

Сравнение ручного и фемтолазерного формирования интрастромального туннеля для введения воздуха при глубокой передней послойной кератопластике с фемтолазерным сопровождением

Б. Малюгин^{1,2,3}, А. Белодедова¹, О. Антонова¹, А. Гелястанов¹, А. Ачирон⁴, Б. Князер³.

¹ ФГАУ НМИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова, Москва, Россия.

² Московский государственный медико-стоматологический университет имени А. И. Евдокимова, Москва, Россия.

³ Department of Ophthalmology, Soroka University Medical Center and Faculty of Health Sciences, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel.

⁴Sackler School of Medicine, Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel.

Реферат

Цель. Наиболее важным этапом глубокой передней послойной кератопластики (DALK) является обнажение десцеметовой мембраны, которое достигается путем нагнетания воздуха между стромой роговицы и десцеметовой мембраной в виде большого пузыря (big bubble). В рамках данного исследования мы оценили новое программное обеспечение для фемтосекундного лазера, которое позволяет точно создавать интрастромальный туннель для формирования big bubble в процессе DALK под контролем встроенного в микроскоп оптического когерентного томографа в режиме реального времени.

Материалы и методы. Проведен ретроспективный анализ данных 61 пациента с кератоконусом (61 глаз). В группе I (n = 33) несквозной круговой разрез роговицы и ламеллярный разрез выполняли фемтосекундным лазером, а интрастромальный туннель создавали вручную с помощью острого лезвия и шпателя (группа DALK с частичным фемтолазерным сопровождением). В группе II (n=28) все разрезы, в том числе интрастромальный направляющий туннель создавались фемтосекундным лазером с обновленным программным обеспечением (группа DALK с полным фемтолазерным сопровождением). После удаления переднего слоя роговицы в обеих группах в интрастромальный туннель вводили воздух для получения big bubble. Период наблюдения составил 18 месяцев.

Результаты. Успешное формирование big bubble значительно чаще наблюдалось в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением, чем в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением (64,3% vs 36,4%, p = 0,04). Время операции было меньше в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением (21,8±5,1 vs 25,6±6,8 мин, p=0,025 без учета времени на накладывание швов). Частота перехода на сквозную кератопластику была почти одинаковой в группе I (15,1%) и в группе II (7,1%), p=0,432. В обеих группах произошло статистически значимое улучшение некорригированной и корригированной остроты зрения, данных центральной пахиметрии роговицы, индексов асимметрии и регулярности поверхности роговицы. Потеря плотности эндотелиальных клеток через 18

месяцев была ниже в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением, чем в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением (10,7% vs 16,5%, $p < 0,05$).

Выводы. Создание интрастромального направляющего туннеля для введения воздуха фемтосекундным лазером привело к более высокому успеху формирования big bubble, сокращению времени операции и уменьшению долгосрочной потери эндотелиальных клеток роговицы.

Ключевые слова: кератоконус, глубокая передняя послойная кератопластика, фемтосекундный лазер, большой пузырь, эндотелий роговицы.

Ключевые моменты

Что было известно:

- Самый важный этап DALK (отделение десцеметовой мембраны путем удаления всех слоев роговицы над ней) выполняется вручную.

Новизна:

- В данном исследовании изучен эффект нового программного обеспечения для фемтосекундного лазера, позволяющего создавать точный интрастромальный туннель для введения воздуха с целью отделения десцеметовой мембраны (метод «big bubble»).
- Создание интрастромального туннеля с помощью фемтосекундного лазера привело к повышению успеха формирования big bubble и сокращению времени операции по сравнению с формированием туннеля вручную.

Введение

Кератоконус – это прогрессирующее дегенеративное заболевание, характеризующееся истончением, растяжением и конусовидной деформацией роговицы глаза, которое сопровождается развитием индуцированного астигматизма и миопии. На поздних стадиях может возникать помутнение роговицы со значительным ухудшением зрения [1]. При отсутствии глубоких рубцов стромы и десцеметовой оболочки предпочтительным вариантом хирургического лечения продвинутых стадий кератоконуса является глубокая передняя послойная кератопластика (deep anterior lamellar keratoplasty, DALK). Преимущества DALK перед сквозной кератопластикой (СКП) включают сохранение собственной десцеметовой мембраны и эндотелия роговицы пациента. Техника DALK продлевает срок службы трансплантата и особенно предпочтительна для молодых пациентов [2]. В отличие от СКП, которая относится к операциям «открытого неба», DALK безопаснее, поскольку проводится без нарушения целостности передней камеры. Кроме того, DALK помогает сберечь дефицитный донорский материал и прооперировать большее число пациентов, поскольку позволяет разделить одну донорскую роговицу на две части: одну часть использовать для

DALK, а вторую для DMEK – пересадки десцеметовой мембраны со слоем эндотелиальных клеток другому пациенту [3].

Фемтосекундные лазерные (FS) технологии значительно улучшили результаты DALK. Фемтолазер помогает очень точно выполнить ламеллярные разрезы, провести трепанацию донорской и реципиентной роговицы, добиться оптимальной адаптации краев раны и более правильного контура роговицы [4]. Однако самый ответственный этап DALK (обнажение десцеметовой мембраной путем удаления всех расположенных над ней слоев роговицы) по-прежнему выполняется вручную. Это достигается путем интрастромального введения воздуха между стромой роговицы и десцеметовой мембраной в виде большого пузыря (big bubble) [5]. Данная техника достаточно сложна, требует от хирурга определенного мастерства и длительного обучения, так как иглу необходимо вводить вручную как можно ближе к десцеметовой мембране, не повредив ее [6].

