DOI: https://doi.org/10.25276/0235-4160-2021-1-68-72
УДК 617.753:617.713

Применение лентикулярной ткани в рефракционной хирургии роговицы

С.В. Костенев[1], С.А. Борзенок[1, 2], В.Г. Ли[1], П.О. Носиров[1]

[1] ФГАУ «НМИЦ «МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова» Минздрава России, Москва;
[2] ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова» Минздрава России , Москва

РЕФЕРАТ

Цель. Выявить проблемы применения лентикулярной ткани, ее хранения, получения бесклеточных каркасов в тканевой инженерии роговицы, возможность прогнозирования рефракции.

Технология Relex Smile позволяет проводить коррекцию аметропии путем создания линз в строме роговицы с последующим удалением лентикулярной ткани через небольшой разрез. Уникальным преимуществом технологии Relex Smile является то, что это потенциально обратимая процедура, которая позволяет сохранить извлеченные лентикулы и открывает широкие возможности для использования лентикулы в офтальмологической практике в будущем.

Исследования в этой области продемонстрировали возможность трансплантации аутологичных и аллогенных лентикул после создания внутрироговичного кармана для лечения таких заболеваний, как пресбиопия, перфорация роговицы, кератэктазия роговицы, рецидивирующий птеригиум, прогрессирующий кератоконус.

Заключение. В данной статье представлены результаты недавних исследований, описывающих протоколы криоконсервации и децеллюляризации лентикулы как наиболее перспективных методов в тканевой инженерии в условиях дефицита донорских роговиц.

Ключевые слова: *Relex Smile, лентикула, имплантация, криоконсервация, децеллюляризация, тканевая инженерия.* ■

Офтальмохирургия. 2021;1: 68–72.

ABSTRACT

The use of lenticular tissue in corneal refractive surgery

S.V. Kostenev[1], S.A. Borzenok[1, 2], V.G. Lee[1], P.O. Nosirov[1]

[1] Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, Moscow
[2] Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Moscow

Purpose. To identify the problems of using lenticular tissue, its storage, obtaining cell-free scaffolds in corneal tissue engineering, and the possibility of predicting refraction.

The unique advantage of Relex Smile technology is that it is a potentially reversible procedure that allows preserve the extracted lenticules and opens up broad possibilities for the use of lenticules in ophthalmic practice in the future.

Research in this area demonstrated the potential for implanted autologous and allogeneic lenticules after creating an intracorneal pocket for treating diseases such as presbyopia, corneal perforation, corneal keratectasia, progressive pterygium, progressive keratoconus.

In addition, this article presents the results of recent studies describing protocols for cryopreservation and decellularization of lenticules as the most promising methods in tissue engineering in conditions a shortage of donor's cornea.

Key words: *Relex Smile, lenticule, implantation, cryopreservation, decellularization, tissue engineering.* ■

Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery. 2021;1: 68–72.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В мировой практике наиболее часто для коррекции аметропии применяют технологию LASIK. Технический момент операции LASIK складывается из запланированных двух этапов операции. На первом этапе с помощью механического микрокератома происходят формирование и подъем клапана роговицы на ножке с возвращением его на прежнее место, после второго этапа операции – эксимерлазерная абляция стромы [1]. Технический прогресс в мире рефракционной хирургии привел к созданию операции под брендовым названием Relex Smile. В ходе данной операции формируется лентикула с помощью фемтосекундного лазера VisuMax (Carl Zeiss Meditec

CC BY 4.0

AG, Йена, Германия) и извлекается через малый разрез. Данная технология является полностью бесклапанной [2]. Данный вид лентикулы расценивается как истинный трансплантат, и в этой связи существует необходимость создания искусственных эквивалентов донорской роговицы человека [3, 4]. Основными недостатками при пересадке роговицы являются иммунологическое отторжение трансплантата и дефицит донорского материала.

Тканевая инженерия на современном этапе позволяет создавать биоимплантаты из отдельных фрагментов собственных тканей донорской роговицы, тем самым решая проблему недостатка донорских роговиц, по крайней мере, для выполнения послойных и интерламеллярных кератопластик [5]. Метод децеллюляризации является перспективным направлением в тканевой инженерии, позволяющим на практике создавать трехмерный каркас, из которого максимально удаляются клетки, и тем самым снижается риск развития реакции трансплантационного иммунитета [6, 7]. В результате операции Relex Smile высвобождается и остается невостребованной стромальная лентикула, обладающая оптико-рефракционными свойствами и открывающая широкие возможности для ее дальнейшего применения в клинике. В связи с этим актуальной остается проблема заготовки и длительного хранения лентикулярного материала, а также возможности ее применения для коррекции аметропий и другой глазной патологии.

