

# Оптическая когерентная томография: от спектральной к swept source

Атлас избранных клинических случаев

Семенова Н.С.

*под редакцией Акопяна В.С.*

**Факультет фундаментальной медицины**  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
2019

**УДК 616-079.2**

**ББК 56.7**

**С30**

**Оптическая когерентная томография: от спектральной к swept source.  
Атлас избранных клинических случаев./ Семенова Н.С.**

**С 30. – М., 2019. –112 с.: ил.**

**ISBN 978-5-600-02470-0**

### **Аннотация**

Книга посвящена методу swept source оптической когерентной томографии, применяемому в офтальмологии. В первых главах изложен принцип получения изображения и его основные преимущества перед традиционной спектральной томографией. Основной раздел представлен в виде атласа: приведены графически и рассмотрены в тексте примеры томографических проявлений разных форм и стадий возрастной макулярной дегенерации, а также групп заболеваний витреомакулярного интерфейса и пахихориоидального спектра. Для каждого заболевания даны рекомендации по выбору стратегии и протоколов сканирования.

Настоящее издание предназначено для врачей-офтальмологов, осваивающих технологию swept source оптической когерентной томографии.

**ISBN 978-5-600-02470-0**

**© Н.С. Семенова**

## Содержание

Содержание . . . . .	3
Используемые сокращения . . . . .	4
От редактора . . . . .	5
Предисловие . . . . .	6
Принцип SS-ОКТ . . . . .	9
Преимущества и недостатки SS-ОКТ . . . . .	14
Сравнительные исследования SS- и SD-ОКТ . . . . .	24
Номенклатура ОКТ. . . . .	29
Возрастная макулярная дегенерация . . . . .	32
Пахихориоидальный спектр заболеваний сетчатки. . . . .	74
Заболевания витреомакулярного интерфейса . . . . .	88

## Используемые сокращения

ВМД	— возрастная макулярная дегенерация
ВМТ	— витреомакулярный тракционный синдром
ГА	— географическая атрофия
ДЗН	— диск зрительного нерва
ЗОСТ	— задняя отслойка стекловидного тела
нВМД	— неоваскулярная возрастная макулярная дегенерация
ОКТ	— оптическая когерентная томография
ОКТА	— оптическая когерентная томография в режиме ангиографии
ПХВ	— полипоидная хориоидальная васкулопатия
ПЭС	— пигментный эпителий сетчатки
РАП	— ретинальная ангиоматозная пролиферация
СНМ	— субретинальная неоваскулярная мембрана
ФА	— флюоресцеиновая ангиография
ЦСХ	— центральная серозная хориоретинопатия
ЭРМ	— эпиретинальная мембрана
EDI	— enhanced depth imaging, режим усиления глубины изображения
SD-ОКТ	— spectral-domain (спектральная) оптическая когерентная томография
SS-ОКТ	— swept source оптическая когерентная томография

### *От редактора*

*Диагностика заболеваний глаз в последние два десятилетия стремительно совершенствуется. Наиболее впечатляющим методом прецизионной и объективной оценки состояния глаз стала оптическая когерентная томография. Этот новый метод офтальмодиагностики сделался неотъемлемой частью повседневной практики, как исследовательской, так и лечебной. Он сформировал очень специфическую область офтальмологических знаний, доступных только высокообразованному и квалифицированному клиницисту. Поэтому предлагаемый атлас рассчитан на специалистов, уже имеющих начальное представление об оптической когерентной томографии глаза и располагающих первичным опытом использования, трактовки и интерпретации результатов.*

*заведующий кафедрой офтальмологии  
Факультета фундаментальной медицины  
Московского государственного университета  
имени М.В. Ломоносова,  
д.м.н., профессор Акопян Владимир Сергеевич*

*Уважаемый читатель!*

*Вы держите перед собой первое издание нашего атласа, целью публикации которого стала попытка подвести промежуточные итоги четырехлетнего опыта использования в клинической практике новой технологии Swept source оптической когерентной томографии (SS-ОКТ). Этот атлас – компромисс между запросом практического врача-пользователя и нашей убежденностью в тщетности подобных публикаций с точки зрения образовательного процесса в медицине. Во-первых, в наши дни понимание патогенеза и классификация заболеваний, а также номенклатура и трактовка ОКТ-изменений меняются столь стремительно, что любые печатные издания обречены на мгновенную потерю актуальности. Во-вторых, не первый год обучая врачей методу ОКТ в офтальмологии, мы убедились, что формат атласа не только не облегчает задачу врача, самостоятельно осваивающего данный раздел офтальмологии, а, напротив, уводит его в сторону сравнения собственных получаемых сканов с иллюстрациями книги в попытке найти сходства, никак не приближая к пониманию метода ОКТ и заболевания.*

*В этом издании мы хотели понятно объяснить, в чем заключается принцип SS-ОКТ и какие возможности она дает в рутинной работе офтальмолога. Несмотря на то что мы*

*постарались подобрать и сравнить, как на практике Swept source и Spectral-domain ОКТ (SD-ОКТ) визуализируют одно и то же изменение, мы не ставили перед собой задачу доказать превосходство метода SS-ОКТ над традиционной спектральной. Любая инновационная технология при сравнении с традиционной и общепринятой будет иметь не только преимущества, но и недостатки, о которых мы честно расскажем ниже. По той же причине мы не стремились охватить все заболевания, выбрав только распространенные болезни и интересные клинические примеры, наглядно демонстрирующие возможности SS-ОКТ. Ставя перед собой задачу на одном клиническом случае продемонстрировать две разные технологии, неизменно сталкиваешься с трудностями максимально близкого совпадения областей сканирования, различий в протоколах, длине и разрешении сканов. Кроме того, зачастую обследование одного пациента выполняется с некоторой разницей во времени. Все это, безусловно, уводит нас в сторону от «идеально спланированного» эксперимента по сравнению, и мы надеемся, что читатель отнесется к этому с пониманием. Ниже мы приведем краткий обзор литературы по подобным клиническим исследованиям-сравнениям и перечислим основные причины возможных различий.*

*Структура изложения материала представляет собой главы и подглавы, соответствующие заболеванию и вариантам/стадиям его проявления. В начале мы постарались дать краткую информацию о болезни и, при необходимости, ее общепринятую классификацию или классификацию, которой мы придерживаемся, чтобы структурировать и облегчить последующее изложение. Основной блок содержит результаты применения SS-ОКТ и традиционной SD-ОКТ на одном клиническом примере (выделены зеленой рамкой), а также отдельные иллюстрации, демонстрирующие ви-*

*зуализацию описываемого заболевания методом SS-ОКТ. В конце главы мы даем рекомендации по выбору протоколов сканирования с учетом особенностей заболевания. Каждый раздел снабжен списком литературы, которая может быть использована читателем для углубленного изучения проблемы.*

*Мы надеемся, что Вы найдете полезной нашу работу, и желаем успехов на пути изучения метода ОКТ*

*доцент кафедры офтальмологии  
Факультета фундаментальной медицины Московского  
государственного университета имени М.В. Ломоносова,  
к.м.н. Семенова Наталия Сергеевна*

## Принцип SS-ОКТ

Как это часто бывает в истории науки, первое упоминание концепции swept source относится к патентам 1991 года, а первые экспериментальные работы – 1996-1997 годам. Еще в ранние 80-е годы принцип линейной частотной модуляции длины волны когерентного источника света применялся для измерения волоконной оптики и компонентов фотоники [1]. Тогда же описывались его преимущества в виде низкого уровня шума на получаемых сканах. Но вплоть до 2003 года технология не могла быть использована в ОКТ по причине отсутствия подходящего лазерного источника излучения. В 2003 году Yun и соавторы впервые продемонстрировали применительно к офтальмологическим задачам высокие для того времени скорость сканирования (19.000 А-сканов в секунду) и аксиальное разрешение (13-14 мкм) SS-ОКТ [2]. Настоящий прорыв случился в 2006 году с появлением лазера с синхронизацией мод Фурье [3]. Уже тогда в офтальмологическом применении была достигнута скорость в 370.000 А-сканов в секунду [1].

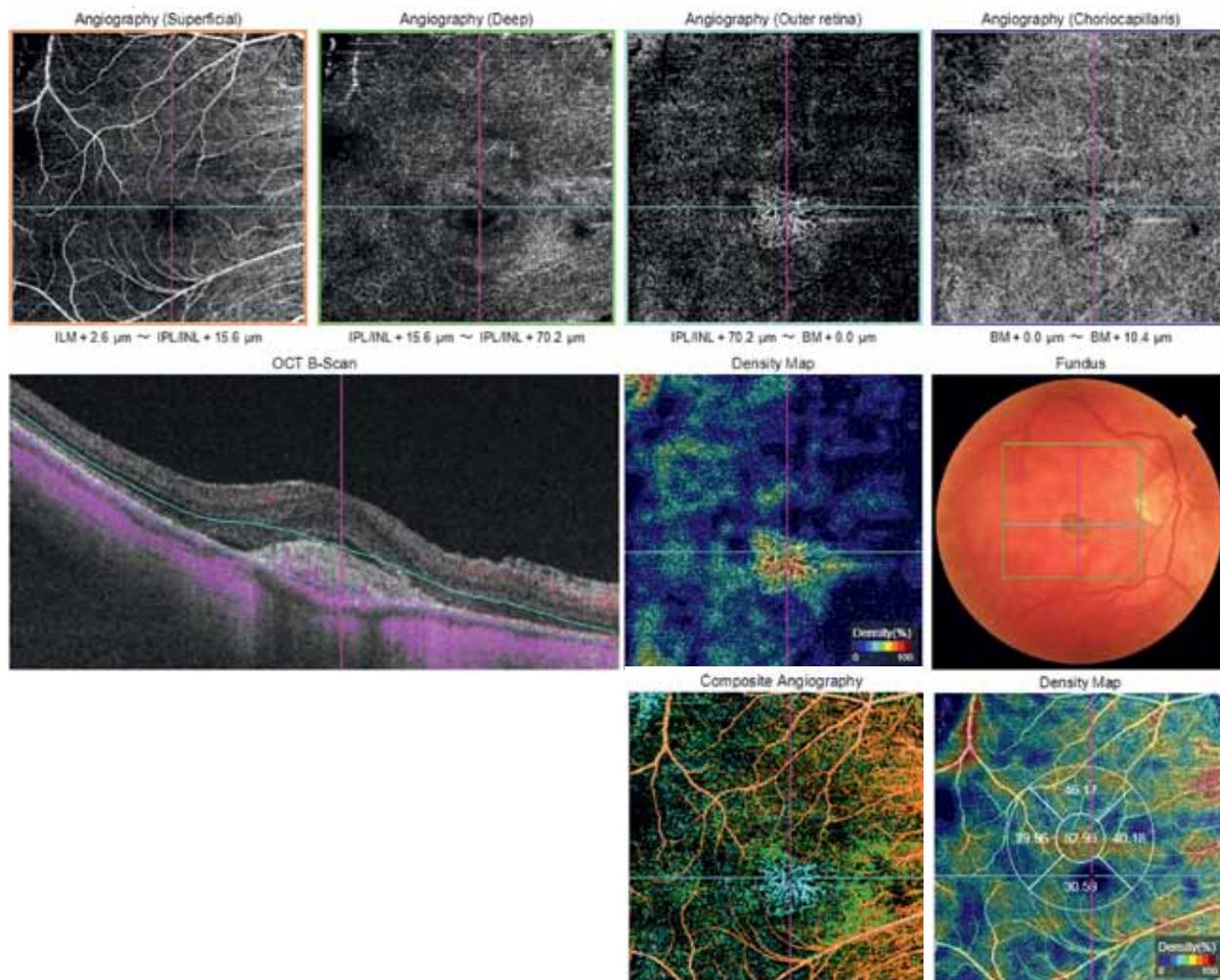
Современный коммерческий swept source томограф использует узкополосный лазерный источник излучения длиной волны 1050 нм, которая быстро меняется в диапазоне 100 нм, имеет скорость сканирования в 100.000 А-сканов в секунду, аксиальное оптическое разрешение составляет 8 мкм при программном (интерполяционном) 2,6 мкм. Технология SS-ОКТ относится к семейству Fourier-domain, поскольку, как и традиционная SD-ОКТ, применяет преобразование Фурье, однако спектральные компоненты кодируются не по пространству, а по времени, как в отчасти уже забытой time-domain ОКТ. Кроме того, аналогично time-domain ОКТ в качестве приемного элемента вместо спектрометра используется высокочастотный фотодетектор, точнее, двойной балансный фотодетектор, что вносит свой вклад в повышение скорости сканирования.

Первый коммерческий томограф, использующий технологию swept source ОКТ, называемую также ОКТ с переменной длиной волны или ОКТ со свипированным/перестраиваемым источником, был представлен компанией Topcon в 2010 году и зарегистрирован в 2012 году. Модель DRI OCT Atlantis спустя три года сменила современная машина DRI OCT Triton, получившая регистрацию на территории Российской Федерации в 2018 году. На момент написания настоящего атласа на базе технологии SS-ОКТ также созданы томограф для переднего отрезка Casia SS-1000 (1310 нм, скорость 30.000 А-сканов/с, аксиальное разрешение 10 мкм, поперечное – 30 мкм) и томограф Casia2 фирмы Tomey (1310 нм, скорость 50.000 А-сканов/с, аксиальное разрешение 10 мкм, поперечное – 30 мкм) с функцией сканирования и переднего, и заднего отрезков глаза. Однако, по информации на конец 2018 года, пока перечисленные приборы не получили разрешения к клиническому применению от Food and Drug Administration (FDA). Кроме того, в 2016 году компания Zeiss анонсировала томограф PLEX Elite 9000 на базе SS-ОКТ, получивший сертификат соответствия Европейского союза и предварительно одобренный FDA, но выпускать его на рынок в качестве коммерческого продукта для клинической практики пока не планирует, позиционируя его как прибор для исследовательской офтальмологии

### **SS-ОКТ в режиме ангиографии**

Оптическая когерентная томография в режиме ангиографии (ОКТА) за пару лет стала современным стандартом диагностики и мониторинга заболеваний сетчатки. Сегодня все производители добавили эту функцию в свои ОКТ-установки. Именно повышение скорости сканирования, в том числе и спектральных томографов, создало предпосылки для изобретения метода. При этом следует понимать, что каждая из компаний-разработчиков использует свой собственный технологический подход к решению задачи контрастной визуализации движения эритроцитов. Очень условно их можно поделить на три группы:

- ОКТА на основе фазового сигнала (phase variance, phase-signal-based) – например, Допплер-ОКТ;



**Рис. 1.** Пример результатов сканирования на SS-ОКТ в режиме ОКТА. Представлены результаты для внутренних, глубоких и наружных слоев сетчатки, а также слоя хориокапилляров (верхний ряд). В режиме просмотра В-скана цветовой кодировкой визуализирован кровоток. Карта плотности (Density map) представляет собой графическое отражение сосудистой плотности от максимальной (красный, оранжевый оттенки) к минимальной (синий, зеленый цвета). На данном примере изображена сосудистая плотность для наружных слоев сетчатки (выделены голубыми линиями и голубой рамкой для карты). Также подобная карта может быть получена для внутреннего, глубокого и хориокапиллярного слоев в зависимости от выбора оператора. При этом для внутреннего слоя сетчатки возможен также расчет средней сосудистой плотности по 5 секторам ETDRS (см. рисунок внизу справа). В этом же окне может быть представлена композитная картина, составленная из картин ОКТА каждого из перечисленных четырех слоев (см. рисунок внизу слева).

- ОКТА на основе сигнала интенсивности спекла или декорреляции (intensity-signal-based OCTA, speckle or intensity decorrelation). В этой категории можно выделить 2 группы: применяющие разделение спектра излучения и не разделяющие спектр. К первой относится алгоритм SSADA (split-spectrum amplitude decorrelation angiography), используемый производителем Optovue. Подход без разделения спектра получил реализацию в виде технологии FSADA (full-spectrum amplitude decorrelation angiography) от компании Heidelberg Engineering и OCTARA (OCTA Ratio Analysis), лежащей в основе ОКТА томографа DRI OCT Triton от Topcon. Отдельно стоят прочие методы: ОКТА на базе карт корреляции (correlation-mapping OCTA), ОКТА на основе спекл-дисперсии (speckle-variance OCT).

- ОКТА на основе комплексного сигнала (complex-signal-based OCTA). К этой группе можно отнести производителя Zeiss с его алгоритмом OMAG (Optical Micro Angiography), использующим и амплитудные, и фазовые данные ОКТ-сигнала. Похожий метод комплексной декорреляции (complex decorrelation) использован у Nidek [4].

Обсуждение преимуществ и недостатков каждого из упомянутых методов ОКТА выходит за рамки настоящего издания. Существуют доказательства, что, например, разделение спектра в алгоритме SSADA приводит к некой потере аксиального разрешения, что не наблюдается при full-spectrum подходах. Однако подобные изыскания остаются уделом технических специалистов и стимулируются самими производителями. А нюансы различий технологий не заметны для рядового пользователя.

### Литература

[1] Fujimoto J, Swanson E. *The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography* // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016; 57:OCT1–OCT13. DOI: 10.1167/iops.16-19963

[2] Yun SH, Tearney GJ, Bouma BE, et al. *High-speed spectral-domain optical coherence tomography at 1.3  $\mu$ m wavelength* // *Opt Exp*. 2003; 11:3598–3604.

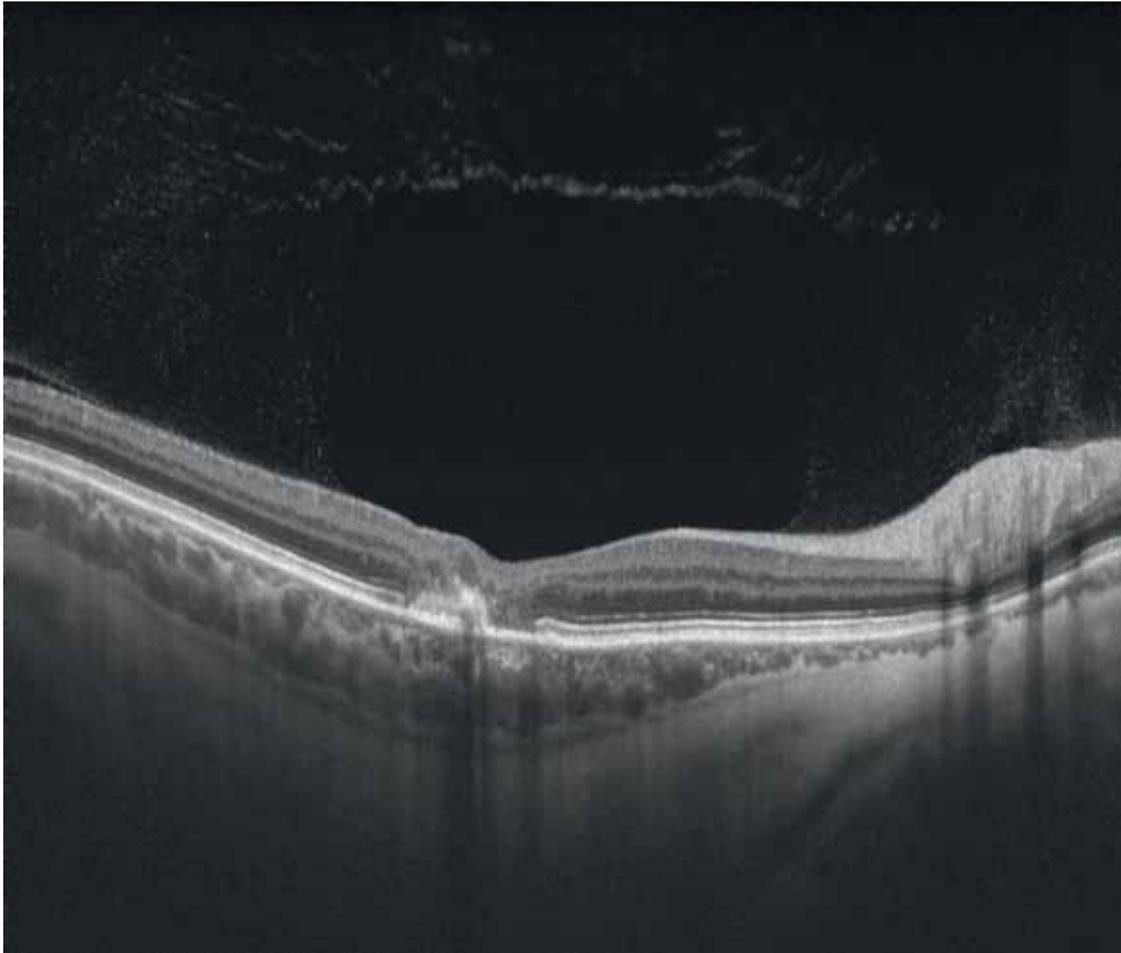
[3] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto JG. *Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography* // *Opt Exp*. 2006; 14:3225–3237.

[4] Kashani AH, Chen CL, Gahm JK, et al. *Optical coherence tomography angiography: A comprehensive review of current methods and clinical applications* // *ProgRetin Eye Res*. 2017 Sep; 60:66-100. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.07.002

## Преимущества и недостатки SS-ОКТ

Главным и неоспоримым преимуществом SS-ОКТ является возможность достигать высокой скорости сканирования. Если уже имеющийся сегодня на рынке томограф делает 100.000 А-сканов в секунду, то обзор литературы описывает ряд прототипов на базе технологий SS-ОКТ, достигающих скорость 200.000-1.640.000 А-сканов в секунду и повысивших аксиальное разрешение до 5 мкм [1-2]. Справедливости ради надо отметить, что на стадии экспериментальной модели в литературе описаны и спектральные томографы со скоростными характеристиками 200-500 кГц [3-4], а единственный сходный по скорости коммерческий спектральный томограф Copernicus REVO NX (Optopol, Польша) демонстрирует скорость в 110 кГц. Возможность быстро получать сканы высокого разрешения позволяет выполнять более длинные сканы, одномоментно охватывая большую площадь биоткани, строить более подробные карты, состоящие из большего количества линейных сканов, эффективно справляться с микродвижением глаз и задачей шумоподавления, наконец, реализовывать алгоритмы ОКТА.

Ко второму значительному преимуществу описываемой технологии относится использование длины волны в 1050 нм, которая лучше проходит в глуболежащие ткани, меньше отражается на уровне слоя ПЭС, а, следовательно, позволяет получать высококачественные изображения сосудистой оболочки глаза. Именно внедрение сначала режима усиления глубины изображения (enhanced depth imaging, EDI) у спектральных томографов, а позже выход на рынок SS-ОКТ произвели революцию в понимании особенностей проявления заболеваний сетчатки пахихориоидального спектра. Стабильно воспроизводимая визуализация в высоком разрешении области хориосклерального соединения дает возмож-



**Рис. 2.** Пример линейного скана SS-ОКТ, выполненного в режиме Dynamic focus. Скан получается путем суммирования 128 сканов, выполненных с фокусировкой на перетинальной области стекловидного тела (24 В-скана), сетчатке (52 В-скана) и хориоидее (52 В-скана).

ность в автоматическом режиме распознавать границы сосудистой оболочки и без измерений вручную определять ее толщину. Причем оценка производится не только субфовеально, но и по всей макулярной зоне. Результат представляется в виде стандартной карты ETDRS со средним значением толщины сосудистой оболочки в каждом из девяти полей. На сегодня это единственный протокол измерения, для которого отсутствует нормативная база данных и четкое определение референсных значений.

Анализ клинических и *post-mortem* исследований демонстрирует высокую вариабельность толщины сосудистой оболочки глаза в популяции за счет большого количества влияющих системных и демографических факторов. Большинство исследователей сходятся на зависимости толщины хориоидеи от возраста (имеется тенденция к ее снижению) и аксиальной длины глаза. Предполагают также влияние этнической принадлежности, пола, индекса массы тела, наличия таких системных заболеваний, как артериальная гипертензия, сахарный диабет и апноэ. Помимо перечисленного, не исключено суточное колебание толщины сосудистой оболочки. Ряд клинических и морфологических работ подтверждают ее топографическую вариабельность и демонстрируют самые высокие результаты измерений в верхнем секторе макулярной зоны и субфовеально. С учетом вышеперечисленного, а также возросшего интереса к проблеме оценки толщины хориоидеи глаза, главным образом из-за выделения в последние годы группы пахихориоидальных заболеваний, сегодня большинство исследователей называют значение в диапазоне 300-390 мкм как условно предельную толщину субфовеальной сосудистой оболочки. Случаи, превышающие это значения, могут быть отнесены к подозрительным на предмет наличия пахихориоидального состояния.

Длина волны 1050 нм менее чувствительна к помутнению сред – катаракте, гемофтальму и проч., кроме того, сканирование производится вне видимого спектра излучения и не сталкивается с трудностями, связанными с непроизвольным следящим движением глаза пациента.

Имеющиеся на рынке спектральные ОКТ-машины используют широкополосный суперлюминесцентный диодный источник с длиной волны от 830 до 870 нм, а их область/глубина сканирования (*coherence gate* – определяет «вертикальный»

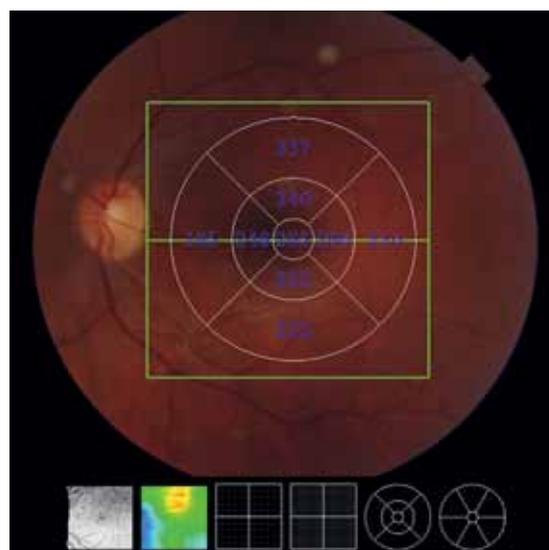
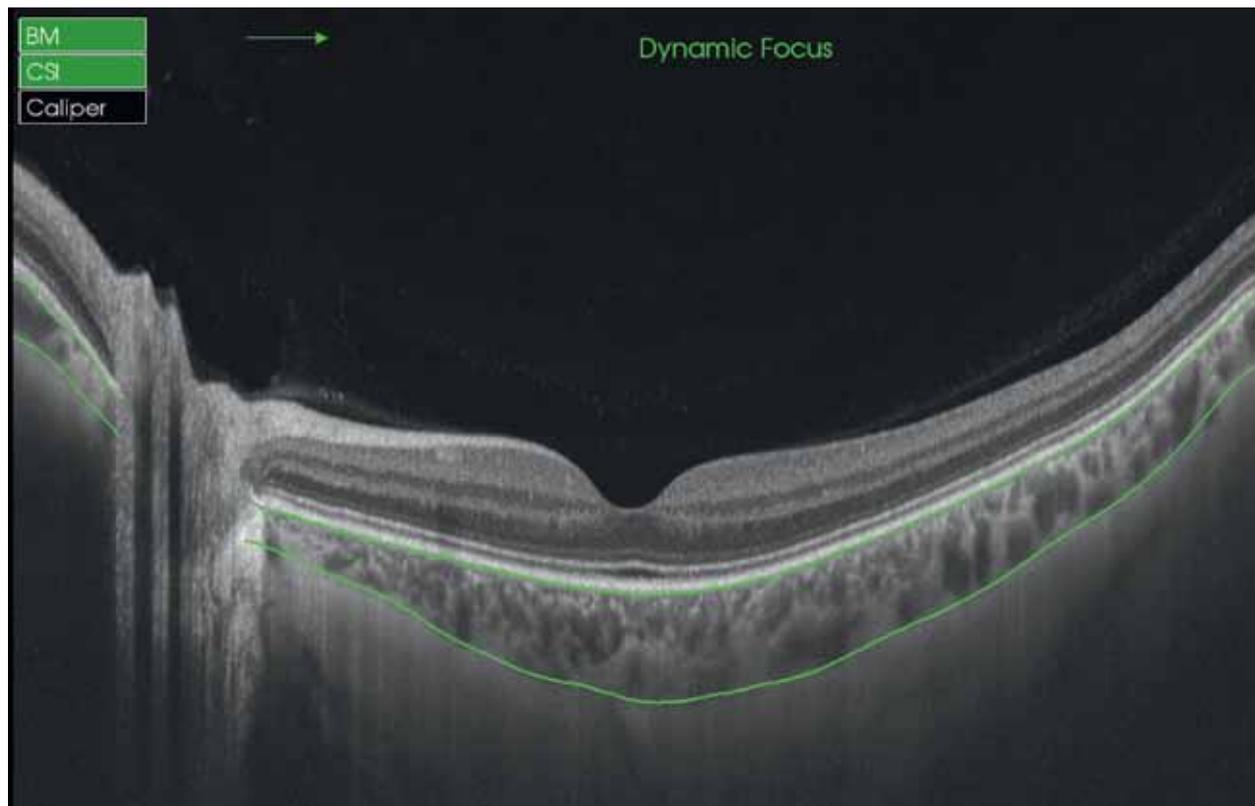
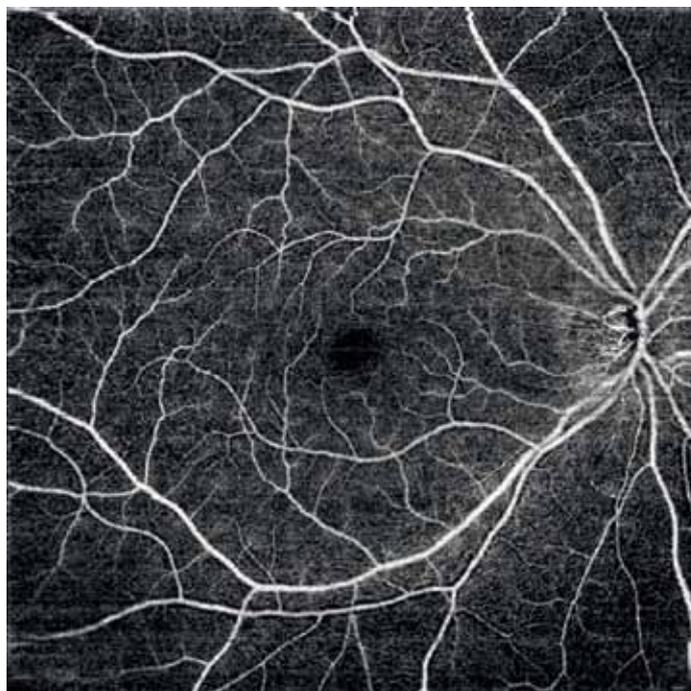
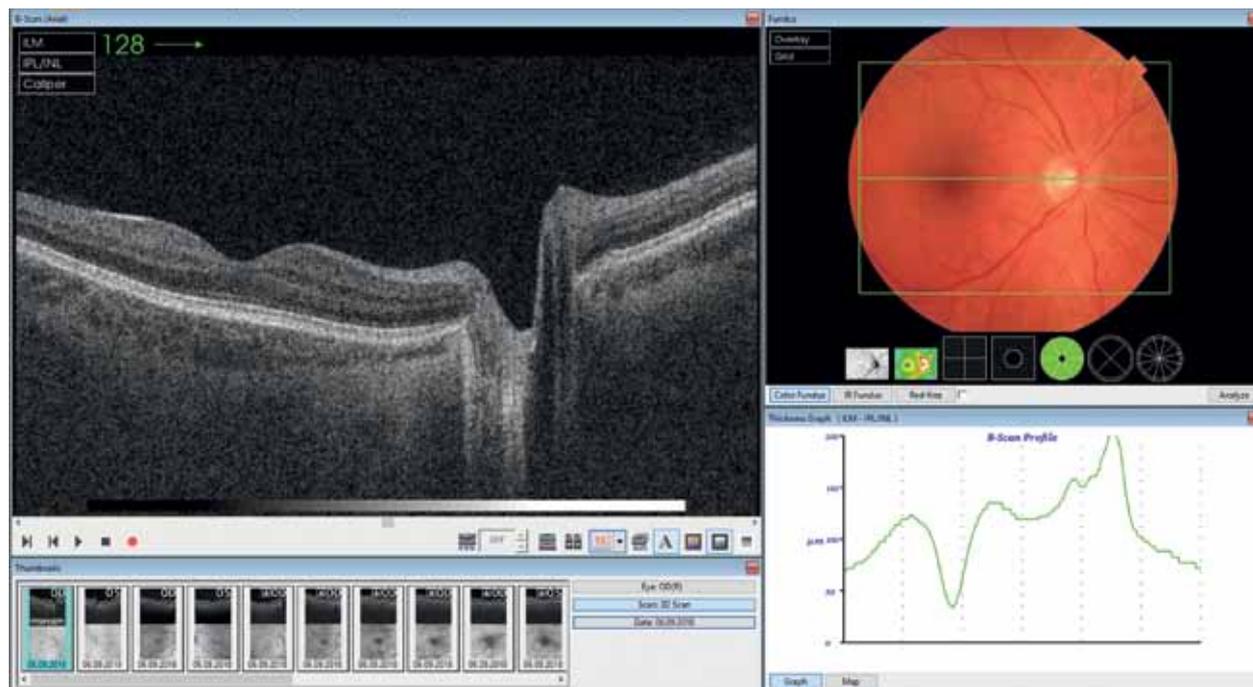


Рис. 3. Пример карты толщины хориоидеи в макулярной зоне сетчатки. Сканирование по протоколу 3D Macular.



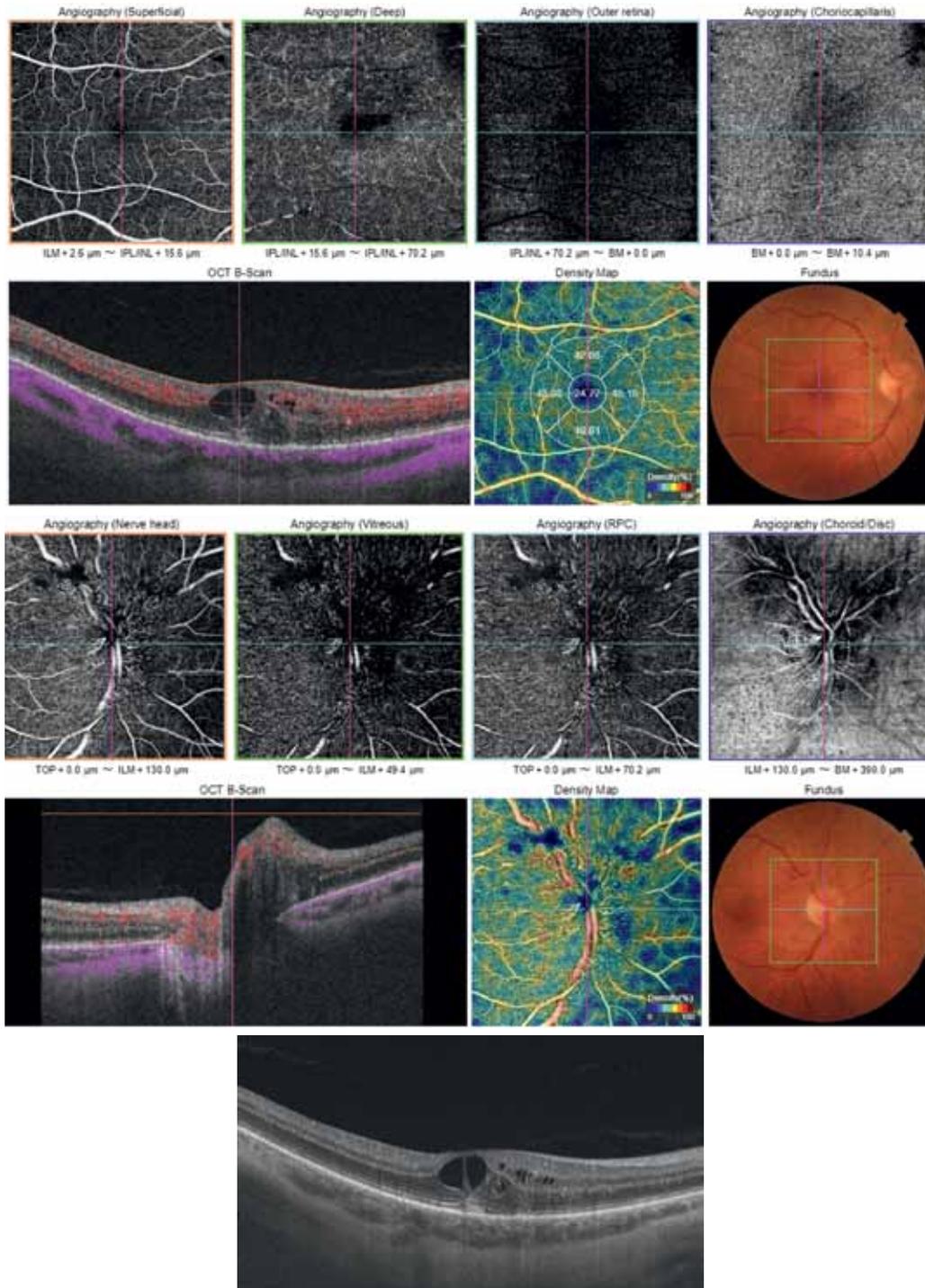
**Рис. 4.** SS-ОКТ в режиме 3D Wide (12x9 мм, 512x256 В-сканов) и ОКТА 12x12 мм.