Недавно было разработано новое программное обеспечение для фемтосекундного лазера, позволяющее точно создавать интрастромальный туннель. Глубину расположения туннеля теперь можно регулировать с помощью интегрированной в микроскоп оптической когерентной томографии (ОКТ) в режиме реального времени [7]. Программное обеспечение было обновлено в 2018 году, и с тех пор мы используем его для создания интрастромального туннеля, через который воздух нагнетается в роговицу. Насколько нам известно, в литературе пока нет публикаций, посвященных данному программному обеспечению, поэтому целью нашего исследования стала оценка результатов DALK до и после внедрения обновленного программного обеспечения для фемтосекундного лазера, которое позволяет создавать интрастромальный туннель для введения воздуха в процессе DALK.

Материалы и методы

Исследование было одобрено локальным этическим комитетом ФГАУ НМИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова (Москва, Россия) и проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. От всех пациентов было получено информированное письменное согласие.

Участники

В исследование были включены 61 пациент с далекозашедшими стадиями кератоконуса (III-IV стадия по классификации Амслера-Крумейха [8]), которым была выполнена FS-DALK (61 глаз, средний возраст пациентов $34,9 \pm 13,9$ года, мужчины – 75,4%). Во всех случаях несквозной круговой разрез и передний ламеллярный разрез роговицы выполнялись фемтосекундным лазером. Пациенты были разделены на две группы в зависимости от того, как создавался направляющий туннель для введения воздуха. В группе I – DALK с частичным фемтолазерным сопровождением, ($n = 33$) – туннель создавали вручную с помощью лезвия и шпателя, а в группе II – DALK с полным фемтолазерным сопровождением, ($n = 28$) – туннель формировали с помощью фемтосекундного лазера с использованием обновленного программного обеспечения. Все операции были выполнены одним хирургом (Б.М.) с 2017 по 2019 г.

Анализируемые параметры

У всех пациентов собирали анамнез, включая время возникновения кератоконуса, его прогрессирование, наличие сопутствующей глазной и системной патологии, анамнез предшествующих глазных операций. Перед операцией и в послеоперационном периоде пациентам проводили исследования переднего отрезка глаза (топография роговицы, пахиметрия роговицы, подсчет плотности эндотелиальных клеток). Топографию роговицы выполняли на аппарате TMS-4 (Tomey, Япония), оптическую когерентную томографию (ОКТ) переднего отрезка глаза – на аппарате Visante (Carl Zeiss Meditec Inc., Германия). Плотность эндотелиальных клеток (ПЭК) и потерю ПЭК оценивали с помощью зеркального микроскопа EM-3000 (Tomey, Nagoya, Japan).

В послеоперационном периоде пациентов обследовали на 7-е, 30-е сутки и через 18 месяцев после операции. Мы сравнили в обеих группах частоту успешного формирования большого пузыря воздуха (big bubble) и частоту перехода на СКП, некорригированную и максимальную корригированную остроту зрения вдаль (НКОЗ и МКОЗ), данные пахиметрии, индекс асимметрии поверхности роговицы (SAI) и индекс регулярности поверхности роговицы (SRI), а также оценили частоту послеоперационных осложнений.

Настройки лазера

Во всех случаях для выполнения операции FS-DALK использовался низкоэнергетический фемтосекундный лазер Femto LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems, Brugg, Switzerland). В обеих группах для формирования ламеллярных и круговых разрезов роговицы использовались одни и те же параметры: длина волны лазера 1020-1060 нм, длительность импульса 250 фемтосекунд, настройки энергии – 130 % для ламеллярного разреза со скоростью 7 мм/с и 145 % для кругового бокового разреза со скоростью 25 мм/с. Несквозной круговой разрез стромы был центрирован по отношению к лимбу и выполнялся на глубину 75-80% роговицы реципиента. Оптимальная глубина рассчитывалась индивидуально на основе данных интраоперационной ОКТ (Lumera Rescan 700, Carl Zeiss Meditec, Inc.), интегрированной в фемтолазерную рукоятку. Диаметр бокового кругового разреза составлял от 7,5 мм до 8,5 мм в зависимости от диаметра роговицы реципиента. В группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением помимо кругового и ламеллярного разрезов роговицы с помощью фемтосекундного лазера создавали интрастромальный туннель. Для его выполнения использовались настройки энергии 105% мощности лазера со скоростью 5 мм/с.

Туннель располагали на средней периферии (в зоне 5,5–7,5 мм) под углом 45–65° к центру роговицы. Ширина туннеля составляла 0,6 мм, а его длина составляла от 90 до 150 мкм в зависимости от расположения самой тонкой части роговицы. Длину туннеля можно было регулировать вручную, используя интраоперационную систему ОКТ фемтосекундного лазера для визуализации туннеля по отношению к десцеметовой мембране. Мы стремились сохранять дистанцию около 80-100 мкм от конца туннеля до десцеметовой мембраны. Скриншоты с дисплея лазера с изображениями роговицы во фронтальной и сагиттальной

плоскостях при формировании интрастромального направляющего туннеля показаны на **рис. 1 и 2**.

