

# Визуализация роговицы, передней камеры и хрусталика в роговичной и рефракционной хирургии

Timo Eppig, Stephanie Mäurer, Loay Daas, Berthold Seitz и Achim Langenbucher

## Аннотация

ОКТ переднего сегмента (AS-OCT) - это технология оптической и бесконтактной визуализации, которая имеет множество областей применения для визуализации роговицы, передней камеры и хрусталика. В этой главе мы представим некоторые области применения AS-OCT в роговичной, катарактной и рефракционной хирургии.

Мы подтвердим потенциал AS-OCT несколькими клиническими примерами, включая визуализацию роговицы (кератоконус, кератопластика и рефракционная хирургия) и интраокулярной линзы после рефракционной хирургии. AS-OCT обладает особым потенциалом для визуализации роговицы в случае отека роговицы и для послеоперационного мониторинга после эндотелиальной кератопластики десцеметовой оболочки (DMEK). В качестве еще одной многообещающей области применения AS-OCT можно назвать послеоперационное наблюдение купола колламерной линзы в задней камере и измерение угла передней камеры.

**Ключевые слова:** передний сегмент, катаракта, рефракционная хирургия, роговица, кератопластика, кератоконус, внутрироговичные кольцевые сегменты, LASIK, факичные интраокулярные линзы.

## 1. Введение

С развитием в конце 1980-х годов оптической когерентной томографии (ОКТ) она нашла многочисленные применения не только в офтальмологии. Первыми офтальмологическими применениями были томографические изображения ультраструктуры сетчатки человека, особенно центральной ямки. Сначала ОКТ позволила провести томографическую визуализацию слоев сетчатки, что позволило выявить субретинальные изменения и с высокой точностью оценить изменения толщины слоя нервных волокон сетчатки.

Длина волны видимого и ближнего инфракрасного диапазонов, используемая в устройствах ОКТ заднего сегмента, обеспечивала высокую пропускную

способность в водянистом материале и высокую отражательную способность в структурах сетчатки. В то время технология визуализации Шаймпфлюга позволяла получать томографические изображения переднего сегмента, включая хрусталик, с высоким разрешением [1]. Биометрия переднего сегмента, например, измерение толщины роговицы (пахиметрия) и глубины передней камеры для планирования операций рефракционной хирургии роговицы или расчета интраокулярных линз (ИОЛ), могла быть выполнена только с помощью ультразвуковой биомикроскопии или визуализации Шаймпфлюга [2, 3]. В 1990-х годах ведущие исследовательские группы по технологии ОКТ представили первые результаты в области визуализации переднего сегмента и биометрии [4-6].

Специальные ОКТ-устройства для томографической визуализации переднего сегмента (AS-OCT) не были доступны до тех пор, пока компания Zeiss Meditec не выпустила свой томограф Visante™ 1000 OCT, основанный на технологии ОКТ того времени [3]. В 2009 году компания Tomey выпустила томограф Casia SS-1000 на основе swept-source, который также был предназначен для визуализации переднего сегмента. Производители устройств для ОКТ заднего сегмента вскоре представили дополнительные объективы, позволяющие получать также томографическое изображение структур переднего сегмента. За последнее десятилетие технология ОКТ нашла применения во множестве областей, включая визуализацию роговицы, рефракционную хирургию, визуализацию хрусталика, хирургию глаукомы и катаракты. В этой главе мы представим и обсудим применение технологии ОКТ для визуализации переднего сегмента человеческого глаза, включая общую визуализацию морфологии переднего сегмента, а также ее применение в хирургии роговицы и переднего сегмента.

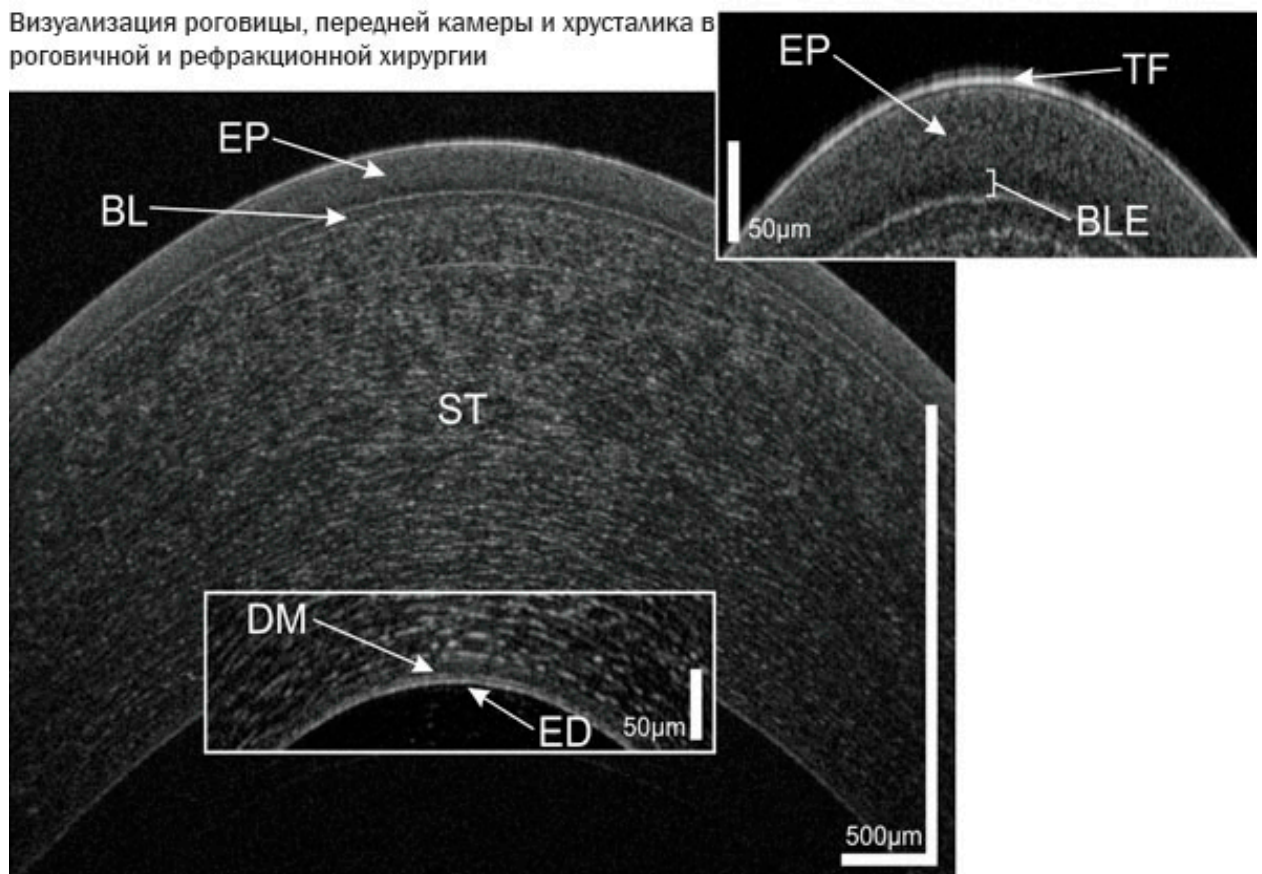
## 2. Роговица

Роговица является самой внешней структурой человеческого глаза и составляет около 2/3 (=48 D) от общей оптической силы глаза. Структуру роговицы можно разделить на шесть слоев, причем эпителий (EP) является наружным слоем, покрывающим слой Боумена (BL). Эпителий покрыт слезной пленкой и состоит из шести слоев эпителиальных клеток. Его средняя толщина составляет около 50 мкм. Слой Боумена представляет собой коллагеновый бесклеточный нерегенерирующий слой, отделяющий слой эпителиальных клеток от стромы. Строма покрывает 85% объема роговицы человека с общей толщиной около 350-450 мкм [7]. Задней границей стромы является десцеметова оболочка (DM), которая имеет толщину около 10-15 мкм [7]. DM является базальной мембраной для эндотелиальных клеток, которые располагаются одиночным слоем гексагональных эндотелиальных клеток толщиной около 4,5 мкм. Дюа с соавторами [7] обнаружили перед десцеметовой оболочкой дополнительный слой толщиной 10-15 мкм, который назвали слоем Дюа (DL). Различные слои роговицы человека можно визуализировать in vivo с