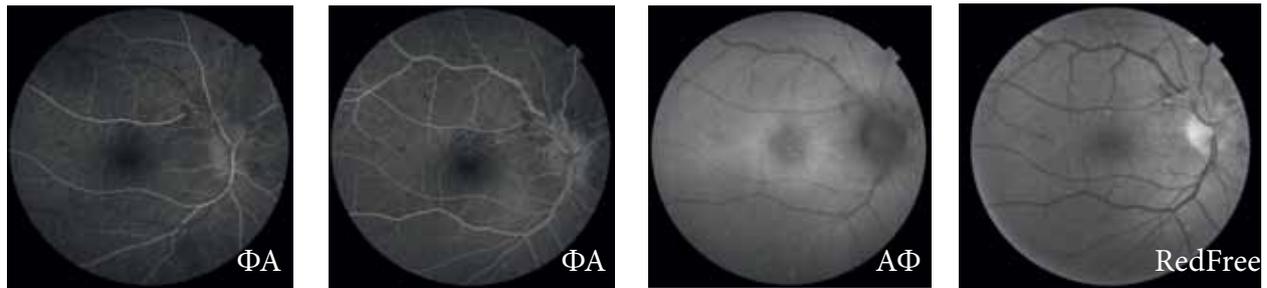
размер В-скана) составляет 2-2,3 мм. Главным образом благодаря большей длине волны SS-ОКТ позволяет получать сканы глубиной 2,6-2,7 мм, что дает одновременно отличную визуализацию как заднего гиалоида и внутренних слоев сетчатки, так и хориоидеи вплоть до склеры на одном В-скане. Расширенная область/глубина сканирования упрощает работу с пациентами с высокой осевой миопией, у которых в большинстве случаев не удается поместить всю сетчатку в один ОКТ-срез.

Чем больше А-сканов в секунду способен сделать томограф, тем длиннее могут быть выполняемые В-сканы и выше их разрешение. SS-ОКТ дает возможность одномоментно сканировать большие площади глазного дна – 12x9 мм в режиме ОКТ и 12x12 в режиме ОКТА. Возможность получать картины от таких больших областей, захватывая и всю зону макулы, и диск зрительного нерва (ДЗН) одномоментно, а не путем компиляции отдельно снятых небольших участков, существенно улучшает качество результата и экономит время пациента и оператора.

Современный стандарт диагностики заболеваний сетчатки предполагает мультимодальный подход – сравнение результатов всех доступных методов визуализации структур глаза. Производители стараются совместить в одном приборе ОКТ и другие диагностические модули, позволяющие проводить контрастную ангиографию, получать цветные фотографии глазного дна с возможностью разложения на спектры, регистрировать аутофлюоресценцию сетчатки, а также сопоставлять получаемые изображения между собой в одном программном обеспечении. Например, пользователь может выбрать интересующий его объект на цветной фотографии и увидеть ОКТ и ОКТА этой зоны и, наоборот, выявив изменение на ОКТ, определить, каким офтальмоскопическим изменениям оно соответствует.

Традиционно предметом главной критики является аксиальное разрешение swept source томографов, которое уступает на 2-4 мкм современным спектральным томографам. Главные тому причины – узкая полоса спектра излучения сканирующего лазера и большая длина волны. Для Fourier-domain ОКТ, вне зависимости от способа детекции ОКТ-сигнала, аксиальное разрешение пропорционально центральной длине волны и обратно пропорционально





▲ **Рис. 5б.** Пример мультимодальной визуализации. Тромбоз ветви центральной вены сетчатки. Флюоресцеиновая ангиография. Аутофлюоресценция сетчатки. Фотография в бесцветном режиме.

◀ **Рис. 5а.** Тот же клинический случай. ОКТА макулярной зоны и зоны ДЗН. Структурная ОКТ

спектральной ширине полосы источника света, и описывается формулой:

$$\Delta Z = 0,44 * \lambda^2 / \Delta \lambda,$$

где  $\lambda$  – центральная длина волны, а  $\Delta \lambda$  – спектральная ширина полосы источника света.

Таким образом, коротковолновый источник с широкой спектральной полосой потенциально имеет аксиальное разрешение выше.

Свой вклад вносит и используемая длина волны 1050 нм, которая меньше отражается структурами глаза, через которые проходит. Справедливости ради надо отметить, что по данным литературы сегодня имеются экспериментальные прототипы SS-ОКТ с аксиальным разрешением 5 мкм. Кроме того, следует понимать роль аксиального разрешения в получении качественной итоговой картины. Если обратиться к истории ОКТ и вспомнить революционный переход от time-domain ОКТ к Fourier-domain, то станет очевидно, что именно выросшая скорость сканирования, а не аксиальное разрешение дала тот колоссальный технологический скачок. Для сравнения: аксиальное разрешение самого массового time-domain томографа Stratus ОСТ составляла 8-10 мкм, аксиальное разрешение томографов второго поколения – 3-7 мкм, при этом качество сканов последних разительно отличалось от результатов томографов первого поколения. И это было обусловлено более чем 100-кратным увеличением скорости сканирования: от 400 А-сканов

в секунду при time-domain эпохе до 20.000-85.000 с появлением спектральной ОКТ. Не секрет, что помимо понятия оптического аксиального существует термин «программное» или «интерполяционное разрешение» – искусственное улучшение качества конечной картинке, представляемой пользователю, после программной обработки первичных сканов. Существует множество ноу-хау и различных способов решения задачи обработки первичного изображения, главной целью которого является «нарисовать неразличимое» путем аппроксимаций и экстраполяций. Подобный постпроцессинг выполняется при любом протоколе сканирования любого томографа и его целью является решение целого ряда технических проблем, связанных в первую очередь со спекл-шумом, а также микродвижением глаз. И тут мы опять возвращаемся к высокой скорости сканирования, так как чем выше скорость, тем большее количество сканов можно выполнить строго в одной и той же точке, и тем совершеннее будет работать алгоритм шумоподавления, и тем ближе к реальности будут «достаиваемые» путем усреднения сканы. Работа Sander и соавторов наглядно демонстрирует, что применение современных алгоритмов увеличения отношения сигнал/шум позволяет визуализировать и распознавать все слои сетчатки на сканах time-domain томографов первого поколения не хуже, чем от спектральных [5].

В качестве итога можно сказать, что рядовой пользователь современных томографов вряд ли почувствует разницу в качестве сканов, полученных с помощью томографов, имеющих аксиальное разрешение 3 и 8 мкм. И уж тем более эта разница никак не повлияет на точность поставленных диагнозов. Кроме того, есть основания надеяться, что в недалеком будущем аксиальное решение современных SS-ОКТ томографов удастся повысить до сходных со спектральными томографами значений. Несколько подобных прототипов уже заявлены в проводимых исследованиях [4].

Вторым фактором, сдерживающим повсеместное распространение SS-ОКТ, является его высокая стоимость. Главным образом она обусловлена стоимостью используемого лазерного источника. Применение технологии синхронизации мод излучения на основе свипирования линии генерации (Fourier Domain Mode Locking, FDML) произвела прорыв, позволивший реализовать на практике идею высокоскоростной SS-ОКТ. Однако стоимость одного такого лазера превышает среднюю стоимость всего спектрального томографа, а также требует дорогих

сопутствующих комплектующих (резонатора, фильтров, усилительных модулей и проч.). Но и для этой проблемы есть надежда на скорое решение. Исследуется возможность создания SS-ОКТ с использованием технологии фотонных интегральных схем, что не только существенно снизит стоимость конечного продукта, но и делает его компактнее [6].

### Литература

- [1] Kolb JP, Pfeiffer T, Eibl M, et al. *High-resolution retinal swept source optical coherence tomography with an ultra-wideband Fourier-domain mode-locked laser at MHz A-scan rates* // *Biomed Opt Express*. 2017 Dec 5; 9(1): 120-130. DOI: 10.1364/BOE.9.000120
- [2] Fujimoto J, Swanson E. *The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography* // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016; 57:OCT1–OCT13. DOI: 10.1167/iops.16-19963
- [3] An L, Li P, Shen TT, et al. *High speed spectral domain optical coherence tomography for retinal imaging at 500,000 A lines per second* // *Biomed Opt Express*. 2011 Oct 1; 2(10): 2770-83. DOI: 10.1364/BOE.2.002770
- [4] Potsaid B, Gorczynska I, Srinivasan VJ, et al. *Ultrahigh speed spectral / Fourier domain OCT ophthalmic imaging at 70,000 to 312,500 axial scans per second* // *Opt Express*. 2008 Sep 15; 16(19):15149-69.
- [5] Sander B, Larsen M, Thrane L, et al. *Enhanced optical coherence tomography imaging by multiple scan averaging* // *Br J Ophthalmol*. 2005 Feb; 89(2): 207–212. DOI: 10.1136/bjo.2004.045989
- [6] Wang Z, Lee HC, Vermeulen D, et al. *Silicon photonic integrated circuit swept-source optical coherence tomography receiver with dual polarization, dual balanced, in-phase and quadrature detection* // *Biomed Opt Express*. 2015 Jun 17; 6(7):2562-74. DOI: 10.1364/BOE.6.002562

## Сравнительные исследования SS- и SD-ОКТ

Методология научного исследования строго диктует необходимость сравнивать любой появляющийся новый диагностический метод с «золотым стандартом», коим в области ОКТ, безусловно, является SD-ОКТ. Подобных работ с момента презентации SS-ОКТ было выполнено множество и все их можно разделить на две группы: исследования, оценивающие диагностическую значимость и точность двух технологий ОКТ, и работы, сравнивающие результаты различных численных измерений, выполненных на одном объекте – толщина слоев сетчатки и хориоидеи, размеры субретинальной неоваскулярной мембраны (СНМ), площадь васкуляризации, параметры ДЗН и т.д. Если начать со второй категории, то в большинстве работ было продемонстрировано, что значимые различия между результатами численных измерений имеются, но вот на этапе объяснения причин возникает много вопросов [1-6]. Соблазнительно предположить преимущество SD- или SS-ОКТ, объяснив это лучшей визуализацией, но следует помнить, что дизайн подобных исследований предусматривает много допущений. У разных моделей томографов различаются протоколы и области сканирования – их локализация, размер, количество, разрешение и шаг сканов. Погрешность может возникать на этапе постпроцессинга первичных В-сканов и зависеть от применяемого алгоритма шумоподавления и усреднения. Кроме того, разные разработчики по-разному определяют границы слоев сетчатки (например, внешние границы сетчатки определяются по внешней или внутренней поверхности ПЭС). Ни одно из исследований не отвечает на вопрос: имеет ли какой-то из методов ОКТ преимущество. И справедливости ради надо сказать, что выявляемые различия хоть и статистически значимы, но численно колеблются в пределах 5-25 мкм, что может быть существенно для исследовательской офтальмологии, но не для практической медицины.

Если же говорить о глобальном сравнении диагностической информативности технологий SD- и SS-ОКТ, то никакой ожидаемой сенсации тут не случилось. Исследования продемонстрировали, что новый принцип ОКТ не уступает традиционной спектральной в диагностике заболеваний сетчатки и зрительного нерва [6-8], а все споры лежат в плоскости задач, которые ставит перед собой оператор/врач, специфики работы офтальмологических отделений, личных предпочтений и привычек врача, а также амбиций маркетологов компаний-производителей.

### Литература

- [1] Miller AR, Roisman L, Zhang Q, et al. Comparison Between Spectral-Domain and Swept-Source Optical Coherence Tomography Angiographic Imaging of Choroidal Neovascularization // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2017 Mar 1; 58(3):1499-1505. DOI: 10.1167/iavs.16-20969
- [2] Tan CS, Chan JC, Cheong KX, et al. Comparison of retinal thicknesses measured using swept-source and spectral-domain optical coherence tomography devices // *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2015 Feb; 46(2):172-9. DOI: 10.3928/23258160-20150213-23
- [3] Zafar S, Siddiqui MR, Shahzad R. Comparison of choroidal thickness measurements between spectral-domain OCT and swept-source OCT in normal and diseased eyes // *Clin Ophthalmol*. 2016 Nov 14; 10:2271-2276.
- [4] Anegondi N, Kshirsagar A, Mochi TB, et al. Quantitative Comparison of Retinal Vascular Features in Optical Coherence Tomography Angiography Images From Three Different Devices // *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2018 Jul 1; 49(7):488-496. DOI: 10.3928/23258160-20180628-04
- [5] Copete S, Flores-Moreno I, Montero JA, et al. Direct comparison of spectral-domain and swept-source OCT in the measurement of choroidal thickness in normal eyes // *Br J Ophthalmol*. 2014 Mar; 98(3):334-8. DOI: 10.1136/bjophthalmol-2013-303904
- [6] Zhang Q, Chen CL, Chu Z, et al. Automated Quantitation of Choroidal Neovascularization: A Comparison Study Between Spectral-Domain and Swept-Source OCT Angiograms // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2017 Mar 1; 58(3):1506-1513. DOI: 10.1167/iavs.16-20977

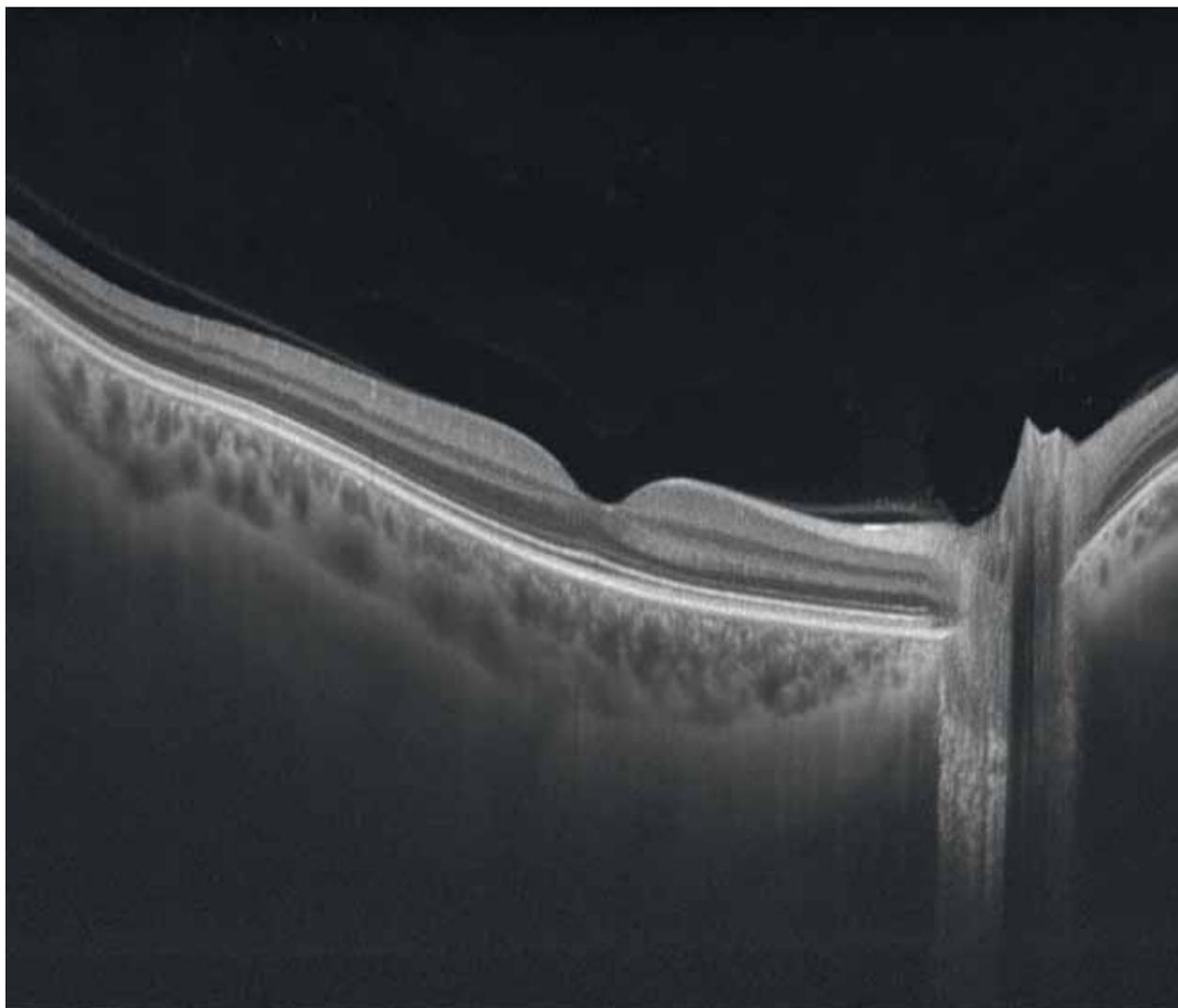
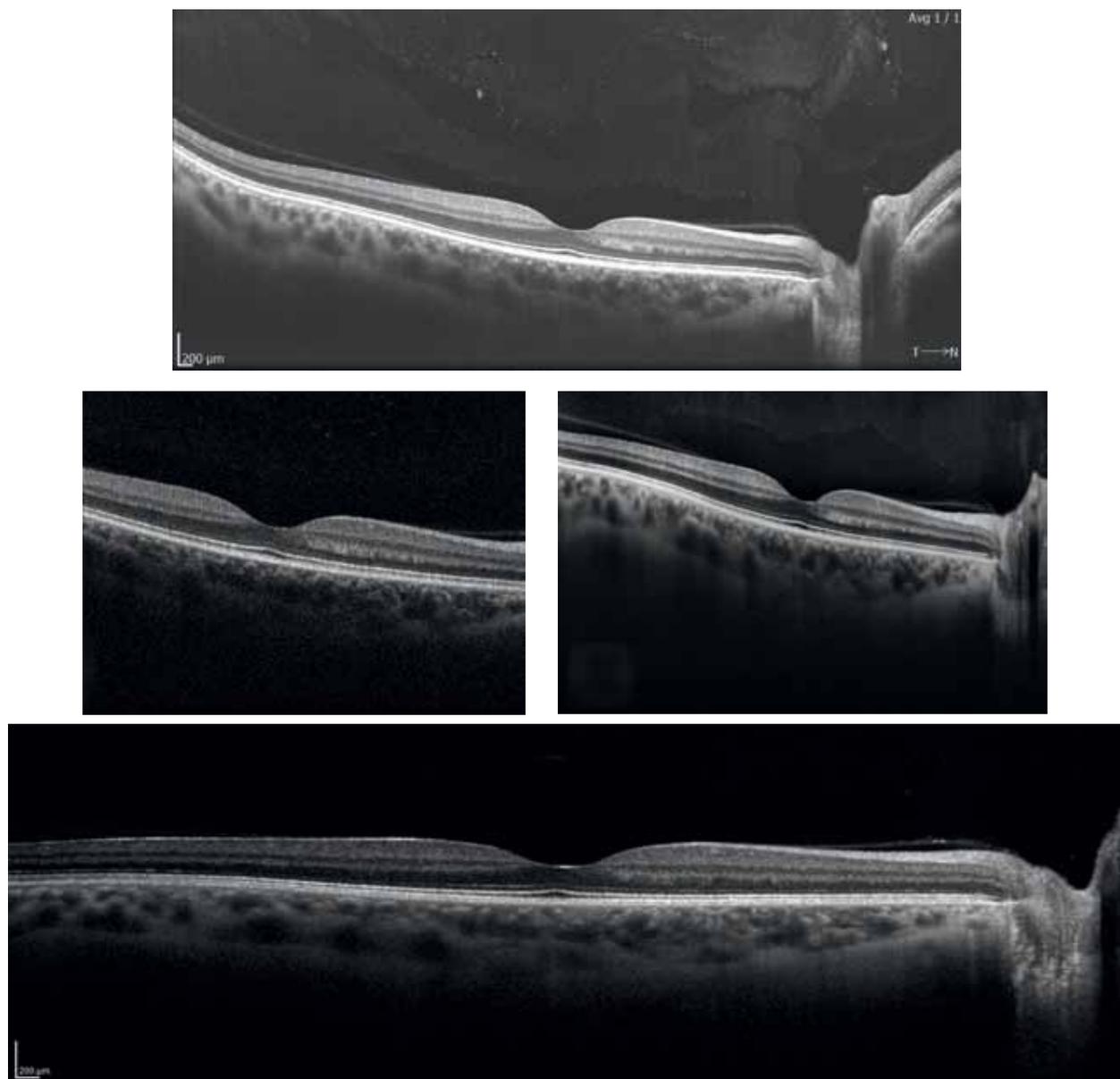


Рис. 6а. Линейный скан, выполненный с помощью SS-ОКТ.



**Рис. 66.** Линейные SD-ОКТ сканы того же глаза (см. рисунок слева), выполненные с помощью различных томографов, доступных в настоящее время.

[7] Su GL, Baughman DM, Zhang Q, et al. Comparison of retina specialist preferences regarding spectral-domain and swept-source optical coherence tomography angiography // *Clin Ophthalmol*. 2017 May 15; 11:889-895. DOI: 10.2147/OPTH.S135479

[8] Lee WJ, Oh S, Kim YK, et al. Comparison of glaucoma-diagnostic ability between wide-field swept-source OCT retinal nerve fiber layer maps and spectral-domain OCT // *Eye (Lond)*. 2018 Sep; 32(9):1483-1492. DOI: 10.1038/s41433-018-0104-5

## Номенклатура ОКТ

Переход от time-domain ОКТ к спектральной позволил приблизиться к гистологической подробности в визуализации сетчатки, но и породил множество вопросов. Наибольшее количество споров вызвала номенклатура наружных слоев сетчатки. Например, в норме аксоны фоторецепторов (волокна Генле) по причине своей строгой пространственной ориентации, будучи гистологически частью наружного плексиформного слоя сетчатки, томографически не отделимы от наружного ядерного слоя. Еще больше вопросов вызывали видимые на ОКТ гиперрефлективные слои в проекции тел фоторецепторов и зоны их контакта с клетками ПЭС.

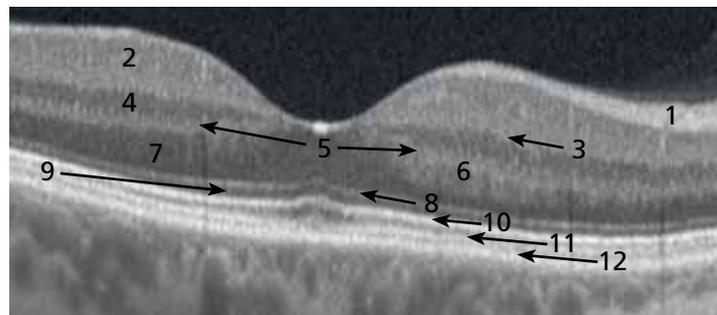
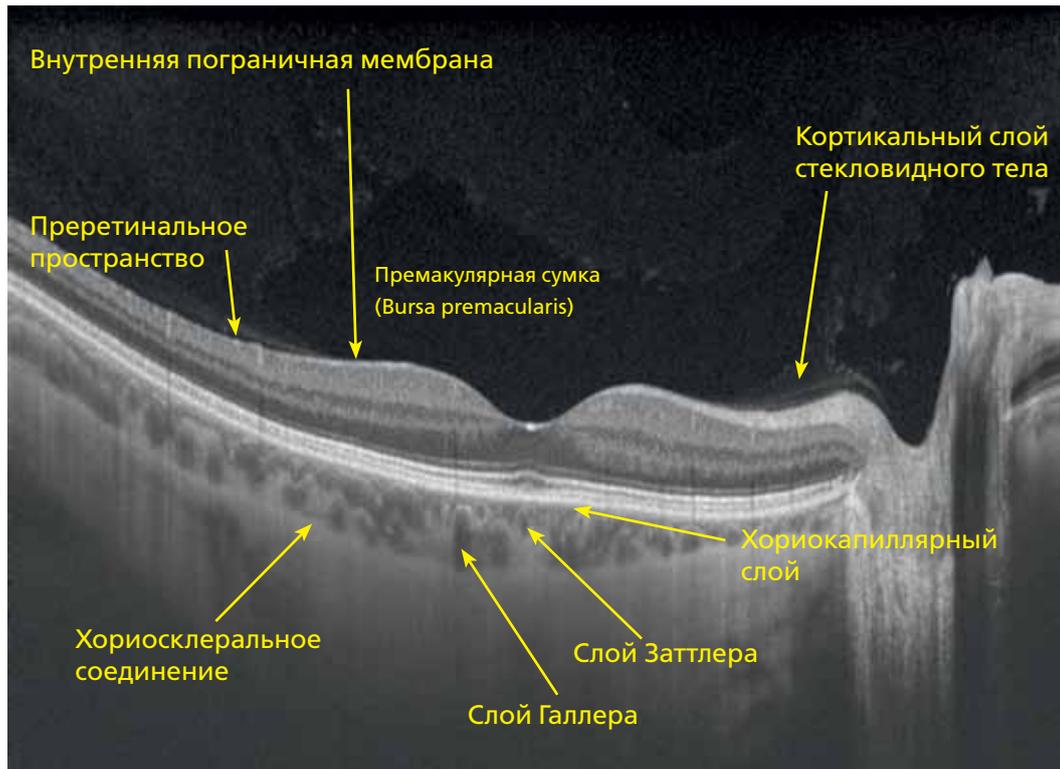
С целью прийти к консенсусу был создан проблемный комитет (the International Nomenclature for Optical Coherence Tomography Panel, IN•ОСТ), и в 2014 году международная группа экспертов представила обновленную систему терминологии ОКТ. В основу легли морфологические, экспериментальные, клинические и эмпирические исследования. Уточнение коснулось слоя, соответствующего скоплению митохондрий во внутренних сегментах фоторецепторов, ранее обозначаемого как область соединения наружных и внутренних сегментов фоторецепторов (inner segment/outer segment junction, IS/OS), а теперь получившего название эллипсоидная зона (эллипсоид). Вышележащий гипорефлективный слой, соответствующий той части внутреннего сегмента фоторецептора, где нет упорядоченного скопления внутриклеточных органелл, способных отражать ОКТ-сигнал, был назван миоидной зоной (миоид). Также пересмотрено определение нижележащего гиперрефлективного слоя. До этого были предположения, что он соответствует вершине наружных сегментов фоторецепторов (cone outer segment tip=COST в центре, на периферии – ROST) или визуализирует сеть меж-

клеточных контактов ПЭС (мембрана Верхофа), или образован скоплением гранул меланина в ПЭС. В настоящее время данный слой считают зоной контакта апикальных отростков клеток ПЭС с наружными сегментами палочек и колбочек (interdigitation zone).

С появлением режима EDI SD-ОКТ и распространением SS-ОКТ стало возможным различать на ОКТ-сканах слой хориокапилляров, слои Заттлера и Галлера хориоидеи, а также зону контакта сосудистой и склеральной оболочек глаза.

### Литература

- [1] Staurenghi G, Sadda S, Chakravarthy U, et al. Proposed lexicon for anatomic landmarks in normal posterior segment spectral-domain optical coherence tomography: the IN • OCT consensus // *Ophthalmology*. 2014 Aug; 121(8):1572-8. DOI: 10.1016/j.ophtha.2014.02.023
- [2] Turgut B. Past and present terminology for the retinal and choroidal structures in optical coherence tomography // *European Ophthalmic Review*, 2017; 11(1):59–61 DOI: <https://doi.org/10.17925/EOR.2017.11.01.59>

**Гипорефлективные слои:**

- 2 – Слой ганглиозных клеток
- 4 – Внутренний ядерный слой
- 7 – Наружный ядерный слой
- 9 – Миоидная зона фоторецепторов

**Гиперрефлективные слои:**

- 1 – Слой нервных волокон
- 3 – Внутренний плексиформный слой
- 5 – Наружный плексиформный слой
- 6 – Волокна Генле
- 8 – Наружная пограничная мембрана
- 10 – Эллипсоидная зона фоторецепторов
- 11 – Зона контакта апикальных отростков ПЭС с наружными сегментами колбочек
- 12 – Комплекс ПЭС/мембрана Бруха

**Рис. 7.** SS-ОКТ скан здоровой сетчатки. Указаны названия согласно номенклатуре IN • ОСТ.

## **Возрастная макулярная дегенерация**

Одна из современных классификаций возрастной макулярной дегенерации (ВМД), утвержденная группой экспертов в 2013 году и получившая имя изобретателя и филантропа Арнольда Бекмана, спонсировавшего работу междисциплинарной программы исследования макулярных заболеваний, выделяет 4 стадии болезни [1]. Стадия 0 подразумевает отсутствие признаков ВМД, а также допускает наличие немногочисленных мелких (менее 63 мкм) друз как части нормального инволюционного процесса, не повышающего риск прогрессирования до поздних стадий заболевания. К стадии ранней ВМД относят наличие друз среднего калибра (63-125 мкм) при отсутствии пигментных аномалий в пределах двух диаметров ДЗН от центра фовеа. Следующая стадия – промежуточная или средняя – диагностируется при наличии крупных (более 125 мкм) друз и/или пигментных аномалий в центральной зоне сетчатки. Последняя (поздняя) стадия включает в себя два варианта исхода заболевания: географическую атрофию ПЭС и неоваскулярную форму ВМД (нВМД). Несмотря на то что авторы классификации ставили своей целью создать понятную систему для практических врачей, основывающуюся в первую очередь на результатах офтальмоскопии, широкое распространение ОКТ в рутинной практике вносит свой вклад в понимание заболевания и упрощает определение стадии заболевания (см. Таблица 1).

### **Макулярные друзы**

Метод ОКТ позволяет не только классифицировать макулярные друзы по размеру, но и приблизиться к гистологической оценке их природы. Хотя надо признать, что до сих пор не существует единого мнения, как соотносятся результаты

Таблица 1.

**Классификация ВМД Бекмана**

стадия ВМД	офтальмоскопическая картина	роль ОКТ в диагностике
нет признаков ОКТ или естественные возрастные изменения сетчатки	нет изменений или единичные мелкие (менее 63 мкм) твердые друзы	дифференциальная диагностика простых твердых друз, кутикулярных друз и ретикулярных псевдодруз
ранняя/начальная ВМД	друзы среднего (63-125 мкм) размера, отсутствуют пигментные аномалии	оценка размера и типа макулярных друз
промежуточная/умеренная стадия ВМД	крупные (более 125 мкм) друзы и/или пигментные аномалии в макулярной зоне сетчатки	оценка размера и типа макулярных друз, выявление зон атрофии, гиперплазии и миграции клеток ПЭС, исключение отслойки ПЭС, симптома «двойной слой» (см. далее), оценка толщины и архитектоники хориоидеи с целью дифференциальной диагностики ВМД и группы пахихориоидальных заболеваний сетчатки(см. далее)
поздняя ВМД	картина ГА ПЭС или нВМД	оценка протяженности и площади атрофии слоя ПЭС, выявление СНМ в режиме ОКТА, определение типа СНМ и формы нВМД, выявление признаков активности СНМ, контроль эффективности антиангиогенной терапии нВМД, оценка толщины и архитектоники хориоидеи с целью дифференциальной диагностики ВМД и группы пахихориоидальных заболеваний сетчатки (см. далее)

post-mortem исследований различных видов макулярных друз с данными прижизненной мультимодальной диагностики.

### **Простые твердые друзы**

Простые твердые друзы, имеющие малый размер, четкие границы и равномерную окраску, не связаны с повышенным риском прогрессирования ВМД, и сегодня считаются естественным признаком позднего возраста [2], а потому все чаще звучат предложения отойти в их определении от понятия «друза» и выбрать иное – drupelet (дословно – костянка, часть плода многокостянки), которое ввиду трудности перевода вряд ли приживется в русском профессиональном языке. Если для мелких твердых друз не существует типичных ОКТ-признаков, а зачастую подобные типы друз вообще слабо различимы даже на ОКТ высокого разрешения [3], то прочие типы друз удастся легко верифицировать.

### **Кутикулярные друзы**

Кутикулярные друзы, ранее не совсем корректно называвшиеся базальными ламинарными друзами, офтальмоскопически могут быть похожи на простые твердые друзы, на флюоресцеиновой ангиографии (ФА) демонстрируют типичную картину «звездного неба» и ассоциированы с высоким риском прогрессирования ВМД. С появлением ОКТ высокого разрешения диагностика этого типа друз больше не требует инвазивной ангиографии. Кутикулярные друзы выглядят как мелкие остроконечные выпячивания слоя ПЭС, основания которых приблизительно равны их высоте (см. рис. 8)

Выявляемые макулярные друзы могут быть не только исключительно кутикулярной природы (см. рис. 9), но также может наблюдаться соседство разного типа друз, особенно часто наблюдается сочетание кутикулярных друз и ретикулярных псевдодруз (см. рис. 10 и 11) с преобладанием одного или другого вида.

### **Ретикулярных псевдодрузы**

До сих пор нет единого мнения о природе и биохимическом составе ретикулярных псевдодруз. С переходом от time-domain к Fourier-domain ОКТ и существенным увеличением разрешения сканов удалось обнаружить главное отличие ретикулярных псевдодруз от прочих видов друз – их локализация над

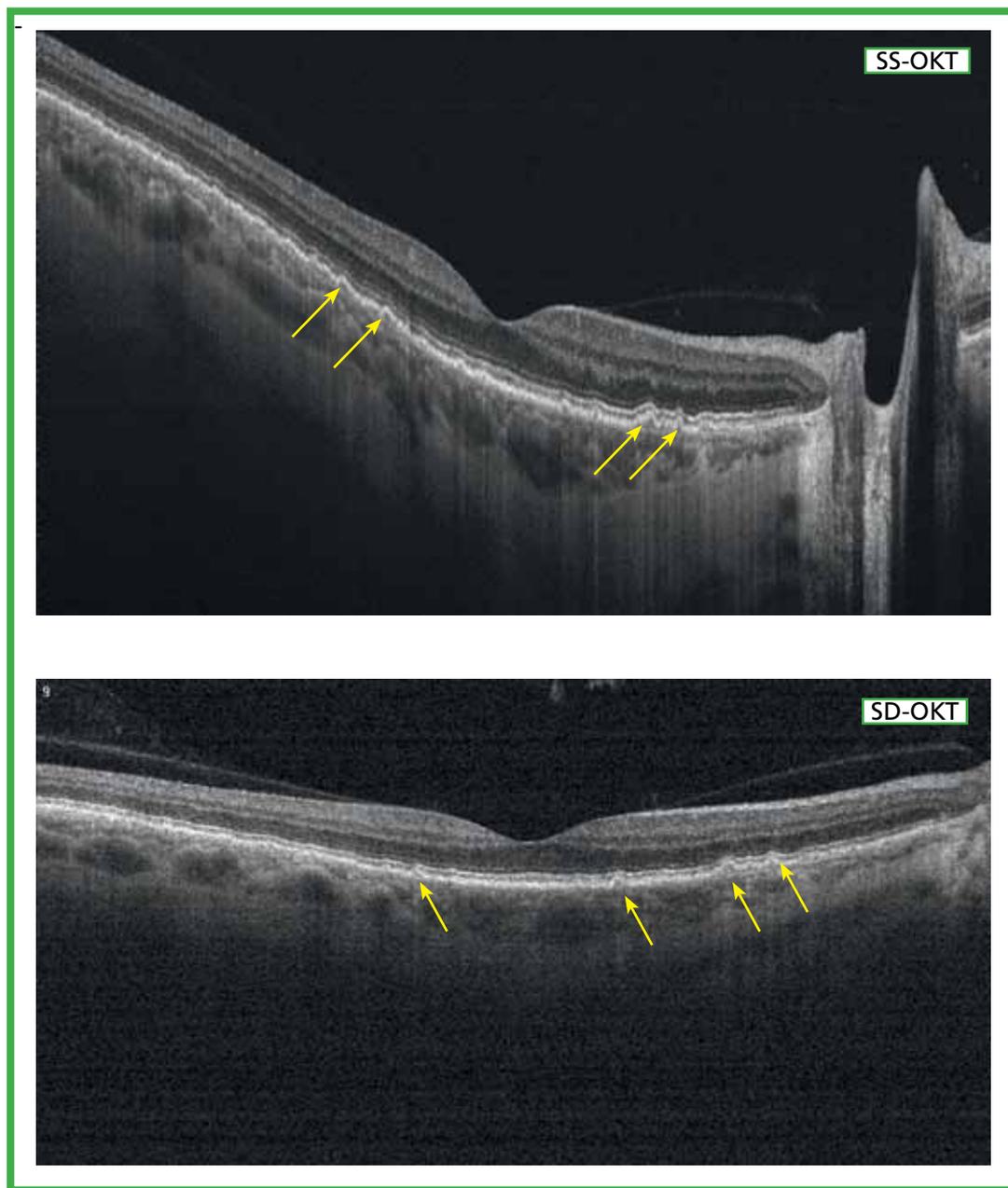


Рис. 8. Кутикулярные друзы сетчатки. Линейные SS-OCT и SD-OCT сканы.