Хирургические методы

После подготовки операционного поля и установки векорасширителя проводили разметку центра роговицы. Для выбора оптимального диаметра трепанации с учетом расстояния до лимба 1,5 мм использовали роговичные штангенциркули с диаметром в диапазоне от 7,0 до 9,0 мм с шагом 0,5 мм. Желаемый диаметр трепанации отмечали чернильными точками. Затем на глаз пациента помещали вакуумное кольцо лазера и выполняли докинг, фиксируя глаз. Затем проводились лазерные резы; энергию, фактически использованную для разрезания роговицы, контролировали на экране лазера.

После отстыковки интерфейса лазера от глаза реципиента поверхностный передний слой стромы роговицы осторожно отделяли от подлежащей стромы с помощью зубчатого пинцета и шпателя. В группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением острым металлическим лезвием вручную выполняли вертикальный разрез длиной 1,0 мм с периферии стромального ложа рядом с боковым круговым разрезом. Затем в разрез вводили тонкий тупой шпатель и направляли его к центру роговицы, создавая туннель.

В группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением туннель визуализировали на изображениях интраоперационной ОКТ и под операционным микроскопом, как показано на **рис. 3**. Туннель вскрывали тонким тупым шпателем.

В обеих группах в туннель вводили канюлю 27G на шприце объемом 2,0 мл, заполненном стерильным воздухом, и продвигали ее вперед до достижения конца туннеля. Через канюлю в строму роговицы вводили стерильный воздух и визуализировали отделение остаточной стромы от десцеметовой мембраны, как показано на **рис. 4**. После успешного создания big bubble в центр пузыря вводили когезивное вязкоупругое вещество (вискоэластик гиалуронат натрия 1%, Provisc, Alcon Laboratories Inc., Fort Worth, TX). Эта манипуляция приводила к полному отслоению десцеметовой мембраны от остаточной стромы и расширению big bubble до края кругового трепанационного разреза (**рис. 5**). Оставшуюся строму затем рассекали крест-накрест металлическим лезвием; получившиеся квадранты иссекали изогнутыми роговичными ножницами с тупыми концами. После этого трансплантат помещали на глаз реципиента и закрепляли четырьмя узловыми швами шелк 8-0. Затем трансплантат фиксировали непрерывным швом нейлон 10-0; четыре временных шелковых шва снимали и в конце процедуры выполняли субконъюнктивальную инъекцию дексаметазона 0,1% (Krka, d. d., Novo Mesto, Slovenia) и гентамицина 4% (Krka, d. d.). В течение нескольких дней после операции пациенты использовали бандажную контактную линзу для уменьшения выраженности роговичного синдрома.

Послеоперационное лечение включало инстилляцию глазных капель дексаметазона 0,1% (в первый месяц – 4 раза в день; во второй месяц – 3 раза в день; в третий месяц – 3 раза в день и в течение следующих девяти месяцев – 1 раз в день), левофлоксацина 0,5% (Офтаквикс, Santen Pharmaceutical Co., Ltd. Osaka, Japan; 4 раза в день в течение 14 дней) и

геля декспантенола 5% (Корнерегель, Dr. Gerhard Mann, Chem.-Pharm. Fabrik, GmbH Berlin, Germany; 4 раза в день в течение одного месяца).

Подготовка донорского трансплантата

Сквозную трепанацию донорской ткани выполняли после фиксации ее эпителиальной стороной на искусственной передней камере с помощью фемтолазерной платформы LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems, Port, Switzerland). Десцеметову мембрану и донорский эндотелий отделяли от трансплантата вручную беззубым пинцетом.

Статистический анализ

Анализ данных проводился с использованием программного обеспечения SPSS Statistics version 26. Для всех клинических показателей в обеих группах были рассчитаны среднее значение и стандартное отклонение (SD). Для проверки нулевой гипотезы big bubble в обеих группах использовали двусторонний точный критерий Фишера (p_f). Возникновение события расценивали как неслучайное при значении $p_f < 0,05$. Для сравнения данных между двумя группами использовали непарный t-критерий Стьюдента $f(p_u)$. Для сравнения данных до и после операции в каждой группе использовали t-критерий Стьюдента для парных повторных измерений (p_r). Во всех тестах значение $p > 0,05$ или ниже считалось статистически значимым. При анализе послеоперационных клинических данных мы исключили из анализа случаи перехода на СКП в связи с перфорацией десцеметовой мембраны (5 пациентов в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением и 2 пациента в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением).

Результаты

Демографические и клинические данные

Исходные параметры в обеих группах были одинаковыми в отношении демографии (возраст, пол), клинического статуса (степень кератоконуса, НКОЗ, МКОЗ) и значений топографии роговицы (K_{min} , K_{max} , средняя толщина роговицы, SAI и SRI), $p > 0,05$ для всех сравнений, **табл. 1**.

Формирование big bubble было более успешным в группе II, в которой направляющий интрастромальный туннель создавался фемтосекундным лазером, чем в группе I, в которой туннель создавался лезвием вручную (64,3% vs 35,7%, $p=0,04$). Частота перфорации десцеметовой мембраны в центральной зоне роговицы с последующим переходом на СКП была сопоставимой в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением (7,1%) и в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением и ручным формированием туннеля (15,1%), $p=0,441$. Подтверждено увеличение МКОЗ в обеих группах по сравнению с дооперационными значениями ($p_r < 0,05$). Статистически значимых различий в МКОЗ между группами DALK с полным или частичным фемтолазерным сопровождением на всех сроках послеоперационного наблюдения не было ($p_u > 0,05$). Среднее время процедуры от остановки фемтосекундного лазера до обнажения десцеметовой мембраны без учета времени для

накладывания швов было достоверно меньше в группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением ($21,8 \pm 5,1$ мин vs $25,6 \pm 6,8$ мин, $p=0,025$) (табл. 2).

