает вероятность регресса 18 μ m of epithelial hyperplasia correspond to 1,0 D of regression OZ < 6.0 mm increases the likelihood of regression
Chayet и соавт. [41]	1998	62	Увеличение толщины эпителия играет огромную роль в миопическом регрессе The increase in the thickness of the epithelium plays a huge role in myopic regression
A.J. Kanellopoulos и G. Asimellis и соавт. [42]	2013	116	Происходит увеличение толщины эпителия после операции, но больше на периферии There is an increase in the thickness of the epithelium after surgery, but more on the periphery
Y. Chen и соавт. [46]	2007	615	Чем меньше OZ, тем больше риск рефракционного регресса The lower OZ, the greater the risk of refractive regression
D.Z. Reinstein и соавт. [47]	2009	37	Эпителий больше утолщается в центробежном направлении, приводя к укрупнению профиля роговицы и миопическому сдвигу. Парадоксально, но рефракционный сдвиг был больше у пациентов с миопией слабой степени, чем с высокой. The epithelium more increase in the centrifugal direction, leading to a steepening of the corneal profile and a myopic shift. Paradoxically, the refractive shift was greater in patients with low myopia than with high myopia

Таблица 9. Влияние биомеханических факторов на рефракционный результат**Table 9.** Influence of biomechanical factors on the refractive result

Авторы / Authors	Год / Year	N глаз / N of eyes	Вывод / Conclusion
A.S. Chayet и соавт. [41]	1998	47	Регресс связан с увеличением толщины роговицы Regression is associated with an increase in the thickness of the cornea
Т.С. Кузнецова и соавт. [48]	2015	956	Стабильность рефракционного результата зависит от корнеосклеральной ригидности, на которую влияют ПЗО, ВГД The stability of the refractive result depends on corneoscleral rigidity, which is affected by the axial length of eye, IOP
H. Li и соавт. [49]	2016	193	ВГД может приводить к сдвигу вперед (выпячиванию) истонченной и ослабленной роговицы IOP can cause a forward shift (protrusion) of the thinned and weakened cornea
M. Motwani и соавт. [50]	2020	266	Точность формирования клапана влияет на биомеханические изменения роговицы и точность эксимерного этапа The accuracy of CAP formation affects the biomechanical changes of the cornea and the accuracy of the excimer ablation

как предполагается, способствует регрессу, является смещение передней и задней поверхности роговицы кпереди после коррекции рефракции методом LASIK.

Н. Li, Y. Wang [49] высказали предположение, что ослабление роговицы впоследствии позволяет действию внутриглазного давления (ВГД) вызывать выпячивание роговицы. Оценка смещения передней части роговицы кпереди после LASIK очень сложна, так как передняя поверхность видоизменяется во время операции. Описаны данные, свидетельствующие о смещении задней поверхности роговицы кпереди после LASIK. Как заметили Pan и соавт., с использованием щелевого сканирования Orbscan, хотя LASIK воздействует только на переднюю поверхность роговицы, также происходят сдвиги задней поверхности роговицы, изменяющие ее профиль. Chan и соавт. провели исследование на 62 глазах, на которых выполнили femtoLASIK. Авторы обнаружили, что через 1 год по данным оптической когерентной томографии наблюдалось небольшое (<5 мкм), но статистически значимое смещение задней поверхности роговицы вперед. Предполагается, что если задняя поверхность роговицы смещается вперед, а толщина роговицы остается неизменной, то также должно происходить последующее выпячивание вперед передней поверхности

роговицы. Применяя принцип Гульстранда, который гласит, что одинаковые сдвиги передней и задней поверхности роговицы приводят к значительно большему увеличению преломляющей силы, такое выпячивание роговицы может объяснить наблюдаемый сдвиг рефракции в сторону миопии [16, 41, 49] (табл. 9).