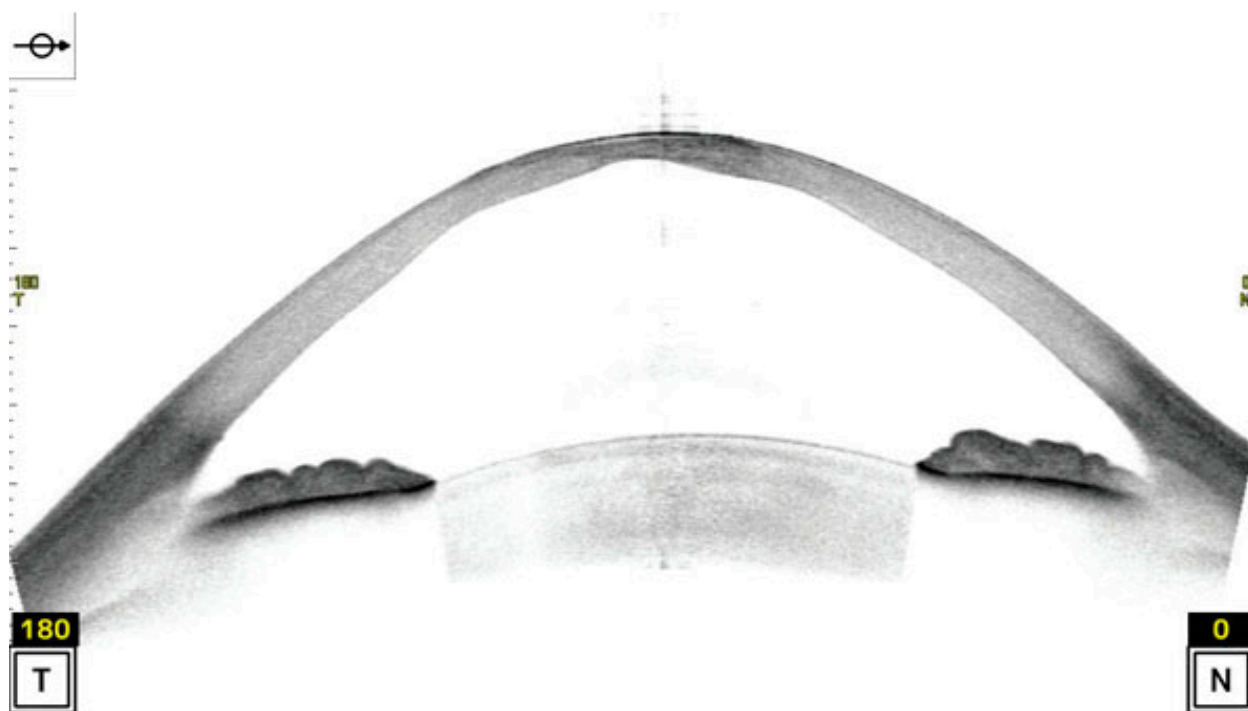
помощью специализированных ОКТ-систем сверхвысокого разрешения, как показано Веркмайстером с соавторами [8] (Рисунок 1).

## 2.1. Кератоконус

Кератоконус (КК) - это заболевание роговицы, характеризующееся прогрессирующим увеличением и выпячиванием рельефа роговицы, сопровождающимся центральным или парацентральным истончением (Рисунок 2). Кератоконус является двусторонним заболеванием и часто проявляется в течение второго-третьего десятилетия жизни. Первичный диагноз подтверждается топографией и томографией роговицы, которые могут быть выполнены с помощью AS-OCT. AS-OCT помогает в раннем выявлении и мониторинге прогрессирования заболевания и выборе вариантов лечения в зависимости от стадии заболевания.



**Рисунок 1.** UHR-OCT томограмма центральной и парацентральной зоны роговицы 38-летнего здорового мужчины. TF - слезная пленка; EP - эпителий; BLE - базальный слой эпителия; BL - слой Боумана; ST - строма роговицы; DM - десцеметова оболочка; ED - эндотелий. Перепечатано с разрешения Веркмайстера с соавторами [8], © Американское оптическое общество.

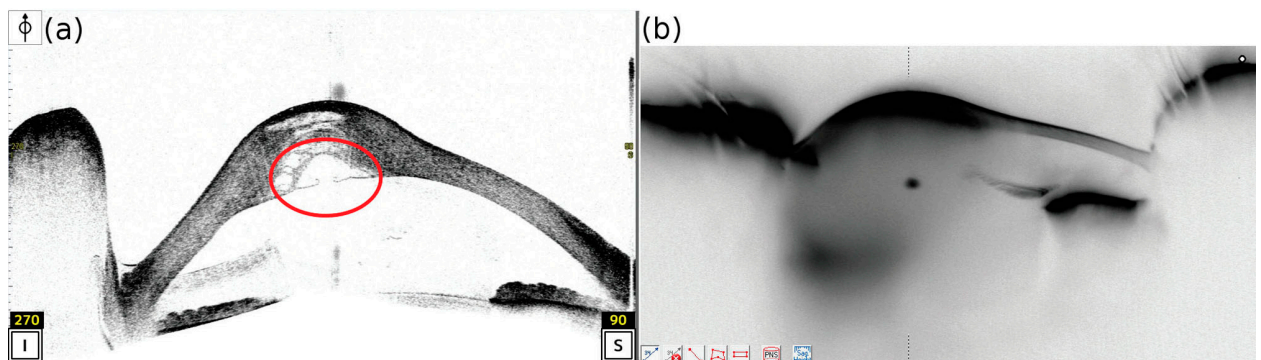


**Рисунок 2.** Горизонтальное изображение среза глаза с кератоконусом, особенно заметным на задней поверхности роговицы. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

Высокая достоверность измерений толщины роговицы делает AS-OCT полезным инструментом для мониторинга изменений толщины роговицы, однако измерения нельзя использовать взаимозаменяемо с другими методами, такими как визуализация Шаймпфлюга [9-11]. Шредер с соавторами показали, что технология ASOCT обеспечивает высокую повторяемость при измерениях толщины роговицы у здоровых пациентов. Они также показали, что измерение задней поверхности было более надежным, чем при использовании технологии Шаймпфлюга [11].

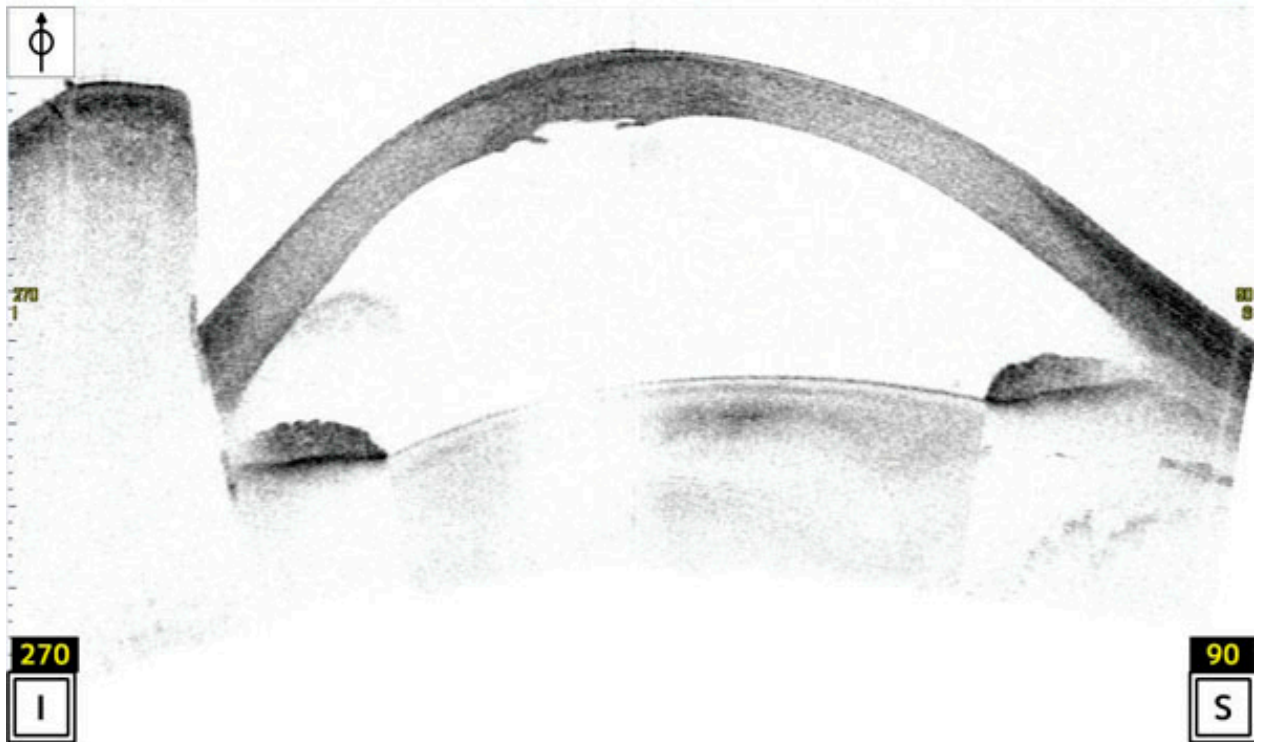
Для раннего выявления кератоконуса были предложены новые методы, такие как ОКТ роговицы и топографическое картирование EP и BL [12-15]. Однако при этом требуется технология ОКТ с высоким разрешением для измерения EP и BL с достаточной точностью. На поздних стадиях кератоконуса DM может разрываться, позволяя водянистой влаге проникать в строму. Эта ситуация также известна как острый кератоконус, для которого характерны отек и помутнение роговицы (гидропс). Отек ограничивает видимость структур в передней камере. Развитие разрыва десцеметовой оболочки может отличаться у разных пациентов, но AS-OCT способна проникать через отек роговицы, позволяя врачу определить местонахождение разрыва десцеметовой оболочки (Рисунок 3). Применение