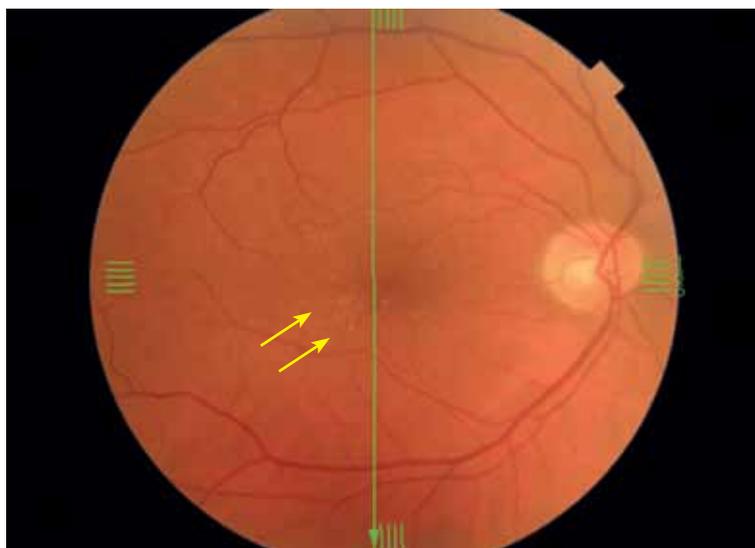
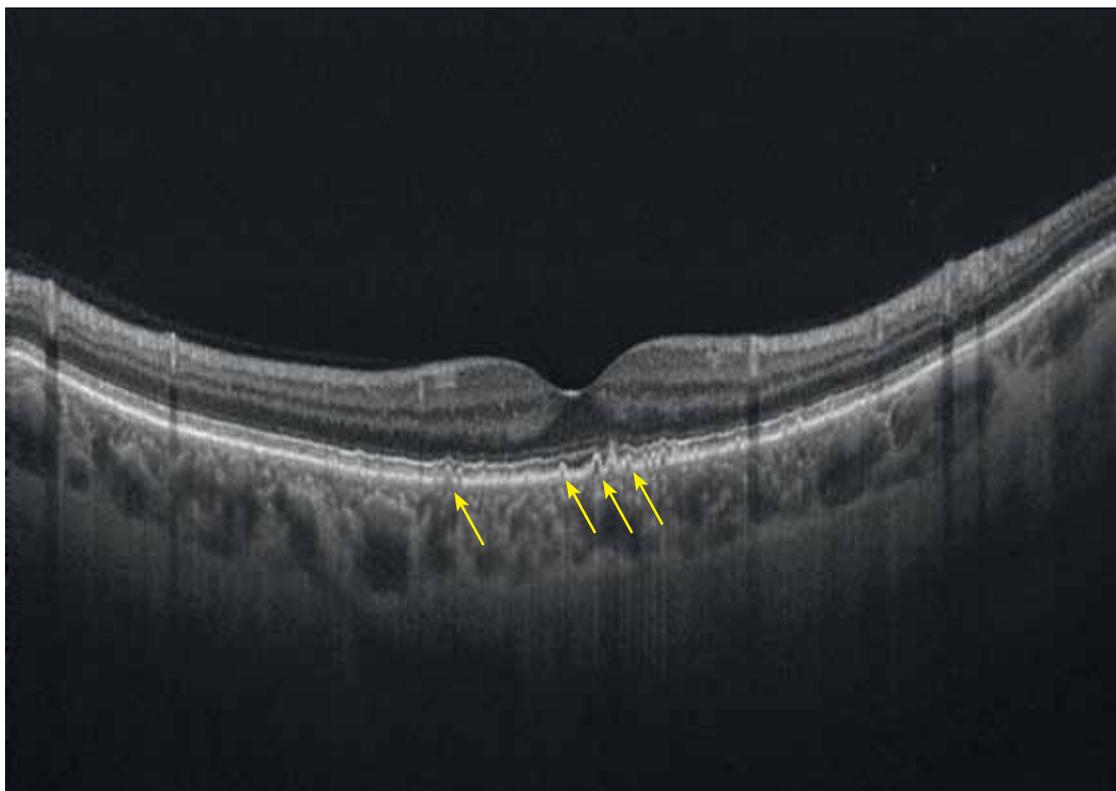
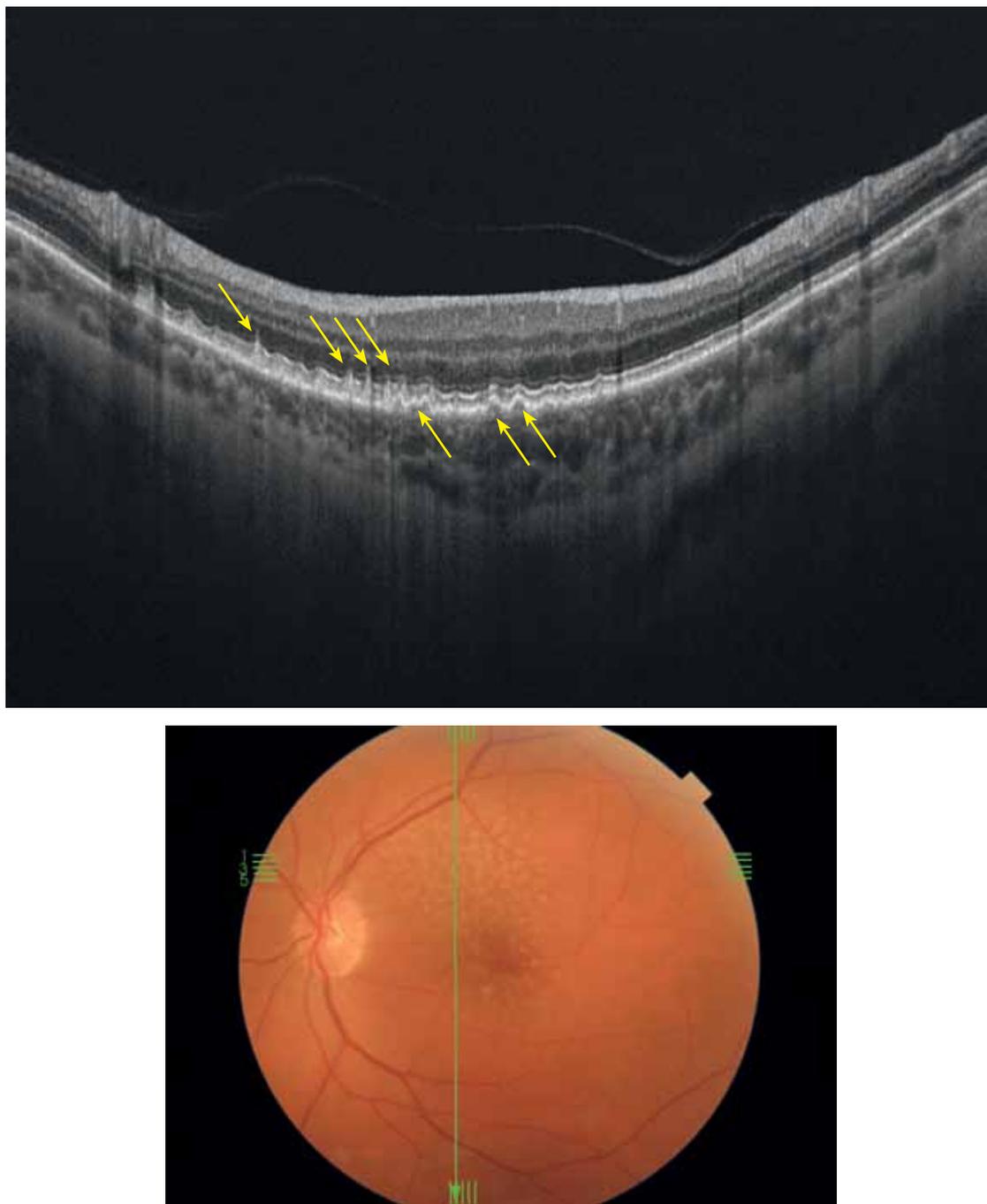
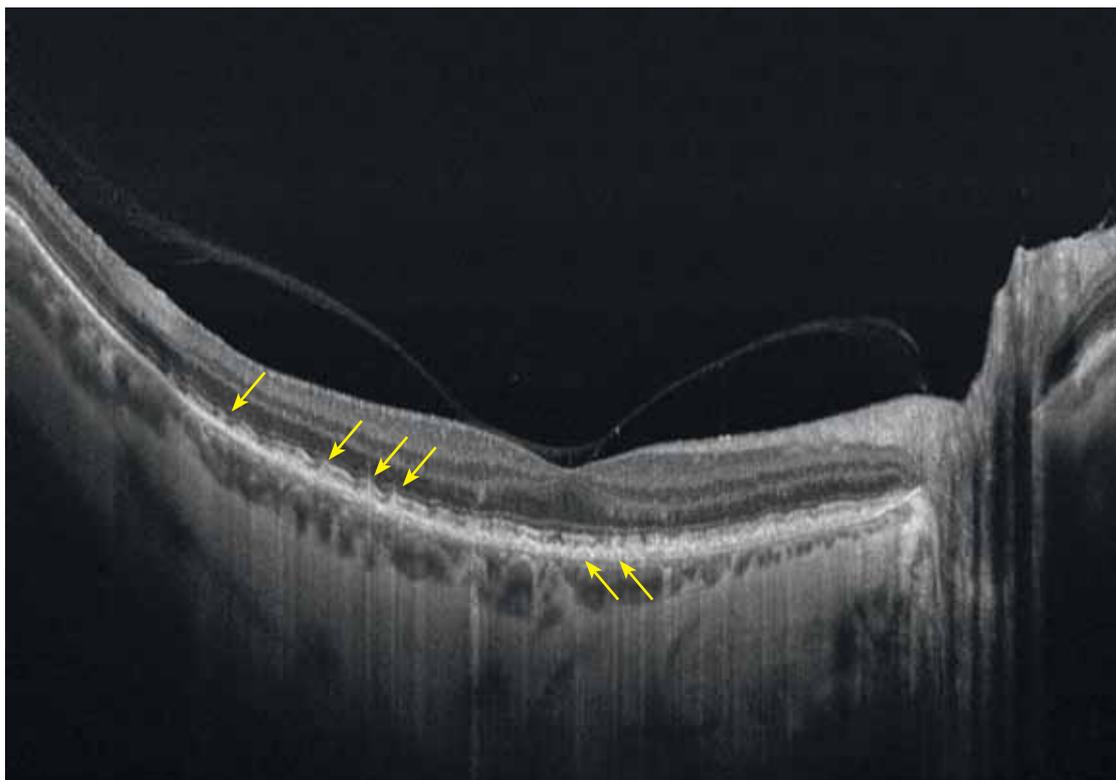


Рис. 9. SS-ОКТ сетчатки с множественными кутикулярными друзами.



**Рис. 10.** SS-ОКТ сетчатки с преимущественно кутикулярными друзами (нижний ряд стрелок) и единичными ретикулярными псевдодрузами (верхний ряд стрелок).



**Рис. 11.** SS-ОКТ сетчатки с преимущественно ретикулярными псевдодрузами (верхний ряд стрелок и отдельными кутикулярными друзами (нижний ряд стрелок).

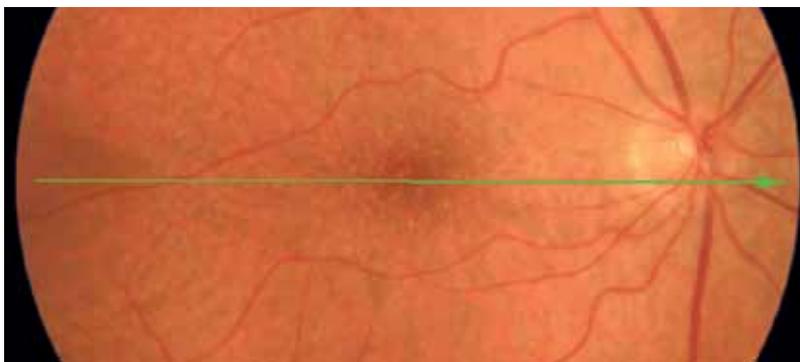
слоем ПЭС. Характерная ОКТ-картина представляет собой конусообразные гиперэхогенные включения, расположенные над сохранным и хорошо различимым комплексом ПЭС/мембрана Бруха, которые прободают вышележащий гиперрефлективный слой – зону контакта фоторецепторов с клетками ПЭС (см. рис. 12) и даже могут достигать наружной пограничной мембраны (см. рис. 13). Ретикулярные псевдодрузы ассоциируются с особо высоким риском прогрессирования ВМД до поздних стадий, и ОКТ в режиме Follow Up в подобных случаях является удобным методом мониторинга и документирования изменений (см. рис. 14).

### **Мягкие друзы**

Макулярные друзы среднего и крупного размера представлены мягкими друзами. Данный тип друз на ОКТ выглядит как локальная приподнятость ПЭС с гомогенным гипоэхогенным субпигментным содержимым (см. рис. 15). Было доказано, что оценка размеров крупных мягких друз на ОКТ-сканах совпадает с результатами традиционных измерений на цветных фотографиях глазного дна [4], и может применяться в том числе для классификации стадии ВМД.

В ряде случаев мягкие друзы со временем демонстрируют тенденцию к увеличению в размерах, слиянию и формированию друзеноидной отслойки ПЭС (см. рис. 16). Подобное состояние может быть трудно отличить от ОКТ-симптома «двойной слой» (см. далее), характерного для группы пахихориоидальных заболеваний сетчатки. Как уже упоминалось выше, технология SS-ОКТ позволяет получать высококачественную визуализацию хориоидеи. Оценка общей толщины хориоидеи и ее отдельных слоев помогает в дифференциальной диагностике таких изменений сетчатки (см. рис. 17).

Другим неблагоприятным исходом множественных мягких друз сетчатки является их спонтанное «высыхание», регресс и формирование зон атрофии ПЭС, которые могут сливаться и формировать географическую атрофию (см. рис 18). Проспективные наблюдения и ретроспективный анализ ОКТ подобной категории пациентов позволил выделить признаки-предвестники географической атрофии (ГА) ПЭС: гиперрефлективные точечные включения во внутренних слоях сетчатки, представляющие собой вероятно мигрировавшие клетки ПЭС (см. рис 19), зоны локальной гиперпроницаемости сигнала ОКТ по краям



**Рис. 12.** Множественные ретикулярные псевдодрозы сетчатки. Линейные SS-OCT и SD-OCT сканы.

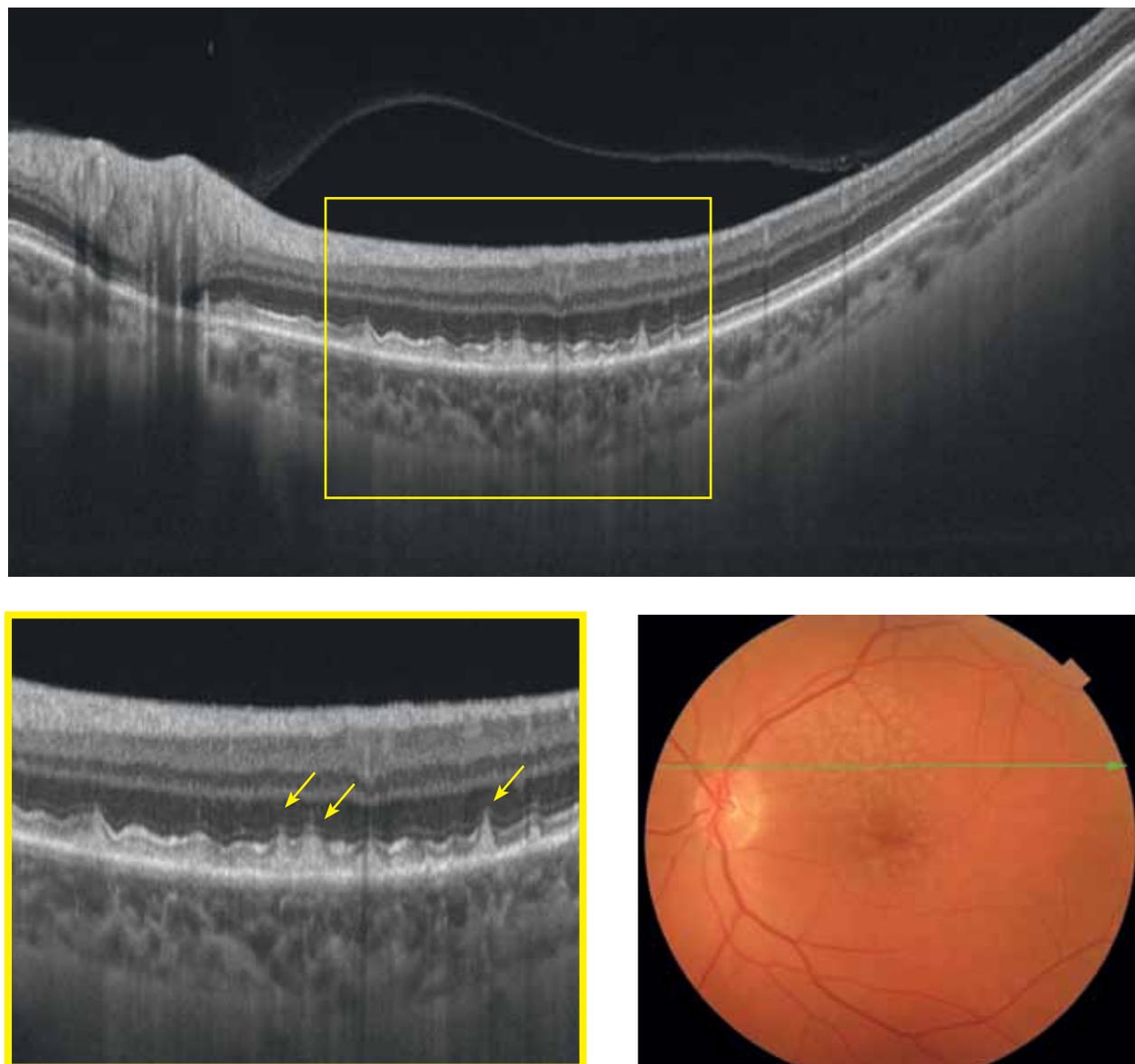
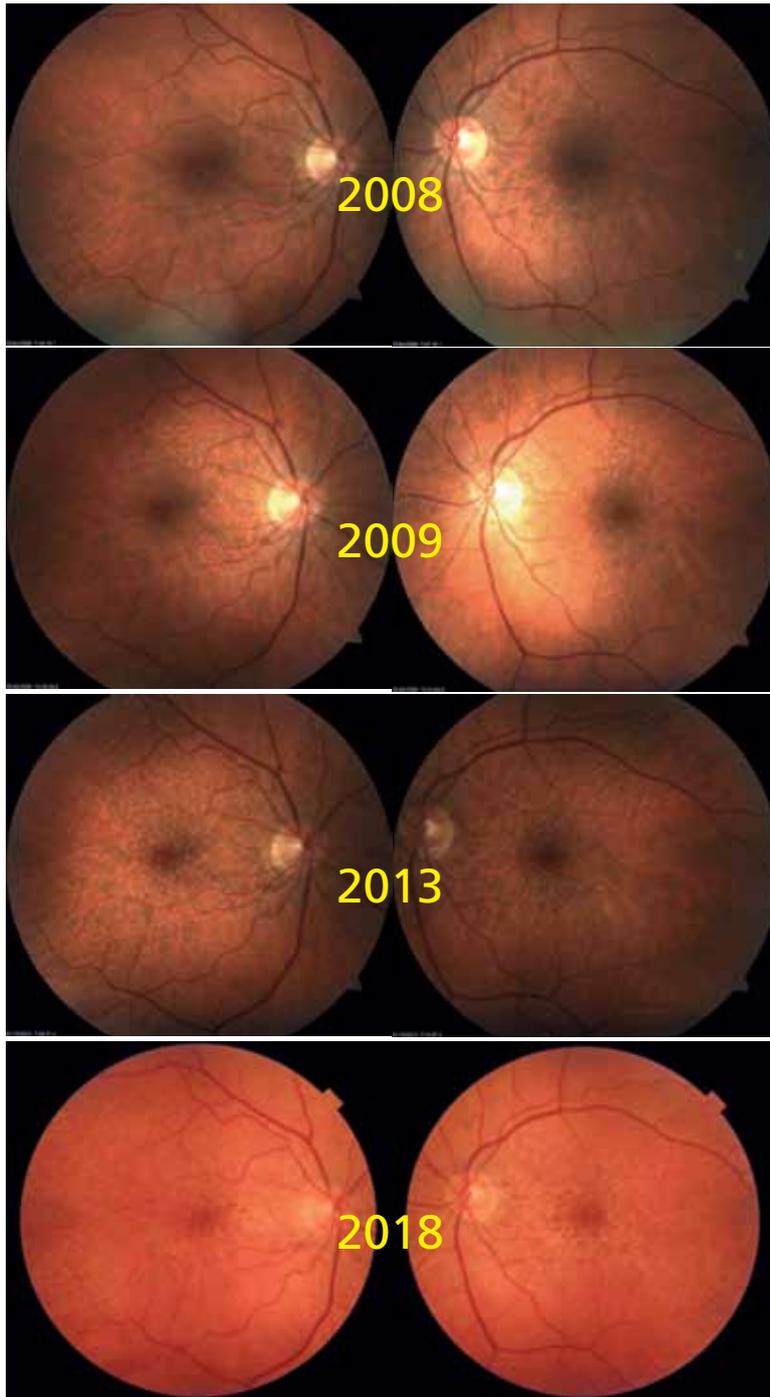
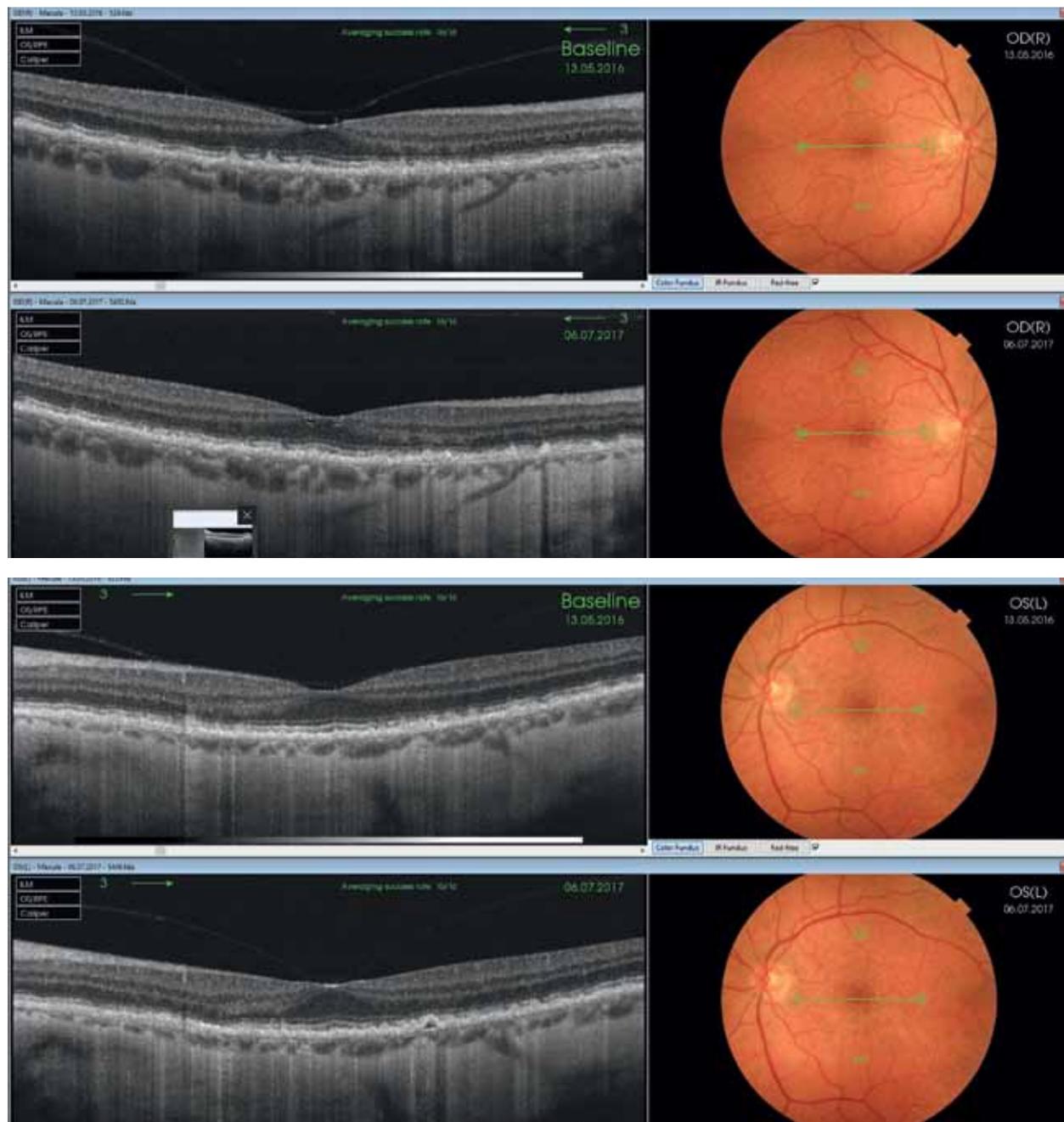


Рис. 13. SS-ОКТ сетчатки с множественными ретикулярными псевдодрузами.



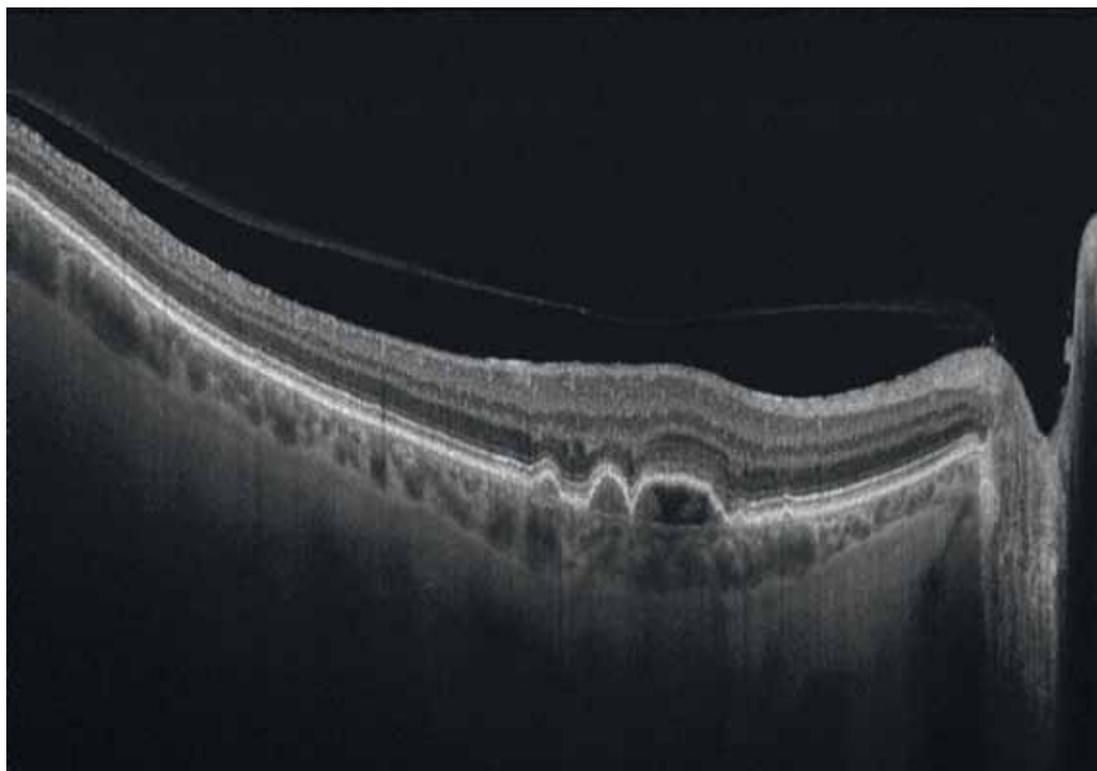
**Рис. 14а.** Клинический пример наблюдения за двусторонними множественными ретикулярными псевдодрузами с 2008 по 2018 год. За период наблюдения произошло последовательное увеличение численности псевдодруз, их частичный регресс с развитием деструкции отдельных клеток ПЭС (видны участки гиперпигментации на фотографиях).



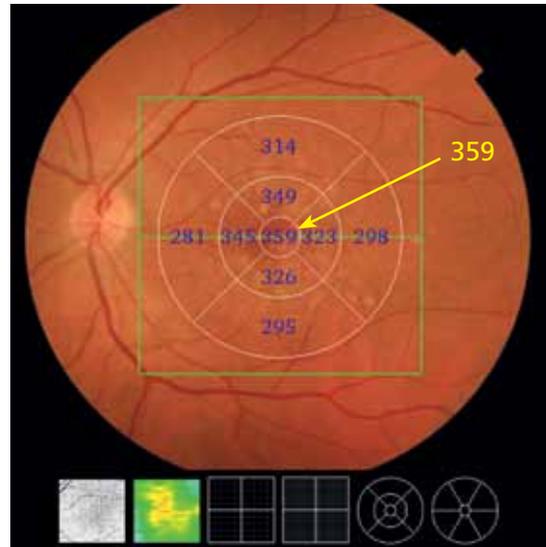
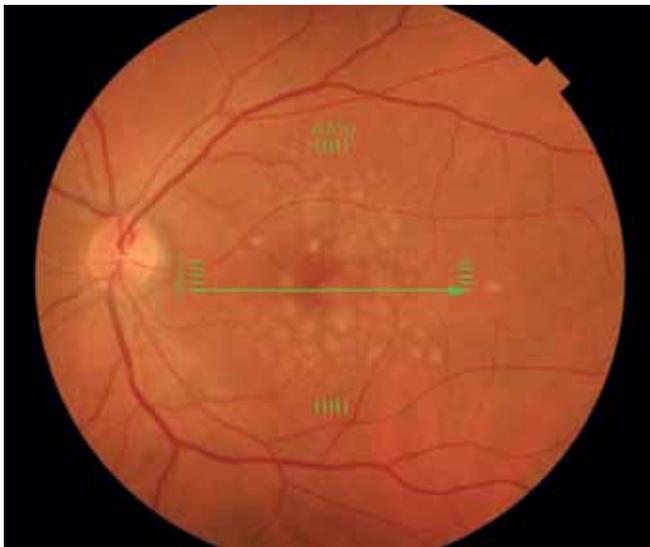
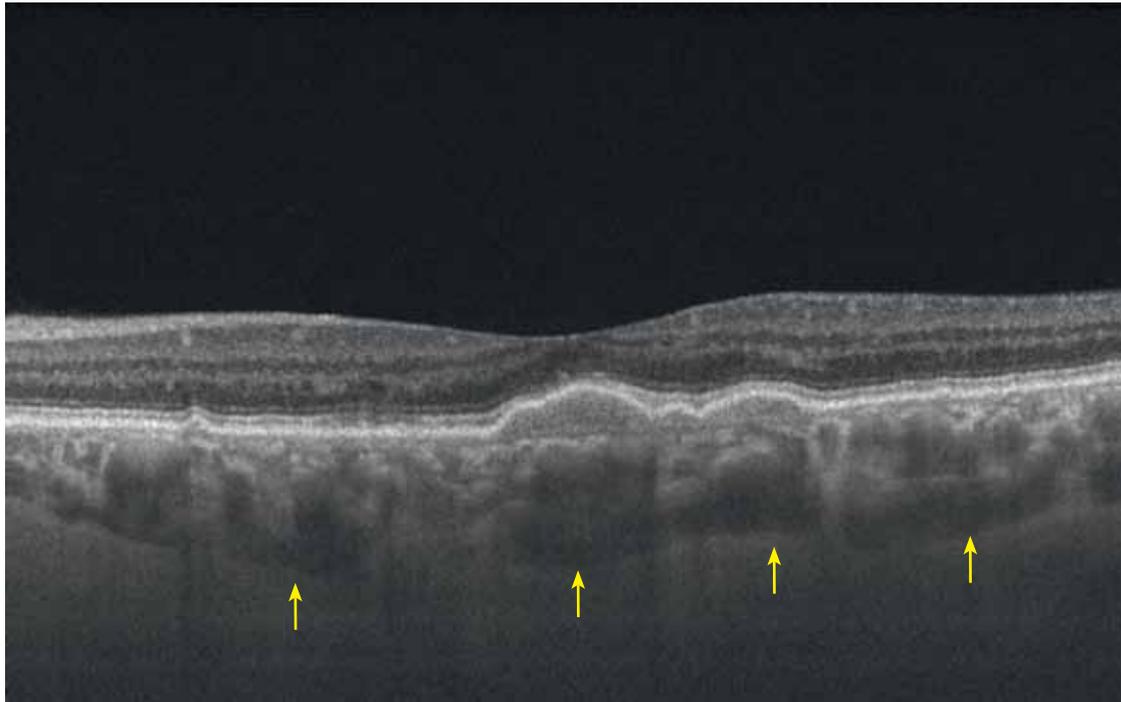
**Рис. 146.** Тот же клинический пример. Сравнительные SS-ОКТ сканы демонстрируют частичный регресс ретикулярных псевдодроз.