ЦЕЛЬ

Выявить проблемы применения лентикулярной ткани, ее хранения, получения бесклеточных каркасов в тканевой инженерии роговицы, возможность прогнозирования рефракции.

Хранение лентикулы

K. Mohamed-Noriega и соавт. в своем исследовании использовали метод криоконсервации лентикулярного материала, в котором качестве криопротектора применялся раствор диметилсульфоксида. Авторы показали, что криоконсервированные лентикулы поддерживают жизнеспособность кератоцитов и общую структурную целостность коллагеновых волокон. В результате исследований авторами получены доказательства сохранности архитектоники и прозрачности лентикулы роговицы, прошедшей стадию криогенного хранения [8].

Данный протокол хранения лентикулы, описанный ранее, нашел свое применение в работах других авторов [9–12].

В дальнейшем индийские ученые модифицировали ранее существующий протокол криоконсервации лентикулы. Авторская методика – фемтосекундная интрастромальная имплантация криоконсервированной аллогенной лентикулы (Femtosecond Intrastromal Lenticular Implantation – FILI) – использовалась для коррекции 8 гиперметропических глаз и одного афакичного глаза [13].

Сингапурские ученые проводили двухэтапное исследование по применению различных сред с разным температурным режимом со сроком хранения лентикулы 48 ч и 4 нед. соответственно. Результаты показали, что лентикулы, которые хранились в растворе глицерина при –80 °C и при комнатной температуре, имели более упорядоченную структуру коллагеновых фибрилл в сравнении с лентикулой, которая хранилась в жидком азоте. Однако данный факт не приводит к значительному изменению прозрачных свойств роговицы [14].

Децеллюляризация лентикулы

В работе G.H. Yam и соавт. дана оценка различных методов децеллюляризации аллогенной лентикулы. Так, по мнению авторов, использование 0,1% додецилсульфата натрия позволяет эффективно удалить клеточный детрит из стромальной лентикулы, при этом структура 3D биоинженерной конструкции остается сохранной [15].

H. Yin и соавт. для децеллюляризации лентикулы использовали гипертонический раствор хлорида натрия и раствор ДНКазы и РНКазы. Затем две децеллюляризованные лентикулы склеивали между собой фибриновым клеем и применяли для передней послойной кератопластики [16].

В 2018 г. M.I. Huh и соавт. в своей работе показали эффективность децеллюляризации лентикулы с различной концентрацией для таких растворов, как Triton X-100, додецилсульфата натрия и трипсин-ЭДТА. Далее лентикулы промывали в гипертоническом трис-буфере, изотоническом трис-буфере и гипотоническом трис-буфере, с последующим добавлением ДНКазы и РНКазы. В результате из всех протоколов децеллюляризации растворы 0,25 и 0,5% трипсин-ЭДТА в гипотоническом трис-буфере показали самое низкое содержание ДНК, в то время как содержание гликозаминогликанов было самым высоким [17].

Имплантация лентикулы в модельных экспериментах на животных

Впервые в 2012 г. R.I. Angunawela и соавт. выполнили аутологичную трансплантацию криоконсервированной лентикулы в эксперименте на кроликах. Результаты показали, что прозрачность роговицы после повторной имплантации лентикулы постепенно улучшалась с 3-го по 28-й дни [9].

H. Liu и соавт. в эксперименте на кроликах трансплантировали лентикулу. Авторы показали, что данная процедура является выполнимой, приживление лентикулы происходило без осложнений, а регенерация нервных волокон наблюдалась уже на первом месяце послеоперационного наблюдения [18].

A. Riau и соавт. получили результаты, аналогичные исследованию R.I. Angunawela и соавт., в эксперименте на обезьянах. Авторы отмечают наступление прозрачности рого-

Для корреспонденции:
Ли Валерий Герасимович, аспирант
ORCID ID: 0000-0002-7542-3126
E-mail: inferno_03@mail.ru

вицы к 8-й неделе после операции. Кроме того, такие показатели, как толщина, рефракция и топография роговицы, были восстановлены до уровня дооперационных значений к 16-й неделе [10].

C.H. Lim и соавт. не отмечали существенных различий в тканевой реакции роговицы в ответ на имплантацию лентикулы после выполнения LASIK на роговице, ранее перенесшей процедуру Relex Smile, по сравнению с роговицей, до этого не подвергавшейся хирургическим вмешательствам [11].