М. Motwani [50] изучил влияние точности формирования клапана на рефракционный результат, а именно биомеханические изменения, происходящие в роговице во время создания лоскута, и их влияние на рефракционный результат. При их возникновении и при последующем проведении абляции под топографическим контролем профиль воздействия становится нерегулярным и может повлиять на точность рефракционного результата. Биомеханические изменения при создании клапана приводят к эллиптической форме абляции и, как следствие, к послеоперационному астигматизму и жалобам со стороны пациента, таким как размытость, двоение, гало-эффект. Данные изменения наблюдались в случаях, когда самая тонкая часть роговицы находилась латеральнее на пахиметрической карте, а также при толщине роговицы не менее 550 мкм в самой тонкой части. Эти биомеханические перестройки приводят к изменению кривизны роговицы по сравнению с запланированными

в лазерной системе. Такие изменения могут влиять на точность нанесения профиля абляции при эксимерлазерном этапе и, как следствие, к отрицательному влиянию на рефракционный результат [50]. Данные проанализированных источников подтверждают необходимость соблюдать максимально допустимую резидуальную толщину роговицы, так как меньшие значения, а в особенности у пациентов с низкой корнеосклеральной ригидностью, увеличивают риск возникновения впоследствии миопического рефракционного сдвига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы показывает, что вопрос планирования и достижения целевого рефракционного результата, исключения риска рефракционного регресса остается одним из актуальных и широко обсуждаемых. Данный обзор позволил выделить следующие факторы, влияющие на рефракционный результат: индивидуальные, факторы параметров операции (оптическая зона, толщина КЭПа/клапана, глубина абляции), биомеханические факторы, фактор ремоделирования и гиперплазии эпителия. Все они по отдельности или в комбинации могут играть роль в точности прогнозирования рефракционных результатов. Их многообразие зачастую осложняет специалистам прогнозирование результата,

а появление рефракционного регресса в послеоперационном периоде побуждает искать его причины.

Понимание условий, влияющих на точность рефракционного результата, и механизмов, приводящих к регрессу, позволит правильно планировать операцию и повысить точность прогнозирования.