технологии Шаймпфлюга в этих случаях ограничено из-за повышенного рассеяния света. После уменьшения отека разрыв десцеметовой оболочки обычно рубцуется, что влияет на остроту зрения пациента. Крайним терапевтическим выбором будет проникающая кератопластика (ПК). Однако, с точки зрения хирурга, до проведения процедуры ПК отек должен рассосаться [16]. AS-OCT является идеальным методом для определения стадии заболевания и регистрации состояния гидропса роговицы (Рисунок 4), чтобы выбрать момент, когда можно выполнить операцию ПК [17]. Чтобы помочь отеку рассосаться и DM снова закрепиться на строме, можно использовать швы перед десцеметовой оболочкой. То есть, гидропс роговицы зашивают перпендикулярно разрыву DM [18]. Закрепление DM поддерживается внутрикамерным введением пузырька воздуха [18]. Несмотря на нарушение проницаемости передней камеры, AS-OCT позволяет получить практически беспрепятственное томографическое изображение передней камеры, включая визуализацию разрыва DM, что облегчает планирование наложения швов перед операцией [18]. На ранних стадиях КС, когда DM не затронута и рубцы образовались только в строме, может быть полезна глубокая передняя послойная кератопластика (DALK). В этом случае трансплантируется только строма (без DM). AS-OCT может помочь визуализировать рубцы перед десцеметовой оболочкой, чтобы проверить пригодность пациента к DALK. Была доказана полезность интраоперационной AS-OCT для анализа полного удаления больной стромы и хорошей интеграции трансплантата в ткань хозяина [19, 20]. В послеоперационном наблюдении AS-OCT снова будет полезной для проверки адгезии трансплантата к DM хозяина или визуализации DM и передней камеры, если поле зрения ограничено из-за повышенного рассеяния света, вызванного отеком роговицы (Рисунок 5). Опять же, ОКТ позволяет детально получить томографический обзор соединения трансплантат-хозяин, на котором обычно имеет место большое рассеяние света.

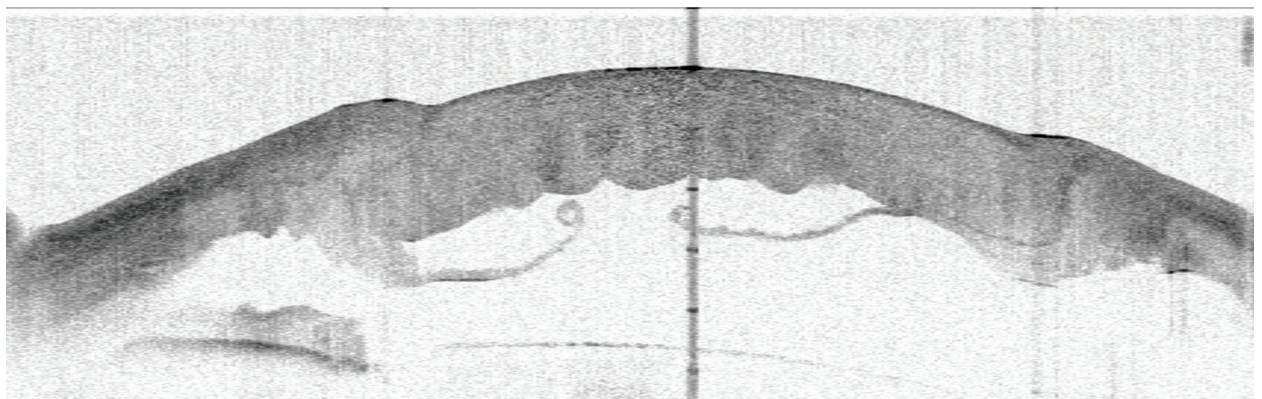


**Рисунок 3.** Глаз 25-летнего пациента с острым кератоконусом (гидропс роговицы). (а) Изображение AS-OCT (Casia 2, Tomey Corp., Нагоя, Япония) показывает степень отека роговицы и место разрыва десцеметовой оболочки.

На десцеметовой оболочке хорошо видны валики, что указывает на ее деформацию. (b) Визуализация Шаймпфлюга (Pentacam® HR, Oculus Optikgerate GmbH, Вецлар) ограничена и не показывает переднюю камеру из-за повышенного рассеяния света.



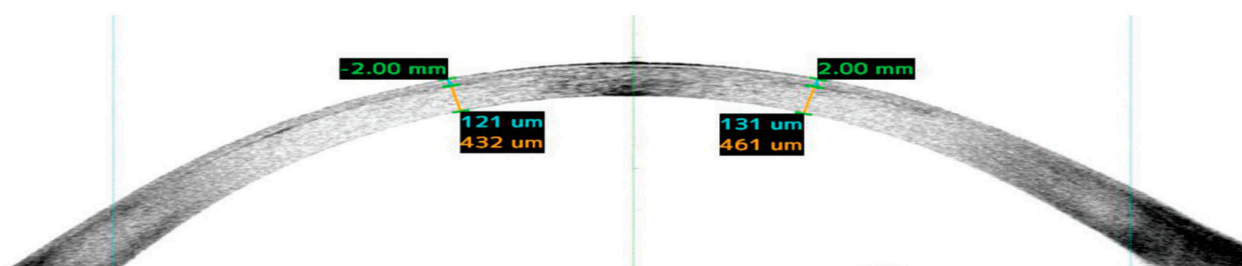
**Рисунок 4.** Глаз 25-летнего пациента через 3 месяца после лечения острого кератоконуса (Рисунок 3) швами Мурайна и введением воздушного пузырька в переднюю камеру. Широкий отек роговицы исчез, остался центральный рубец, включая заднюю поверхность. Помутнение все еще присутствует, видимое как более темная строма в центре. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).



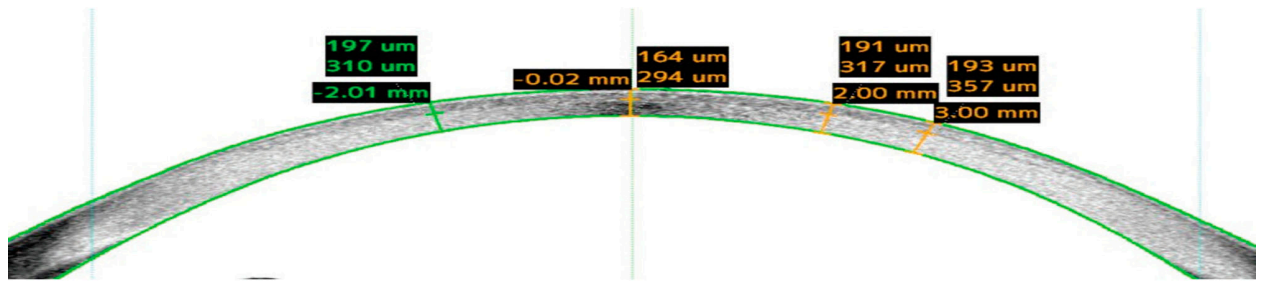
**Рисунок 5.** Разрыв десцеметовой оболочки во время операции DALK с большим отеком полнослойного трансплантата. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia SS-1000 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

## 2.2. Рефракционная хирургия

Высокое осевое разрешение AS-OCT и возможность обнаружения небольших изменений в отраженном свете являются идеальными предпосылками для ее применения в рефракционной хирургии роговицы. AS-OCT способна визуализировать разрезы, рубцы и лоскуты роговицы, созданные лазерным кератомилезом in-situ (LASIK). Ее можно использовать в качестве диагностического инструмента для измерения до- и послеоперационного изменения толщины роговицы, а также для контроля толщины и качества лоскута. На Рисунке 6 показан глаз после операции LASIK с использованием фемтосекундного лазера (fs-LASIK) с толщиной лоскута 120 мкм. На Рисунке 7 показан глаз с лоскутом, созданным операцией LASIK с использованием микрокератома, через 18 лет после операции, с толщиной остаточного стромального слоя около 300 мкм. AS-OCT также может помочь в выявлении причин эктазии роговицы после LASIK, как показано на Рисунке 8, где заметно несбалансированное соотношение толщины лоскута и стромального слоя и слишком тонкий остаточный стромальный слой. Новые методы, такие как удаление линтикулы через малый разрез (SMILE), также можно визуализировать с помощью AS-OCT [21]. Было показано, что интраоперационная AS-OCT полезна в операциях SMILE для визуализации линтикулы при осложнениях [22, 23].



**Рисунок 6.** Правый глаз пациента после операции LASIK с использованием фемтосекундного лазера. Толщина лоскута около 120 мкм измерена с помощью AS-OCT (Casia 2, Tomey Corp., Нагоя, Япония).