Впервые имплантацию аллогенной лентикулы в эксперименте на обезьянах выполнили R. Liu и соавт. Авторы отметили, что преломляющая сила роговицы увеличилась к 6-му месяцу и составляла 82% от предполагаемой коррекции [19]. В 2017 г. J. Zhao и соавт. в эксперименте на кроликах успешно провели аллогенную трансплантацию лентикулы. По данным оптической когерентной томографии, лентикула интегрирована с окружающей тканью, а центральная толщина роговицы увеличилась на 58,75±21,58 мкм. В течение 6 мес. наблюдения отмечался стабильный процесс приживления лентикулы [20]

H. Jin и соавт. в эксперименте на обезьянах обнаружили отсутствие отторжения при аутологичной и аллогенной трансплантации материала. В дальнейшем H. Jin и соавт. впервые использовали ксенотрансплантаты из лентикул, которые хранили в глицерине при +4 °C в течение 7 дней. В группе ксенотрансплантации отмечалось увеличение уровня воспалительных маркеров в слезной жидкости, в сравнении с группой аллотрансплантации, где отмечалось снижение большинства маркеров воспаления через 1 мес. после операции. Тем не менее за весь период наблюдения (6 мес.) реакции отторжения не отмечалось ни в одной из групп [21, 22]. M. He и соавт. считают, что методика фемтосекундной лазерной эндокератофакии малого разреза с использованием ксеногенной лентикулы может стать эффективным методом в лечении миопии и кератоконуса. С точки зрения биосовместимости, при имплантации ксеногенной лентикулы фемтосекундная интрастромальная кератопластика превосходит послойную кератопластику [23, 24]. В других работах китайские ученые анализируют результаты трансплантации ксеногенных и аллогенных лентикул с различной дозой облучения: 10, 20, 50 и 100 Гр. По мнению авторов, пороговой дозой, при которой происходит инициация апоптоза кератоцитов, является рентгеновское излучение 100 Гр [25].

В другой работе, клинически ориентированной, изучались биологические свойства роговицы реципиента после интеграции лентикулы для коррекции пресбиопии в эксперименте на обезьянах. Авторы сравнивали три группы лентикул: аутологичные, децеллюляризированные ксеногенные и ксеногенные лентикулы. В качестве детергента в протоколе децеллюляризации использовали 0,1% додецилсульфат натрия. В результате было выявлено усиление центральный кривизны роговицы (значения кератометрии от 1,8 до 2,3 дптр), изменились значения Q-фактора (с –0,26 до –0,36), изменилась высота передней поверхности роговицы (с 7,7 до 9,3 мкм), существенных различий между тремя группами не отмечалось. Авторы подтвердили факт биологической совместимости аутологичных и децеллюляризированных ксеногенных групп. В одном случае отмечалось отторжение ксеногенной лентикулы [26].

В эксперименте на обезьянах Y.C. Liu и соавт. сравнивали результаты операций LASIK, Relex Smile и повторной имплантации аутологичной лентикулы для коррекции гиперметропии +2,0 и +4,0 дптр. Авторы отмечают, что в группе с повторной имплантацией лентикулы для коррекции гиперметропии (+2,00 дптр) наблюдалась более высокая тенденция к регрессу. Авторы предполагают, что регресс связан с глубиной имплантации лентикулы 160 мкм. Кроме того, повторная имплантация аутологичной лентикулы для лечения гиперметропии может быть безопасной и жизнеспособной процедурой [27, 28].

Успешные результаты опытов на животных позволили перейти с фазы доклинических экспериментов к пересадке аутологичных и аллогенных лентикул людям.

Имплантация лентикулы у людей для коррекции аметропий

Первый клинический случай имплантации нативной аллогенной лентикулы был описан K.R. Pradhan и соавт. Реципиент имел высокую степень гиперметропии из-за афакии правого глаза +12,0 sph –1,50 cyl 157 ax. Через год после операции рефракция правого глаза составила +7,5 sph –3,0 cyl 150 ax, сферэквивалент снизился до 5,52 дптр, что означало около 50% недокоррекции. Авторы связывают данный факт с изменением задней поверхности роговицы и ремоделированием эпителия роговицы после операции [29].

L. Sun и соавт. в своем исследовании подтвердили стабильность, эффективность, безопасность и предсказуемость результатов трансплантации аутологичной лентикулы для лечения гиперметропии у пациентов с миопией на одном глазу и гиперметропией в контралатеральном глазу [30]. На 9-м и 12-м месяцах наблюдения отмечалась частичная регенерация суббазального нервного сплетения [31].