Настоящий обзор выделил множество исследований, предлагающих к использованию различные номограммы, и показал высокую актуальность данного вопроса. Многие из них требуют дальнейших наблюдений и исследований. Именно поэтому создание автоматизированных номограмм для планирования различных методов оперативного вмешательства позволит упростить процесс расчета параметров операции, избежать отклонений в получаемых рефракционных результатах и снизить риск рефракционного регресса. Это, в свою очередь, приведет к получению стабильных и точных целевых результатов.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Эскина Э.Н. — существенный вклад в замысел и дизайн статьи, анализ и интерпретация данных, научное редактирование статьи;
Белогурова А.В. — существенный вклад в замысел и дизайн статьи, анализ и интерпретация данных;
Паршина В.А. — существенный вклад в замысел и дизайн статьи, сбор и интерпретация данных;
Мовсесян М.Х. — вклад в дизайн статьи, сбор, анализ и интерпретация данных, подготовка текста статьи.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Mrochen M., Hafezi F., Iseli H.P., Löffler J., Seiler T. Verbesserung der refraktiven Ergebnisse durch Nomogramme [Nomograms for the improvement of refractive outcomes]. *Ophthalmologie*. 2006 Apr;103(4):331–338. German. DOI: 10.1007/s00347-005-1290-7
- Arba Mosquera S., de Ortueta D., Verma S. The art of nomograms. *Eye Vis (Lond)*. 2018 Jan 25;5:2. DOI: 10.1186/s40662-018-0096-z
- Liang G., Chen X., Zha X., Zhang F. A Nomogram to Improve Predictability of Small-Incision Lenticule Extraction Surgery. *Med Sci Monit*. 2017 Oct 30;23:168–175. DOI: 10.12659/msm.904598
- Солодкова Е.Г., Фокин В.П., Балалин С.В. К вопросу о стабильности рефракционного результата после эксимерлазерной коррекции миопии. *Вестник Волгоградского государственного медицинского университета*. 2018;1(65):78–81. [Solodkova E.G., Fokin V.P., Balalin S.V. On the question of the stability of the refractive result after excimer laser correction of myopia. *Journal Volgograd State Medical University = Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2018;1(65):78–81 (In Russ.)]. DOI: 10.19163/1994-9480-2018-1(65)-78-81
- Lohmann C.P., Guell J.L. Regression After LASIK for the Treatment of Myopia: The Role of the Corneal Epithelium. *Seminars in Ophthalmology*. 1998;13(2):79–82. DOI: 10.3109/08820539809059822
- Lim S.A., Park Y., Cheong Y.J., Na K.S., Joo C.K. Factors Affecting Long-term Myopic Regression after Laser In Situ Keratomileusis and Laser-assisted Subepithelial Keratectomy for Moderate Myopia. *Korean J Ophthalmol*. 2016 Apr;30(2):92–100. DOI: 10.3341/kjo.2016.30.2.92
- Yan M.K., Chang J.S., Chan T.C. Refractive regression after laser in situ keratomileusis. *Clin Exp Ophthalmol*. 2018 Nov;46(8):934–944. DOI: 10.1111/ceo.13315
- Бурилов Б., Богущ И.В., Садрутдинов Р.Ш. Регресс эффекта после эксимерлазерных рефракционных операций. *Современные технологии в офтальмологии*. 2018;5:188–189. [Burirov B., Bogush I.V., Sadrutdinov R.Sh. Regression of the effect after excimer laser refractive surgery. *Modern technologies in ophthalmology = Sovremennye tekhnologii v oftalmologii*. 2018;5:188–189 (In Russ.)]. DOI: 10.25276/2312-4911-2018-5-188-189
- Балашевич Л.И., Никулин С.А., Качанов А.Б., Ефимов О.А., Чураков Т.К., Завьялов А.И. К вопросу о регрессе рефракционного результата в отдаленном периоде после операции lasik. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2012;12(148):12–14. [Balashevich L.I., Nikulin S.A., Kachanov A.B., Efimov O.A., Churakov T.K., Zavyalov A.I. On the issue of regression of the refractive result in the long-term period after lasik surgery. *Annals of Orenburg State University = Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2012;12(148):12–14 (In Russ.)].
- Sekundo W., Kunert K.S., Blum M.: Small incision corneal refractive surgery using the small incision lenticule extraction (SMILE) procedure for the correction of myopia and myopic astigmatism: results of a 6 month prospective study. *Br J Ophthalmol*. 2011;95:335–339.
- Kim J.R., Hwang H.B., Mun S.J., et al. Efficacy, predictability, and safety of small incision lenticule extraction: 6-months prospective cohort study. *BMC Ophthalmol*. 2014;14:117. DOI: 10.1186/1471-2415-14-117
- Hjortdal J.O., Vestergaard A.H., Ivarsen A., Ragnathan S., Asp S. Predictors for the outcome of small-incision lenticule extraction for Myopia. *J Refract Surg*. 2012 Dec;28(12):865–871. DOI: 10.3928/1081597X-20121115-01
- Ryu I.H., Kim B.J., Lee J.H., Kim S.W. Comparison of Corneal Epithelial Remodeling After Femtosecond Laser-Assisted LASIK and Small Incision Lenticule Extraction (SMILE). *J Refract Surg*. 2017 Apr 1;33(4):250–256. DOI: 10.3928/1081597X-20170111-01
- Jun I., Kang D.S.Y., Roberts C.J., Lee H., Jean S.K., Kim E.K., Seo K.Y., Kim T.I. Comparison of Clinical and Biomechanical Outcomes of Small Incision Lenticule Extraction With 120- and 140-µm Cap Thickness. *Transl Vis Sci Technol*. 2021 Jul 1;10(8):15. DOI: 10.1167/tvst.10.8.15
- Guell J.L., Verdague P., Mateu-Figueras G., et al. SMILE procedures with four different cap thicknesses for the correction of myopia and myopic astigmatism. *J Refract Surg*. 2015;31(9):580–585. DOI: 10.3928/1081597X-20150820-02
- Damgaard I.B., Ivarsen A., Hjortdal J. Refractive correction and biomechanical strength following SMILE with a 110- or 160-µm cap thickness, evaluated ex vivo by inflation test. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2018;59(5):1836–1843. DOI: 10.1167/iovs.17-23675
- Эскина Э., Клокво О., Дамашаускас Р., Давтян К., Пайч Б., Мовсесян М. Visual Outcomes of Small-Incision Lenticule Extraction (SMILE) in Thin Corneas. *J. Clin. Med*. 2022;11:4162. DOI: 10.3390/jcm11144162
- Reinstein D.Z., Archer T.J., Gobbe M. Lenticule thickness readout for small incision lenticule extraction compared to Artemis three-dimensional very high-frequency digital ultrasound stromal measurements. *J Refract Surg*. 2014 May;30(5):304–309. DOI: 10.3928/1081597X-20140416-01
- Luft N., Priglinger S.G., Ring M.H., Mayer W.J., Mursch-Edlmayr A.S., Kreutzer T.C., Bolz M., Dirisamer M. Stromal remodeling and lenticule thickness accuracy in small-incision lenticule extraction: One-year results. *J Cataract Refract Surg*. 2017 Jun;43(6):812–818. DOI: 10.1016/j.jcrs.2017.03.038
- Wu F., Yin H., Chen X., Yang Y. Investigation of predictability and influence factors of the achieved lenticule thickness in small incision lenticule extraction. *BMC Ophthalmol*. 2020 Mar 17;20(1):110. DOI: 10.1186/s12886-020-01374-4
- Wang D., Li Y., Sun M., Guo N., Zhang F. Lenticule Thickness Accuracy and Influence in Predictability and Stability for Different Refractive Errors after SMILE in Chinese Myopic Eyes. *Curr Eye Res*. 2019 Jan;44(1):96–101. DOI: 10.1080/02713683.2018.1532011
- Romito N., Trinh L., Goemaere I., Borderie V., Laroche L., Bouheraoua N. Corneal Remodeling After Myopic SMILE: An Optical Coherence Tomography and In Vivo Confocal Microscopy Study. *J Refract Surg*. 2020 Sep 1;36(9):597–605. DOI: 10.3928/1081597X-20200713-01