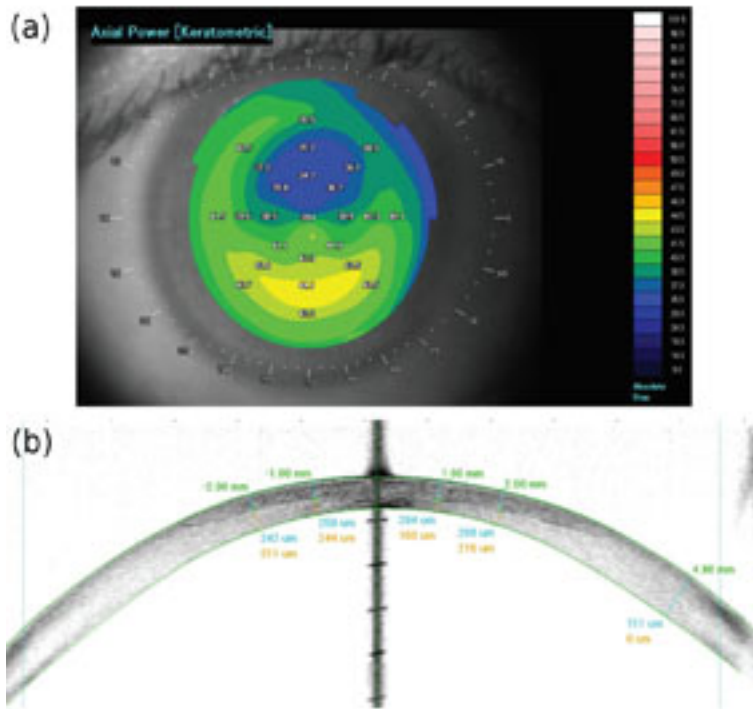


**Рисунок 7.** Левый глаз 39-летнего мужчины с лоскутом, созданным LASIK с использованием микрокератома, который все еще виден через 18 лет после операции. Указанные значения толщины разделены на толщину лоскута и толщину стромы. Остаточный стромальный слой составляет около 300 мкм. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

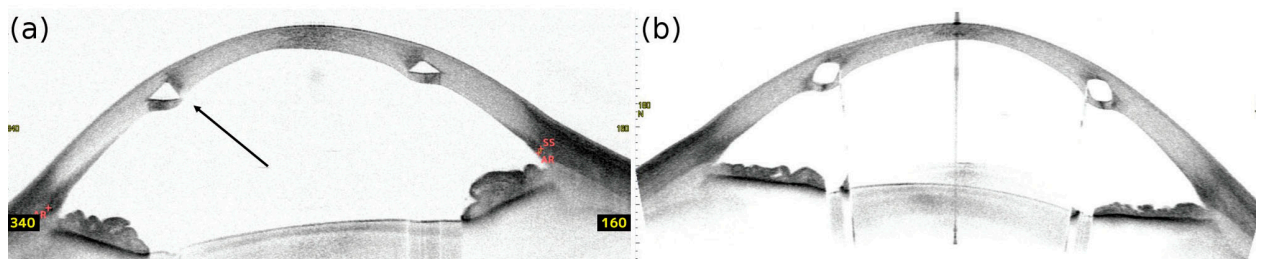
Внутрироговичные кольцевые сегменты (ICRS) служат возможностью снижения преломляющей способности роговицы при кератоконусе, если в оптическом центре нет рубцов. Для этого в строме подготавливают круглый туннель, в который имплантируют пластиковое кольцо (кольца). Туннель может быть подготовлен механически или с использованием фемтосекундного лазера. Однако Монтейро с соавторами с помощью AS-OCT показали, что подготовка туннеля с использованием фемтосекундного лазера более предсказуема, чем подготовка туннеля вручную [24]. В настоящее время на рынке представлены различные модели ICRS с различной геометрией сечения, толщиной и длиной дуги. Толщина, длина дуги и место имплантации обычно определяются запатентованными номограммами [25]. В послеоперационном наблюдении ICRS, AS-OCT полезна для исследования правильного расположения кольцевых сегментов, особенно для измерения расстояния до DM и/или BL и эпителия [26]. В этих случаях пластиковые кольца в роговице будут создавать артефакты, видимые в виде ярких полос, параллельных линии обзора. Структуры, лежащие за этими кольцами, подвержены искажениям из-за изменения коэффициента преломления, что в настоящее время не может быть интерпретировано клиническим программным обеспечением AS-OCT. На Рисунке 9 показан глаз с внутрироговичными кольцевыми сегментами для лечения кератоконуса. Из-за искажения надежное измерение толщины за этими структурами не представляется возможным. Однако AS-OCT полезна для отслеживания относительных изменений или смещений ICRS во времени. Если пациенту устанавливают имплантат роговицы со стенопеической целью (KAMRA®, AcuFocus Inc., Ирвин, США), центрирование и имплантация имплантата под лоскутом, созданным фемтосекундным лазером, имеют решающее значение и должны контролироваться с помощью ОКТ-визуализации. Из-за



очень заметного на центральном ОКТ-изображении рефлекса Пуркинье легко выполнить оценку правильного центрирования имплантата КАМРА®. Однако поглощение света имплантатом со стенопеической щелью скрывает любые структуры, лежащие за ним (Рисунок 10).



**Рисунок 8.** (a) AS-OCT-топография роговицы 44-летнего пациента через несколько лет после операции LASIK. Топография показывает децентрированную абляцию и позднее начало эктазии роговицы. (b) Хорошо виден лоскут, а остаточная толщина слоя не превышает 200 мкм. Изображения получены с помощью AS-OCT Casia SS-1000 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

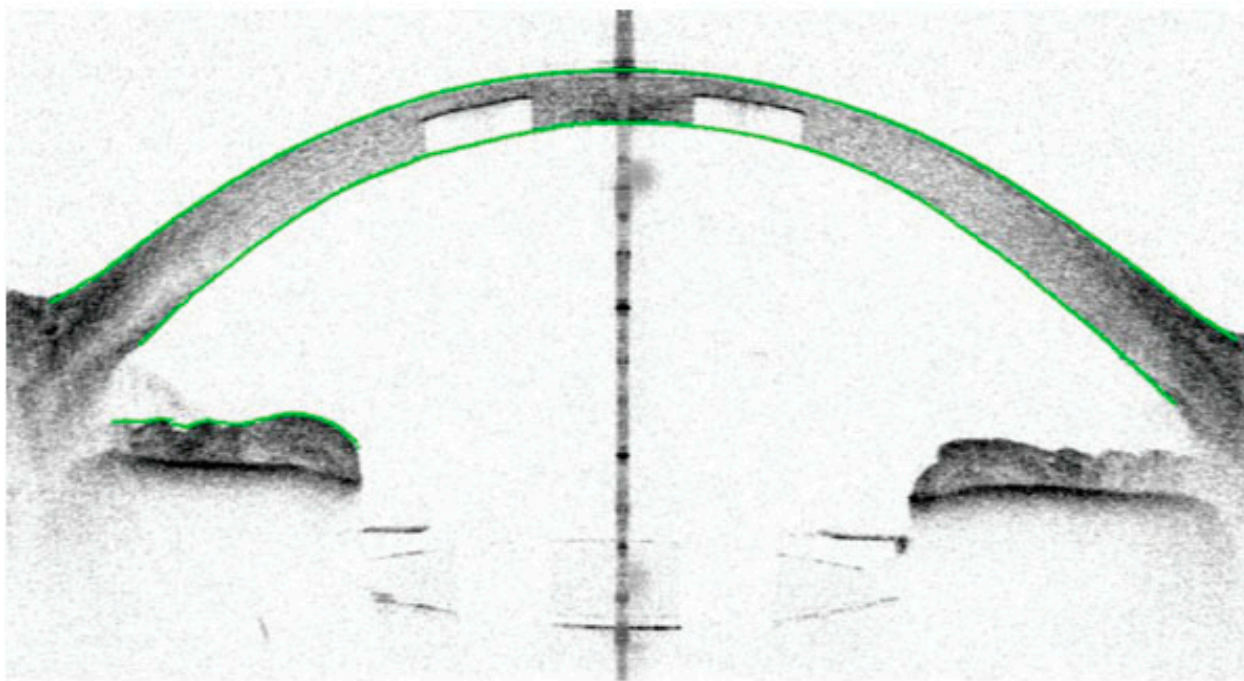


**Рисунок 9.** (a) Глаз с кератоконусом с установленными внутрироговичными кольцевыми сегментами (ICRS) призматического сечения. Острый край

временного кольца (стрелка) расположен близко к DM и требует мониторинга. (b) Роговица с имплантатами ICRS Intacs® SK, установленными с помощью фемтосекундного лазера (Addition Technology Inc., Ломбард, США). На ОКТ-изображении видно эллиптическое сечение имплантатов Intacs® SK. Край ICRS приводит к появлению артефактов в передней камере. Изображения получены с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

### 2.3. Трансплантация роговицы

Первая успешная трансплантация ткани роговицы была выполнена Эдуардом Цирмом в 1905 году [27]. С тех пор трансплантация роговицы стала старейшим и наиболее успешным методом трансплантации тканей или органов человека. Начиная с оригинальной РК и переноса всех слоев роговицы, появляются новые методы, такие как послойная трансплантация. Доказано, что РК обеспечивает хорошие оптические результаты и превосходную приживаемость трансплантата с учетом начальных показаний для РК [28].