Параметры роговицы

В группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением ОКТ-пахиметрия роговицы в самой тонкой точке составляла $369,11 \pm 33,65$ мкм до операции и $511,25 \pm 25,41$ мкм через год после операции ($p_r < 0,05$). В группе DALK с полным фемтолазерным сопровождением значения ОКТ-пахиметрии составили $357,29 \pm 31,22$ мкм и $524,92 \pm 35,98$ мкм через 1 год после операции соответственно ($p_r < 0,05$).

После оперативного лечения также было отмечено статистически значимое изменение SAI (индекс асимметрии поверхности роговицы) и SRI (индекс регулярности поверхности роговицы) в обеих группах по сравнению с данными до операции. Сравнение дооперационных данных проводилось с данными, полученными через три месяца после снятия роговичных швов. Значение индекса SAI достоверно снизилось: с $4,48 \pm 1,89$ до $1,21 \pm 0,72$ в группе I и с $4,12 \pm 1,61$ до $1,27 \pm 0,80$ в группе II ($p_r < 0,05$). Аналогичным образом средний индекс SRI снизился с $2,11 \pm 0,52$ до $1,28 \pm 0,56$ в группе I и с $2,08 \pm 0,48$ до $1,21 \pm 0,55$ в группе II. Отметим, что в норме $SRI < 1$ считается удовлетворительным.

Оценка плотности эндотелиальных клеток

Дооперационная плотность эндотелиальных клеток была одинаковой в обеих группах (группа I: $2127 \pm 434,9$ кл/мм², группа II: $2357 \pm 386,2$ кл/мм²), $p=0,11$. Краткосрочный сравнительный анализ ПЭК через 1, 3 и 6 месяцев после операции не выявил статистически значимой разницы между группами. Однако долгосрочный анализ выявил значительно более высокую потерю эндотелиальных клеток в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением: через 12 месяцев потеря ПЭК составила в группе I составила 16,0% по сравнению с 10% в группе II, а через 18 месяцев потеря ПЭК в группе I составила 16,5% по сравнению с 10,7% в группе II ($p_r < 0,001$ для обоих сравнений).

Осложнения

Количество осложнений в виде синдрома Урретса-Завалиа (3,0% vs 7,1%), нарушений роговичного шва (0% vs 3,6%), вторичной офтальмогипертензии (3,0% vs 7,1%) и рецидивирующего герпетического кератита (3,0% vs 0%) были аналогичными в обеих группах ($p > 0,05$ для всех сравнений). Все осложнения успешно поддавались лечению и не оказывали или оказывали минимальное негативное влияние на функциональные результаты.

Обсуждение

В данном исследовании с длительным периодом наблюдения (18 месяцев) мы оценили безопасность и эффективность методов FS-DALK с формированием направляющего роговичного туннеля для интрастромального введения воздуха при кератоконусе с помощью фемтолазера или вручную. Мы получили хорошие послеоперационные результаты в обеих группах: увеличение НКОЗ, МКОЗ, улучшение параметров роговицы, низкую частоту

осложнений и низкую частоту перехода на СКП. В то же время мы продемонстрировали, что DALK с полным фемтолазерным сопровождением и выполнением направляющего туннеля фемтосекундным лазером сопровождается более высоким успехом достижения big bubble и сокращением времени операции.

Частота перехода на СКП в нашем исследовании 11,4% находится в пределах зарегистрированных данных о частоте перехода с DALK на СКП (от 0,37% до 30%) [10, 11]. Даже если происходит перфорация десцеметовой мембраны, многие хирурги предпочитают продолжать диссекцию вручную и завершить процедуру как DALK. Huang OS et al опубликовали результаты 540 процедур DALK [10]. Они сообщили о перфорации десцеметовой мембраны в 101 случае из 540 (18,7%): 79 случаев (78,2%) микроперфорации и 15 случаев (14,9%) макроперфорации. Однако хирурги перешли с DALK на СКП только в 2 случаях (2/540; 0,37%).

По сравнению с обычной DALK, при которой передние слои роговицы удаляются путем ручной диссекции, фемтолазерные технологии упрощают критические этапы и сокращают время операции. Использование очень точных фемтосекундных лазерных платформ со встроенными инструментами визуализации роговицы и возможностью обхода самых тонких участков роговицы является логичным и целесообразным. Впервые FS-DALK осуществил Buzzonetti L [12]. С помощью фемтосекундного лазера он создавал относительно широкий туннель в роговице, оканчивающийся примерно в 50 мкм от десцеметовой мембраны. Следующий этап операции выполнялся после повторного докинга, когда фемтосекундным лазером выкраивался роговичный лоскут в виде гриба с боковым круговым разрезом на глубину стромы до 100 мкм от десцеметовой мембраны. Затем операция продолжалась как обычная процедура DALK с введением воздуха для создания big bubble, что удавалось в 94% случаев [12]. Однако повторный докинг значительно увеличивает продолжительность операции и снижает ее безопасность, поскольку роговица пациента дважды подвергается механическим и лазерным манипуляциям.