23. Wang Y., Zhang X.F., Qian Y.F., Luo B.G., Li C., Yang X.L. [Comparison of corneal epithelial remodeling after small incision lenticule extraction and femtosecond laser-assisted LASIK]. *Zhonghua Yan Ke Za Zhi*. 2020 Feb 11;56(2):93–102. Chinese. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2020.02.004. PMID: 32074819
24. Ganesh S., Brar S., Relekar K.J. Epithelial Thickness Profile Changes Following Small Incision Refractive Lenticule Extraction (SMILE) for Myopia and Myopic Astigmatism. *J Refract Surg*. 2016 Jul 1;32(7):473–482. DOI: 10.3928/1081597X-20160512-01
25. Liu Y.C., Ang H.P., Teo E.P., Lwin N.C., Yam G.H., Mehta J.S. Wound healing profiles of hyperopic-small incision lenticule extraction (SMILE). *Sci Rep*. 2016 Jul 15;6:29802. DOI: 10.1038/srep29802
26. Fang W., Houfa Y., Yabo Y. Evaluation of the Difference between Predicted and Measured Central Corneal Thickness Reduction after SMILE and Femtosecond Laser-assisted LASIK for Myopia. *Curr Eye Res*. 2021 Aug;46(8):1089–1095. DOI: 10.1080/02713683.2021.1877310
27. Cui T., Wang Y., Ji S., Li Y., Hao W., Zhou H., Jhanji V. Applying Machine Learning Techniques in Nomogram Prediction and Analysis for SMILE Treatment. *American Journal of Ophthalmology*. 2020;210:71–77. DOI: 10.1016/j.ajo.2019.10.015
28. Эскина Э.Н., Давтян К.К. Алгоритм выбора параметров при операции ReLEx SMILE. *Вестник офтальмологии*. 2018;134(1):24–31. [Eskina E.N., Davtyan K.K. Algorithm for choosing parameters for relex smile surgery. *Annals of Ophthalmology = Vestnik oftal'mologii*. 2018;134(1):24–31 (In Russ.)]. DOI: 10.17116/oftal-ma2018134124-31
29. Naderi M., Sabour S., Khodakarim S., Daneshgar F. Studying the factors related to refractive error regression after PRK surgery. *BMC Ophthalmol*. 2018 Aug 14;18(1):198. DOI: 10.1186/s12886-018-0879-y
30. Sy M.E., Zhang L., Yeroushalmi A., Huang D., Hamilton D.R. Effect of mitomycin-C on the variance in refractive outcomes after photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg*. 2014;40(12):1980–1984. DOI: 10.1016/j.jcrs.2014.02.048
31. Pokroy R., Mimouni M., Sela T., Munzer G., Kaiserman I. Predictors of myopic photorefractive keratectomy retreatment. *J Cataract Refract Surg*. 2017 Jun;43(6):825–832. DOI: 10.1016/j.jcrs.2017.06.001
32. Hanna R., Mimouni M., Plaza A.B., Alió J.L. Factors predicting successful customized excimer laser treatment in irregular corneas. *J Cataract Refract Surg*. 2020 Feb;46(2):241–249. DOI: 10.1097/j.jcrs.0000000000000043
33. Mohammadi S.E., Nabovati P., Mirzajani A., Ashrafi E., Vakilian B. Risk factors of regression and undercorrection in photorefractive keratectomy. *Int J Ophthalmol*. 2015;8(5):933–937.
34. Randleman J.B., White A.J., Lynn M.J., Hu M.H., Stulting R.D. Incidence, outcomes, and risk factors for retreatment after wavefront-optimized ablations with PRK and LASIK. *J Refract Surg*. 2009;25(3):273–276.
35. Gauthier C.A., Epstein D., Holden B.A., Tengroth B., Fagerholm P., Hamberg-Nyström H., Sievert R. Epithelial alterations following photorefractive keratectomy for myopia. *J Refract Surg*. 1995 Mar-Apr;11(2):113–118. DOI: 10.3928/1081-597X-19950301-11
36. Gauthier C.A., Holden B.A., Epstein D., Tengroth B., Fagerholm P., Hamberg-Nyström H. Role of epithelial hyperplasia in regression following photorefractive keratectomy. *Br J Ophthalmol*. 1996 Jun;80(6):545–548. DOI: 10.1136/bjo.80.6.545