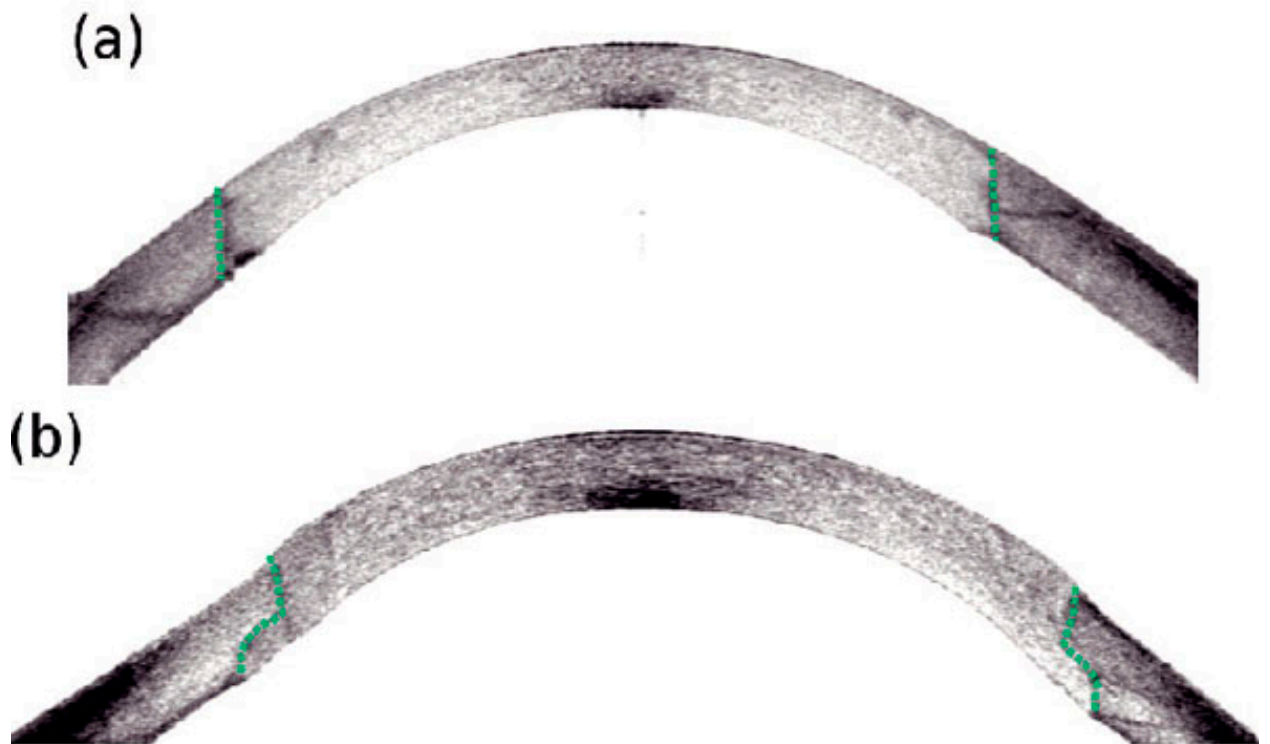


**Рисунок 10.** Псевдофакический глаз с внутрироговичной вставкой KAMRA® для лечения пресбиопии под лоскутом толщиной 200 мкм, созданным фемтосекундным лазером. Центральный рефлекс Пуркинье показывает, что интраокулярная линза и роговичная вставка хорошо центрированы. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

Однако могут возникнуть такие осложнения, как образование задней ступени, помутнение или отторжение трансплантата. Кроме того, одним из побочных действий РК является частично нерегулярный послеоперационный астигматизм роговицы. Сзентмари с соавторами [29] показали, что немеханическая трепанация во время РК дает лучшие морфологические и функциональные результаты, чем механическая трепанация. Иммунологические недостатки могут быть сведены к минимуму в новых послойных методах, таких как DALK, автоматизированная эндотелиальная кератопластика с удалением десцеметовой оболочки (DSAEK) или эндотелиальная кератопластика десцеметовой оболочки (DMEK) [16]. ASOCT может помочь в оценке адгезии трансплантата, границы раздела хозяин-трансплантат [30], толщины трансплантата или образования ступеней [31]. Енерель с соавторами аргументировал, что AS-OCT может быть полезным инструментом для мониторинга морфологических результатов РК и для лечения послеоперационных осложнений после РК [32]. На Рисунке 11 показаны два глаза после кератопластики эксимерным лазером и фемтосекундным лазером с трепанацией.

### *2.3.1. Автоматизированная эндотелиальная кератопластика с удалением десцеметовой оболочки (DSAEK)*

Задняя послойная кератопластика была впервые проведена Меллесом в 1998 году и постоянно совершенствовалась до 2004 года, когда Меллес представил новый метод для удаления DM, который привел к процедуре автоматизированной эндотелиальной кератопластики с удалением десцеметовой оболочки (DSAEK) [33, 34].



**Рисунок 11.** (а) Глаз с интегрированным трансплантатом после кератопластики эксимерным лазером с ровным соединением и отсутствием ступеней. (b) Глаз после кератопластики фемтосекундным лазером с трепанацией цилиндрического профиля. Пунктирные линии показывают соединение трансплантат-хозяин. Изображения получены с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).

Целью было внедрение метода послойной кератопластики для трансплантации эндотелиальных клеток, оставляющего строму хозяина на месте. Тонкий трансплантат DM и стромы подготавливают из донорской ткани. После удаления DM хозяина трансплантат помещают на заднюю сторону роговицы хозяина. Интраоперационная ОКТ может помочь при позиционировании трансплантата [35, 36]. Толщина и геометрический профиль трансплантата приводят к изменению задней поверхности роговицы хозяина и общей преломляющей силы роговицы (Рисунок 12). Это приводит к неправильным измерениям кератометром и систематическим ошибкам при расчете мощности интраокулярной линзы для глаз, подвергавшихся операции DSAEK, что вызывает гиперопический сдвиг до 1,5 D [37-39]. Это необходимо учитывать при расчете интраокулярной линзы и требует корректировки в случае комбинированной операции DSAEK и катаракты. Таким образом, в этих случаях томография роговицы (AS-OCT или Шаймпфлюга) будет обязательной. В случае последующей операции по удалению катаракты из глаза с проведенной операцией DSAEK, AS-OCT и визуализация Шеймпфлюга являются полезными

инструментами для расчета общей преломляющей силы роговицы вместо измерений кератометром [39].

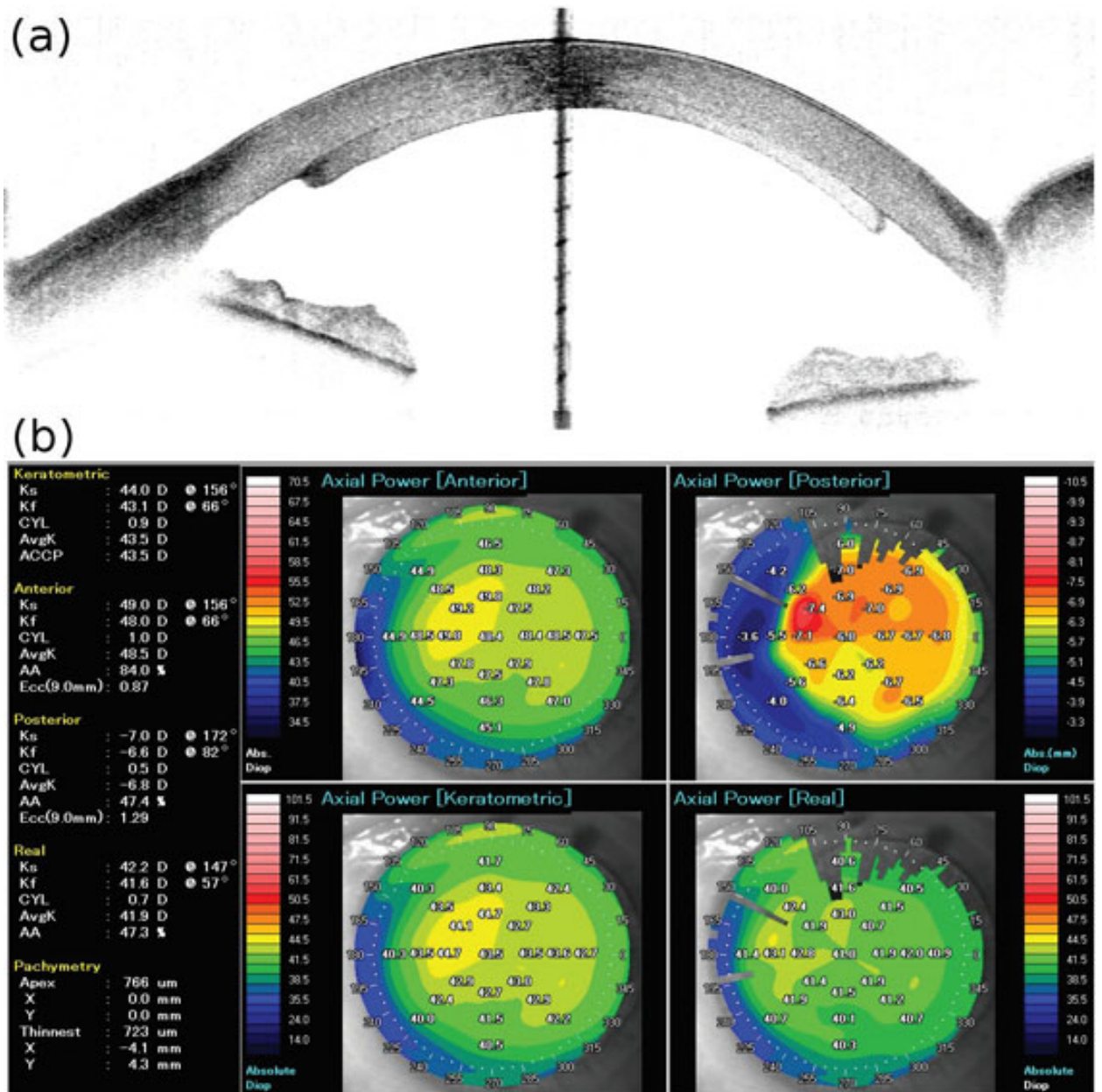
### *2.3.2. Эндотелиальная кератопластика десцеметовой оболочки (DMEK)*