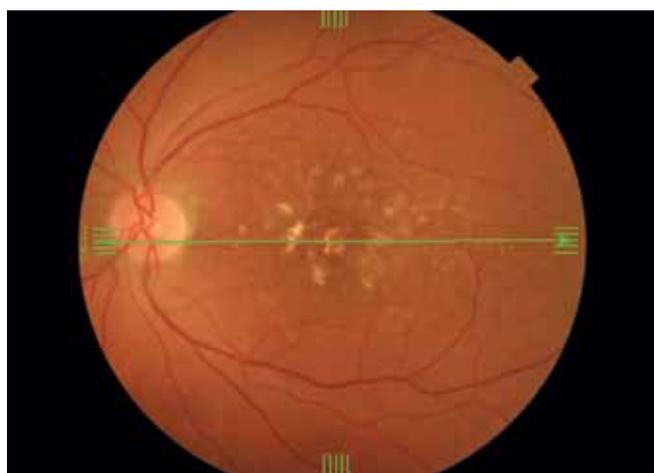
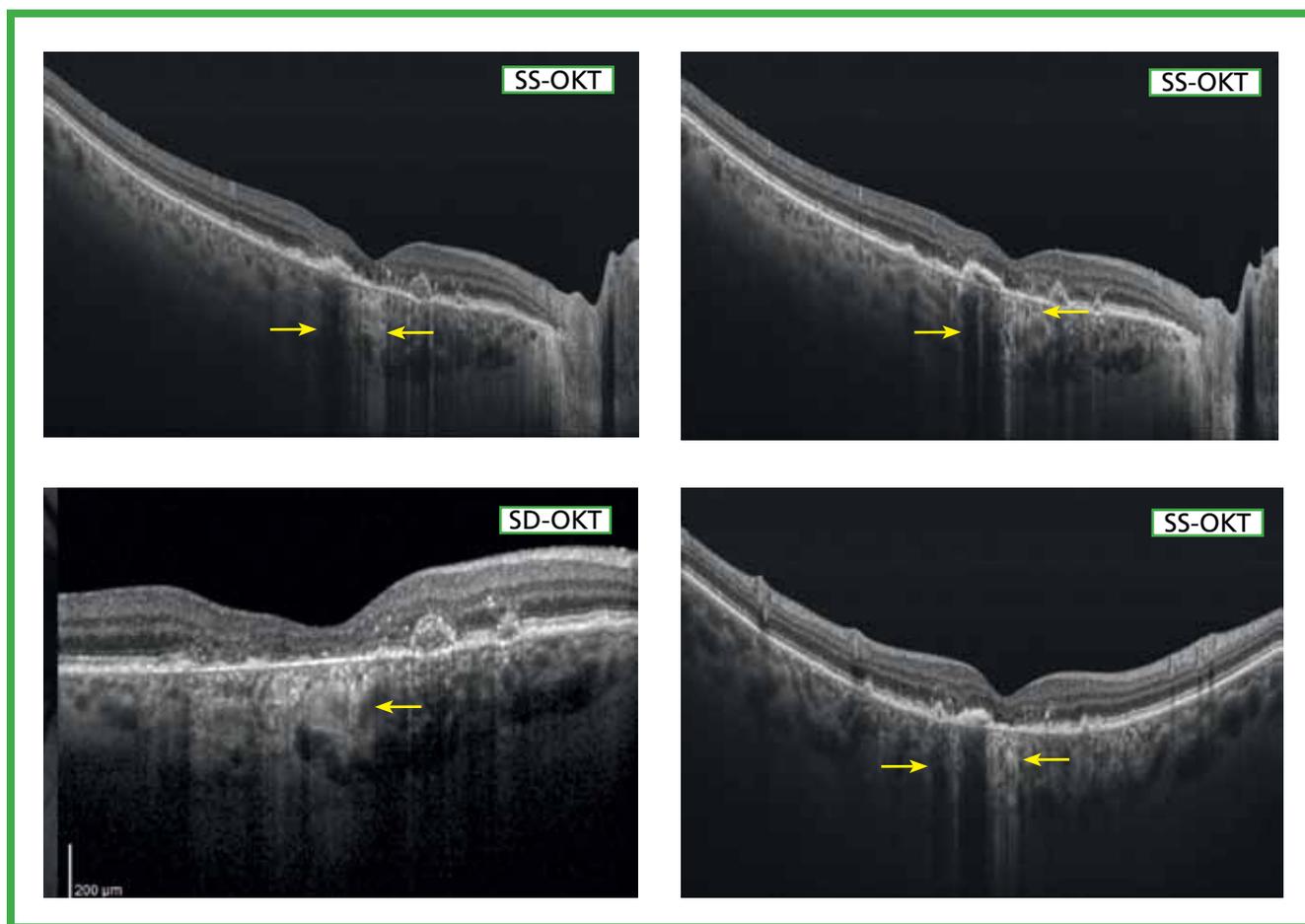
**Рис. 15.** Мягкие друзы среднего и крупного калибра. Линейные SS-ОКТ и SD-ОКТ сканы. В данном клиническом случае возрастная катаракта существенно снижает качество SD-ОКТ скана..



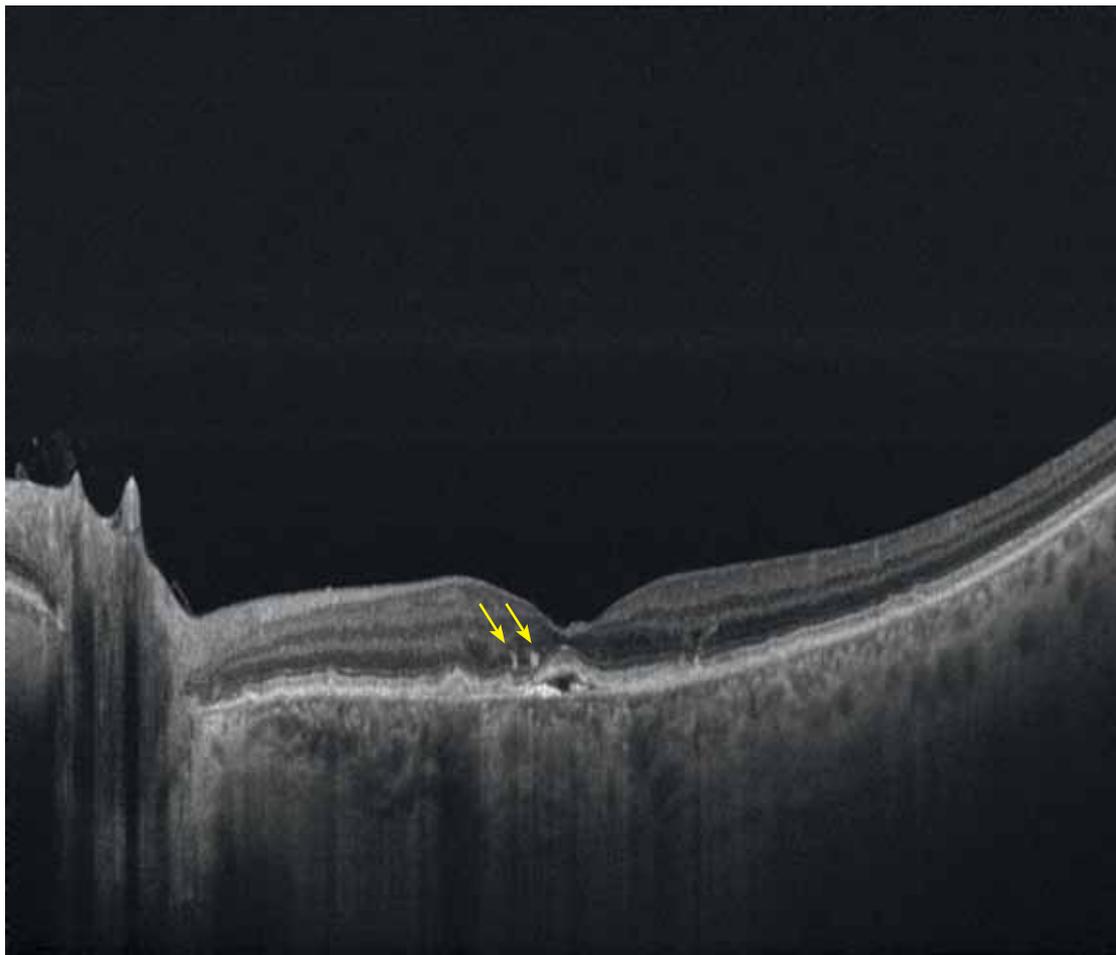
**Рис. 16.** SS-ОКТ сливных мягких друз сетчатки.



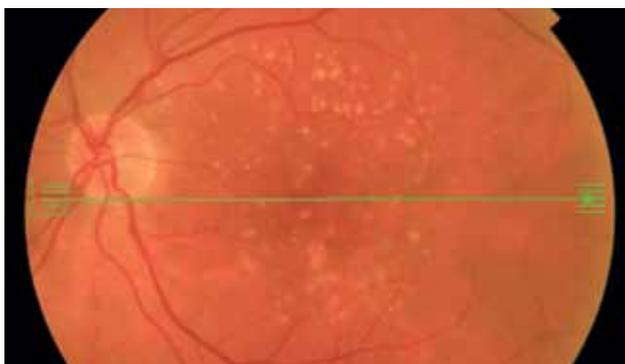
**Рис. 17.** SS-ОКТ пахихориоидальной пигментной эпителиопатии сетчатки и карта толщины хориоидеи в макулярной зоне. Субфовеальная толщина сосудистой оболочки превышает 300 мкм, линейный скан демонстрирует расширенные хориоидальные сосуды слоя Галлера.



**Рис. 18.** SS-OКТ и SD-OКТ сетчатки с регрессирующими мягкими друзами. Видны участки гиперплазии (ОКТ-сигнал от подлежащих структур ослаблен, стрелка указывает направо) и атрофии клеток ПЭС (зоны «гиперпроницаемые» для ОКТ-сигнала, стрелка указывает налево).



**Рис. 19.** SS-ОКТ сетчатки с мягкими друзами. Видны мигрировавшие клетки ПЭС в виде гиперэхогенных включений в нейросенсорной сетчатке.



**Рис. 20.** Мягкие друзы на стадии перехода к географической атрофии ПЭС. Линейные SS-OCT и SD-OCT сканы. Визуализируются зоны локальной гиперпроницаемости сигнала ОКТ по краям мягкой друзы и соответствующие им области клиновидного «проседания» всех вышележащих слоев нейросенсорной сетчатки.

мягкой друзы, объясняющиеся отсутствием клеток ПЭС в этих участках и соответствующие им области клиновидного «проседания» всех вышележащих слоев нейросенсорной сетчатки (см. рис 20). Комплекс подобных ОКТ-признаков получил название «зарождающейся» ГА [5].

### Рекомендуемые режимы сканирования

На практике сложности возникают с дифференциальной диагностикой мелких макулярных друз. Офтальмоскопически простые твердые, кутикулярные друзы и ретикулярные псевдодрузы могут быть очень похожи. Использование не только режима ОКТ-сканирования, но и всех возможностей мультимодальной диагностики упрощает задачу врача. Для обнаружения простых мелких твердых друз эффективнее использовать режим цветного фотографирования, который позволяет не только оценить их количество, но и документировать изменение их численности в процессе наблюдения за пациентом. Режим Guided navigation позволяет выбрать любой участок на цветной фотографии глазного дна, например, зону скопления макулярных друз, и провести прицельное ОКТ-сканирование в этой зоне.

Для максимально эффективного выявления макулярных друз рекомендуется использовать различные режимы сканирования в виде карт (3D Macular: 7x7 мм, 512x256 сканов; 3D Wide: 12x9 мм, 512x256 сканов) и линейных сканов высокого разрешения (Line, 5LineCross, Radial). Карты состоят из большого количества сканов вертикального и горизонтального направления и позволяют заметить минимальные изменения, отдельные линейные сканы дают картину высокого разрешения интересующих объектов.

Наконец, не стоит забывать о возможности фоторегистрации аутофлюоресценции сетчатки, а также информативности разложения цветного фотоизображения на 3 монохроматические цветные картинки. Для кутикулярных друз нехарактерна аномальная аутофлюоресценция, ретикулярные псевдодрузы будут блокировать нормальное базовое собственное свечение сетчатки и давать картину точечной гипофлюоресценции, мягкие друзы проявляются гетерогенной картиной, сочетающей гипер- и гипофлюоресценцию. Ретику-

лярные псевдодрузы в отличие от прочих видов друз особенно хорошо визуализируются в бескрасном режиме и в сине-зеленом спектре, поскольку лежат над слоем ПЭС, а, следовательно, указанные спектры света не блокируются его клетками [6].

### Литература

- [1] Ferris FL, 3rd, Wilkinson CP, Bird A, et al. *Clinical classification of age-related macular degeneration* // *Ophthalmology*. 2013; 120(4): 844-851. DOI: 10.1016/j.opthta.2012.10.036
- [2] Rudolf M, Clark ME, Chimento MF, et al. *Prevalence and morphology of druse types in the macula and periphery of eyes with age-related maculopathy* // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2008 Mar; 49(3):1200-9. DOI: 10.1167/iovs.07-1466
- [3] Khan KN, Mahroo OA, Khan RS, et al. *Differentiating drusen: Drusen and drusen-like appearances associated with ageing, age-related macular degeneration, inherited eye disease and other pathological processes* // *Prog Retin Eye Res*. 2016 Jul; 53:70-106. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2016.04.008
- [4] Jain N, Farsiu S, Khanifar AA, et al. *Quantitative comparison of drusen segmented on SD-OCT versus drusen delineated on color fundus photographs* // *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2010 Oct; 51(10):4875-83. DOI: 10.1167/iovs.09-4962
- [5] Wu Z, Luu CD, Ayton LN, et al. *Optical coherence tomography-defined changes preceding the development of drusen-associated atrophy in age-related macular degeneration* // *Ophthalmology*. 2014 Dec; 121(12):2415-22. DOI: 10.1016/j.opthta.2014.06.034
- [6] Семенова Н.С., Акопян В.С., Родин А.С. *Вариабельность макулярных друз: возможности мультимодальной визуализации* // *Вестник офтальмологии*. 2016; 6:78-86. DOI: 10.17116/oftalma2016132678-86

## Географическая атрофия ПЭС

ГА обычно не вызывает трудностей диагностики (см. рис. 21). Роль ОКТ в системе мониторинга данного заболевания заключается в первую очередь в исключении вторичной неоваскуляризации. Кроме того, анализ ОКТ-карт в режиме En face позволяет оценить границы и площадь атрофии ПЭС (см. рис. 22), отслеживать её динамику и, используя возможности мультимодальной визуализации, сопоставлять с картиной аутофлюоресценции сетчатки (см. рис. 23), которая предсказывает вероятность дальнейшего прогрессирования и расширения зоны атрофии ПЭС [1-2].

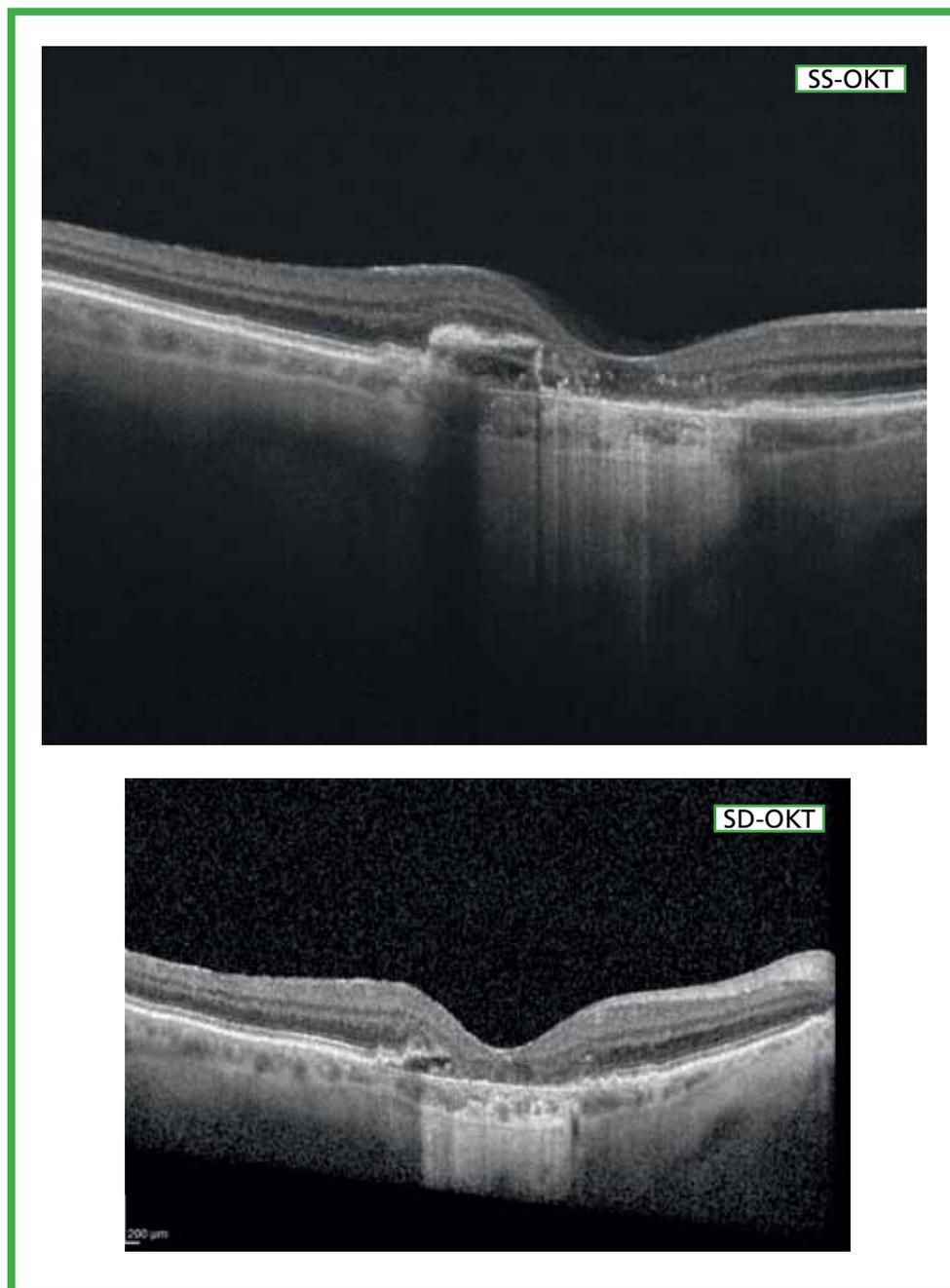
### Рекомендуемые режимы сканирования

При наблюдении за пациентами с ГА ПЭС рекомендуется сочетать сканирование в режиме линейных сканов с различными картами сетчатки (3D Macular: 7x7 мм, 512x256 сканов; 3D Wide: 12x9 мм, 512x256 сканов) [1]. Одновременно можно производить регистрацию аутофлюоресценции сетчатки. Для определения границ атрофии ПЭС и прогнозирования их расширения этот метод более информативен, чем цветное фотографирование. Больные с ГА зачастую имеют низкие зрительные функции, затрудняющие фиксацию взгляда. Режим Follow Up, при котором программа в режиме реального времени находит на инфракрасном изображении сетчатки зоны предыдущего сканирования, позволяет точнее выполнять сравнение в динамике.

### Литература

[1] Thulliez M, Motulsky EH, Feuer W, et al. En Face Imaging of Geographic Atrophy Using Different Swept-Source OCT Scan Patterns // *Ophthalmol Retina*. 2019 Feb; 3(2):122-132. DOI: 10.1016/j.oret.2018.09.004

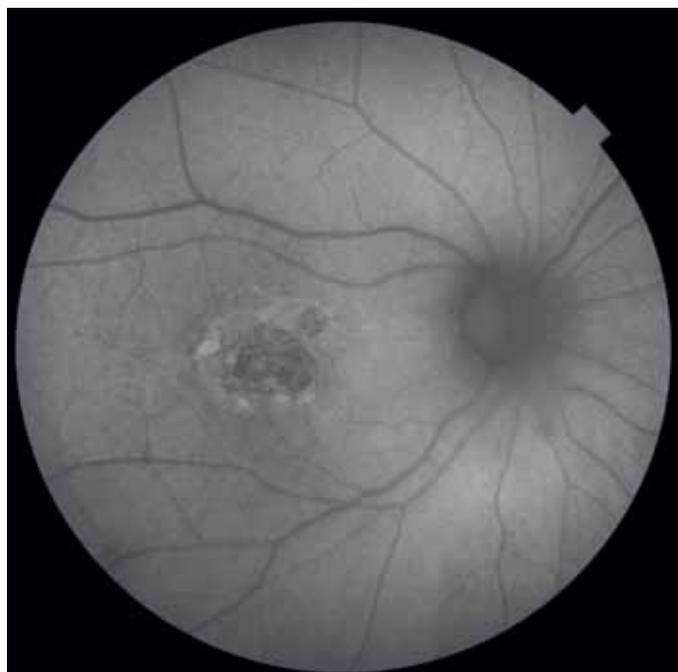
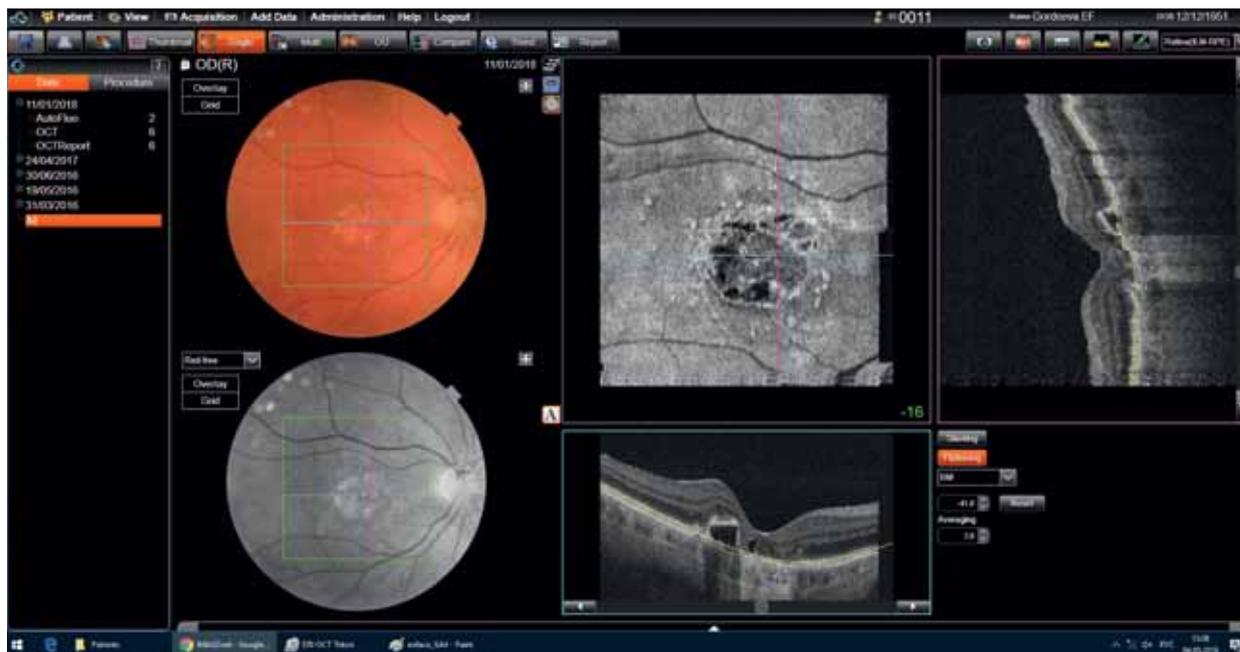
[2] Kashani AH, Chen CL, Gahm JK, et al. Optical coherence tomography angiography: A comprehensive review of current methods and clinical applications // *ProgRetin Eye Res*. 2017 Sep; 60:66-100. DOI: 10.1016/j.preteyeres.2017.07.002



**Рис. 21** ГА ПЭС. Линейные SS-OCT и SD-OCT сканы. Виден протяженный участок отсутствующего слоя ПЭС, избыточно проницаемый для OCT-сигнала.



Рис. 22. Анфас картина SS-ОКТ при ГА сетчатки.



**Рис. 23.** Анфас картина SS-OCT и аутофлюоресценция сетчатки в ближнем инфракрасном спектре при ГА.

## Неоваскулярная возрастная макулярная дегенерация

Долгое время в арсенале офтальмолога для визуализации поражений макулярной зоны сетчатки была исключительно контрастная ангиография. На основании ФА СНМ, выявляемая при нВМД, подразделялась на классическую, оккультную или смешанную в зависимости от ее локализации над или под слоем ПЭС. Внедрение ОКТ в широкую практику дополнило понимание структурных изменений сетчатки при нВМД. Случаи преимущественно субпигментного расположения СНМ с характерной ОКТ-картиной серозной или фиброваскулярной отслойкой ПЭС стали называть СНМ 1 типа [1]. К этому же типу первоначально причисляли полипoidную хориоидальную васкулопатию (ПХВ), считавшуюся вариантом ВМД. Ранее называемая классической СНМ теперь обозначалась как 2 тип и на ОКТ демонстрировала серозную отслойку нейросенсорной сетчатки и/или ее кистозные изменения. Вариант смешанного над- и субпигментного расположения СНМ отнесли к 3 типу, включив сюда также ретикулярную ангиоматозную пролиферацию (РАП).

Совершенствование технологий визуализации наружных слоев сетчатки и хориоидеи с помощью SS-ОКТ и режима EDI SD-ОКТ, а также распространение ОКТА изменило и продолжает менять наше представление о нВМД. Во-первых, стало понятно, что в большинстве случаев выявления СНМ, определяемой ранее как классическая (2 тип), нам просто не хватало визуализационных методов для того, чтобы увидеть субпигментно расположенные петли новообразованных сосудов. Во-вторых, стало появляться все больше данных в пользу того, что ПХВ является самостоятельным заболеванием, которое по своим клиническим и ОКТ-проявлениям не может быть отнесено к ВМД (см. далее) [2]. Кроме того, проспективное наблюдением за пациентами с СНМ с помощью метода ОКТА позволило выделить категорию неэкссудативной СНМ.

### СНМ 1 тип

При полностью субпигментном расположении СНМ картина ОКТ будет демонстрировать хорошо различимый по всей площади макулярной зоны сохраненный слой ПЭС, отделенный от подлежащей мембраны Бруха (см. рис. 24). Высота отслойки ПЭС и субпигментное содержимое могут быть различными. Новооб-

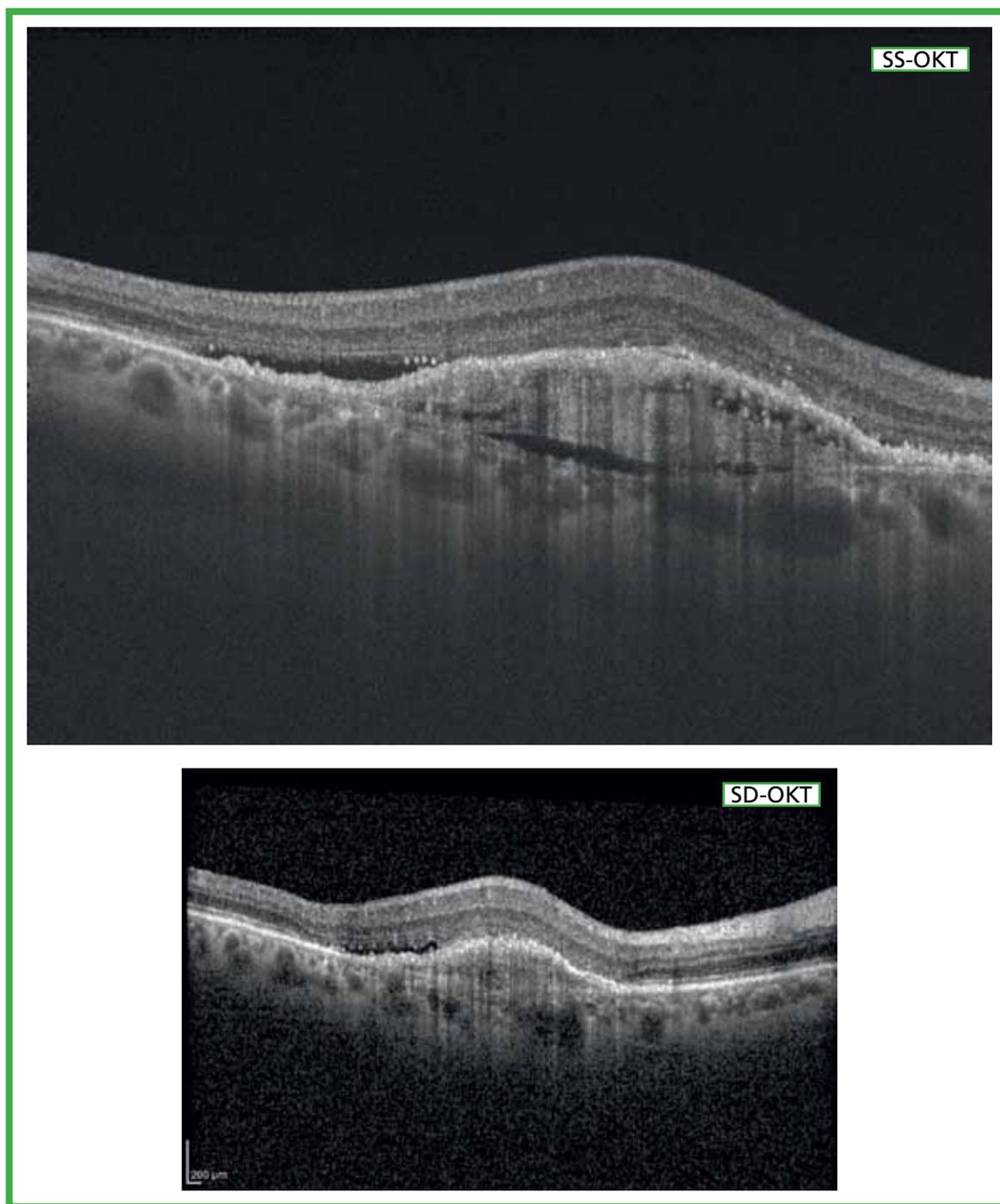


Рис. 24. СНМ 1 типа

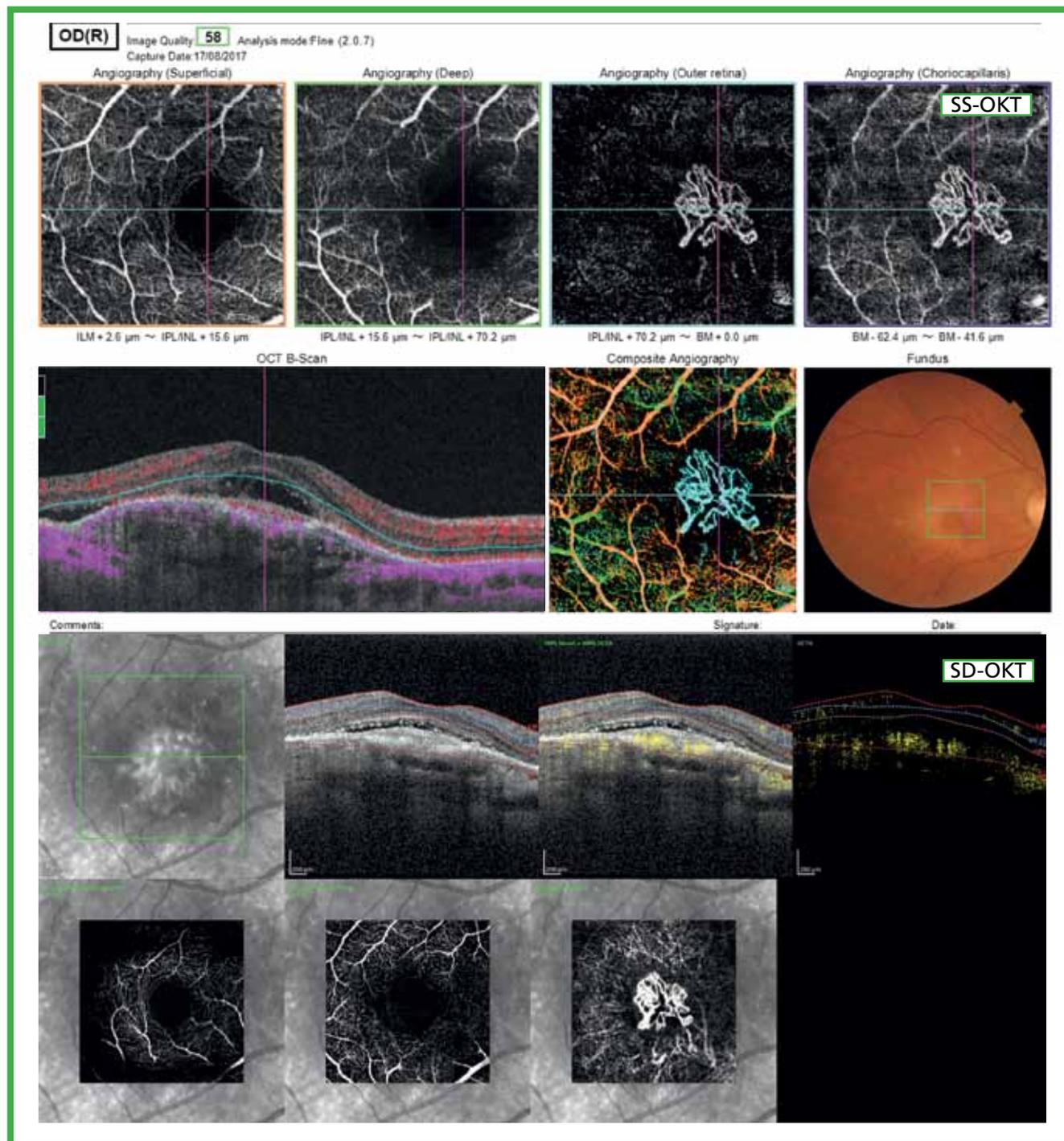
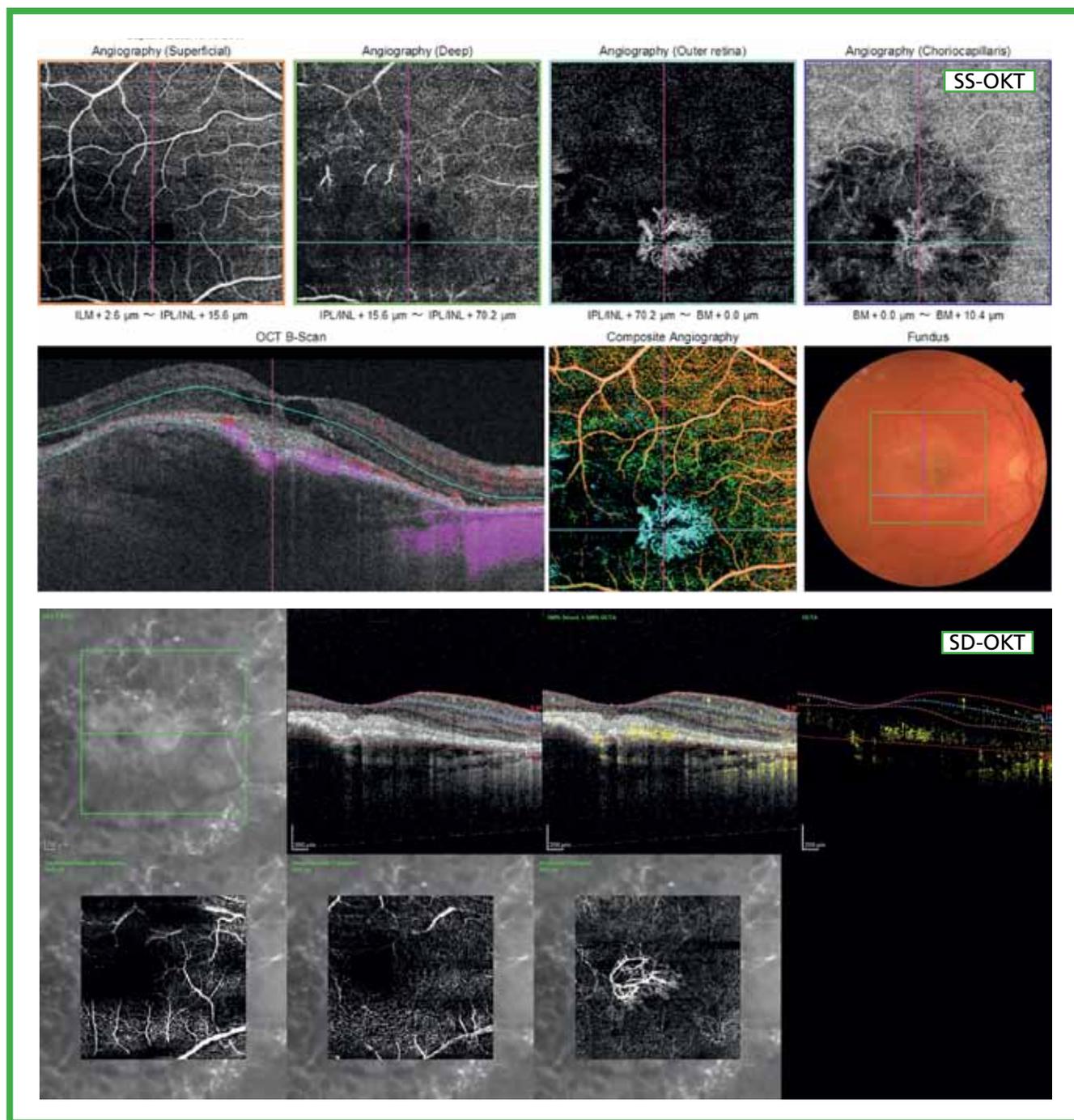


Рис. 25. СНМ 1 типа.