L. Mastropasqua и соавт. имплантировали лентикулу в эксперименте ex vivo. Произошло значительное уплощение центральной зоны роговицы на 7,31±1,52 дптр (p=0,002). Было обнаружено, что площадь диаметра уплощения роговицы зависит от диаметра оптической зоны имплантированной лентикулы (p=0,006) [32].

В 2017 г. S. Jacob и соавт. описали технику имплантации аллогенной лентикулы, полученной по методике Relex Smile для коррекции пресбиопии (PrEsbyopic Allogenic Refractive Lenticule Inlay – PEARL). Лентикула (толщиной 61,5±3,32 мкм) была трепанирована в центре диаметром 1,0 мм и вставлена в карман под роговичный лоскут (толщиной 120 мкм) в недоминантный глаз пациентам с пресбиопией. За 6 мес. наблюдения авторы не отмечали таких по-

бочных явлений, как ночные блики и ореолы [33].

M. Moshirfar и соавт. модифицировали способ лентикулярной интрастромальной кератопластики (Lenticule Intrastromal Keratoplasty – LIKE), при данном способе под лоскут (толщиной 110 мкм) трансплантируют лентикулу. И предложили новый способ коррекции гиперметропии – микроинвазивную лентикулярную интрастромальную кератопластику (Small-incision Lenticule Intrastromal Keratoplasty – sLIKE). При этом способе лентикула вводится в стромальный карман (на глубину 120 мкм) через небольшой разрез без формирования лоскута. Авторы предполагают, что это приведет к меньшему повреждению суббазального нервного сплетения и меньшим осложнениям, связанным с лоскутом. В случае же возникновения остаточных рефракционных ошибок авторы способов LIKE и sLIKE предлагают повторно поднять лоскут и произвести абляцию стромы роговицы [34].

I.B. Damgaard и соавт. оценивали изменения роговицы в эксперименте ex vivo с учетом толщины лентикулы (95 мкм = 4,00 дптр, 150 мкм = 8,00 дптр) и глубины (110 и 160 мкм) имплантации лентикулы. Усиление передней кривизны было сопоставимо между группами 4,00 и 8,00 дптр ($p>0,141$), но более выражено при глубине имплантации 110 мкм ($p<0,038$). Более значительное уплощение задней кривизны наблюдалось после имплантации лентикулы 8,00 дптр ($p<0,002$). Кроме того, авторы обнаружили, что только 78 и 50% предполагаемой коррекции были достигнуты при глубине имплантации 110 и 160 мкм соответственно. Авторы пришли к выводу, что сила имплантированной лентикулы должна быть больше, чем предполагаемая коррекция, и должна соответствовать глубине имплантации лентикулы [35]. Однако авторы другого исследования предложили формулу для прогнозирования рефракционного результата, согласно которой мощность имплантированной лентикулы должна быть ниже, чем предполагаемая коррекция [36].

Терапевтические возможности применения лентикулы

В 2015 г. S. Ganesh и соавт. предоставили данные применения методики фемтосекундной интрастромальной имплантации лентикулы (Femtosecond Intrastromal Lenticular Implantation – FILI) в комбинации с методикой акселерированного кросслинкинга у пациентов с прогрессирующим кератоконусом и тонкой роговицей [37, 38]. M.S. Sachdev и соавт. в своем исследовании трансплантировали лентикулу на деэпителизированную роговицу и провели методику кросслинкинга роговицы по «Дрезденскому протоколу» [39].

В 2018 г. Y. Zhou и соавт. модифицировали ранее описанную методику и подтвердили безопасность ее проведения [40]. Недавние исследования на кроликах продемонстрировали, что кросслинкинг-обработанная лентикула (ее диаметр составлял 2,5 мм) усиливает переднюю кривизну и стабилизирует рефракцию роговицы через 8 нед. [41].

Также имеются данные о применении лентикулы в случае для пост-LASIK-индуцированной гиперметропии и астигматизма высокой степени [42] в случае с рецидивирующим птеригиумом [43], при прогрессирующем кератоконусе [44–46], для лечения лимбального дермоида [47, 48], микроперфорациях и макроперфорациях роговицы [49, 50], в случае кератэктазии после LASIK [51]. Есть сведения применения лентикулы в педиатрической практике для лечения перфорации роговицы как вторичного осложнения блефарокератоконъюнктивита, вызванного демодексом [52]. Описан случай успешной имплантации аутологичной лентикулы в сочетании с фоторефрактивной кератэктомией для лечения осложнений после LASIK [53]. Ряд исследователей сообщили о применении лентикулярного материала в качестве пластыря при буллезной кератопатии и при осложнениях, связанных с дренажной трубкой клапанного устройства Ахмеда, в хирургии глаукомы [54, 55].