Эндотелиальная кератопластика десцеметовой оболочки (DMEK) первоначально была предложена Меллесом с соавторами в 2006 году [40] и все чаще выполнялась в течение последнего десятилетия [41]. Показания включают эндотелиальные заболевания, такие как дистрофия Фукса, когда отек роговицы влияет на ее прозрачность и остроту зрения. Во время операции DM хозяина удаляется и заменяется донорской DM со здоровым эндотелием. Прикрепление трансплантата к строме хозяина имеет решающее значение и обычно поддерживается пузырьком газа, который интраоперационно вводится в переднюю камеру. Адгезия трансплантата требует контроля в течение первых дней и недель после операции. Необходимо высокое разрешение AS-OCT для визуализации небольших дефектов адгезии и определения локализации трансплантата. В частности, в первые дни после операции пациенты должны регулярно проходить мониторинг с помощью AS-OCT для регистрации адгезии трансплантата и определения необходимости повторного введения пузырька (Рисунки 13 и 14). В краткосрочном мониторинге DMEK обследование с помощью ASOCT превосходит обследование с помощью щелевой лампы и является более быстрым и более удобным для пациентов. Поэтому, предпочтительным будет трехмерное изображение переднего сегмента (видео 1). Глаза, прошедшие операцию DMEK, после имплантации ИОЛ также подвержены гиперопическому сдвигу. Однако изменение общей преломляющей силы роговицы после DMEK гораздо меньше (около 0,5 D), чем после DSAEK [42, 43].

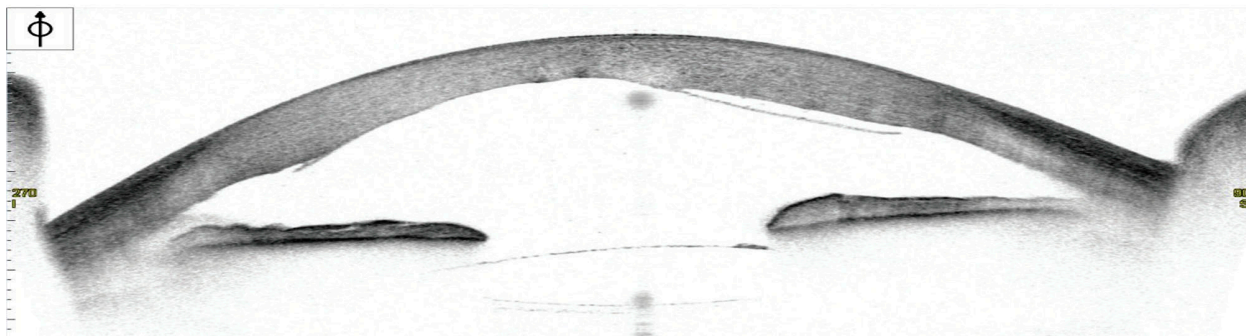
### *2.3.3. Скрининг донорской ткани роговицы*

За проверку пригодности донорской ткани роговицы для РК отвечают глазные банки. Процедура анализа включает визуальную проверку, морфологическое и микробиологическое исследование. Одним из важнейших параметров является плотность эндотелиальных клеток, которая должна превышать 2000 клеток на мм<sup>2</sup>. Для хорошей визуальной реабилитации стромы должна быть без рубцов. Для РК нельзя использовать роговицы доноров с кератоконусом или перенесших какую-либо лазерную рефракционную операцию - из-за непредсказуемого рефракционного результата. Однако DM может подходить для задней послойной кератопластики, например, DMEK. Роговицы с операциями кератоконуса и пострефракционными операциями можно выявить путем анализа передних и задних радиусов кривизны и профиля толщины роговицы или путем исследования структурных изменений в ткани роговицы [44]. Однако данные доноров *in vivo* редко доступны, и поэтому скрининг томографии донорских тканей может проводиться только во время культивирования тканей. Технология

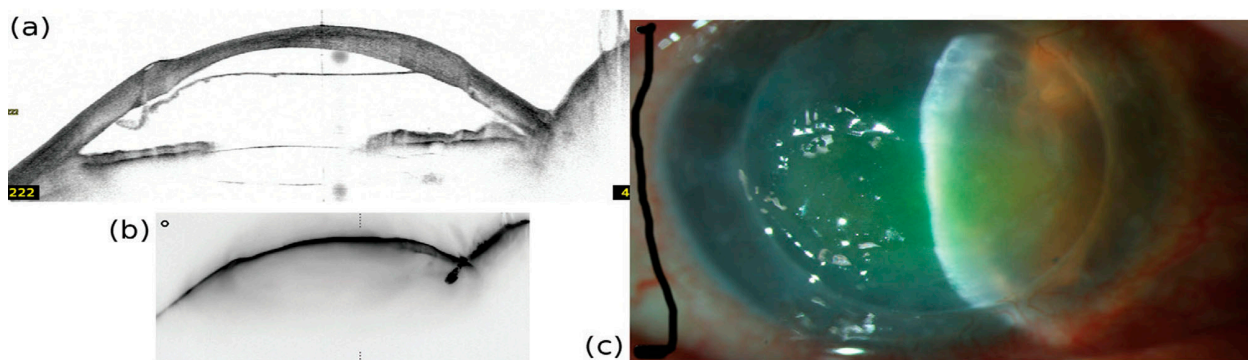
ОКТ позволяет получать стерильную прямую бесконтактную томографию донорской ткани роговицы, помещенной в культуральную колбу.



**Рисунок 12.** (а) Глаз после DSAEK с трансплантатом, хорошо прикрепленным к строме хозяина (AS-OCT Casia SS-1000, Tomey Corp., Нагоя, Япония). Толщина трансплантата составляет от 190 до 290 мкм. (б) Графическое представление преломляющей силы передней и задней поверхностей, а также кератометрической мощности и общей преломляющей (реальной) силы. Значения показывают, что при использовании кератометрической мощности преломляющая сила роговицы будет переоценена на 1,6 D (средняя кератометрическая мощность 43,5 D при реальной силе роговицы 41,9 D), что приведет к гиперопическому сдвигу после операции по удалению катаракты.