Одноэтапная процедура FS-DALK, включающая круговую несквозную трепанацию роговицы, создание ламеллярного разреза и формирование направляющего туннеля для введения воздуха, выглядит многообещающе. Pedrotti E. et al протестировали последовательное выполнение ламеллярного разреза и создание туннеля в исследовании с использованием 20 донорских роговиц человека на платформе Victus FSL (Technolas Perfect Vision GmbH, Munich, Germany) [13]. В этом исследовании на 10 роговицах сначала формировали туннель, затем ламеллярный разрез (группа TL), а на 10 других роговицах действия выполняли в обратном порядке (группа LT). Big bubble был достигнут в 100% глаз группы TL и только в 70% в группе LT.

По нашему опыту, конфигурация и расположение интрастромальных туннелей могут быть адаптированы индивидуально в зависимости от толщины стромы и расстояния до десцеметовой мембраны по данным интраоперационной ОКТ. Расстояние от конца туннеля до десцеметовой мембраны в диапазоне от 90 до 120 мкм считается оптимальным. Мы создавали туннель шириной 0,6 мм, что соответствует размеру рабочей части офтальмологического шпателя и канюли 27G, которой стерильный воздух нагнетается в туннель.

Различные лазерные платформы имеют разные встроенные функции и возможности. Система LDV Z8 (Ziemer Ophthalmic Systems) имеет встроенную ОКТ, позволяющую визуализировать формирование ламеллярных, круговых и туннельных разрезов роговицы в режиме реального времени. Liu Y-C et al первыми изучили возможности нового программного обеспечения LDV Z8 для DALK [15]. Они оценили точность создания лазером интрастромальных туннелей и осуществимость пневматической диссекции с формированием big bubble в эксперименте на тридцати свиных и трех человеческих трупных глазах. Плоскость ламеллярной диссекции роговицы была гладкой, что свидетельствовало об отличном качестве ламеллярного разреза. Затем авторы сообщили о 14 пациентах с кератоконусом или рубцами роговицы, которым было проведено лечение с выполнением ламеллярной диссекции фемтосекундным лазером. Big bubble был успешно достигнут во всех случаях. Ручное отделение остаточной стромы или переход на СКП не потребовался ни в одном случае [15].

В нашем исследовании в группе II частота успешного формирования big bubble была достоверно в 2 раза выше (64,3%), чем в группе I (35,7%). Различия между группами были статистически значимыми ($p=0,04$). Это подтверждает преимущества создания интрастромального туннеля фемтосекундным лазером. Метод также позволил снизить частоту необходимости в ручном отделении остаточной стромы и, как следствие, снизить риск перфорации десцеметовой мембраны.

Долгосрочные потери плотности эндотелиальных клеток после DALK варьируются от 5,4% до 13% [16, 17]. В нашем исследовании полное фемтолазерное сопровождение DALK ассоциировалось с меньшей потерей ПЭК через 12 и 18 месяцев после операции. Хотя механизм появления этих различий не совсем ясен, мы полагаем, что более высокая потеря эндотелиальных клеток в группе DALK с частичным фемтолазерным сопровождением связана с более многочисленными и длительными манипуляциями вблизи десцеметовой мембраны при ручном отделении остаточной стромы, которые могли привести к повреждению эндотелия. При проведении DALK с полным фемтолазерным сопровождением мы сохраняли дистанцию 80–100 мкм от конца роговичного туннеля до десцеметовой мембраны. Это могло уменьшить повреждение эндотелия.

Ограничения этой работы включают ее ретроспективный дизайн и отсутствие рандомизации.

В заключение, по результатам нашего исследования создание интрастромального направляющего туннеля для введения воздуха с помощью фемтосекундного лазера привело к большему успеху формирования big bubble, сокращению времени операции и уменьшению долгосрочной потери ПЭК. В то время как другие клинические данные были сопоставимы в обеих группах, одноэтапная FS-DALK с полным фемтолазерным сопровождением может привести к снижению операционных затрат.

Материал подготовила врач-офтальмохирург, к.м.н., Михайлова Т.Н.