разованные сосуды под слоем ПЭС на ОКТ будут давать гетерогенную (преимущественно гиперэхогенную) картину с отдельными, иногда объемными гипозоногенными полостями. Данное состояние может сочетаться с серозной отслойкой нейросенсорной сетчатки различной степени выраженности, что относится к косвенным признакам активности СНМ при динамическом наблюдении в процессе антиангиогенной интравитреальной терапии. До распространения ОКТА наличие интравитреальных кист в сочетании с вышеописанными характерными изменениями на ОКТ трактовалось как прорастание новообразованных сосудов под нейросенсорную сетчатку и переход состояния в СНМ смешанного типа. Появление ОКТА ценно не только возможностью визуально увидеть новообразованные сосуды, но и топографически локализовать аномальный активный кровоток. Стало понятно, что СНМ 1 типа также может сопровождаться кистозными изменениями нейросенсорной сетчатки даже без патологических сосудов непосредственно под ней. Поэтому сегодня определение СНМ как 1 типа требует демонстрации исключительно субпигментно расположенного аномального кровотока на картине ОКТА (см. рис. 25).

### **СНМ 2 тип**

Классическая СНМ с исключительно субсенсорным расположением встречается крайне редко. Происхождение СНМ 2 типа также носит хориоидальную природу, однако ее рост и распространение происходит под нейросенсорной сетчаткой, куда новообразованные сосуды попадают через дефект в слое ПЭС. В эру до ОКТ диагностика классической СНМ вызывала меньше всего вопросов, поскольку ФА позволяла визуализировать новообразованные сосуды. С появлением ОКТ и ОКТА стало понятно, что в большинстве случаев, определяя границы СНМ по ФА, мы упускаем какую-то часть новообразованной сосудистой сети, скрытую под ПЭС. При этом далеко не всегда эти сосуды будут давать симптом патологического вытекания красителя из неизвестного источника при контрастной ангиографии. ОКТ-картина СНМ, расположенной субсенсорно, демонстрирует серозную отслойку нейросенсорной сетчатки различной высоты, единичные или множественные кисты разного размера и локализации. В большинстве случаев состояние сопровождается значительной деструкцией наружной нейросенсорной оболочки и невозможностью дифференцировать ее слои, соответствующие расположению фоторецепто-



**Рис. 26.** СММ 2 тип. Кровоток в новообразованных сосудах детектируется над слоем ПЭС, субпигментно активных новообразованных сосудов, несмотря на отслойку ПЭС и гиперэхогенное содержимое, не определяется.

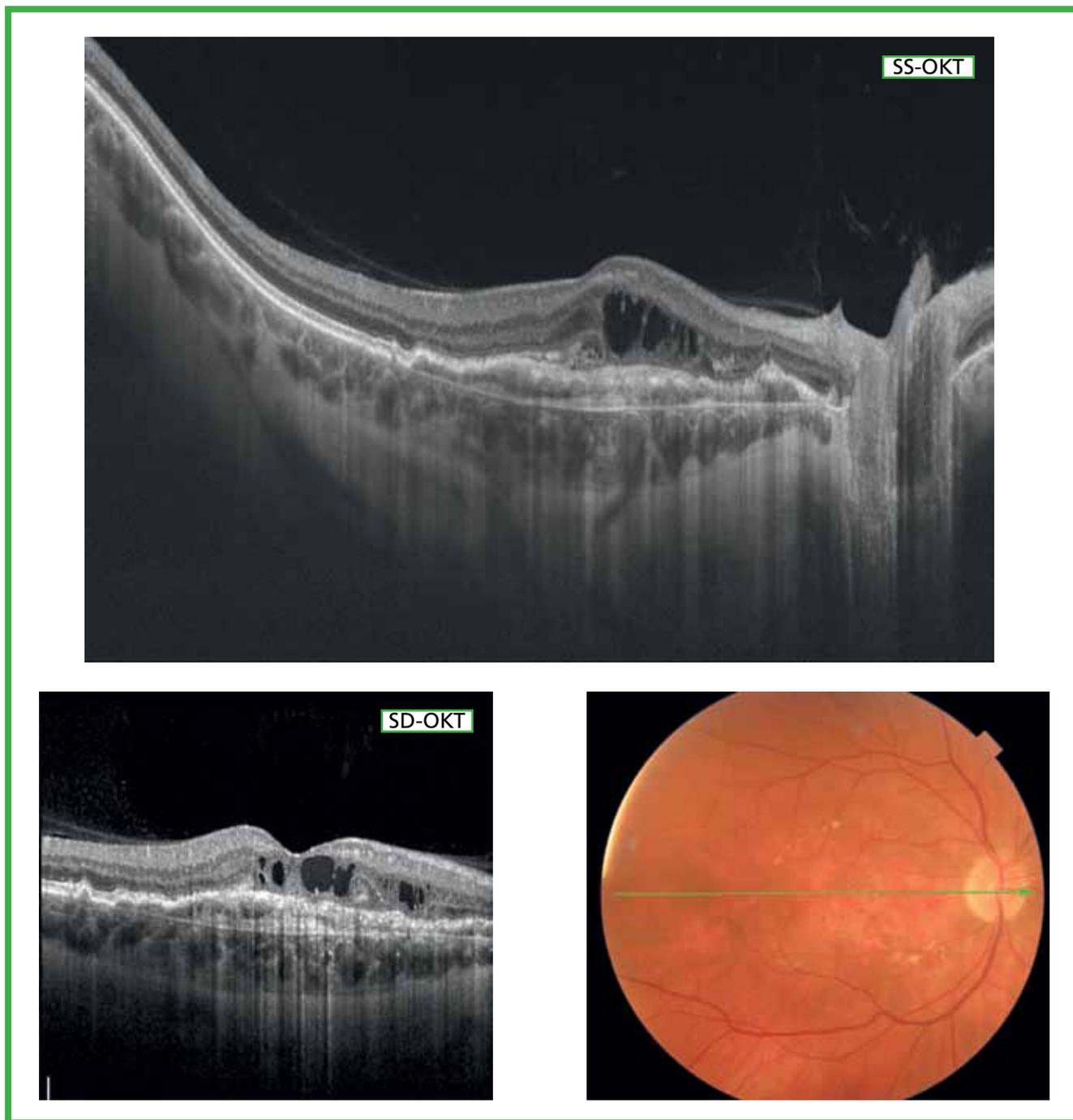


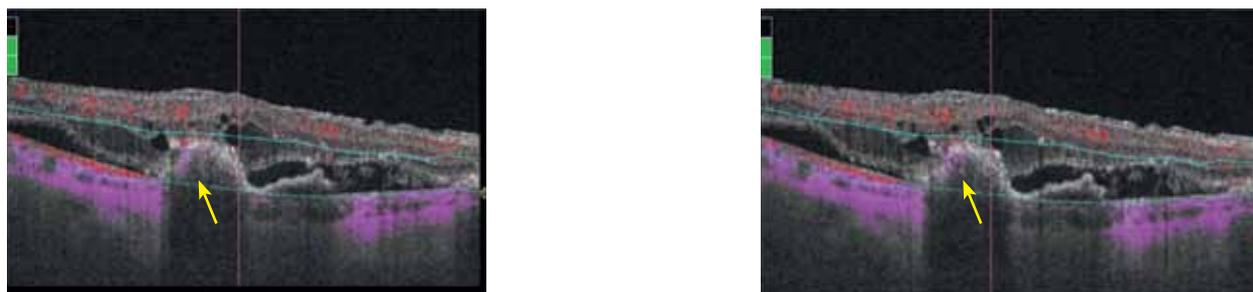
Рис. 27. CNV 2 тип.

ров. Исход заболевания может сопровождаться появлением гиперэхогенной рубцовой ткани, отличить которую от плотной сети новообразованных сосудов легко позволяет сегодня режим ОКТА.

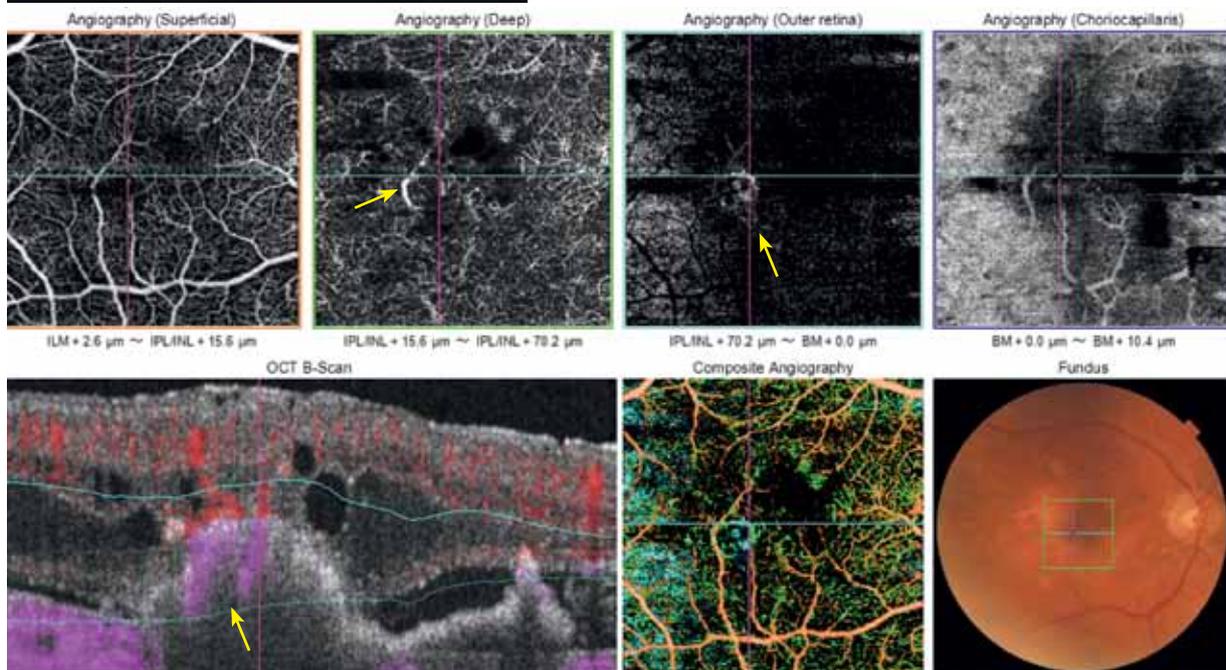
### **Ретинальная ангиоматозная пролиферация**

Ретинальная ангиоматозная пролиферация (РАП) – относительно молодой диагноз, был описан Yannuzzi в начале 2000-х годов. Главное отличие РАП заключается в том, что интратретинальные новообразованные сосуды происходят из глубокого сосудистого сплетения макулярной зоны сетчатки, а не хориоидального русла, и, следовательно, располагаются экстрафовеально за пределами аваскулярной зоны. Предполагают, что типичное естественное течение РАП сопровождается ангиоматозом преимущественно в вертикальном направлении (перпендикулярно слоям сетчатки), с последовательным развитием сначала субсенсорной неоваскуляризации, а позже и субпигментной, формируя на этом этапе типичную СММ. Офтальмоскопически РАП часто проявляется как хорошо различимое интратретинальное кровоизлияние, в то время как для прочих форм СММ более характерно субретинальное. Описанные особенности клинического течения и тот факт, что на самых ранних стадиях экстрафовеальное расположение зачастую не сопровождается ощутимым пациентом функциональным снижением, значительно затрудняют дифференциальную диагностику. А на самых поздних фазах, вероятно, делают ее невозможной. С учетом того, что в настоящее время выбор терапевтических подходов небольшой и сводится по сути к выбору очередности и дозы антиангиогенной и фотодинамической терапии, ценность установления истинной природы и типа СММ в рутинной практике офтальмолога сомнительна. Однако, согласно данным литературы, РАП отличается слабым ответом на антиангиогенную терапию, что при немалой распространенности данного типа СММ, оцениваемой в 10-15% от всех случаев нВМД, следует учитывать при определении тактики лечения [3].

В зависимости от стадии и давности РАП ОКТ-картина может быть очень полиморфна и проявляться в виде интратретинальных кистозных изменений, гиперэхогенных включений, соответствующих интратретинальному кровоизлиянию или мигрировавшим клеткам ПЭС, отслойки нейросенсорной сетчатки и/или слоя ПЭС.



**Рис. 28.** РАП. В глубоких и наружных слоях сетчатки прослеживается петля anomального сосуда. На соответствующем этой зоне В-скане в режиме SS-ОКТА отчетливо виден вертикально направленный кровоток. Структурная SS-ОКТ демонстрирует множественные интратретинальные кисты, протяженную отслойку нейросенсорной сетчатки и локальную отслойку ПЭС, вероятно соответствующую сформировавшемуся ретино-хориоидальному анастомозу. На цветной фотографии визуализируется соответствующее этой зоне интратретинальное кровоизлияние.



С учетом предполагаемой гипотезы развития РАП на ОКТА (в зависимости от стадии РАП) можно увидеть сформированные ретино-ретиальные или уже ретино-хориоидальные анастомозы с характерным направленным вертикально током крови.

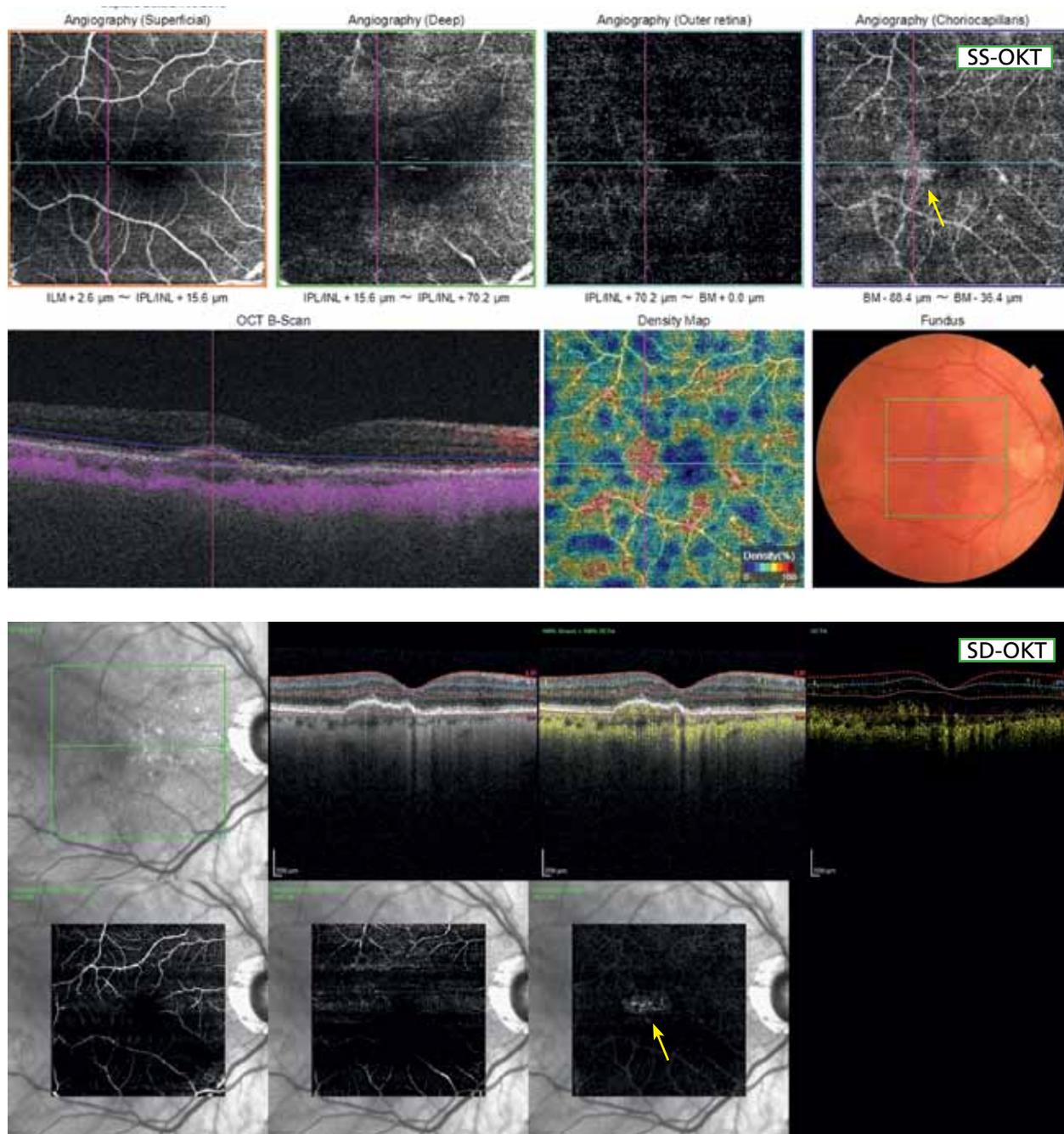
### **Неэкссудативная СМ**

Неэкссудативная СМ зачастую обнаруживается случайно, не вызывает активных жалоб пациента на снижение зрительных функций и является вариантом СМ 1 типа. Этот вид СМ располагается субпигментно, не сопровождается значительной отслойкой ПЭС и обычно имеет малый размер. Для того чтобы определить СМ как неэкссудативную, нужно удостовериться в отсутствии даже минимальных признаков ее активности – отслойки нейросенсорной сетчатки и/или ее кистозных изменений на ОКТ. Офтальмоскопия не должна выявлять свежих интравитреальных кровоизлияний. При этом в режиме ОКТА может быть отчетливо различима сеть новообразованных сосудов в слое хориокапилляров. С учетом отсутствия клинических проявлений, а также полностью субпигментного расположения СМ большинство исследователей сегодня склоняются к неэффективности и нецелесообразности антиангиогенной терапии в подобных случаях.

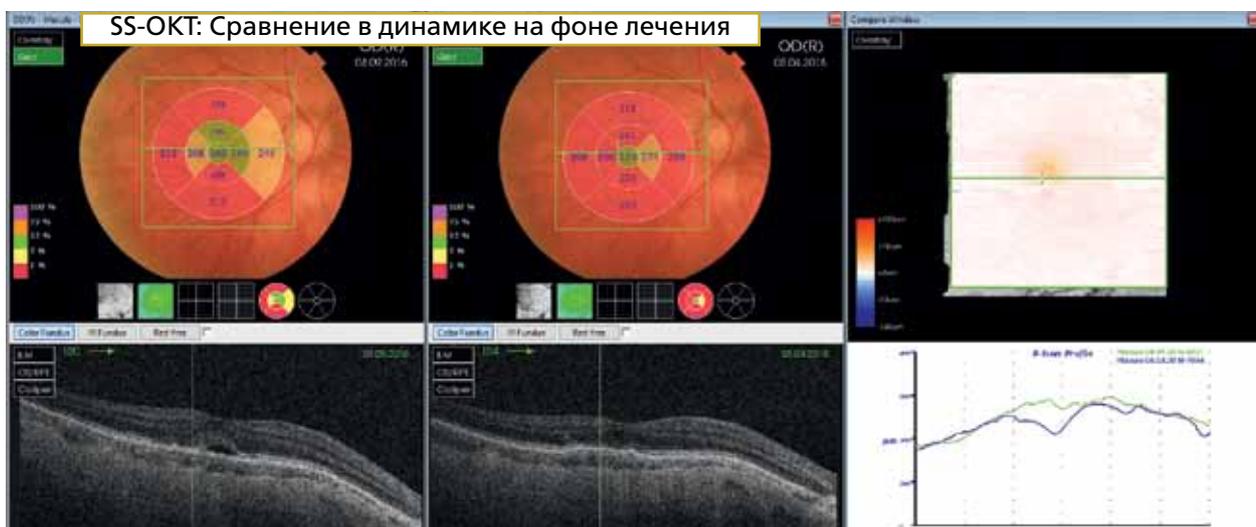
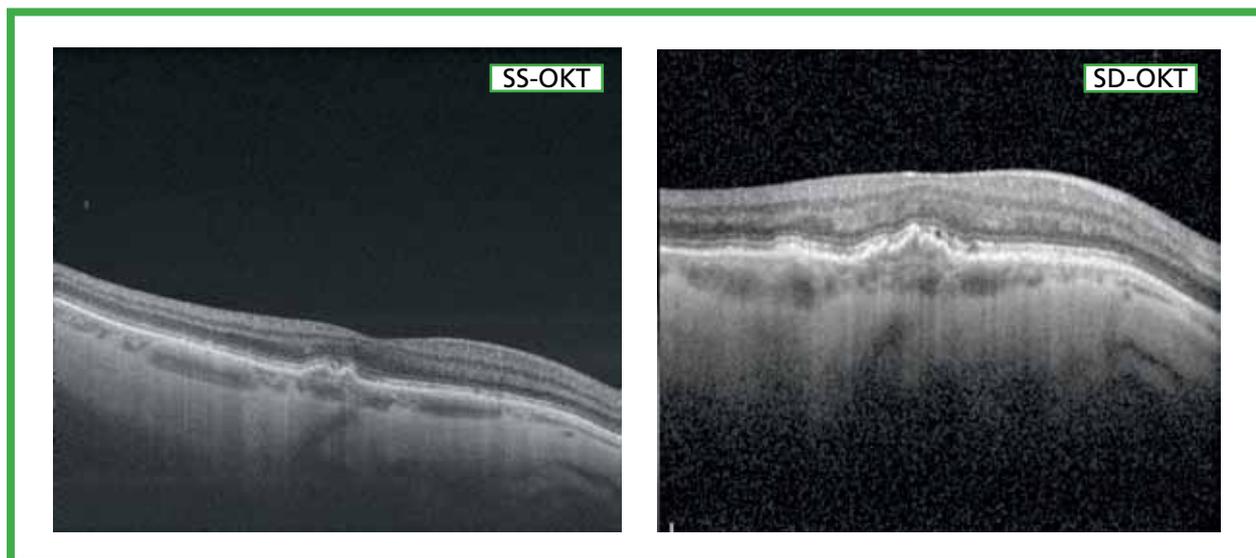
Похожая ОКТ и ОКТА картины будут наблюдаться при достижении ремиссии на фоне антиангиогенной терапии нВМД. В случае эффективности лечения, согласно широко применяемому сегодня протоколу treat-and-extend, интервалы между интравитреальными инъекциями следует постепенно увеличивать вплоть до полного прекращения введения при неоднократно подтвержденном отсутствии признаков экссудативной активности.

### **Рекомендуемые режимы сканирования**

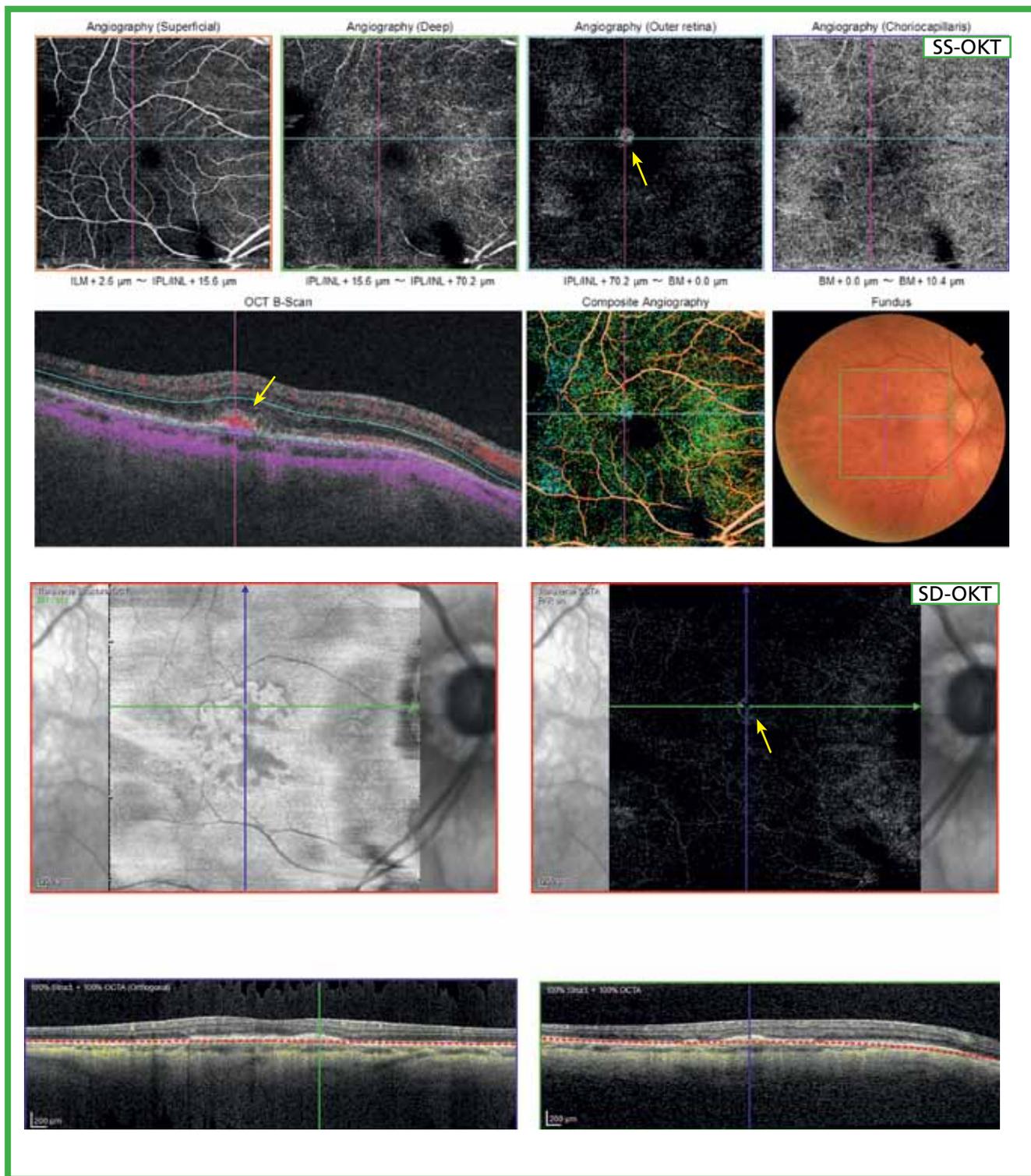
Простота применения метода ОКТА создает отчасти ошибочную иллюзию легкости постановки диагноза нВМД сегодня. В действительности процесс требует от врача понимания принципа метода, хорошего знания возможностей интерфейса программного обеспечения и критической оценки получаемых результатов. Любой коммерческий томограф сегодня, несмотря на постоянно совершенствующийся алгоритм ОКТА, не может дать 100-процентной чувстви-



**Рис. 29.** Неэкссудативная СНМ. В режиме ОКТА субпигментно различима сеть новообразованных сосудов, карта сосудистой плотности и активный локальный кровоток под плоской отслойкой ПЭС на В-скане подтверждает находку. Структурная ОКТ демонстрирует отсутствие признаков активности.



**Рис. 30.** нВМД, ремиссия после 3х интравитреальных инъекций антиангиогенного препарата. На ОКА новообразованные сосуды хорошо различимы, но на структурной ОКТ признаки активности СНМ отсутствуют.

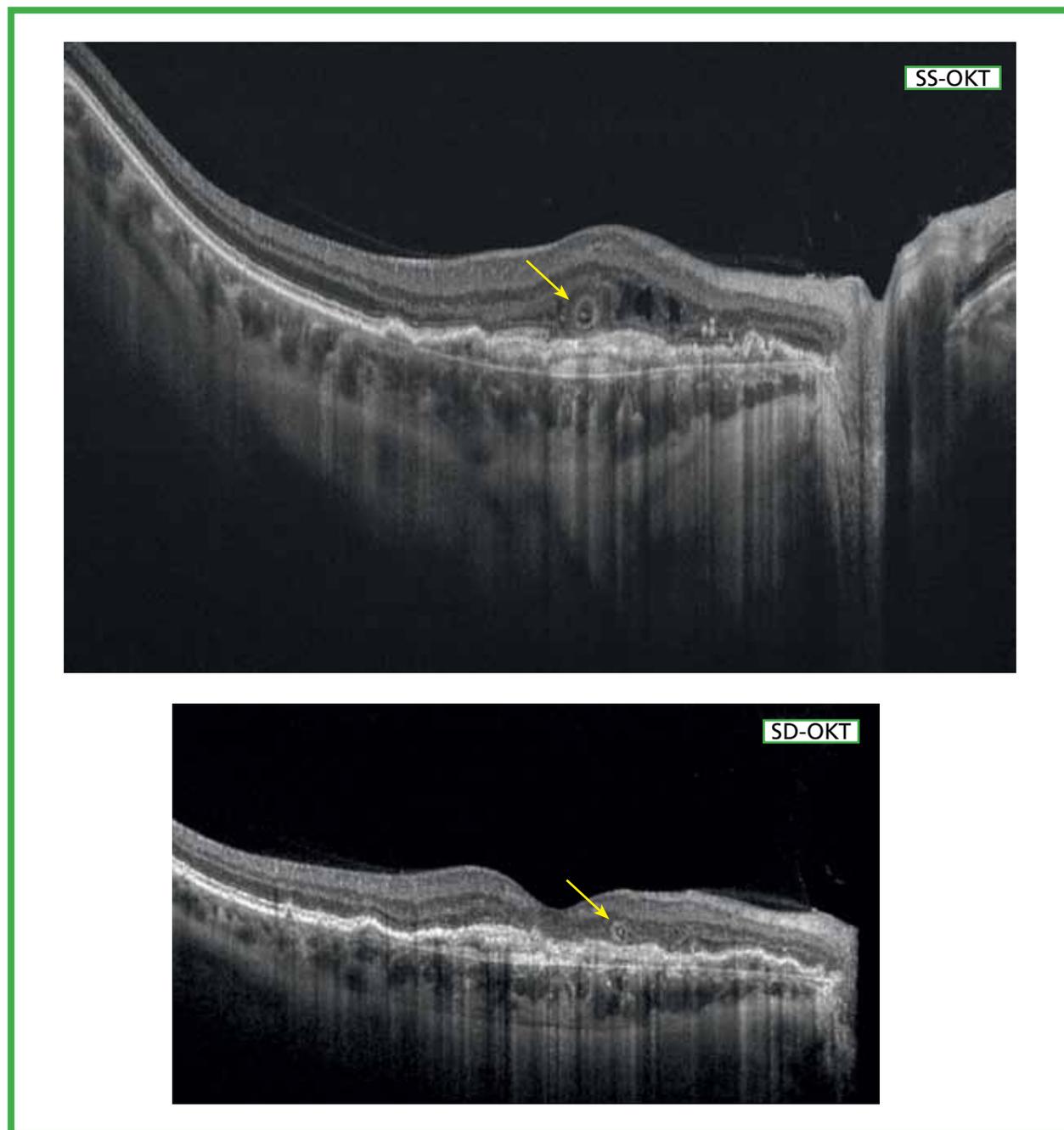


тельности и специфичности при выявлении СММ. Ограниченные возможности контрастной ангиографии, с которой как с «золотым стандартом» мы по-прежнему сравниваем результаты ОКТА, не добавляет ясности к пониманию, всегда ли имеющаяся СММ будет видна на ОКТА и, наоборот, во всех ли случаях обнаруженные с помощью ОКТА признаки СММ указывают на ее истинное присутствие. Оперировав понятиями ложноположительных и ложноотрицательных результатов ОКТА, можно выделить следующие основные причины несоответствия результатов. К первой группе относится проблема проекционных артефактов (projection artifact), которая, надо сказать, сегодня более или менее эффективно решена большинством крупных производителей различными программными методами. Однако в отдельных случаях может возникать мнимая картина наличия упорядоченного кровотока в каком-либо слое сетчатки, которая на самом деле является проекцией выше- или нижележащего слоя. Основные причины – сверхвысокая скорость и объем кровотока в вышележащих ветвях центральной артерии сетчатки, гиперрефлективный нижележащий слой (ПЭС, рубцовая ткань), сильный сигнал от хориоидальных сосудов, не ослабленный ПЭС (например, при ГА). Алгоритм ОКТА также может обманывать броуновское движение экстравазальной жидкости и ее включений (липидов, белка, лейкоцитов и т.д.). Причиной ложноотрицательного результата ОКТА может стать противоположное проявление той же проблемы проекционных артефактов. Из-за особенностей метода контрастной визуализации алгоритму трудно детектировать кровотоки вокруг и под гипорефлективными зонами (например, крупными интравитреальными кистами). Кроме того, чувствительность метода ограничена минимально различимой скоростью кровотока, а сигнал ОКТА может ослабляться недостаточной прозрачностью сред.

В диагностике нВМД не стоит ограничиваться возможностями ОКТ и ОКТА. Весьма информативным может быть сравнение картин ОКТ и ОКТА с цветной фотографией и результатом регистрации аутофлюоресценции. Визуализация кровотока на структурных В-сканах помогает не ошибиться в локализации предполагаемой СММ и исключать случаи артефактов. Разные размеры карт для сканирования в режиме ОКТА позволяют различить даже самую небольшую СММ. При послойном анализе результатов ОКТА не следует ограничиваться выбранным по умолчанию уровнем.



**Рис. 31.** Миграция клеток ПЭС наблюдается на фоне регресса мягких друз и формирования зон атрофии



**Рис. 32.** Наружная тубуляция сетчатки. SS- и SD-OCT пациента с нВМД на стадии формирования рубца.

### Литература

[1] Mitchell P, Liew G, Gopinath B, et al. Age-related macular degeneration // *Lancet*. 2018 Sep 29; 392(10153):1147-1159. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31550-2

[2] Farazdaghi MK, Ebrahimi KB. Role of the Choroid in Age-related Macular Degeneration: A Current Review // *J Ophthalmic Vis Res*. 2019 Jan-Mar; 14(1):78-87. DOI: 10.4103/jovr.jovr\_125\_18

[3] Bhavsar KV, Jia Y, Wang J, et al. Projection-resolved optical coherence tomography angiography exhibiting early flow prior to clinically observed retinal angiomatous proliferation // *Am J Ophthalmol Case Rep*. 2017 Oct 6; 8:53-57. DOI: 10.1016/j.ajoc.2017.10.001

### Прочие ОКТ-признаки ВМД

Разные формы и стадии ВМД могут сопровождаться рядом неспецифических ОКТ-признаков, идентификация которых иногда вызывает затруднение у начинающих врачей. Миграция клеток ПЭС во внутренние слои сетчатки является звеном многих патологических процессов, включая пролиферативную витреоретинопатию, и может возникать как следствие нарушения целостности клеточного монослоя. На ОКТ этот признак выглядит как гиперэхогенные включения разного размера и формы.

На поздних стадиях ГА и нВМД, в результате обширной деструкции наружных слоев сетчатки, отдельные сохранившиеся фоторецепторы могут мигрировать и организовываться в трубчатые структуры. Этот ОКТ-симптом называется наружной тубуляцией сетчатки, главное его отличие от кист и псевдокист – гиперэхогенный монослой фоторецепторов вокруг видимой гипозохогенной полости.