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

J. Gu и соавт. в эксперименте на кроликах успешно трансплантировали децеллюляризированную лентикулу в субретинальное пространство [56].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в литературе имеется достаточно данных о применении лентикулы, полученной по технологии Relex Smile, в офтальмологии. Тем не менее существующие протоколы хранения, децеллюляризации лентикулы, данные для прогнозирования рефракционного эффекта с целью коррекции аметропий не лишены недостатков и до конца не изучены. В связи с этим актуальной проблемой остается поиск эффективных методов и технологий заготовки, хранения аллогенных лентикул и прогнозирования клинического эффекта при их имплантации.

Вклад авторов в работу:
С.В. Костенев: существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, написание текста, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.
С.А. Борзенок: существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, написание текста, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.
В.Г. Ли: существенный вклад в концепцию и дизайн работы, сбор, анализ и обработка материала, написание текста, редактирование, окончательное утверждение версии, подлежащей публикации.
П.О. Носиров: сбор, анализ и обработка материала, статистическая обработка данных, редактирование, окончательное утверждение материала, подлежащего публикации.

Author's contribution:
S.V. Kostenev: substantial contributions to the conception and design of the work, acquisition, analysis and processing of the material, writing text, editing, final approval of the version to be published.
S.A. Borzenok: substantial contributions to the conception and design of the work, acquisition, analysis and processing of the material, writing text, editing, final approval of the version to be published.
V.G. Lee: substantial contributions to the conception and design of the work, acquisition, analysis and processing of the material, writing text, editing, final approval of the version to be published.
P.O. Nosirov: collection, analysis and processing of the material, statistical data processing, editing, final approval of the material to be published.

Финансирование: Авторы не получали конкретный грант на это исследование от какого-либо финансирующего агентства в государственном, коммерческом и некоммерческом секторах.
Авторство: Все авторы подтверждают, что они соответствуют действующим критериям авторства ICMJE.
Согласие пациента на публикацию: Письменного согласия на публикацию этого материала получено не было. Он не содержит никакой личной идентифицирующей информации.
Конфликт интересов: Отсутствует.
ORCID ID: Ли В.Г. 0000-0002-7542-3126

Funding: The authors have not declared a specific grant for this research from any funding agency in the public, commercial or not-for-profit sectors.
Authorship: All authors confirm that they meet the current ICMJE authorship criteria.

Patient consent for publication: No written consent was obtained for the publication of this material. It does not contain any personally identifying information.
Conflict of interest: There is no conflict of interest.
ORCID ID: Lee V.G. 0000-0002-7542-3126