Литература

1. Males JJ, Viswanathan D (2018) Comparative study of long-term outcomes of accelerated and conventional collagen crosslinking for progressive keratoconus. *Eye* 32:32–38. [https:// doi.org/ 10. 1038/ eye. 2017. 296](https://doi.org/10.1038/eye.2017.296)
2. Henein C, Nanavaty MA (2017) Systematic review comparing penetrating keratoplasty and deep anterior lamellar keratoplasty for management of keratoconus. *Cont Lens Anterior Eye* 40:3–14. [https:// doi.org/ 10. 1016/j. clae. 2016. 10. 001](https://doi.org/10.1016/j.clae.2016.10.001)
3. Keane M, Coster D, Ziaei M, Williams K (2014) Deep anterior lamellar keratoplasty versus penetrating keratoplasty for treating keratoconus. *Cochrane Database Syst Rev*:CD009700. [https:// doi.org/ 10. 1002/ 14651 858. CD009 700. pub2](https://doi.org/10.1002/14651858.CD009700.pub2)
4. Alio JL, Abdelghany AA, Barraquer R et al (2015) Femtosecond laser assisted deep anterior lamellar keratoplasty outcomes and healing patterns compared to manual technique. *Biomed Res Int* 2015:397891. [https:// doi.org/ 10. 1155/ 2015/ 397891](https://doi.org/10.1155/2015/397891)
5. Anwar M, Teichmann KD (2002) Big-bubble technique to bare Descemet's membrane in anterior lamellar keratoplasty. *J Cataract Refract Surg* 28:398–403. [https:// doi.org/ 10. 1016/ s0886- 3350\(01\) 01181-6](https://doi.org/10.1016/s0886-3350(01)01181-6)
6. Pasricha ND, Shieh C, Carrasco-Zevallos OM et al (2016) Needle depth and big-bubble success in deep anterior lamellar keratoplasty: an ex vivo microscope-integrated OCT study. *Cornea* 35:1471–1477. [https:// doi.org/ 10. 1097/ ICO. 0000000000000948](https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000000948)
7. Santorum P, Yu AC, Bertelli E, Busin M (2022) Microscope-integrated intraoperative optical coherence tomography-guided big bubble deep anterior lamellar keratoplasty. *Cornea* 41:125–129. [https:// doi.org/ 10. 1097/ ICO. 00000 00000 002826](https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000002826)
8. Naderan M, Shoar S, Kamaledin MA et al (2015) Keratoconus clinical findings according to different classifications. *Cornea* 34:1005–1011. [https:// doi.org/ 10. 1097/ ICO. 00000 00000000537](https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000000537)
9. Liu Z, Pflugfelder SC (1999) Corneal surface regularity and the effect of artificial tears in aqueous tear deficiency. *Ophthalmology* 106:939–943. [https:// doi. org/ 10. 1016/ S0161- 6420\(99\) 00513-8](https://doi.org/10.1016/S0161-6420(99)00513-8)
10. Huang OS, Htoon HM, Chan AM et al (2019) Incidence and outcomes of intraoperative Descemet membrane perforations during deep anterior lamellar keratoplasty. *Am J Ophthalmol* 199:9–18. [https:// doi.org/ 10. 1016/j. ajo. 2018. 10. 026](https://doi.org/10.1016/j.ajo.2018.10.026)
11. Gadhvi KA, Romano V, Fernández-Vega Cueto L et al (2019) Deep anterior lamellar keratoplasty for keratoconus: multisurgeon results. *Am J Ophthalmol* 201:54–62. [https:// doi.org/ 10. 1016/j. ajo. 2019. 01. 022](https://doi.org/10.1016/j.ajo.2019.01.022)
12. Buzzonetti L, Petrocelli G, Valente P (2012) Femtosecond laser and big-bubble deep anterior lamellar keratoplasty: a new chance. *J Ophthalmol* 2012:264590. [https:// doi. org/ 10. 1155/2012/ 264590](https://doi.org/10.1155/2012/264590)
13. de Macedo JP, de Oliveira LA, Hirai F, de Sousa LB (2018) Femtosecond laser-assisted deep anterior lamellar keratoplasty in phototherapeutic keratectomy versus the big-

bubble technique in keratoconus. Int J Ophthalmol 11:807–812. <https://doi.org/10.18240/ijo.2018.05.15>

14. Achiron A, Haddad F, Gerra M et al (2016) Predicting cataract surgery time based on preoperative risk assessment. Eur J Ophthalmol. 26:226–229. <https://doi.org/10.5301/ejo.5000697>

15. Liu Y-C, Wittwer VV, Yusoff NZM et al (2019) Intraoperative optical coherence tomography-guided femtosecond laser-assisted deep anterior lamellar keratoplasty. Cornea 38:648–653. <https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000001851>

16. Han DCY, Mehta JS, Por YM et al (2009) Comparison of outcomes of lamellar keratoplasty and penetrating keratoplasty in keratoconus. Am J Ophthalmol 148:744–751.e1. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2009.05.028>

17. Khattak A, Nakhli FR, Al-Arfaj KM, Cheema AA (2018) Comparison of outcomes and complications of deep anterior lamellar keratoplasty and penetrating keratoplasty performed in a large group of patients with keratoconus. Int Ophthalmol 38:985–992. <https://doi.org/10.1007/s10792-017-0548-9>

Таблица 1. Исходные данные в группах DALK с частичным и полным фемтолазерным сопровождением

Параметры	FS-DALK		P-value
	с частичным фемтолазерным сопровождением	с полным фемтолазерным сопровождением	
Пациенты			
Пол (мужчины : женщины)	21:12 (64:36%)	18:10 (64:36%)	1.00
Возраст (годы)	35.9 ± 14.6	33.8 ± 13.2	0.55
Острота зрения			
НКОЗ (LogMAR)	1.56 ± 0.51	1.62 ± 0.45	0.68
МКОЗ (LogMAR)	1.21 ± 0.49	1.34 ± 0.51	0.49
Роговица			
Аллергический кератоконъюнктивит	5 (15%)	4 (14%)	0.95
Стадия кератоконуса* (%)	III 88%; IV 12%	III 93%; IV 7%	0.67
Кросслинкинг в анамнезе	8 (24%)	7 (25%)	0.82
К 1 (D)	52.03 ± 4.29	54.01 ± 5.05	0.11
К 2 (D)	58.63 ± 4.83	60.75 ± 4.86	0.92
Средняя минимальная толщина роговицы (мкм)	369.1 ± 33.7	357.3 ± 31.2	0.51
SAI	4.48 ± 1.89	4.12 ± 1.61	0.83
SRI	1.99 ± 0.40	2.07 ± 0.46	0.49
ПЭК (клеток/мм ²)	2357.2 ± 386.2	2127.1 ± 434.9	0.11

Данные представлены в виде Среднее (\pm SD) или абсолютных чисел с пропорциями, если не указано иное.