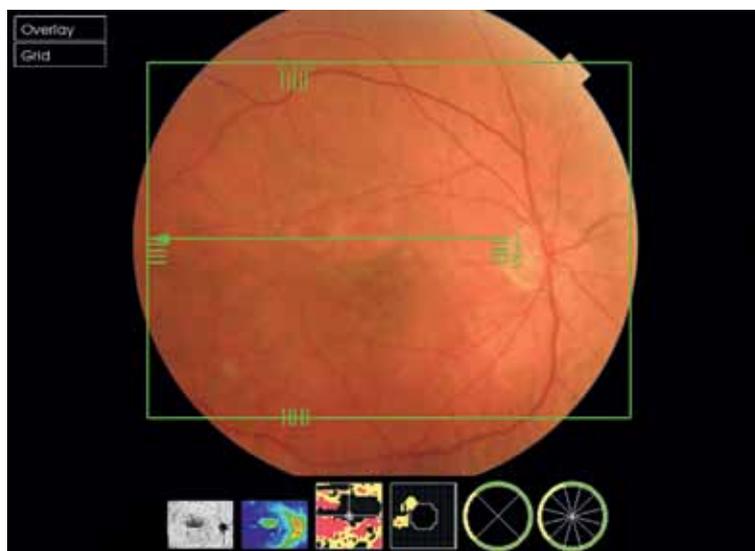
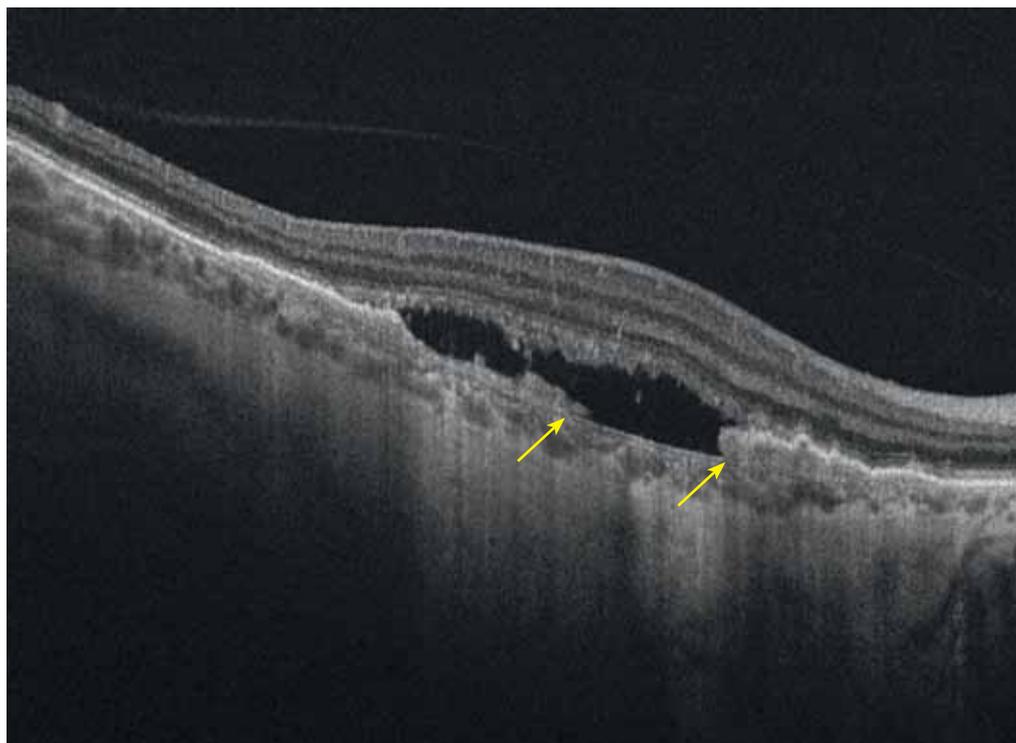
Еще одним ОКТ-явлением, часто ошибочно принимаемым за свидетельство кистозного отека, является формирование псевдокист. Этот неспецифический признак можно наблюдать на поздних стадиях ГА или наследственных макулострофий. Вероятное объяснение подобным находкам – экстенсивная локальная гибель клеток Мюллера. От истинных кист их отличает отсутствие смещения окружающих тканей и изменения профиля сетчатки – изменения,



Рис. 33. Псевдокиста сетчатки

которые можно было бы наблюдать, если бы полость была бы образована выпотом жидкости.

Одним из неблагоприятных результатов антиангиогенной терапии ВМД с высокой отслойкой слоя ПЭС является его разрыв. На рис. 33 представлен такой пример.

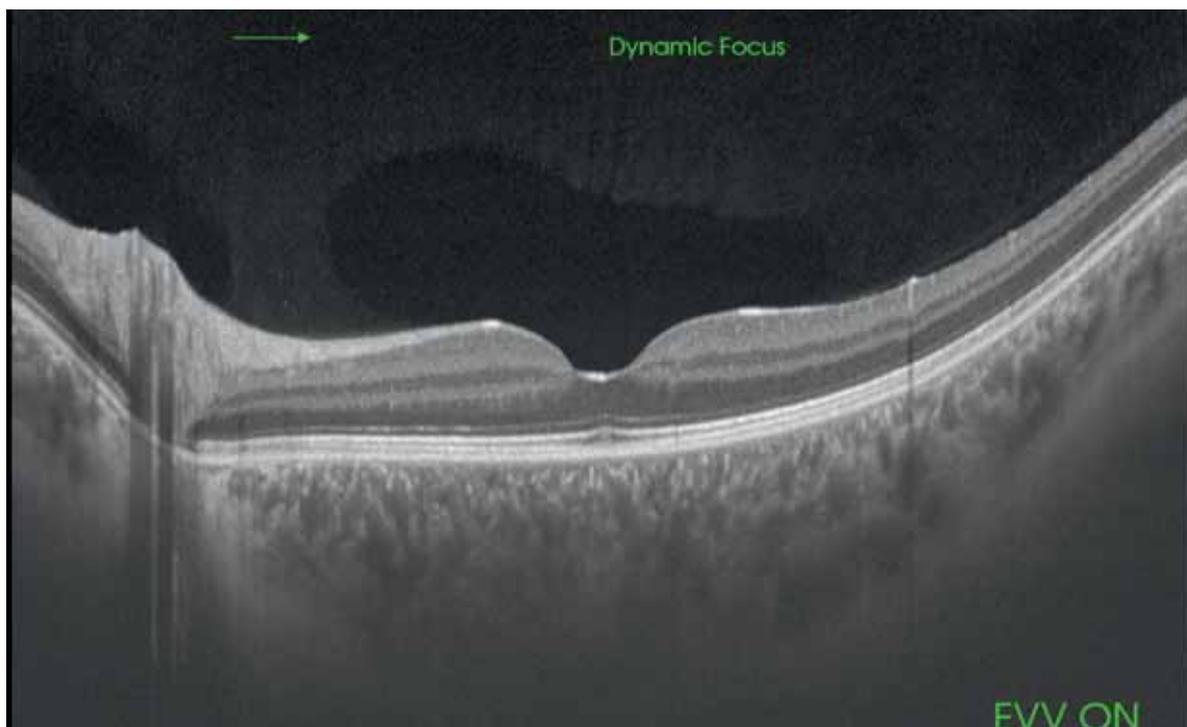


**Рис. 34** . Разрыв слоя ПЭС на фоне интравитреальной антиангиогенной терапии нВМД. Виден резкий обрыв слоя ПЭС слева, его отсутствие в центре и складка завернувшегося слоя ПЭС справа. На цветной фотографии также видны четкие границы разрыва.

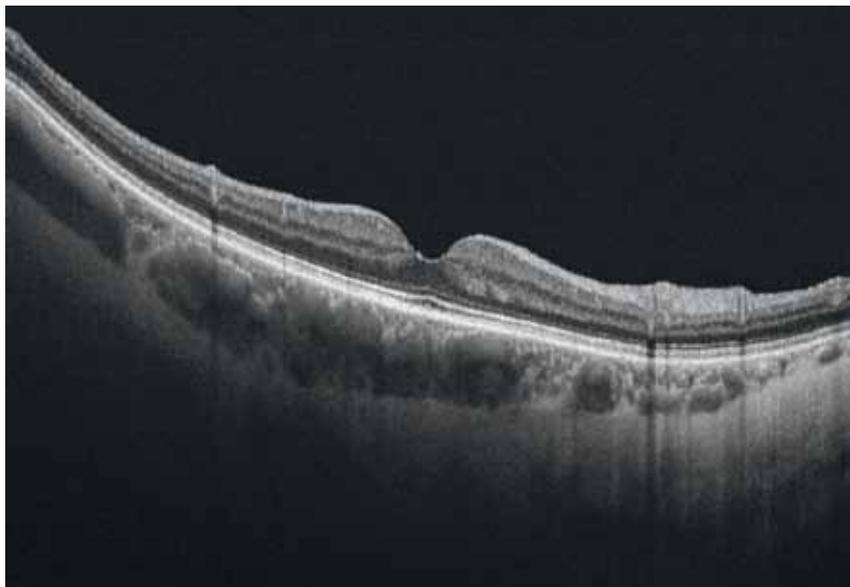
## Пахихориоидальный спектр заболеваний сетчатки

О группе заболеваний, объединенных патоморфологическим признаком особо толстой хориоидеи (пахихориоидеи), впервые заговорили в 2013 году [1]. Развитие технологий визуализации SD-ОКТ в режиме EDI и SS-ОКТ позволило подробнее изучить состояние сосудистой оболочки глаза, и фокус обсуждения сместился с оценки ее толщины на исследование морфологии ее отдельных слоев. Стало понятно, что пахихориоидальное состояние характеризуется не только и не столько общим утолщением хориоидеи, а главным образом аномальным расширением сосудов слоя Галлера, которые, вероятно, приводят к сдавлению вышележащих сосудов Заттлера и дегенерации хориокапиллярного слоя. В результате возникает дисфункция вышележащего пигментного эпителия и нарушение кровоснабжения наружных слоев сетчатки, что в конечном итоге провоцирует гибель фоторецепторов [2]. На момент написания данного текста большинство исследователей сходятся на том, что к спектру пахихориоидальных заболеваний следует относить пахихориоидальную пигментную эпителиопатию, центральную серозную хориоретинопатию, пахихориоидальную неоваскулопатию и полипидную хориоидальную васкулопатию (ПХВ). Причем перечисленные состояния не просто являются вариантами проявления пахихориоидального заболевания, а и его стадиями. Т.е. в некоторых случаях можно наблюдать последовательное прогрессирование от неосложненной пахихориоидеи к ПХВ как самому неблагоприятному исходу.

Чем больше клинической информации накапливается об описываемой группе заболеваний, тем больше свидетельств указывает на то, что ОКТ-признак экстратолстой хориоидеи как первоначально главный объединяющий симптом, давший ей название, не является обязательным. Толщина хориоидальной оболочки



**Рис. 35.** Пример экстратолстой хориоидальной оболочки при отсутствии каких-либо изменений сетчатки и пигментного эпителия. SS-ОКТ линейный скан.



**Рис. 36.** Пример неосложненной пахихориоидеи. Расширенные сосуды слоя Галлера, трудно дифференцируемые слои Заттлера и хориокапилляров, при общей умеренной толщине сосудистой оболочки и отсутствии каких-либо изменений сетчатки и ПЭС.

может быть в пределах статистической нормы и даже ниже. Ключевым критерием сегодня считается архитектура ее сосудов. Также следует помнить, что к пахихориоидальному состоянию относят не только генерализованное утолщение сосудистой оболочки, но и локальное, причем не обязательно субфовеально. Фокальное утолщение сосудистой оболочки на 50 мкм и более по сравнению с соседними участками также относят к патогномичному признаку [3].

Таким образом, аномальная дилатация сосудов слоя Галлера и истончение слоев Заттлера и хориокапилляров, чаще всего (но не обязательно) сопровождаемое генерализованным или фокальным утолщением сосудистой оболочки, будут характерны для всех описываемых далее состояний. Ниже будут описаны только характерные признаки, отличающие одну стадию от другой.

### **Пахихориоидальная пигментная эпителиопатия**

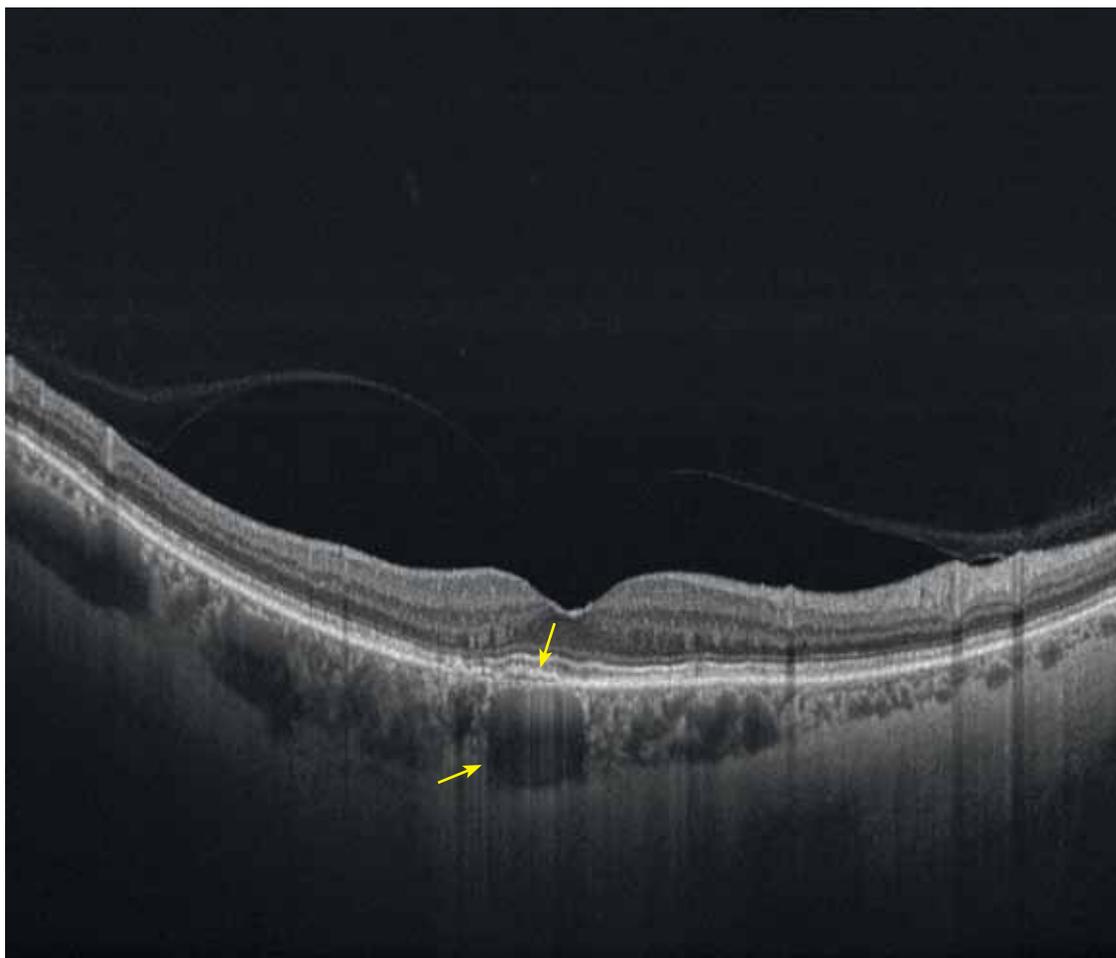
Пахихориоидальная пигментная эпителиопатия обусловлена локальной или протяженной дисфункцией ПЭС, проявляющейся на ОКТ в виде симптома «двойного слоя» – невысокой плоской гетерогенной отслойки ПЭС от подлежащей мембраны Бруха. Протяженность отслойки, как и ее высота, варьируются. Долгое время это состояние ошибочно относили к вариантам проявления ранней ВМД. Примечательно, что в большинстве случаев измененный ПЭС непосредственно прилежит к аномально дилатированным хориоидальным сосудам.

### **Центральная серозная хориоретинопатия**

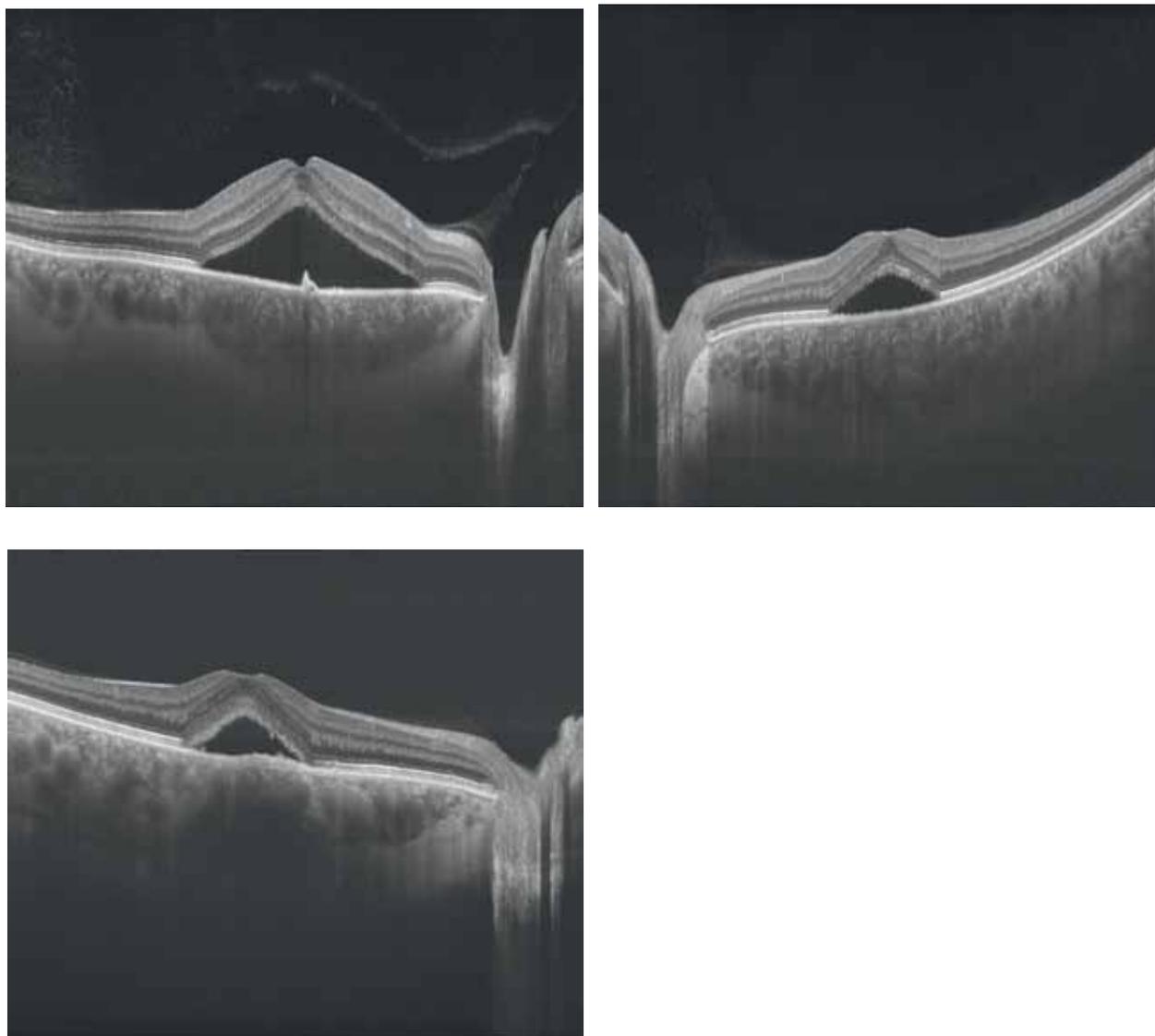
Долгие годы ОКТ-диагностика центральной серозной хориоретинопатии (ЦСХ) не вызывала трудностей. С появлением ОКТА и значительным улучшением визуализации хориоидеи понимание этого заболевания претерпело значительные изменения. Стало понятно, что ранее, в отсутствие возможностей ОКТА, пропускалась значительная доля случаев неоваскуляризации при данном состоянии. ФА по причине быстрого вытекания и накопления красителя под нейросенсорной сетчаткой не позволяла обнаружить СНМ. Современная диагностика ЦСХ подразумевает обязательное исключение неоваскулярного компонента, в том числе методом ОКТА, а также рекомендует оценивать толщину хориоидеи и сравнивать ее с парным глазом.



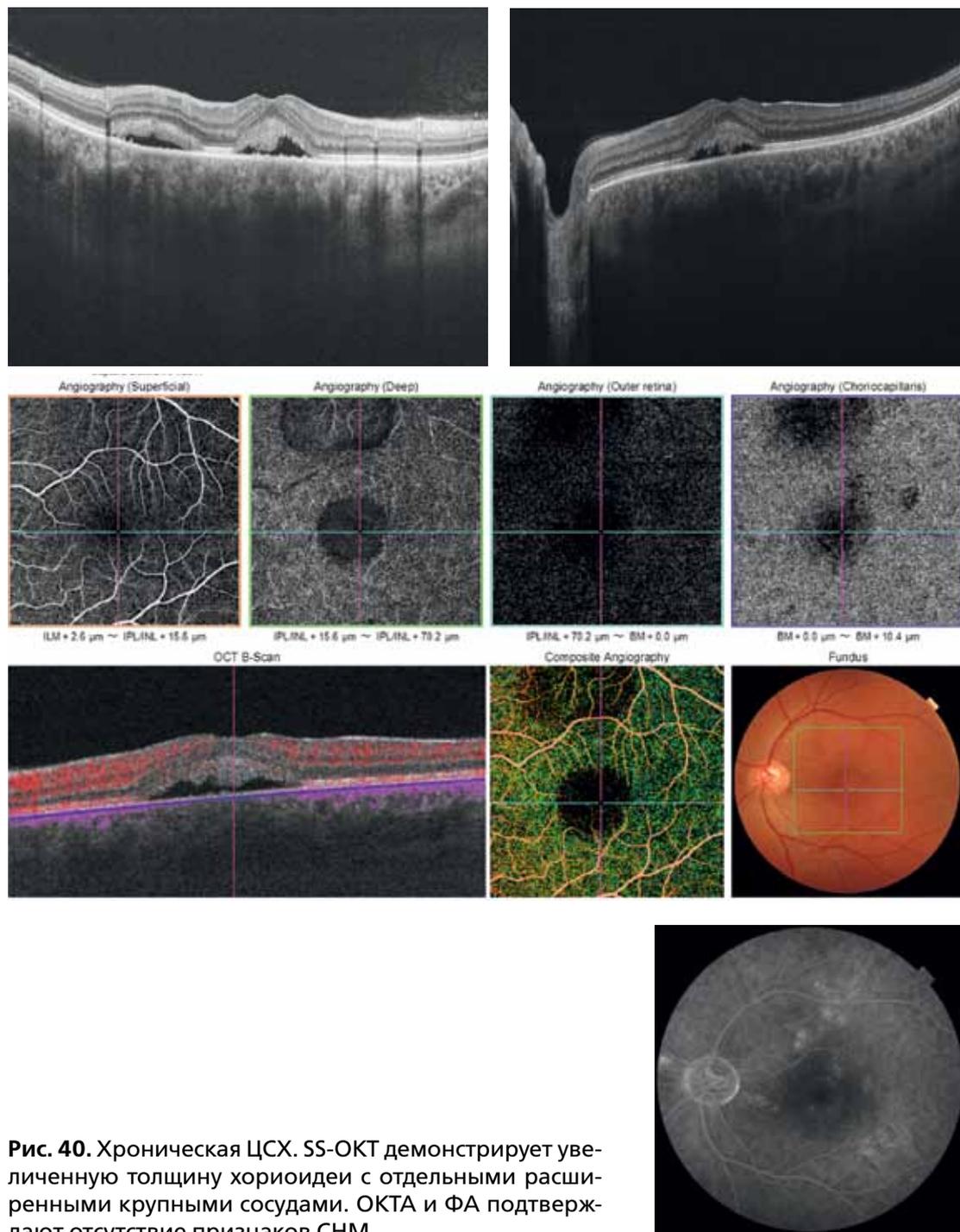
**Рис. 37.** SS-ОКТ пахихориоидальной пигментной эпителиопатии. Слой Галлера практически не просматривается за расширенными сосудами Заттлера, видна нерегулярная плоская отслойка ПЭС от мембраны Бруха.



**Рис. 38.** SS-ОКТ пахихориоидальной пигментной эпителиопатии. Локальная отслойка ПЭС топографически четко соответствует anomalно расширенному хориоидальному сосуду.



**Рис. 39.** SS-ОКТ разных вариантов проявления острой ЦСХ. В некоторых клинических случаях толщина сосудистой оболочки столь велика, что не поддается полной визуализации даже методом SS-ОКТ.



**Рис. 40.** Хроническая ЦХН. SS-ОКТ демонстрирует увеличенную толщину хориоидеи с отдельными расширенными крупными сосудами. ОКТА и ФА подтверждают отсутствие признаков СНМ.

### **Пахихориоидальная неоваскулопатия**

Пахихориоидальная неоваскулопатия возникает, вероятно, как осложнение хронически персистирующей ЦСХ и характеризуется появлением новообразованных сосудов под отслоенным ПЭС. От СНМ 1 типа при ВМД данное состояние отличают изменения хориоидеи и отсутствие макулярных друз, в том числе на парном глазу. Отслойка ПЭС чаще всего носит гетерогенный неравномерный характер, высота ее варьируется.

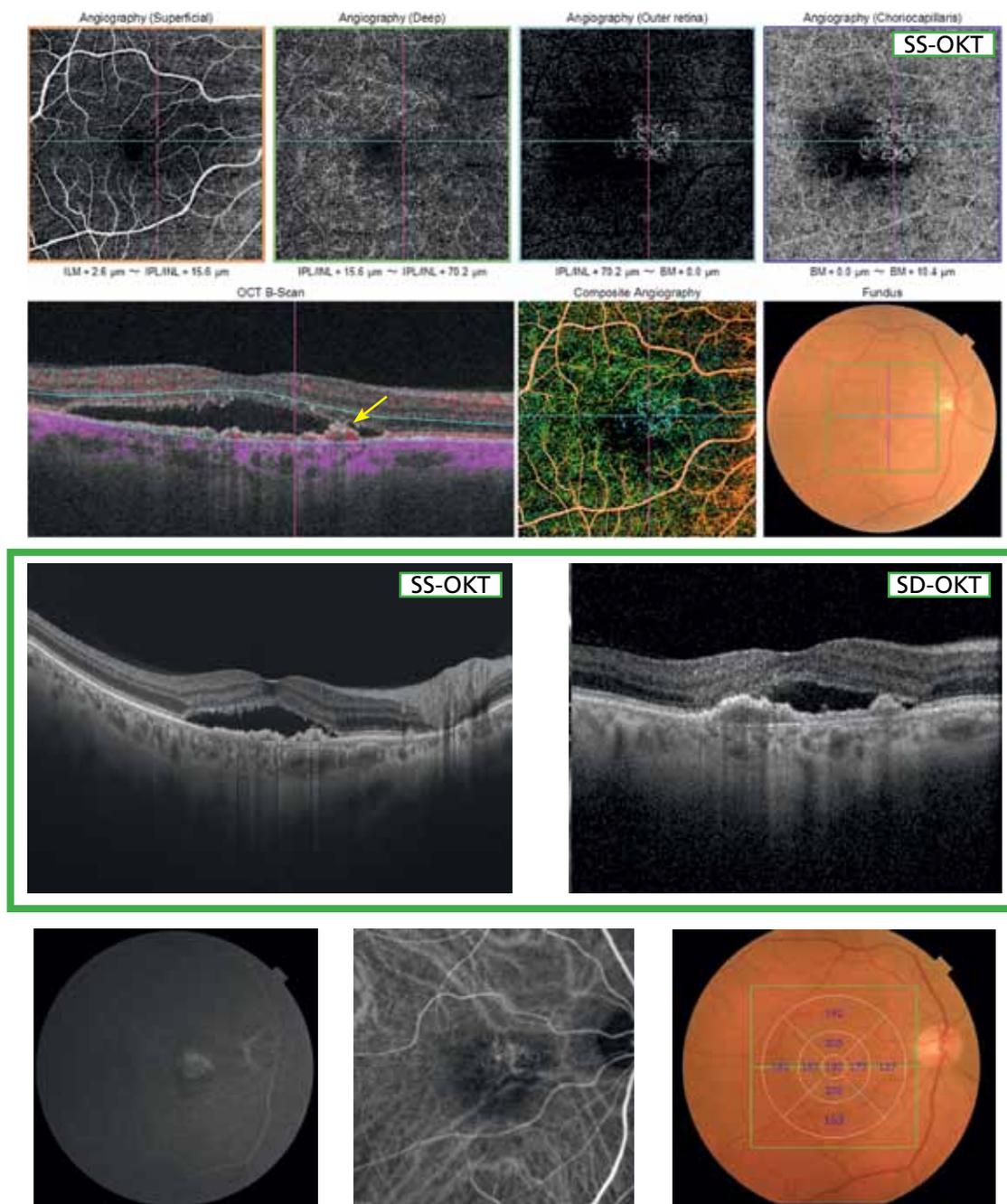
### **Полипоидная хориоидальная васкулопатия**

Из всех перечисленных в этом разделе заболеваний подход к диагностике ПХВ поменялся меньше всего и по-прежнему невозможен без индоцианин-зеленой ангиографии. Информативность ОКТ и ОКТА ограничена при данном состоянии и сводится к выявлению полипоподобных выпячиваний ПЭС с признаками активного кровотока в них. Долгие годы ПХВ относили к СНМ 1 типа нВМД. До сих пор, несмотря на все имиджинговые возможности, дифференциальная диагностика ПХВ и нВМД представляет трудность из-за зачастую выраженных экссувативно-геморрагических проявлений обоих состояний.

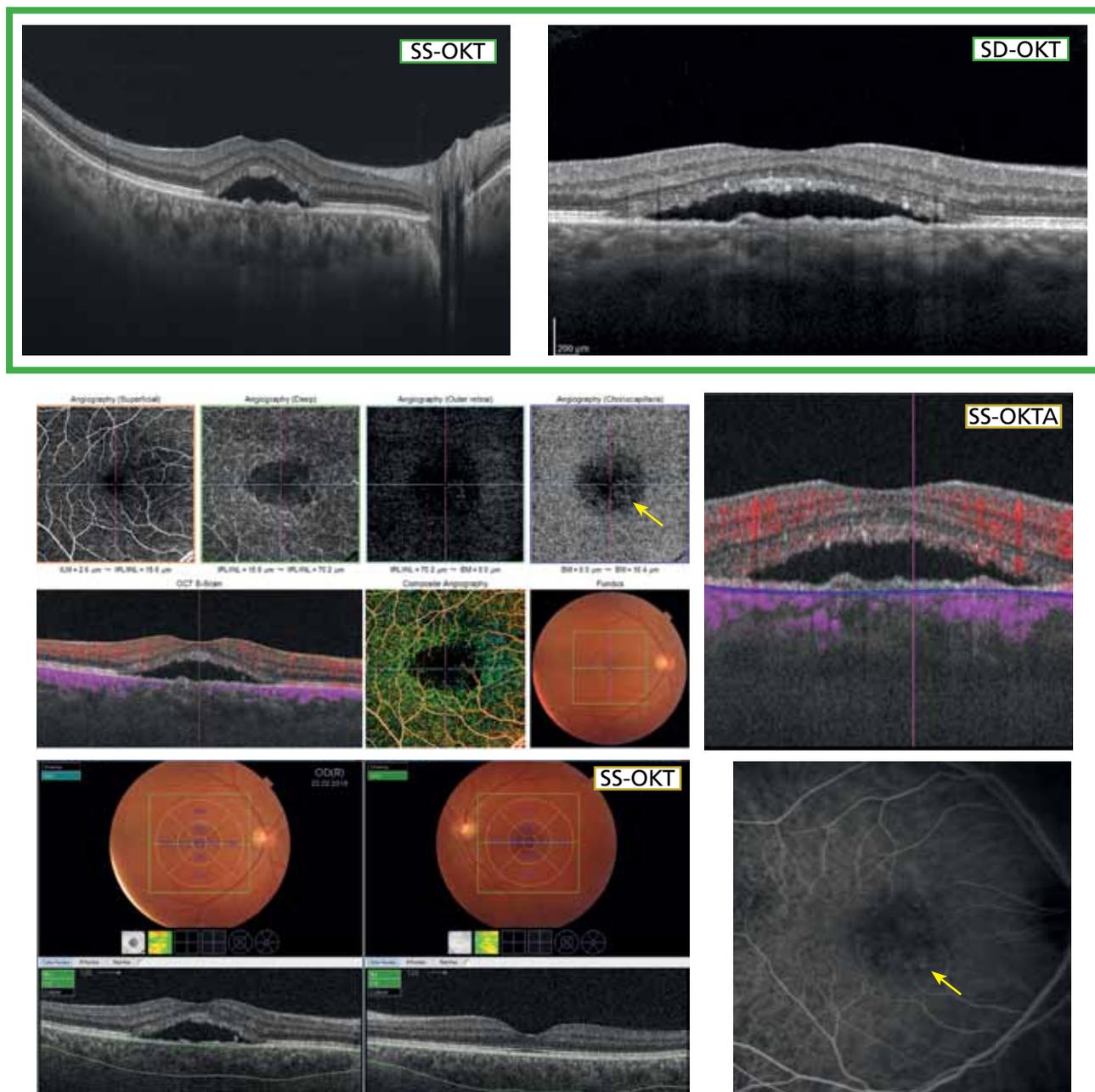
Последний год высказываются предложения относить к спектру пахихориоидальных заболеваний также перипапиллярный пахихориоидальный синдром и фокальную экскавацию хориоидеи, однако накопленных данных пока недостаточно.

### **Рекомендуемые режимы сканирования**

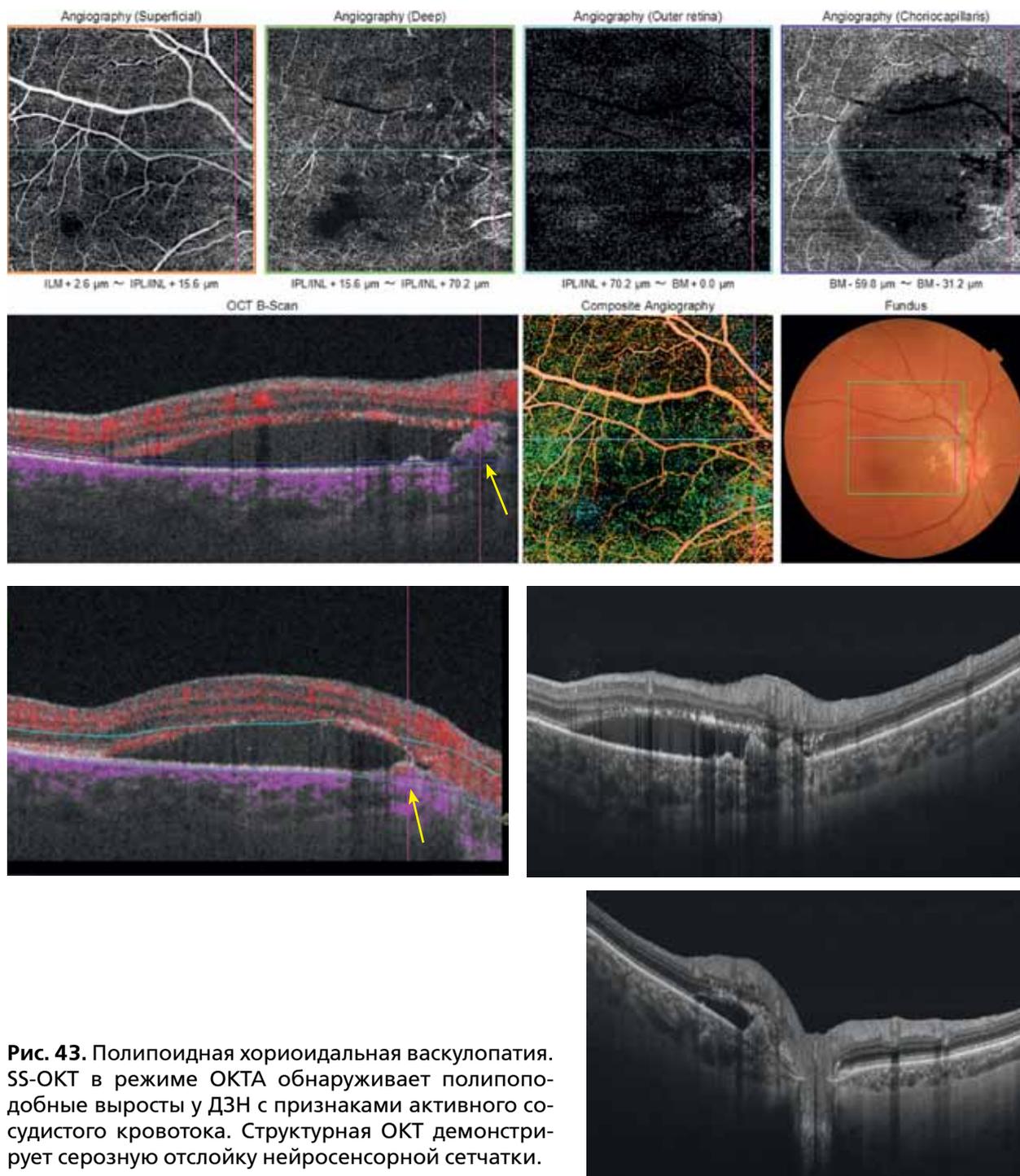
Рекомендации к стратегии и выбору протоколов сканирования сходны с данными выше для ВМД. Также требуется вдумчивое комбинирование и сопоставление результатов структурной ОКТ и ОКТА. Для мониторинга в динамике состояний, связанных с увеличением общей толщины сетчатки, отеком, отслойкой нейросенсорной сетчатки и/или ПЭС удобно использовать режим Follow Up.