ЛИТЕРАТУРА

1. Santhiago MR, Kara-Junior N, Waring GO. 4th Microkeratome versus femtosecond flaps: accuracy and complications. Curr Opin Ophthalmol. 2014;25(4): 270–274. doi: 10.1097/ICU.0000000000000070
2. Sekundo W, Kunert KS, 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(3): 335–339. doi: 10.1136/bjo.2009.174284
3. McColgan K. Corneal transplant surgery. J Perioper Pract. 2009;19(2): 51–54. doi: 10.1177/175045890901900201
4. Nishida K. Tissue engineering of the cornea. Cornea. 2003;22(7 Suppl): S28–34. doi: 10.1097/00003226-200310001-00005
5. Sun MT, O'Connor AJ, Wood J, et al. Tissue engineering in ophthalmology: implications for eyelid reconstruction. Ophthalmic Plast Reconstr Surg. 2017;33(3): 157–162. doi: 10.1097/IOP.0000000000000792
6. Badylak SF, Taylor D, Uygun K. Whole-organ tissue engineering: decellularization and recellularization of three-dimensional matrix scaffolds. Annu Rev Biomed Eng. 2011;13: 27–53. doi: 10.1146/annurev-bioeng-071910-124743
7. Porzionato A, Stocco E, Barbon S, et al. Tissue-engineered grafts from human decellularized extracellular matrices: a systematic review and future perspectives. Int J Mol Sci. 2018;19(12): 4117. doi: 10.3390/ijms19124117
8. Mohamed-Noriega K, Toh KP, Poh R, et al. Cornea lenticule viability and structural integrity after refractive lenticule extraction (ReLEx) and cryopreservation. Mol Vis. 2011;17: 3437–3449.
9. Angunawela RI, Riau AK, Chaurasia SS, et al. Refractive lenticule re-implantation after myopic ReLEx: a feasibility study of stromal restoration after refractive surgery in a rabbit model. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2012;53(8): 4975–4985. doi: 10.1167/iovs.12-10170
10. Riau AK, Angunawela RI, Chaurasia SS, et al. Reversible femtosecond laser-assisted myopia correction: a non-human primate study of lenticule re-implantation after refractive lenticule extraction. PLoS One. 2013;8(6): e67058. doi: 10.1371/journal.pone.0067058
11. Lim CH, Riau AK, Lwin NC, et al. LASIK following small incision lenticule extraction (SMILE) lenticule re-implantation: a feasibility study of a novel method for treatment of presbyopia. PLoS One. 2013;8(12): e83046. doi: 10.1371/journal.pone.0083046
12. Sun Y, Zhang T, Zhou Y, et al. Reversible femtosecond laser-assisted endokeratophakia using cryopreserved allogeneic corneal lenticule. J Refract Surg. 2016;32(8): 569–576. doi: 10.3928/1081597X-20160523-02
13. Ganesh S, Brar S, Rao PA. Cryopreservation of extracted corneal lenticules after small incision lenticule extraction for potential use in human subjects. Cornea. 2014;33(12): 1355–1362. doi: 10.1097/ICO.0000000000000276
14. Liu YC, Williams GP, George BL, et al. Corneal lenticule storage before reimplantation. Mol Vis. 2017;23: 753–764. Available from: http://www.molvis.org/molvis/v23/753/ [Accessed 18th December 2019].
15. Yam GH, Yusoff NZ, Goh TW, et al. Decellularization of human stromal refractive lenticules for corneal tissue engineering. Sci Rep. 2016;6: 26339. doi: 10.1038/srep26339
16. Yin H, Qiu P, Wu F, et al. Construction of a corneal stromal equivalent with SMILE-derived lenticules and fibrin glue. Sci Rep. 2016;6: 33848. doi: 10.1038/srep33848
17. Huh MI, Lee KP, Kim J, et al. Generation of femtosecond laser-cut decellularized corneal lenticule using hypotonic trypsin-EDTA solution for corneal tissue engineering. J Ophthalmol. 2018;4: 2590536. doi: 10.1155/2018/2590536
18. Liu H, Zhu W, Jiang AC, et al. Femtosecond laser lenticule transplantation in rabbit cornea: experimental study. J Refract Surg. 2012;28(12): 907–911. doi: 10.3928/1081597X-20121115-05
19. Liu R, Zhao J, Xu Y, et al. Femtosecond laser-assisted corneal small incision allogenic intrastromal lenticule implantation in monkeys: a pilot study. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2015;56(6): 3715–3720. doi: 10.1167/iovs.14-15296
20. Zhao J, Shen Y, Tian M, et al. Corneal lenticule allotransplantation after femtosecond laser small incision lenticule extraction in rabbits. Cornea. 2017;36(2): 222–228. doi: 10.1097/ICO.0000000000001076
21. Liu LP, Wang Y, He M, et al. Preliminary investigation femtosecond laser-assisted refractive lenticule transplantation in rhesus monkeys. J Sunyat-sen Univ (Medical Sciences). 2015;36: 449–455.