37. Seo K.Y., Lee J.B., Kang J.J., Lee E.S., Kim E.K. Comparison of higher-order aberrations after LASEK with a 6.0 mm ablation zone and a 6.5 mm ablation zone with blend zone. *J Cataract Refract Surg*. 2004;30:653–657.
38. Shin D.H., Lee Y.W., Song J.E., Choi C.Y. Comparison of refractive outcomes after photorefractive keratectomy with different optical zones using Mel 90 excimer laser. *BMC Ophthalmol*. 2020 Jul 9;20(1):270. DOI: 10.1186/s12886-020-01537-3
39. Artini W., Riyanto B.S., Hutaauruk J.A., Gondhowardjo D.T., Kekalih A. Predictive Factors for Successful High Myopia Treatment Using High-Frequency Laser-In-Situ Keratomileusis. *Open Ophthalmol J*. 2018 Jul 23;12:214–225. DOI: 10.2174/1874364101812010214
40. Tatar M.G., Kantarci A.F., Yildirim A., et al. Risk factors in Post-LASIK corneal ectasia. *J Ophthalmol*. 2014;2014:204191. DOI: 10.1155/2014/204191
41. Chayet A.S., Assil K.K., Montes M., Espinosa-Lagana M., Castellanos A., Tsioulas G. Regression and its mechanisms after laser in situ keratomileusis in moderate and high myopia. *Ophthalmology*. 1998 Jul;105(7):1194–1199. DOI: 10.1016/S0161-6420(98)97020-8
42. Kanellopoulos A.J., Asimellis G. Refractive and keratometric stability in high myopic LASIK with high-frequency femtosecond and excimer lasers. *J Refract Surg*. 2013;29(12):832–837. DOI: 10.3928/1081597X-20130924-02
43. Patel S., Alió J.L., Walewska A., Amparo F., Artola A. Patient age, refractive index of the corneal stroma, and outcomes of uneventful laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg*. 2013;39(3):386–392. DOI: 10.1016/j.jcrs.2012.09.027
44. Sakimoto T., Rosenblatt M.L., Azar D.T. Laser eye surgery for refractive errors. *Lancet*. 2006;367(9520):1432–1447. DOI: 10.1016/S0140-6736(06)68275-5
45. Shapira Y., Vainer I., Mimouni M., Levartovsky S., Sela T., Munzer G., Kaiserman I. Effect of Anisometropia on the Predictability and Accuracy of Refractive Surgery. *Cornea*. 2016 Nov;35(11):1410–1415. DOI: 10.1097/ICO.0000000000000974
46. Chen Y.L., Chien K.L., Wang I.J., et al. An interval-censored model for predicting myopic regression after laser in situ keratomileusis. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2007;48:3516–3523. DOI: 10.1167/iovs.06-1044
47. Reinstein D.Z., Srivannaboon S., Gobbe M., Archer T.J., Silverman R.H., Sutton H., Coleman D.J. Epithelial thickness profile changes induced by myopic LASIK as measured by Artemis very high-frequency digital ultrasound. *J Refract Surg*. 2009 May;25(5):444–450. DOI: 10.3928/1081597X-20090422-07
48. Кузнецова Т.С., Овечкин И.Г., Антонюк С.В., Щукин С.В. Факторы риска рефракционного регресса после эксимерлазерной коррекции близорукости высокой степени при механической и фемтолазерной технологиях формирования лоскута роговицы. *Современная оптометрия*. 2015;6(86):26–30. [Kuznetsova T.S., Ovechkin I.G., Antonyuk S.V., Shchukin S.Yu. Risk factors for refractive regression after excimer laser correction of high myopia with mechanical and femtolaser technologies for corneal flap formation. *Modern optometry = Sovremennaya optometriya*. 2015;6(86):26–30 (In Russ.)].
49. Li H., Wang Y., Dou R., et al. Intraocular pressure changes and relationship with corneal biomechanics after SMILE and FS-LASIK. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016;57:4180–4186. DOI: 10.1167/iovs.16-19615
50. Motwani M. Biomechanical Changes to the Cornea from LASIK Flap Creation Resulting in Inaccurate Ablations and Suboptimal Refractive Outcomes with Topographic-Guided Ablation. *Clin Ophthalmol*. 2020 Aug 12;14:2319–2327. DOI: 10.2147/OPHTH.S263896