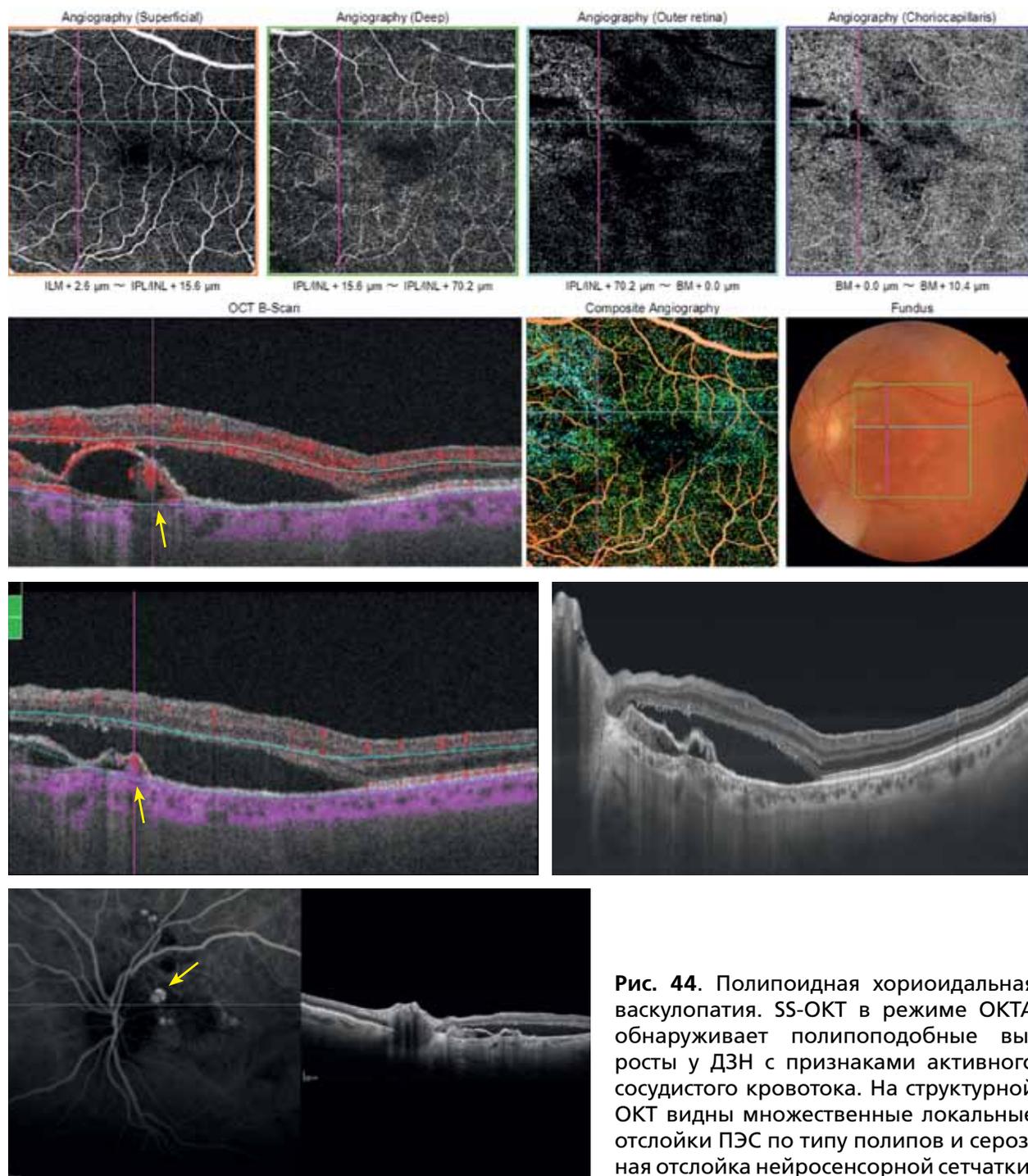


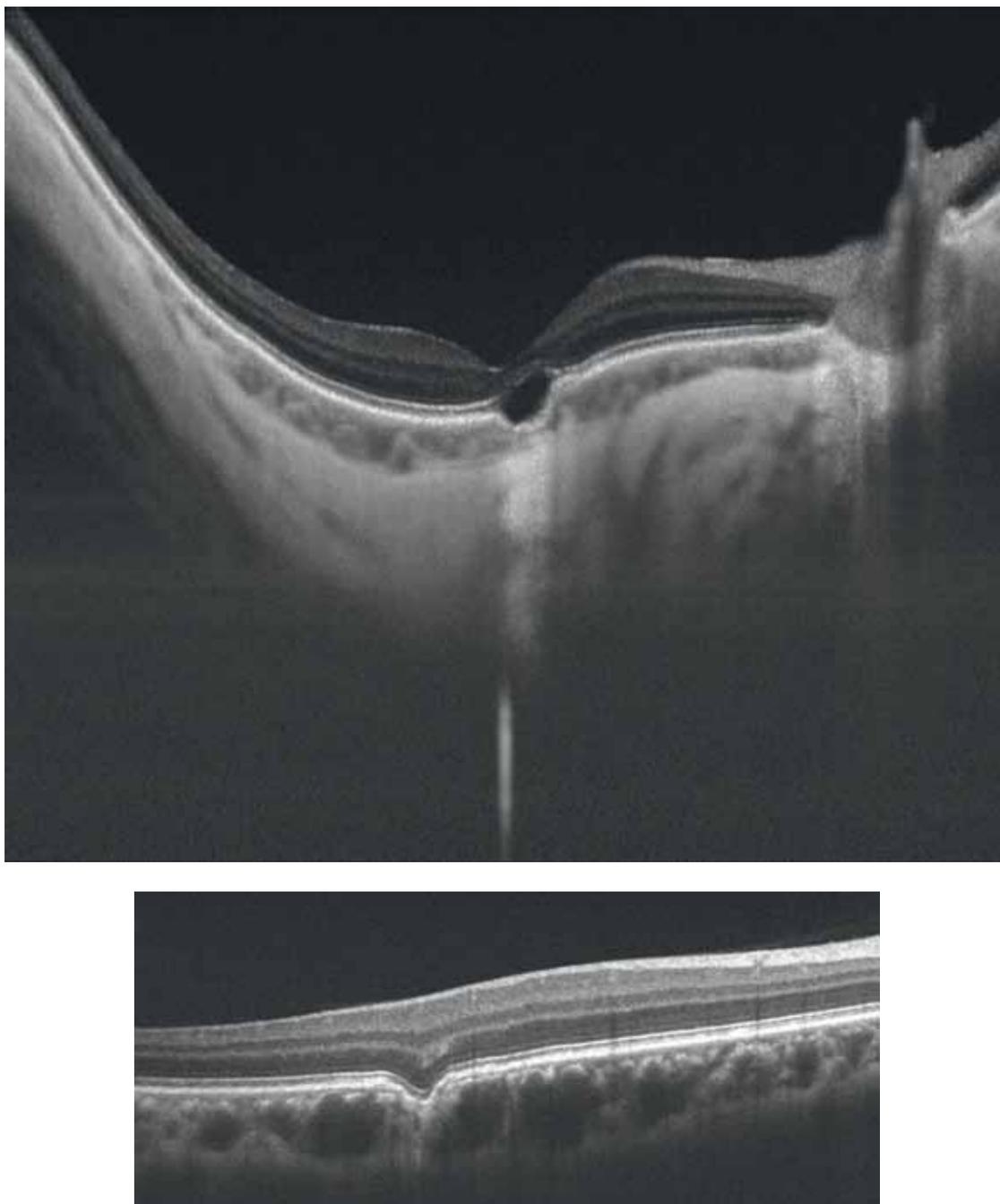
**Рис. 41.** Пахихориоидальная неоваскулопатия. SS-, SD-ОКТ, ФА и индоцианин-зеленая ангиография. СНМ визуализируется под минимальной плоской отслойкой ПЭС. Видны отдельные расширенные сосуды хориоидеи при общей небольшой ее толщине (см. карту толщины хориоидеи).



**Рис. 42.** Пахихориоидальная неоваскулопатия. SS- и SD-ОКТ. ОКТА и ФА подтверждают наличие слаборазличимой СНМ. Активный кровоток детектируется под приподнятым слоем ПЭС на В-скане. Субфовеальная толщина хориоидеи более 300 мкм обнаруживается и в парном здоровом глазу.







**Рис. 45.** Варианты проявления фокальной экскавации хориоидеи.

### Литература

[1] Warrow DJ, Hoang QV, Freund KB. *Pachychoroid pigment epitheliopathy // Retina.* 2013 Sep; 33(8):1659-72. DOI: 10.1097/IAE.0b013e3182953df4

[2] Akkaya S. *Spectrum of pachychoroid diseases // Int Ophthalmol.* 2018 Oct; 38(5):2239-2246. DOI: 10.1007/s10792-017-0666-4

[3] Cheung CMG, Lee WK, Koizumi H, et al. *Pachychoroid disease // Eye (Lond).* 2019 Jan; 33(1):14-33. DOI: 10.1038/s41433-018-0158-4

## **Заболевания витреомакулярного интерфейса**

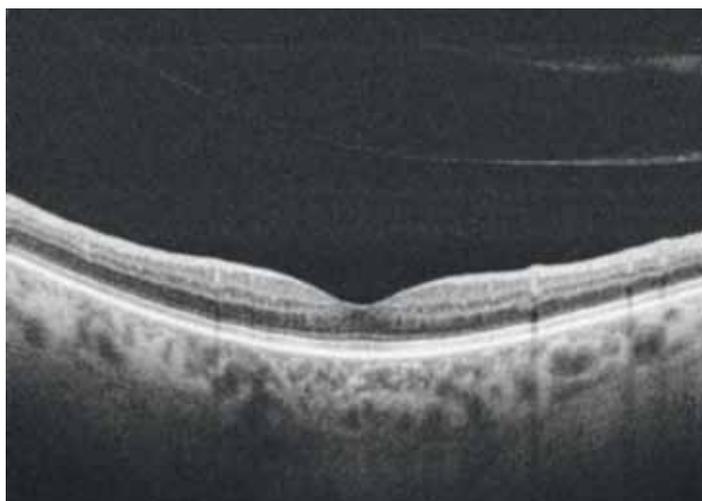
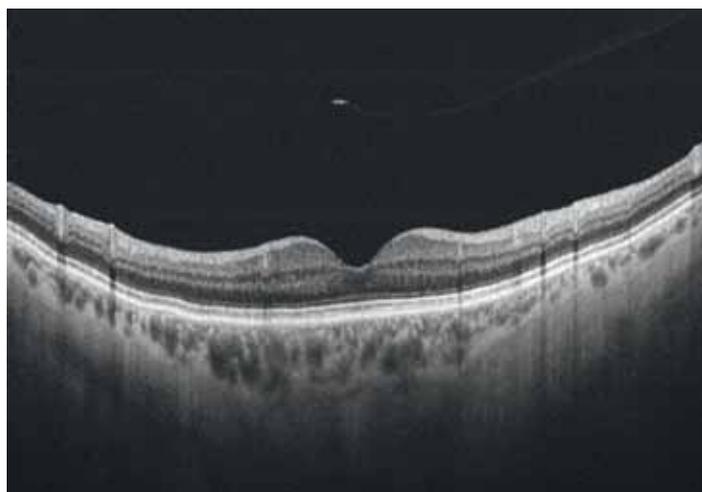
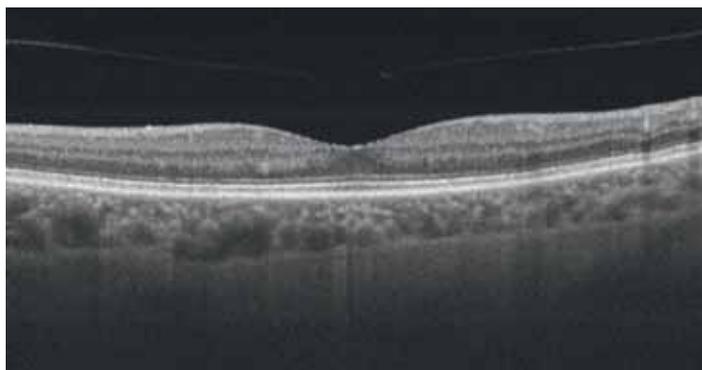
К данной группе заболеваний относятся изменения в плоскости контакта задней гиалоидной мембраны и внутренней пограничной мембраны сетчатки, а также вторичные изменения внутренних и наружных ретинальных слоев, ассоциированные с ними.

В ходе физиологической (инволюционной) задней отслойки гиалоида стекловидное тело прогрессивно отделяется от сетчатки с периферии макулы к центру фовеа и включает два этапа: (1) отслоение гиалоида в зоне перифовеа с сохраняющимся его прилеганием к фовеа, (2) отделение от фовеа с окончательным формированием задней отслойки стекловидного тела в области макулы.

Завершившаяся задняя отслойка стекловидного тела (ЗОСТ) в области макулярной зоны может произойти без каких-либо последствий для фовеальной сетчатки, или в случае формирования витреомакулярного тракционного синдрома (ВМТ) привести к сквозному макулярному отверстию, или оставить другие структурные изменения фовеальной сетчатки.

### **Витреомакулярный тракционный синдром**

Существуют разные теории, объясняющие с точки зрения патофизиологии причины, по которым в ряде случаев ЗОСТ идет не по пути полного отделения от внутренней пограничной мембраны сетчатки и приводит к возникновению ВМТ. Экспериментальные и эмпирические работы демонстрируют, что процесс ЗОСТ является физиологическим и способствует улучшению оксигенации сетчатки. Помимо исключения механических тракций, провоци-



**Рис. 46.** Примеры завершенной физиологической ЗОСТ. На SS-ОКТ отсутствуют изменения сетчатки, визуализируется задняя гиалоидная мембрана.

рующих хроническое воспаление и оксидативный стресс, задняя отслойка отделяет от сетчатки стекловидное тело, которое может выступать в качестве депо провоспалительных и ангиогенных факторов. Клинические данные подтверждают, что сохраняющийся контакт между стекловидным телом и сетчаткой в старшем возрасте является фактором риска прогрессирования ВМД до поздних стадий

[1-2]. В 2013 году Международная группа исследования ВМТ (The International Vitreomacular Traction Study, IVTS) предложила классификацию и систему ОКТ-признаков заболеваний витреомакулярного интерфейса. Тогда же было дано определение понятию витреомакулярная адгезия – частичное отделение от поверхности сетчатки заднего гиалоида при их сохраняющемся контакте в отдельных зонах в радиусе 3-х мм от центра фовеа [3]. Важно подчеркнуть, что ОКТ должно демонстрировать отсутствие изменений профиля сетчатки в зоне адгезии, иначе состояние следует трактовать как ВМТ.

## **Макулярные отверстия**

Примечательно, что современное представление о стадиях формирования макулярного отверстия базируется на классификации Гасса, созданной автором в эру до ОКТ на основе офтальмоскопических наблюдений [4]. Внедрение нового метода визуализации сетчатки практически полностью подтвердило теорию, дополнив ее доказательством вовлечения слоя фоторецепторов уже на самой ранней стадии [5].

### **Сквозное макулярное отверстие**

Состоявшийся сквозной макулярный разрыв редко вызывает трудности в диагностике при выполнении ОКТ. Задача врача заключается в оценке состояния краев сетчатки вокруг разрыва (наличие/отсутствие кистозных изменений, степень их приподнятости) и выявлении зоны сохраняющейся тракции, если таковая имеется.

Гораздо больше вопросов возникает на самых ранних стадиях формирования макулярного отверстия. Для стадии 1А типичны следующие варианты ОКТ-изменений:



Рис. 47. SS- и SD-ОКТ пациента с витреомакулярной адгезией. Отсутствуют признаки тракции.

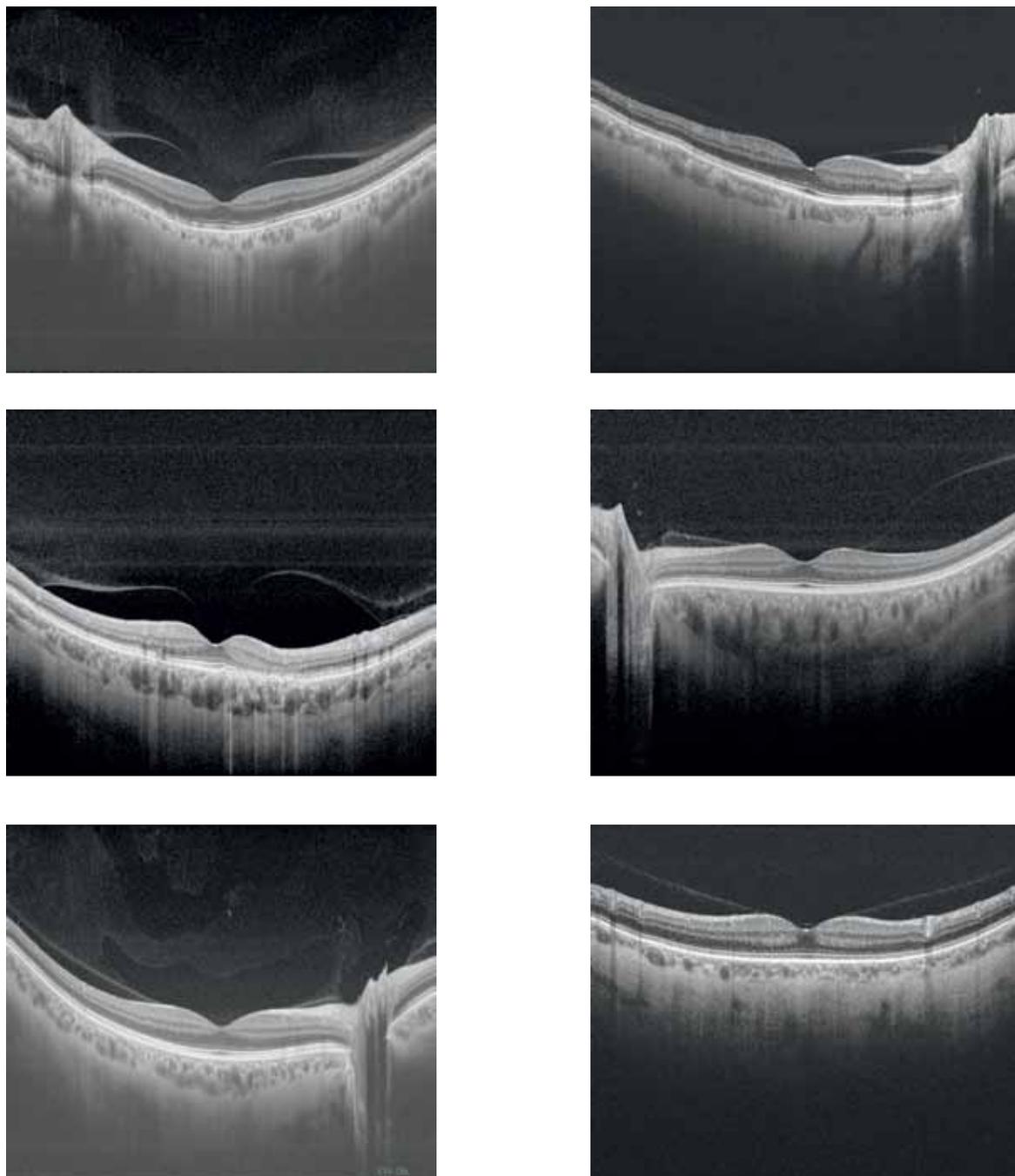


Рис. 48. Варианты проявлений витреомакулярной адгезии на SS-ОКТ.

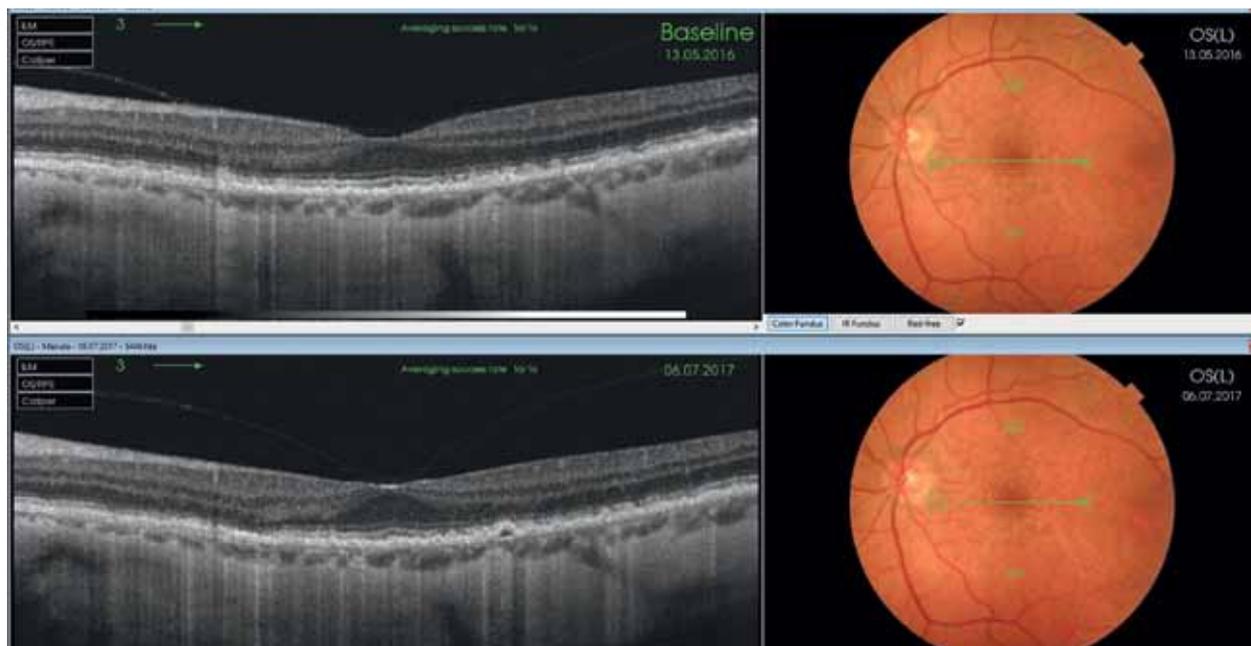
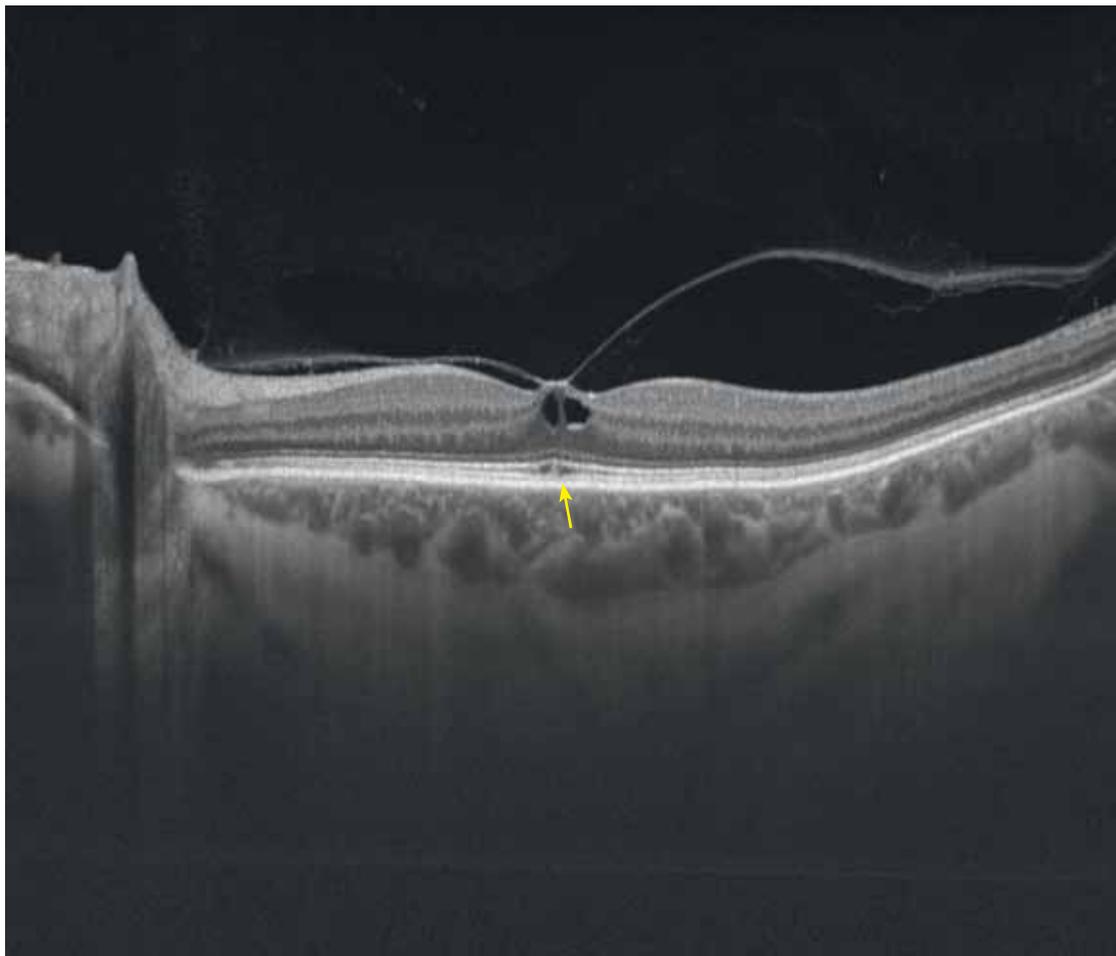


Рис. 49. SS-ОКТ случая перехода витреомакулярной адгезии в ВМТ. На скане внизу видна сглаженность профиля сетчатки.

- появление интратетинальных полостей во внутренних слоях сетчатки, при сохранных наружных;
- локальное отделение нейросенсорной сетчатки от подлежащих тканей в самом центре фовеолы при отсутствии изменений в вышележащих (внутренних) слоях;
- также оба ОКТ-признака могут присутствовать одновременно.

Такая вариабельность проявлений может создавать путаницу в трактовке ОКТ-результатов. Принципиальным на этом этапе является обнаружение вовлечения слоя фоторецепторов, поскольку зачастую это определяет зрительные функции, прогноз заболевания и тактику его ведения. Возможности SS-ОКТ позволяют на одном скане получать максимально качественную визуализацию и заднего гиалоида, и наружных слоев сетчатки, детектируя минимальные дефекты (см. рис. 50).



**Рис.50** SS-ОКТ формирующегося макулярного разрыва. Стадия 1А. Вследствие ВМТ сформировалась полость в толще внутренних слоев сетчатки, виден минимальный дефект слоя фоторецепторов.

### **Ламеллярное макулярное отверстие**

По счастью, далеко не всегда ВМТ, приведшая к формированию стадии 1А макулярного отверстия, проходит последовательно все этапы до формирования сквозного разрыва. Иногда происходит спонтанное отделение стекловидного тела и разрешение тракции. Тогда в тех случаях, когда уже произошло формирование полостей во внутренних слоях сетчатки, возникает ламеллярное отверстие, описываемое в виде характерных щелей в толще слоя волокон Генле [6]. Если же стадия 1А характеризовалась только локальной отслойкой наружного нейросенсорного слоя, то остается микроотверстие сетчатки.

### **Макулярное псевдоотверстие**

Офтальмоскопически макулярное псевдоотверстие очень похоже на ламеллярное отверстие. Данное состояние возникает на фоне формирующейся эпиретинальной мембраны (ЭРМ) и на ОКТ характеризуется приподнятостью сетчатки в центре [3, 8]. Важно помнить, что от сквозного макулярного и ламеллярного отверстий псевдоотверстие отличает отсутствие потери объема (клеток) в зоне фовеа.

Дифференциальная диагностика ламеллярного отверстия и макулярного псевдоотверстия на ОКТ может вызывать трудности в тех случаях, когда наличие эпиретинальной мембраны сопровождается незавершившейся ЗОСТ. При сочетании этих двух состояний тип отверстия, которое сформируется в итоге, по сути зависит от превалирующей силы – тангенциальных тракций или тракций вдоль переднезадней оси [7].

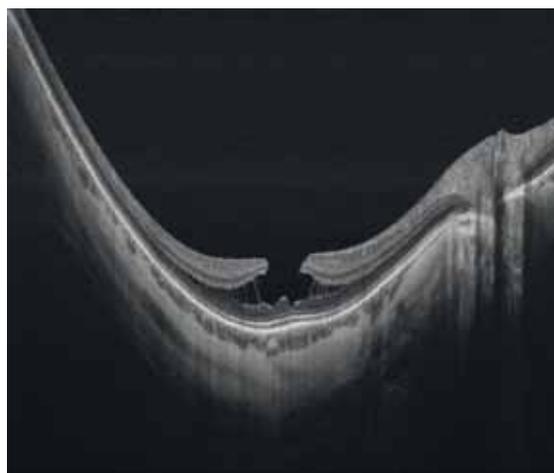
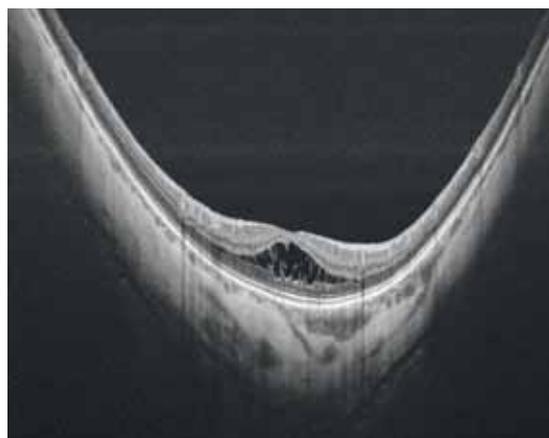
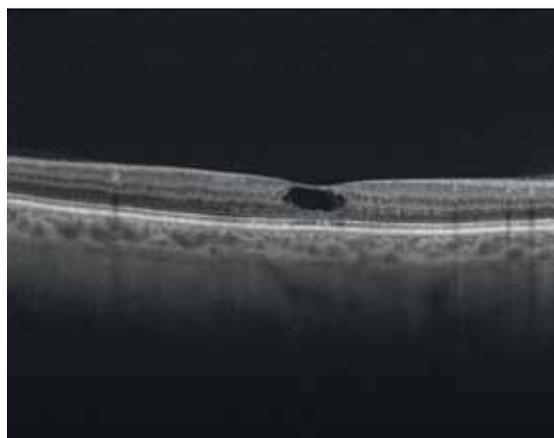
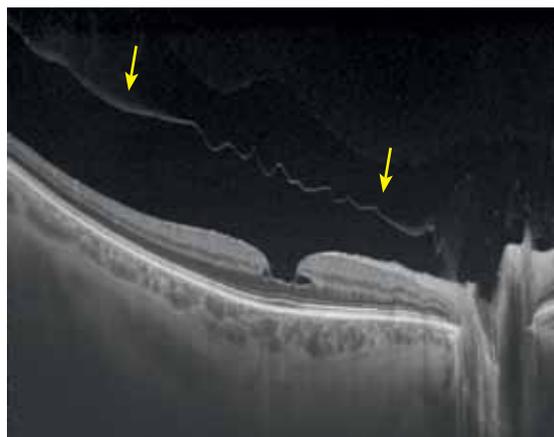
Кроме того, ламеллярный разрыв может сформироваться сам по себе как осложнение ЭРМ, без предшествовавших изменений сетчатки на фоне ЗОСТ.

### **Эпиретинальная мембрана**

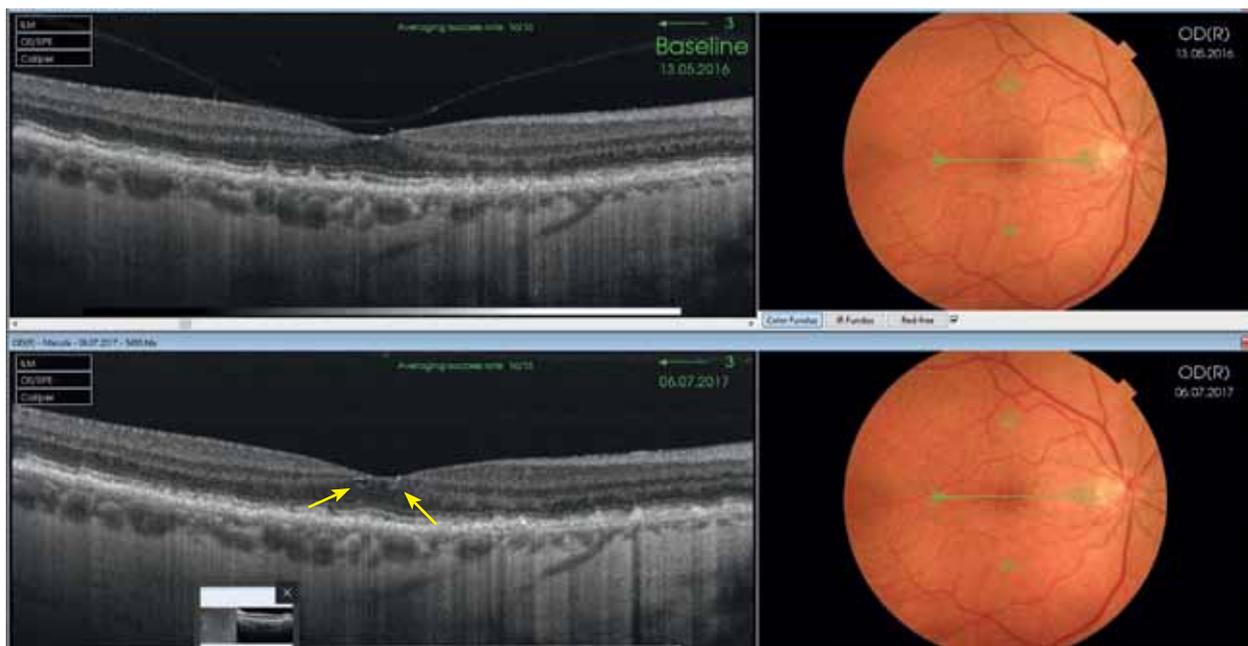
ЭРМ образуется на поверхности макулярной сетчатки, может вызывать утолщение сетчатки и образование ретинальных складок, снижающих и искажающих зрение. Эти изменения на поверхности сетчатки типичны для глаз, в которых уже состоялась задняя отслойка стекловидного тела (более 90% случаев). ЭРМ,



**Рис.51.** SS- и SD-ОКТ ламеллярного отверстия. Виден контур полностью отделившейся задней гиалоидной мембраны.



**Рис. 52.** SS-ОКТ различных вариантов ламинарного отверстия. На некоторых сканах видна полностью отделившаяся задняя гиалоидная мембрана (помечена стрелками). ОКТ-картина в том числе зависит от того, как проходит скан через дефект.



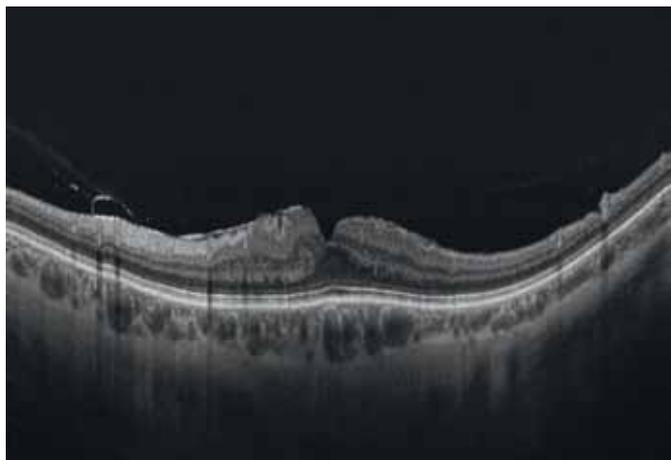
**Рис. 53.** SS-ОКТ случая витреомакулярной адгезии, закончившейся полным ЗОСТ. В толще сетчатки сформировались две мелкие полости. Признаки ламеллярного отверстия отсутствуют.

обнаруженные без очевидных признаков какого-либо первичного патологического процесса, называют идиопатическими. Они могут выглядеть как прозрачные, полупрозрачные или белесоватые. Встречаются как небольшие радиальные складки сетчатки, так и крупные, деформирующие фовеа. Такие вызывают деформацию ретинальных сосудов с патологической проницаемостью и формированием кистозных пространств в ткани. Вторичными премакулярными мембранами считаются те, что сформировались после хирургии отслойки сетчатки (macular pucker) или увеитов.

Образование мембран объясняют две выдвинутые теории, которые не конфликтуют между собой. Первая касается глаз, в которых уже состоялась ранее ЗОСТ. Склонность к образованию ЭРМ обусловлена сохранением на поверхности сетчатки остатков отслоенного витреального кортекса – его клеток, способных к пролиферации. Вторая гипотеза касается глаз с незавершенной ЗОСТ, остановившейся на границе фовеа. В условиях миграции клеток прилегающего кортекса через трещины во внутренней пограничной мембране сетчатки происходит взаимная пролиферация как клеток витреального кортекса, так и элементов мембраны. Формируется фиброклеточная структура, способная сокращаться и оказывать тракционное действие на подлежащую сетчатку. В обоих вариантах присутствует разной степени контрактура ретинальной поверхности.