22. Jin H, Liu L, Ding H, et al. Comparison of femtosecond laser-assisted corneal intrastromal xenotransplantation and the allotransplantation in rhesus monkeys. BMC Ophthalmol. 2017;17(1): 202. doi: 10.1186/s12886-017-0595-z
23. He M, Jin H, He H, et al. Femtosecond laser-assisted small incision endokeratophakia using a xenogeneic lenticule in rhesus monkeys. Cornea. 2018;37(3): 354–361. doi: 10.1097/ICO.0000000000001470
24. Jin H, He M, Wang W, et al. Comparison of small-incision femtosecond laser-assisted intrastromal keratoplasty and lamellar keratoplasty in rhesus monkeys using xenogenic corneal lamellae. Curr Mol Med. 2018;18(6): 365–375. doi: 10.2174/1566524018666181109120023
25. Jin H, Liu L, Ding H, et al. Small incision femtosecond laser-assisted X-ray-irradiated corneal intrastromal xenotransplantation in rhesus monkeys: a preliminary study. Curr Mol Med. 2018;18(9): 612–621. doi: 10.2174/1566524019666190129123935
26. Liu YC, Teo EPW, Ang HP, et al. Biological corneal inlay for presbyopia derived from small incision lenticule extraction (SMILE). Sci Rep. 2018;8(1): 1831. doi: Available from: 10.1038/s41598-018-20267-7
27. Williams GP, Wu B, Liu YC, et al. Hyperopic refractive correction by LASIK, SMILE or lenticule reimplantation in a non-human primate model. PLoS One. 2018;13(3): e0194209. doi: 10.1371/journal.pone.0194209
28. Liu YC, Wen J, Teo EPW, et al. Higher-order-aberrations following hyperopia treatment: small incision lenticule extraction, laser-assisted in situ keratomileusis and lenticule implantation. Transl Vis Sci Technol. 2018;7(2): 15. doi: 10.1167/tvst.7.2.15
29. Pradhan KR, Reinstein DZ, Carp GI, et al. Femtosecond laser-assisted keyhole endokeratophakia: correction of hyperopia by implantation of an allogeneic lenticule obtained by SMILE from a myopic donor. J Refract Surg. 2013;29(11): 777–782. doi: 10.3928/1081597X-20131021-07
30. Sun L, Yao P, Li M, et al. The safety and predictability of implanting autologous lenticule obtained by SMILE for hyperopia. J Refract Surg. 2015;31(6): 374–379. doi: 10.3928/1081597X-20150521-03
31. Li M, Li M, Sun L, et al. In vivo confocal microscopic investigation of the cornea after autologous implantation of lenticules obtained through small incision lenticule extraction for treatment of hyperopia. Clin Exp Optom. 2018;101(1): 38–45. doi: 10.1111/cxo.12595
32. Mastropasqua L, Nubile M. Corneal thickening and central flattening induced by femtosecond laser hyperopic-shaped intrastromal lenticule implantation. Int Ophthalmol. 2017;37(4): 893–904. doi: 10.1007/s10792-016-0349-6
33. Jacob S, Kumar DA, Agarwal A, et al. Preliminary evidence of successful near vision enhancement with a new technique: presbyopic allogenic refractive lenticule (PEARL) corneal inlay using a SMILE lenticule. J Refract Surg. 2017;33(4): 224–229. doi: 10.3928/1081597X-20170111-03
34. Moshirfar M, Shah TJ, Masud M, et al. A modified small-incision lenticule intrastromal keratoplasty (sLIKE) for the correction of high hyperopia: a description of a new surgical technique and comparison to lenticule intrastromal keratoplasty (LIKE). Med Hypothesis Discov Innov Ophthalmol. 2018;7(2): 48–56.
35. Damgaard IB, Ivarsen A, Hjortdal J. Biological lenticule implantation for correction of hyperopia: an ex vivo study in human corneas. J Refract Surg. 2018;34(4): 245–252. doi: 10.3928/1081597X-20180206-01
36. Li M, Li M, Sun L, et al. Predictive formula for refraction of autologous lenticule implantation for hyperopia correction. J Refract Surg. 2017;33(12): 827–833. doi: 10.3928/1081597X-20171016-01
37. Ganesh S, Brar S. Femtosecond intrastromal lenticular implantation combined with accelerated collagen cross-linking for the treatment of keratoconus: initial clinical result in 6 eyes. Cornea. 2015;34(10):1331-1139. doi: 10.1097/ICO.0000000000000539
38. Ganesh S, Brar S. Clinical outcomes of small incision lenticule extraction with accelerated cross-linking (ReLEx SMILE Xtra) in patients with thin corneas and borderline topography. J Ophthalmol. 2015;2015: 263412. doi: 10.1155/2015/263412
39. Sachdev MS, Gupta D, Sachdev G, et al. Tailored stromal expansion with a refractive lenticule for crosslinking the ultrathin cornea. J Cataract Refract Surg. 2015;41(5): 918–923. doi: 10.1016/j.jcrs.2015.04.007