*Степень кератоконуса по классификации Амслера-Крумайха.

НКОЗ – некорригированная острота зрения; МКОЗ – максимальная корригированная острота зрения; ПЭК – плотность эндотелиальных клеток; SAI – индекс асимметрии поверхности роговицы; SRI – индекс регулярности поверхности роговицы.

Таблица 2. Сравнение клинических параметров между группами DALK с частичным и полным фемтолазерным сопровождением

Параметры	FS-DALK		P-value
	с частичным фемтолазерным сопровождением	с полным фемтолазерным сопровождением	
Размер трепанации роговицы донора, мм	7.17 \pm 1.25	7.35 \pm 1.37	0.094
Размер трепанации роговицы реципиента, мм	7.29 \pm 1.27	7.40 \pm 1.39	0.270
Успех формирования big bubble	12 (36.4%)	18 (63.4%)	0.041
Переход на СКП	5 (15.1%)	2 (7.1%)	0.437
Время операции	25.6 \pm 6.8	21.8 \pm 5.1	0.025

Данные представлены в виде Среднее (\pm SD) или абсолютных чисел с пропорциями. СКП – сквозная кератопластика

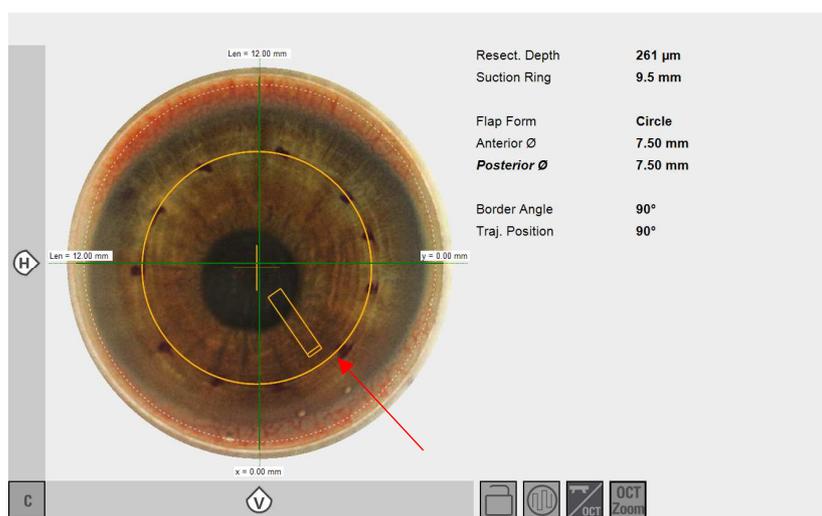


Рис. 1. На дисплее лазерной платформы Femto LDV Z8 отображается круговой боковой рез (отмечен желтым кругом), соответствующий чернильным меткам (отмечены синими точками) на поверхности роговицы реципиента. Интрастромальный направляющий туннель (отмечен

желтым квадратом) расположен на 5 часах и простирается от кругового реза к центру роговицы (отмечен красной стрелкой).

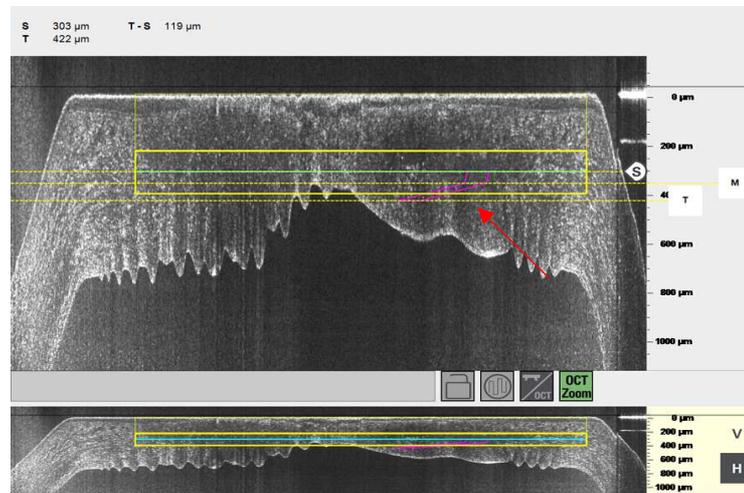


Рис. 2. Интраоперационные ОКТ-изображения переднего отрезка глаза пациента с дисплея лазерной платформы Femto LDV Z8. Желтые линии обозначают вертикальный (круговой) и горизонтальный (ламеллярный) разрезы. Фиолетовой двойной линией показано расположение интрастромального туннеля (отмечен красной стрелкой), горизонтальная зеленая линия определяет верхнюю границу интрастромального туннеля.