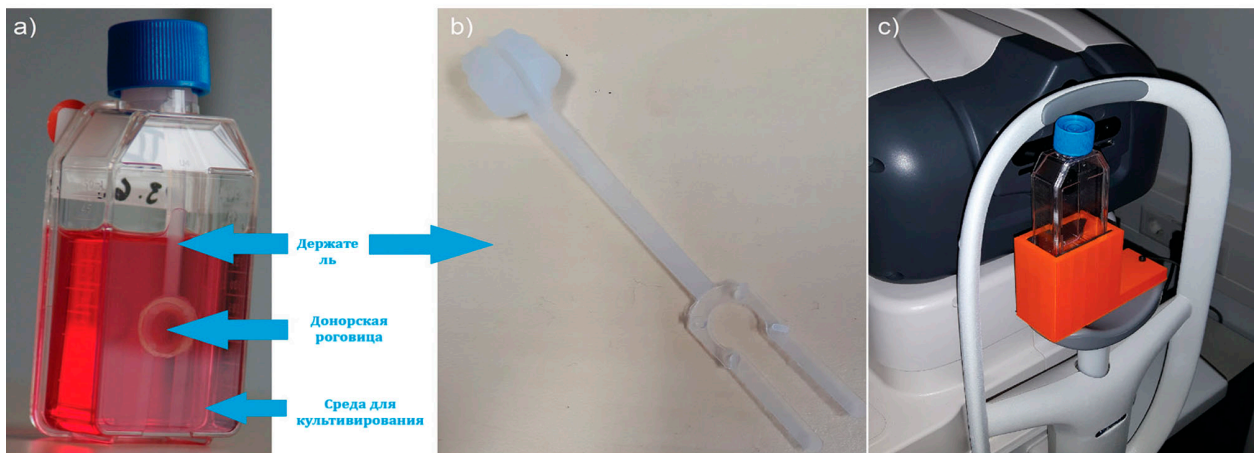
**Рисунок 13.** Вертикальное сечение псевдофакического глаза после комбинированной операции ДМЕК и катаракты, демонстрирующее большое превосходящее отслоение трансплантата и частично декомпенсированную роговицу, что требует повторного введения пузырька. Изображение получено с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония).



**Рисунок 14.** (a) Отслоение большой площади трансплантата после ДМЕК и операции по удалению катаракты. Роговица полностью непрозрачна, и (b) визуализация Шаймпфлюга (Pentacam® HR, Oculus Optikgerate GmbH, Вецлар, Германия) или (c) обследование щелевой лампой (BX 900, Haag-Streit AG, Кёниц, Швейцария) переднего сегмента невозможно. Однако изображение AS-OCT (Casia 2 AS-OCT, Tomey Corp., Нагоя, Япония) позволило проанализировать отслоенную DM и переднюю камеру.

Первые попытки были сделаны Нойбауэром и Приглинггером [45, 46], и их метод был усовершенствован с помощью различных устройств и технологий Янунтсом с соавторами [47] (CASIA SS-1000, Tomey Corp., Нагоя, Япония) и Дамианом с соавторами (Spectralis Anterior Segment Module, Heidelberg Engineering GmbH, Гейдельберг, Германия) [48]. С тех пор как в 2016 году на рынок был выпущен новый томограф AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония), мы разработали

улучшенный метод томографического скрининга донорской ткани. Культуральные колбы (Рисунок 15а) можно поставить непосредственно на опору для подбородка (Рисунок 15с), а объемное сканирование позволяет захватить весь диск роговицы, включая держатель (Рисунок 15b), к которому прикреплен диск роговицы, находящийся в культуральной колбе (Рисунок 16). Затем для поиска в объемном наборе данных передней и задней поверхности диска роговицы используется специально созданный макрос MATLAB® (The Mathworks, Нейтик, США), и для этих данных устанавливается параметрическая модель поверхности, позволяющая рассчитать радиусы кривизны и профиль толщины диска роговицы.



**Рисунок 15.** (а) Ткань роговицы культивируется в пластиковых культуральных колбах (адаптировано из работы Дамиана с соавторами [48], первоначально опубликованной по лицензии Creative Commons Attribution 3.0 Unported License. Доступно по адресу: DOI: 10.1117/1.JVO.22.1.016001). Ткань роговицы фиксируется в держателе (b), чтобы она не могла свободно плавать в колбе. (с) Культуральная колба ставится на опору для подбородка томографа ASOCT Casia 2 с помощью адаптера, специально изготовленного на 3D-принтере.

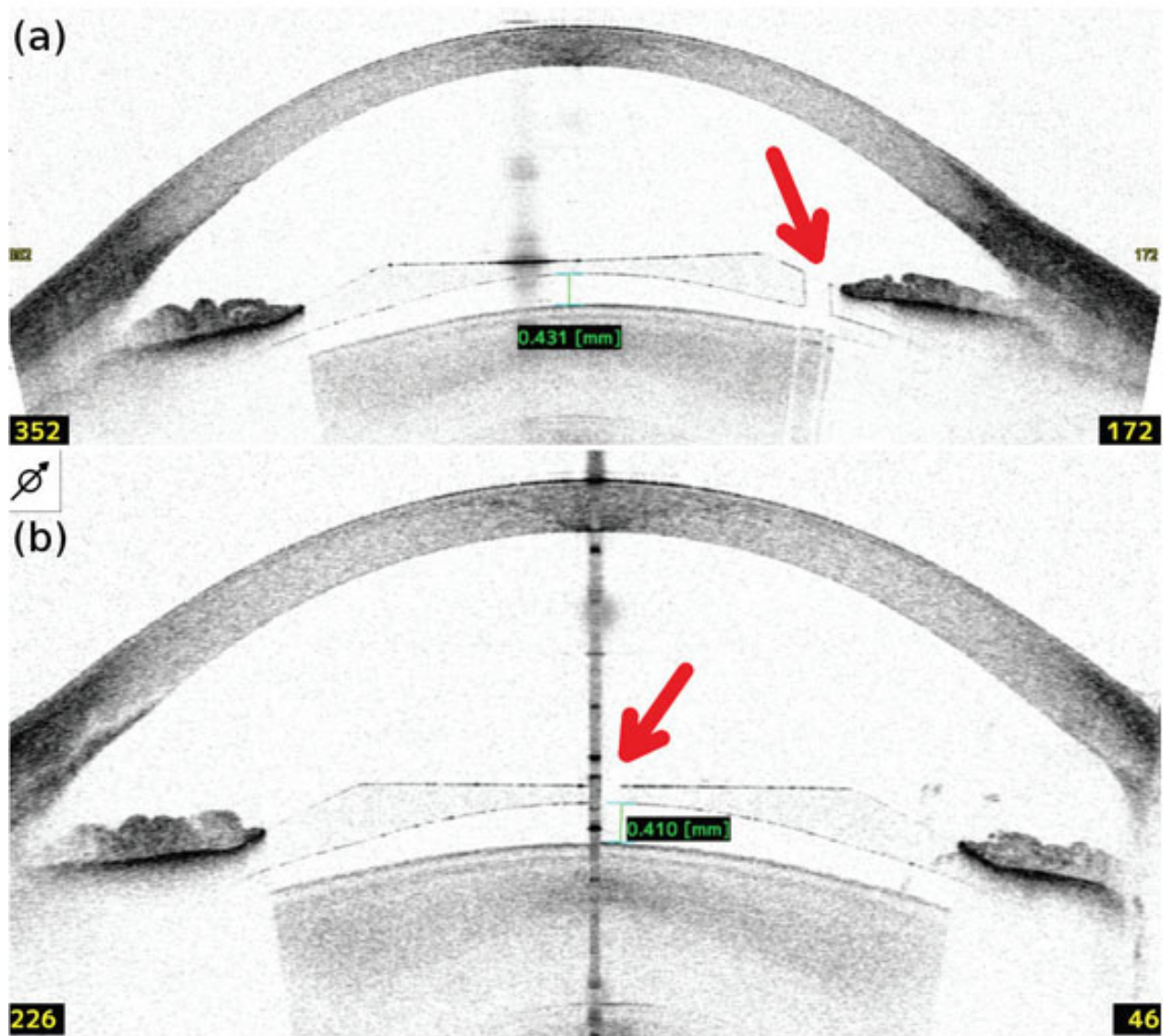
**Рисунок 16.** Объемный набор данных и центральный срез изображения донорской роговицы, измеренные в культуральной колбе. На изображении хорошо видны стенки колбы и держатель роговицы. В интересующей области (ROI) можно рассчитать радиусы кривизны роговицы.