40. Zhou Y, Liu M, Zhang T, et al. In vivo confocal laser microscopy of morphologic changes after small incision lenticule extraction with accelerated cross-linking (SMILE Xtra) in patients with thin corneas and high myopia. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol. 2018;256(1): 199–207. doi: 10.1007/s00417-017-3811-x
41. Damgaard IB, Liu YC, Riau AK, et al. Corneal remodelling and topography following biological inlay implantation with combined crosslinking in a rabbit model. Sci Rep. 2019;9(1): 4479. doi: 10.1038/s41598-019-39617-0
42. Lazaridis A, Reinstein DZ, Archer TJ, et al. Refractive lenticule transplantation for correction of iatrogenic hyperopia and high astigmatism after LASIK. J Refract Surg. 2016;32(11): 780–786. doi: 10.3928/1081597X-20160726-01
43. Pant OP, Hao JL, Zhou DD, et al. A novel case using femtosecond laser-acquired lenticule for recurrent pterygium: case report and literature review. J Int Med Res. 2018;46(6): 2474–2480. doi: 10.1177/0300060518765303
44. Jin H, He M, Liu H, et al. Small-incision femtosecond laser-assisted intracorneal concave lenticule implantation in patients with keratoconus. Cornea. 2019;38(4): 446–453. doi: 10.1097/ICO.0000000000001877
45. Zhao J, Shang J, Zhao Y, et al. Epikeratophakia using small-incision lenticule extraction lenticule addition combined with corneal crosslinking for keratoconus. J Cataract Refract Surg. 2019;45(8): 1191–1194. doi: 10.1016/j.jcrs.2019.03.010
46. Pradhan KR, Reinstein DZ, Vida RS, et al. Femtosecond laser-assisted small incision sutureless intrastromal lamellar keratoplasty (SILK) for corneal transplantation in keratoconus. J Refract Surg. 2019;35(10): 663–671. doi: 10.3928/1081597X-20190826-01
47. Jacob S, Narasimhan S, Agarwal A, et al. Combined interface tattooing and fibrin glue-assisted sutureless corneal resurfacing with donor lenticule obtained from small-incision lenticule extraction for limbal dermoid. J Cataract Refract Surg. 2017;43(11): 1371–1375. doi: 10.1016/j.jcrs.2017.09.021
48. Pant OP, Hao JL, Zhou DD, et al. Lamellar keratoplasty using femtosecond laser intrastromal lenticule for limbal dermoid: case report and literature review. J Int Med Res. 2018;46(11): 4753–4759. doi: 10.1177/0300060518790874
49. Bhandari V, Ganesh S, Brar S, et al. Application of the SMILE-derived glued lenticule patch graft in microperforations and partial-thickness corneal defects. Cornea. 2016;35(3): 408–412. doi: 10.1097/ICO.0000000000000741
50. Jacob S, Dhawan P, Tsatsos M, et al. Fibrin glue-assisted closure of macroperforation in predescemetic deep anterior lamellar keratoplasty with a donor obtained from small incision lenticule extraction. Cornea. 2019;38(6): 775–779. doi: 10.1097/ICO.0000000000001918
51. Li M, Zhao F, Li M, et al. Treatment of corneal ectasia by implantation of an allogenic corneal lenticule. J Refract Surg. 2018;34(5): 347–350. doi: 10.3928/1081597X-20180323-01
52. Pant OP, Hao JL, Zhou DD, et al. Tectonic keratoplasty using femtosecond laser lenticule in pediatric patients with corneal perforation secondary to blepharokeratoconjunctivitis: a case report and literature review. J Int Med Res. 2019;47(5): 2312–2320. doi: 10.1177/0300060519841163
53. Zhao J, Zhao F, Huang J, et al. Two-year outcome of a patient treated with phototherapeutic keratectomy and autologous SMILE lenticule transplantation for flap-related complications following LASIK. J Refract Surg. 2018;34(4): 281–285. doi: 10.3928/1081597X-20180130-01
54. Song YJ, Kim S, Yoon GJ. Case series: use of stromal lenticule as patch graft. Am J Ophthalmol Case Rep. 2018;12: 79–82. doi: 10.1016/j.ajoc.2018.09.009
55. Wang Y, Li X, Huang W, Liu J, et al. Partial thickness cornea tissue from small incision lenticule extraction: a novel patch graft in glaucoma drainage implant surgery. Medicine (Baltimore). 2019;98(9): e14500. doi: 10.1097/MD.0000000000014500
56. Gu J, Wang Y, Cui Z, et al. The construction of retinal pigment epithelium sheets with enhanced characteristics and cilium assembly using iPS conditioned medium and small incision lenticule extraction derived lenticules. Acta Biomater. 2019;92: 115–131. doi: 10.1016/j.actbio.2019.05.017

Поступила: 18.12.2020
Переработана: 12.01.2021
Принята к печати: 02.02.2021

Originally received: 18.12.2020
Final revision: 12.01.2021
Accepted: 02.02.2021