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Академия постдипломного образования ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр специализированных видов медицинской помощи и медицинских технологий» Федерального медико-биологического агентства
Офтальмологическая клиника «Сфера» профессора Эскиной
Эскина Эрика Наумовна
доктор медицинских наук, профессор кафедры офтальмологии; руководитель Офтальмологической клиники «Сфера»
Волоколамское шоссе, 91, Москва, 125371, Российская Федерация
ул. Старокачаловская, 6, Москва, 117628, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0001-7714-6196>

Офтальмологическая клиника «Сфера» профессора Эскиной
Белогурова Алена Вячеславовна
врач-офтальмолог, главный врач
ул. Старокачаловская, 6, Москва, 117628, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-4434-7404>

Офтальмологическая клиника «Сфера» профессора Эскиной
Паршина Виктория Анатольевна
врач-офтальмолог, зав. отделением рефракционной хирургии, рефракционный хирург
ул. Старокачаловская, 6, Москва, 117628, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0002-2780-4792>

Офтальмологическая клиника «Сфера» профессора Эскиной
Мовсесян Марина Хажаконна
врач-офтальмолог, рефракционный хирург
ул. Старокачаловская, 6, Москва, 117628, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-2463-3403>

ABOUT THE AUTHORS

Academy of Postgraduate Education of Federal Medical-Biological Agency
Ophthalmological Clinic “Sphere” of Professor Eskina
Eskina Erika N.
MD, Professor, head of the Ophthalmological Clinic “Sphere”
Volokolamskoye highway, 91, Moscow, 125371, Russian Federation
Starokachalovskaya str., 6, Moscow, 117628, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0001-7714-6196>

Ophthalmological Clinic “Sphere” of Professor Eskina
Belogurova Alena V.
ophthalmologist, chief doctor
Starokachalovskaya str., 6 Moscow, 117628, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-4434-7404>

Ophthalmological Clinic “Sphere” of Professor Eskina
Parshina Victoria A.
ophthalmologist, head of Department of refractive surgery, refractive surgeon
Starokachalovskaya str., 6 Moscow, 117628, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0002-2780-4792>

Ophthalmological Clinic “Sphere” of Professor Eskina
Movsesyan Marina Kh.
ophthalmologist, refractive surgeon
Starokachalovskaya str., 6, Moscow, 117628, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-2463-3403>