### 3. Факичные интраокулярные линзы

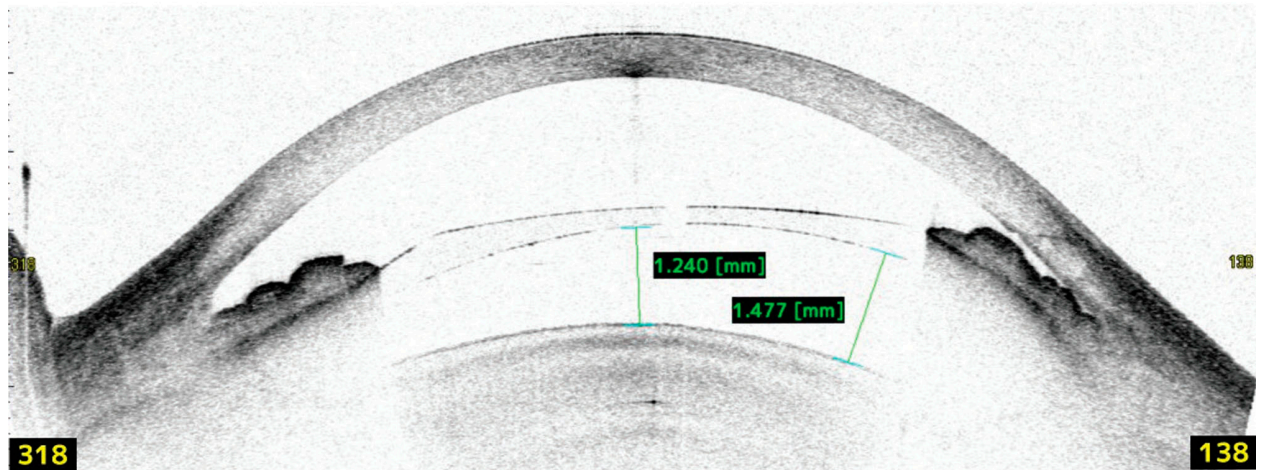
При операции глаукомы, а также в рефракционной хирургии важна точная оценка передней камеры. Особенно, дополнительного внимания требуют новые концепции рефракционной хирургии, например, факичные интраокулярные линзы. Имплантируемые в задней камере колламерные линзы (ICL) являются практичным вариантом для рефракционной хирургии, когда лазерная хирургия



роговицы противопоказана. Наиболее часто используемым продуктом этого типа является ICL Visian®. Такие линзы имплантируются в цилиарную борозду между хрусталиком и радужкой. Диаметр линзы должен быть адаптирован к размерам цилиарной борозды. Пространство можно оценить по диаметру роговицы (диаметр от белого до белого). Другой вариант измерения диаметра цилиарной борозды включает использование ультразвуковой биомикроскопии. Наиболее частыми осложнениями при использовании первых моделей ICL были послеоперационное повышение внутриглазного давления, закрытие угла и образование катаракты [49-51]. Поэтому более поздние модели имели два отверстия в гаптике, обеспечивающих отвод водянистой влаги в переднюю камеру. Самый последний тип ICL Visian® V4c имеет дополнительное отверстие в центре оптики. Размер ICL имеет решающее значение для предотвращения ее контакта с хрусталиком, что обычно происходит при недостаточном размере ICL. С другой стороны, слишком большие ICL сгибаются к передней камере и могут вызвать закрытоугольную глаукому [52]. Поэтому расстояние от задней поверхности ICL до передней поверхности хрусталика, так называемый купол, является ключевым параметром, который необходимо отслеживать после имплантации ICL. Возможность измерения купола линзы с помощью AS-OCT была впервые показана Бехманном с соавторами [53]. Несколько исследователей сообщили, что размер купола ICL варьируется от 90 мкм до 1 мм, тогда как идеальным размером считается 0,5 мм [54-57]. Накамура с соавторами [56] сообщили о методе расчета размера ICL на основе AS-OCT. Чжан с соавторами [58] сравнили параметры переднего сегмента, измеренные с помощью AS-OCT и ультразвуковой биомикроскопии. Они обнаружили, что AS-OCT слегка переоценила размеры купола и что оба метода нельзя использовать взаимозаменяемо.

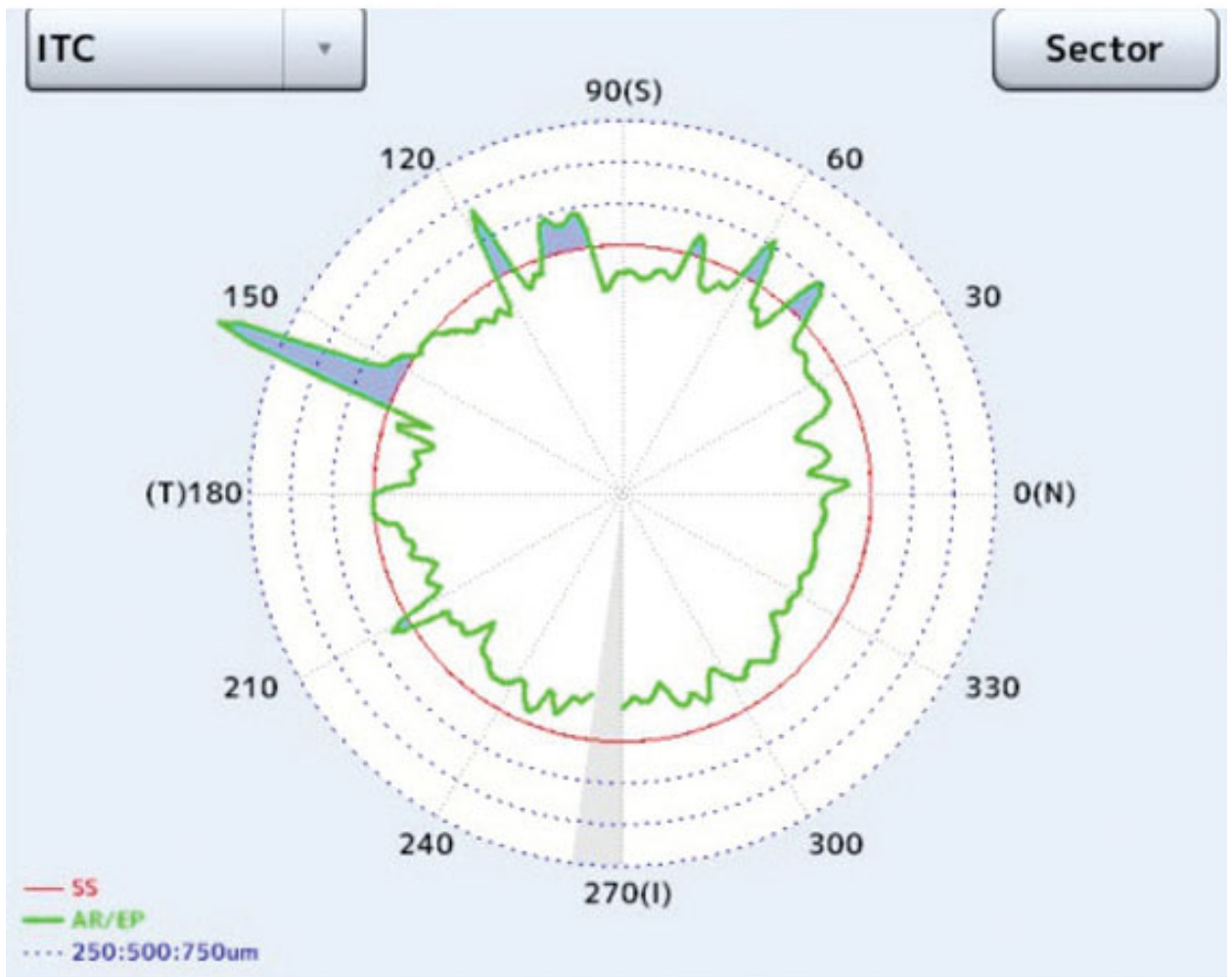


**Рисунок 17.** Миопический глаз с хорошо центрированной ICL Visian® V4c. Купол линзы в центре превышает 400 мкм. На отдельных срезах изображения видны периферийный (на верхнем снимке) и центральный (на нижнем снимке) аквапорты.



**Рисунок 18.** Закрытие угла на 138° после имплантации слишком большой ICL Visian® V4c. На изображении виден центральный аквапорт. Размер купола в центре составляет 1,2 мм, а на периферии - до 1,4 мм. Рекомендуется эксплантация ICL во избежание острого закрытия угла.

Однако измерение купола требует ручной работы опытного оператора, поскольку программное обеспечение для автоматического анализа не создано. Кроме того, угол передней камеры (АСА) требует контроля для выявления ранней угрозы закрытия угла. На Рисунке 17 показан миопический глаз с ICL типа Visian® V4c с хорошо установленным имплантатом с двумя аквапортами и широким АСА.



**Рисунок 19.** Анализ Star 360°, выполненный с помощью AS-OCT Casia 2 (Tomey Corp., Нагоя, Япония) для глаза со слишком большой ICL (Рисунок 18). Зеленая линия, касающаяся красного круга и синих областей, показывает участки закрытия угла на периферии угла передней камеры.

Применение AS-OCT для последующего наблюдения после имплантации ICL иллюстрируется случаем 26-летнего пациента, перенесшего имплантацию ICL (Visian® V4c) для коррекции миопии. Мы обнаружили большой и слегка асимметричный купол имплантата (Рисунок 18). Анализ ACA с использованием собственного программного обеспечения для ОКТ показал угрозу частичного закрытия угла из-за слишком большого имплантата (Рисунок 19). Во избежание острого закрытия угла рекомендуется эксплантация ICL. Очень важно применять трехмерное обследование передней камеры.

#### 4. Заключение

ОКТ переднего сегмента находит множество применений в роговичной и рефракционной хирургии, которые требуют изучения и дальнейшего совершенствования. Современные методы анализа, такие как измерение толщины лоскута или купола ICL, требуют ручной работы опытных операторов для получения воспроизводимых и репрезентативных результатов. Скрининг донорской ткани роговицы позволяет получить дополнительную информацию о ткани и может помочь при выявлении анамнестически необнаруженных рефракционных операций, таких как LASIK или PRK.