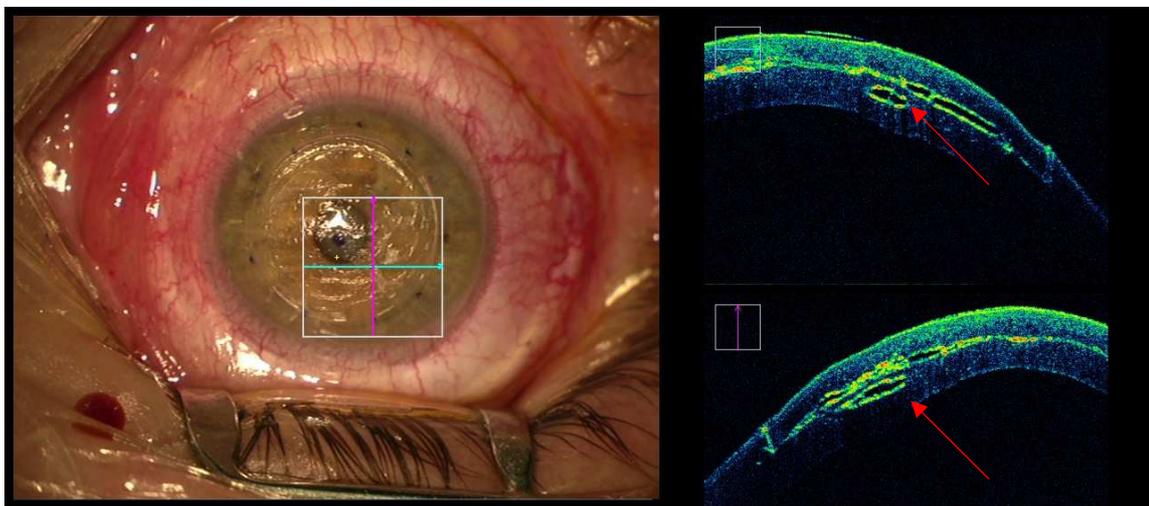


Рисунок 3. Скриншот видео с операционного микроскопа. Слева – глаз пациента после удаления поверхностных слоев роговицы. Пересечением вертикальной фиолетовой и горизонтальной зеленой линией обозначен интрастромальный туннель. Справа – интраоперационные ОКТ-изображения интрастромального фемтолазерного туннеля (отмечен красными стрелками). Туннель расширен и заполнен пузырьками газа, оставшимися после работы лазера.

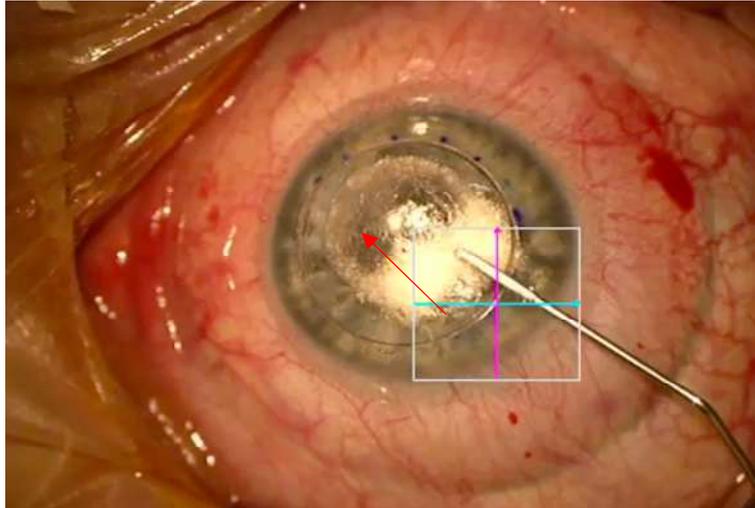


Рисунок 4. Изображение с операционного микроскопа. В интрастромальный туннель помещают канюлю 27G, в строму роговицы вводят стерильный воздух. Видны пузырьки воздуха, не достигающие до кругового трепанационного разреза (отмечены красной стрелкой).

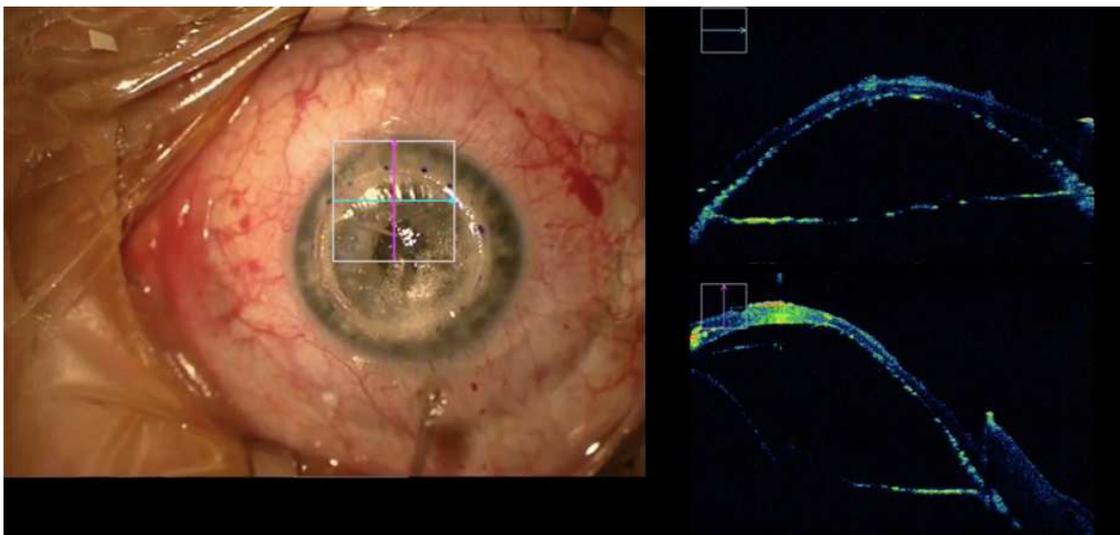


Рис. 5. Изображение с операционного микроскопа (слева) и интраоперационные ОКТ-изображения (справа). После введения вязкоэластика в big bubble определяется полное отделение десцеметовой мембраны вплоть до кругового разреза роговицы.