В значительной части случаев ЭРМ не приводят к существенной потере зрительных функций. Тех, где происходит падение остроты зрения, насчитывается не более 10%. Сокращение ЭРМ может как стремительно прогрессировать, так и полностью прекращаться. Кроме того, встречаются случаи самопроизвольного пилинга (отделения) ЭРМ.

Симптом диссоциации слоя нервных волокон (dissociated optic nerve fibre layer, DONFL) обнаруживается через 1-6 месяцев после витреоретинального хирургического вмешательства, сопровождавшегося пилингом внутренней пограничной мембраны. Типичные изменения поверхности сетчатки в виде стрий, наблюдаемые в режиме En face на ОКТ, вероятно, объясняются потерей или деструкцией



**Рис. 54.** SS-ОКТ макулярного псевдоотверстия в разных проекциях.

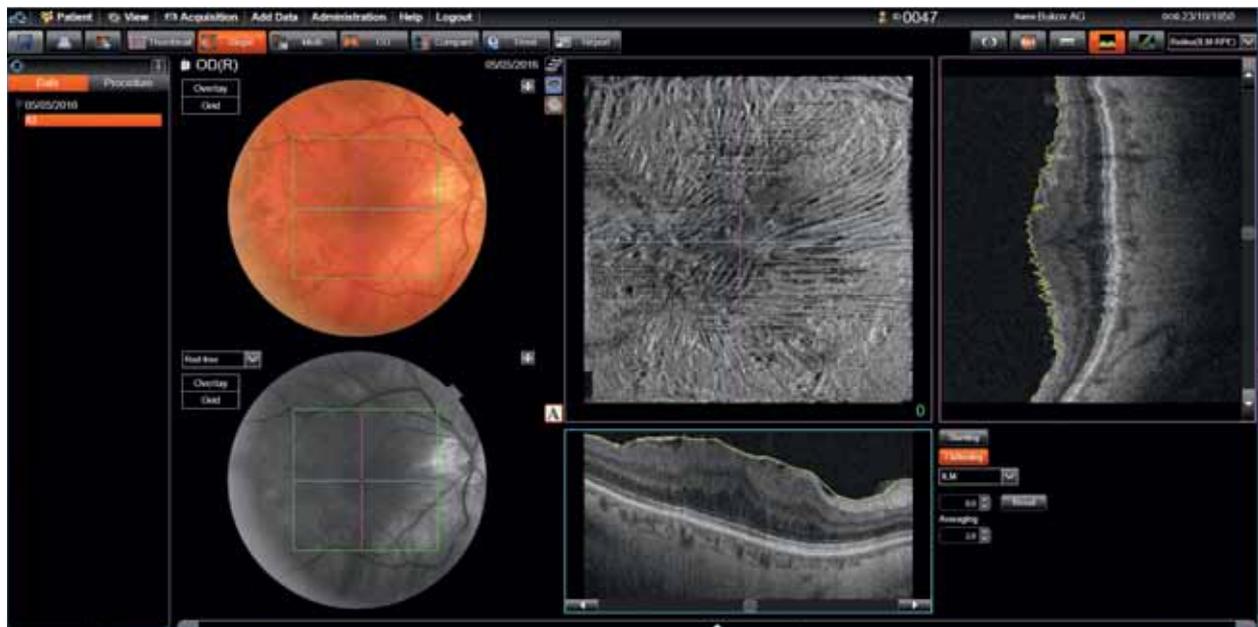
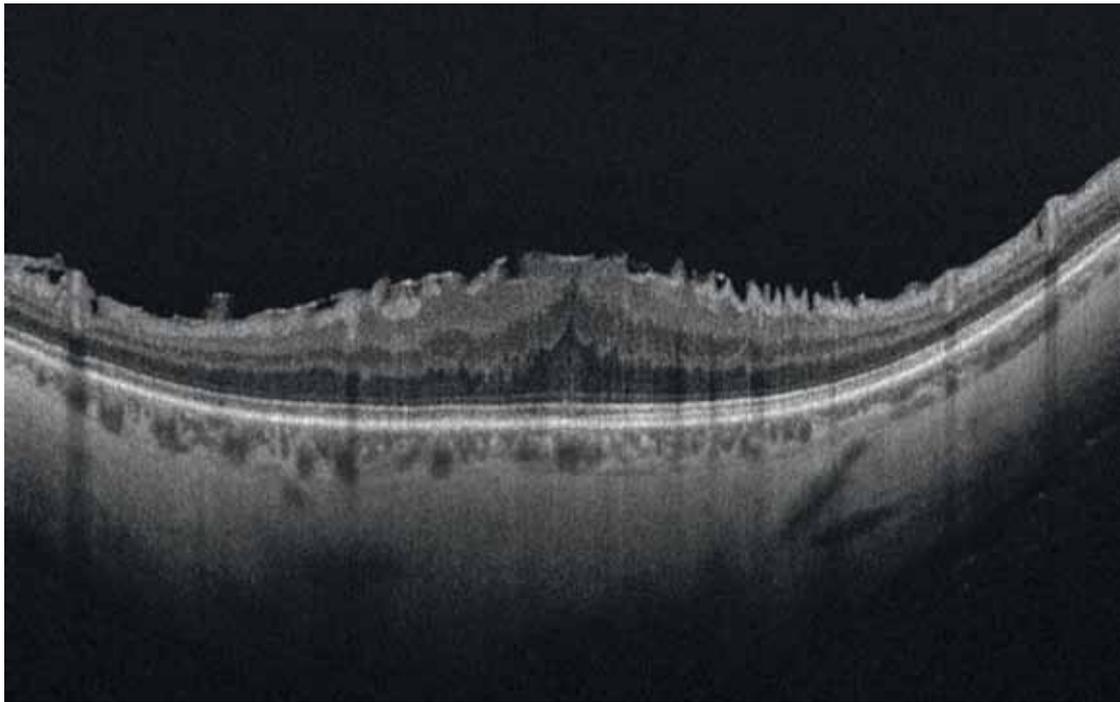
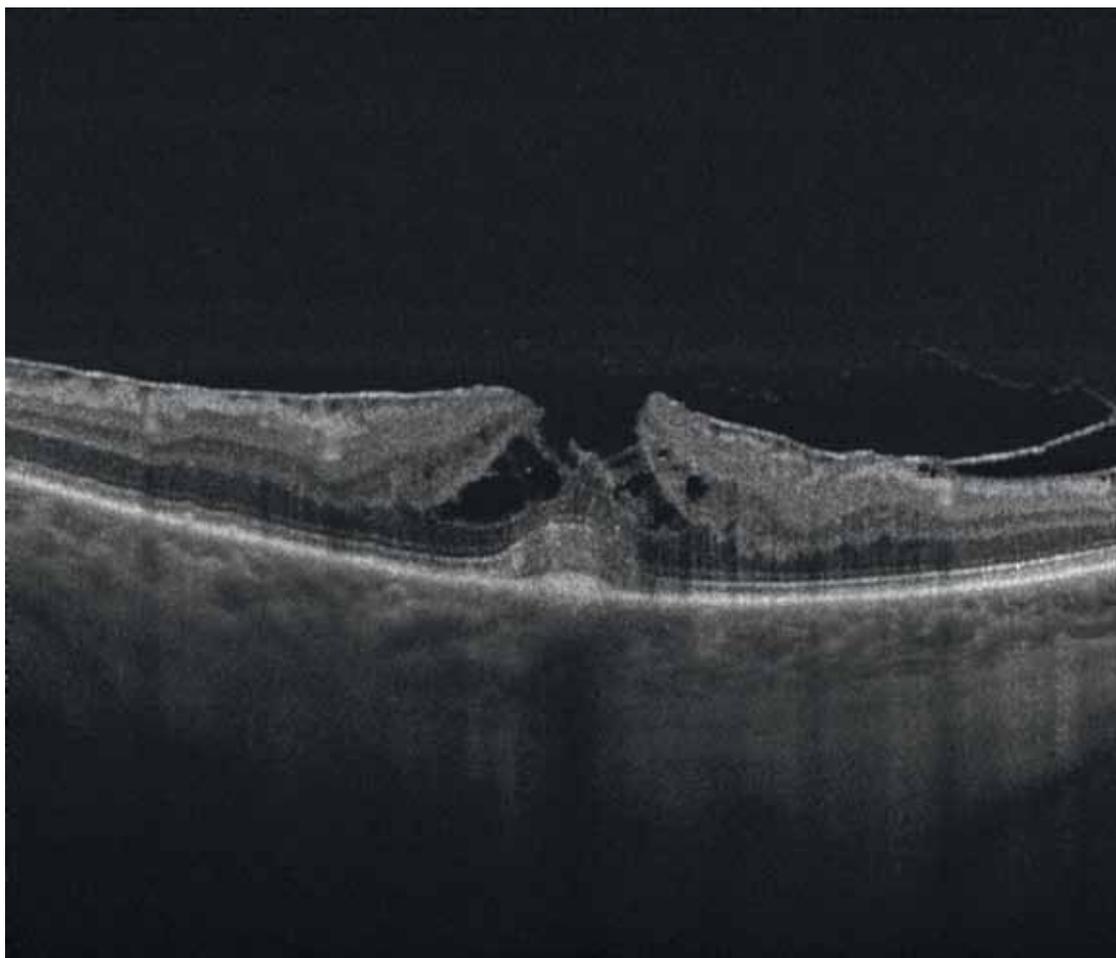
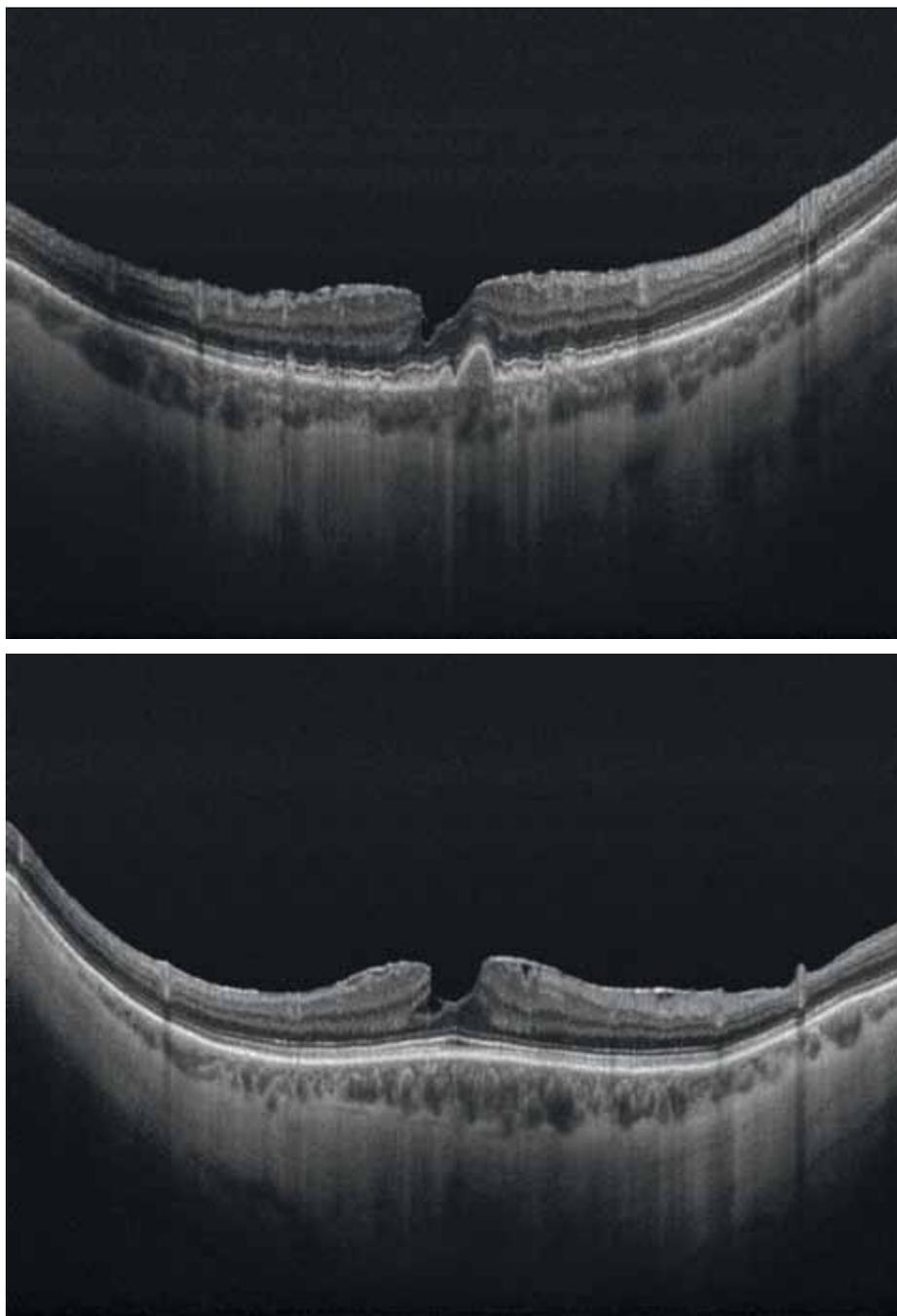


Рис. 55. Макулярное псевдоотверствие на фоне ЭРМ. SS-ОКТ продемонстрирован в режиме В-скана и просмотра En face.



**Рис. 56.** SS-ОКТ ламеллярного отверстия, возникшего на фоне эпиретинальной мембраны и незавершившейся ЗОСТ.



**Рис. 57.** SS-ОКТ различных вариантов ламеллярных отверстий в сочетании с ЭРМ.

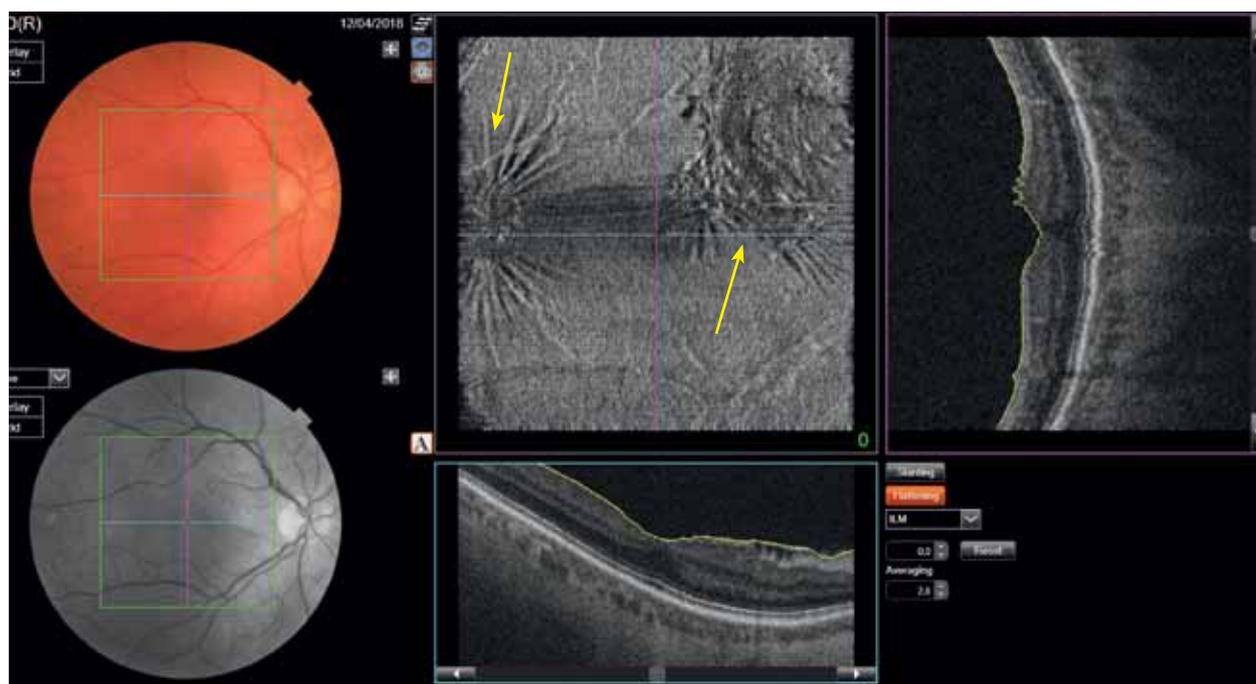
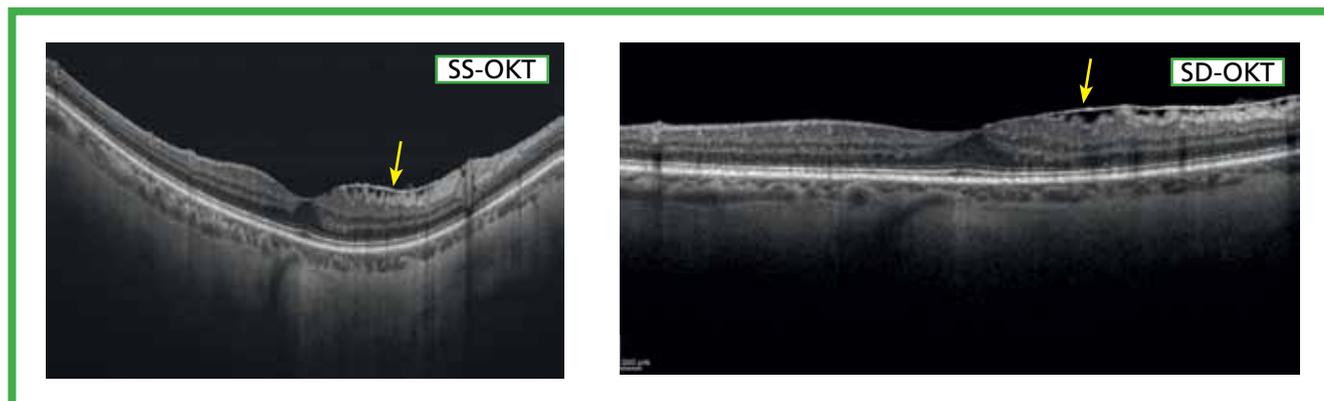
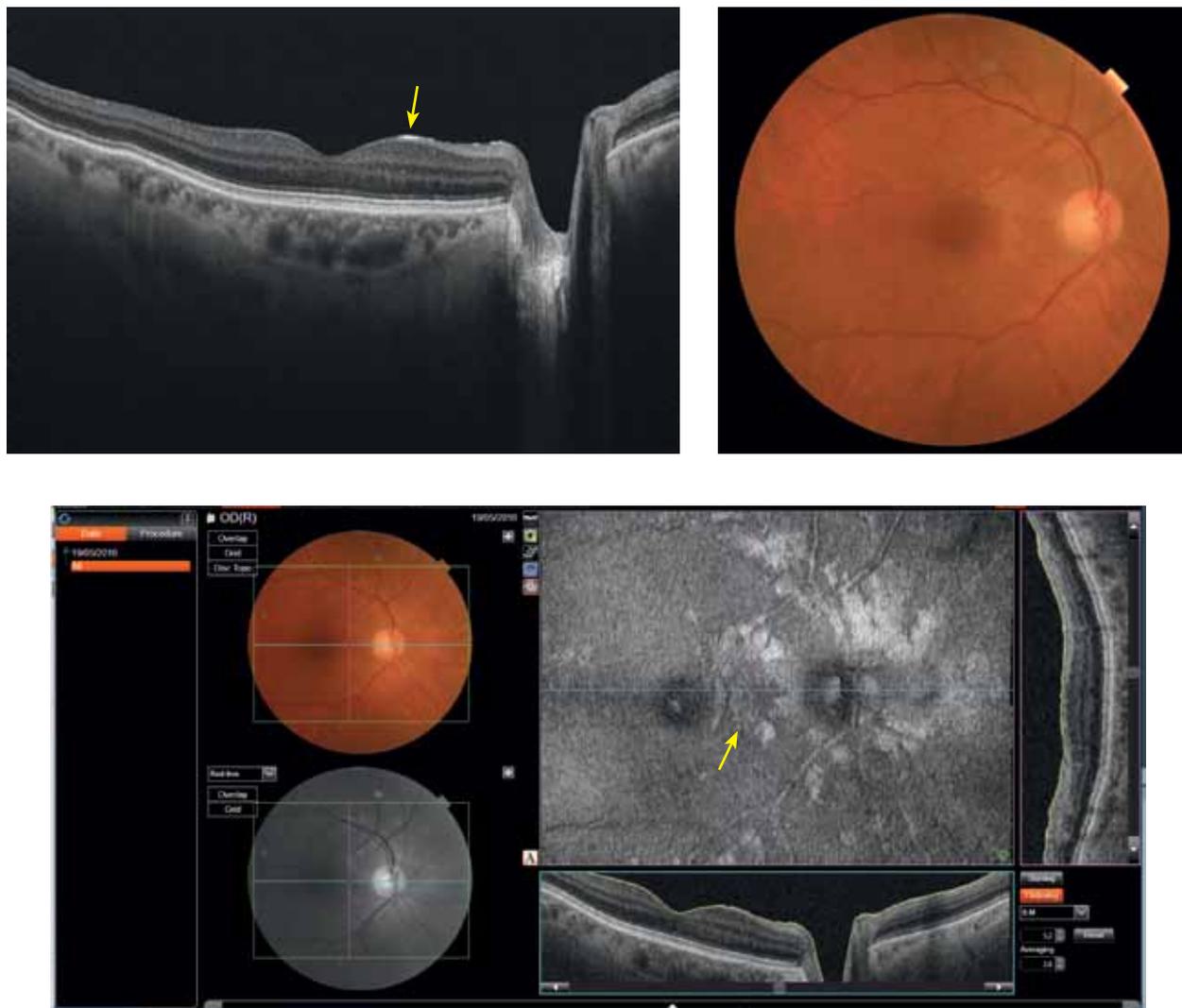
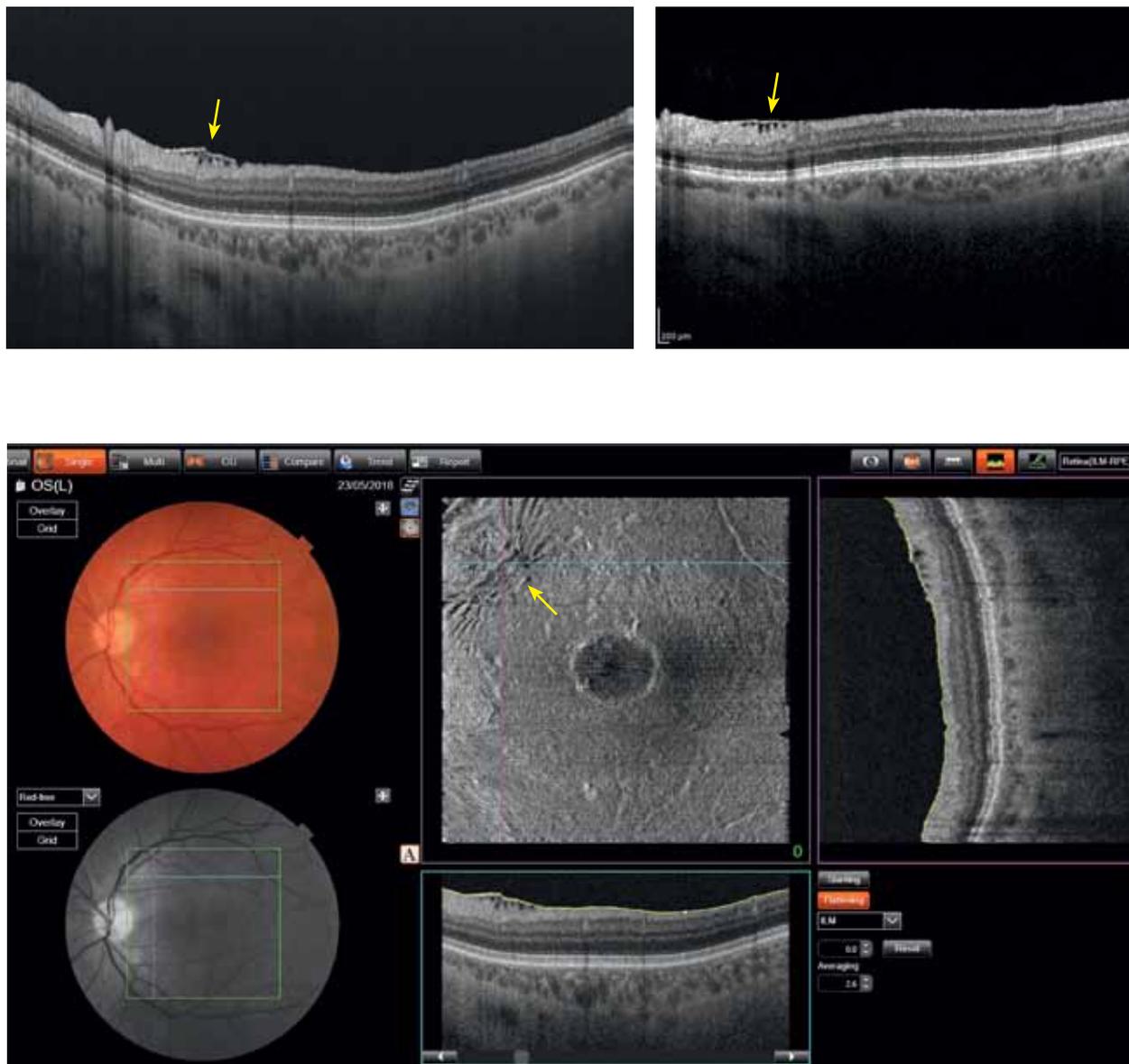


Рис. 58. Случай ЭРМ. SS-и SD-ОКТ в режиме просмотра отдельных В-сканов и SS-ОКТ в режиме En face.



**Рис. 59.** Случай ЭРМ. Офтальмоскопически в проекции папилломакулярного пучка видны изменения по типу «целлофановая макулопатия», на В-скане SS-ОКТ различимы только повышенная рефлективность и толщина внутренней пограничной мембраны. В режиме просмотра En face можно оценить размеры и протяженность ЭРМ.



**Рис. 60.** SS- и SD-ОКТ ЭРМ. Режим просмотра En face демонстрирует экстрафовеальное расположение ЭРМ

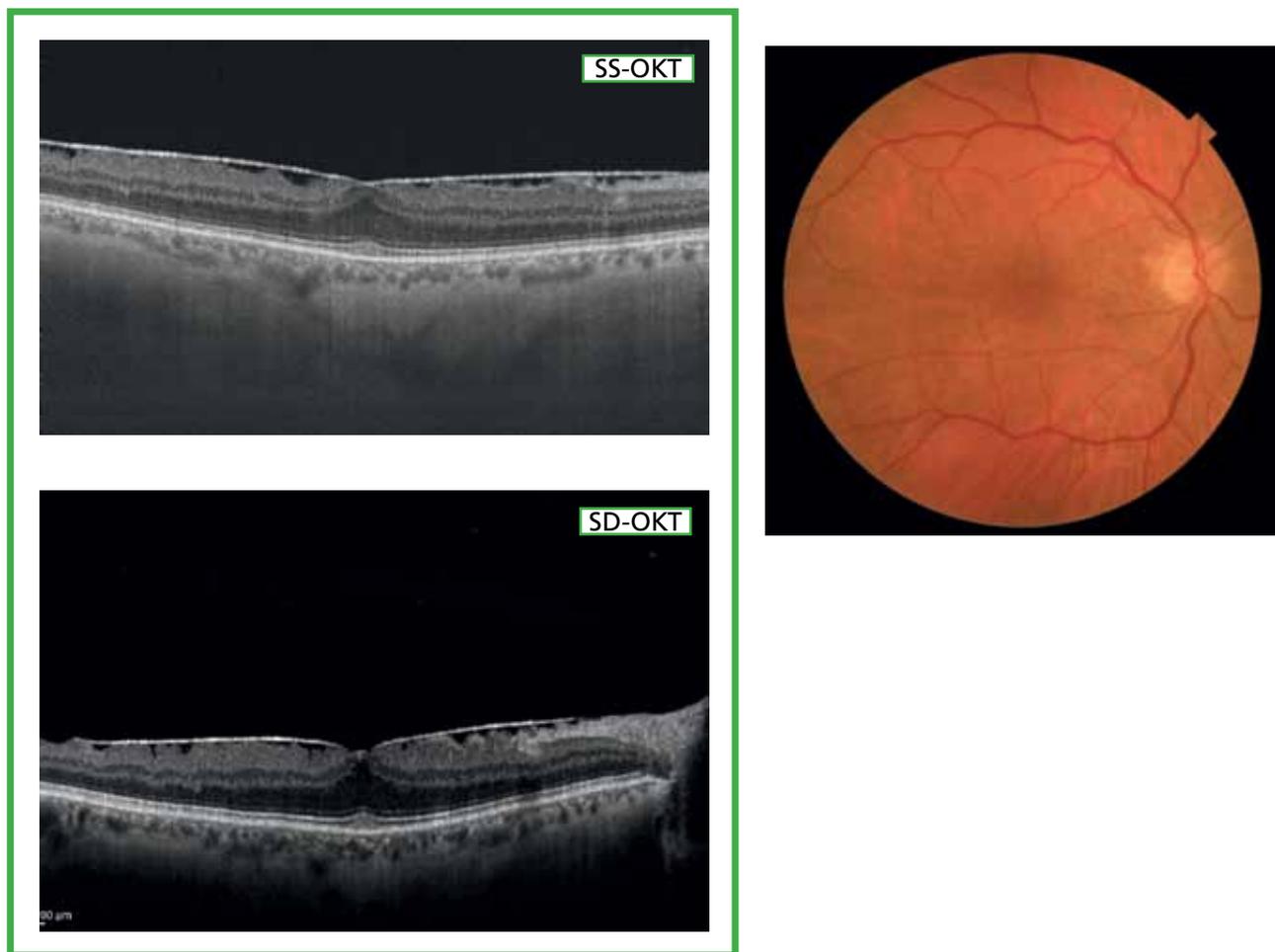
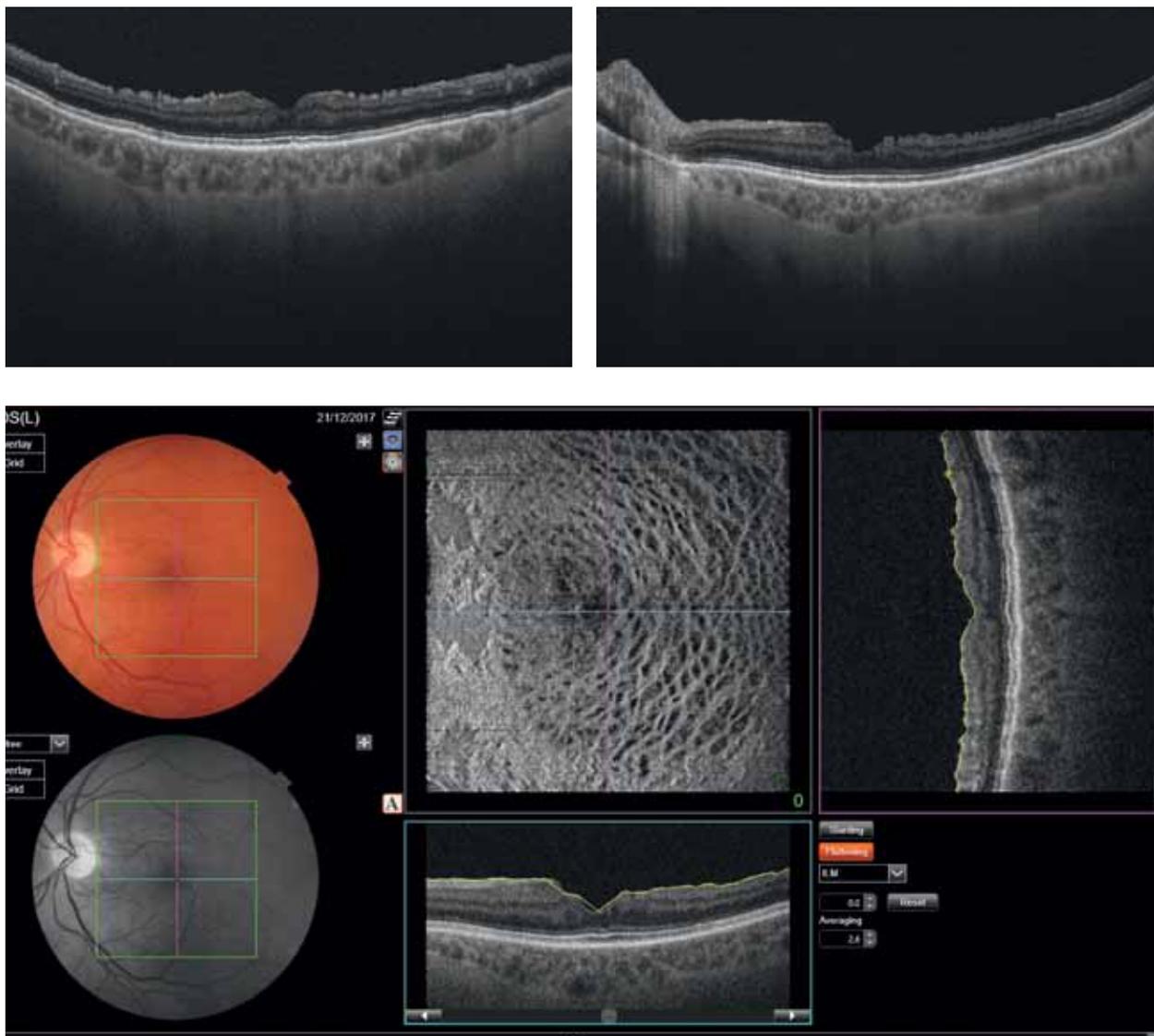


Рис. 61. SS- и SD-ОКТ случая ЭРМ с формирующимся макулярным псевдоотверстием.



**Рис. 62.** Результаты SS-ОКТ в режиме Enface пациентки с симптомом диссоциации слоя нервных волокон после эндовитреального вмешательства с пилингом внутренней пограничной мембраны. На линейных В-сканах виден неровный профиль сетчатки, соответствующий видимым на картине En face стриям.

опорных мюллеровских клеток и их отростков вместе с удаляемой внутренней пограничной мембраной, что ведет к нарушению пространственной ориентации аксонов [8].

### Рекомендуемые режимы сканирования

SS-ОКТ сегодня по качеству визуализации стекловидного тела и широким возможностям программного обеспечения для просмотра результатов предоставляет наилучшие условия для оценки состояния витреомакулярного интерфейса. За счет увеличенной глубины ОКТ-скана не требуется переключение между витреоретинальным и хориоретинальным режимами сканирования, а длинные сканы позволяют строить протяженные карты и оценивать одновременно большие площади, снижая риск упустить периферические изменения макулярной зоны.

Самым наглядным способом визуализации заболеваний, описанных в этом разделе, является сканирование по протоколу карт сетчатки и просмотр в режиме En face. Дополняют исследование отдельные линейные сканы высокого разрешения, которые позволяют различить минимальные изменения преретинального стекловидного тела, а просмотр в режиме Enhanced vitreous visualization (EVV) усиливает их контрастность. Протокол типа Radial удобен для оценки макулярных отверстий, линейное сканирование центра под разным углом позволяет найти наиболее типичную проекцию.

### Литература

- [1] Ilim O, Akkin C, Oztas Z, et al. *The Role of Posterior Vitreous Detachment and Vitreomacular Adhesion in Patients With Age-Related Macular Degeneration // Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina. 2017 Mar 1; 48(3):223-229. DOI: 10.3928/23258160-20170301-05*
- [2] Jackson TL, Nicod E, Angelis A, et al. *Vitreous attachment in age-related macular degeneration, diabetic macular edema, and retinal vein occlusion: a systematic review and metaanalysis // Retina. 2013 Jun; 33(6):1099-108. DOI: 10.1097/IAE.0b013e31828991d6*

- [3] Duker JS, Kaiser PK, Binder S, et al. *The International Vitreomacular Traction Study Group classification of vitreomacular adhesion, traction, and macular hole* // *Ophthalmology*. 2013 Dec; 120(12):2611-2619. DOI: 10.1016/j.ophtha.2013.07.042
- [4] Gass JD. *Reappraisal of biomicroscopic classification of stages of development of a macular hole* // *Am J Ophthalmol*. 1995 Jun; 119(6):752-9
- [5] Hee MR, Puliafito CA, Wong C, et al. *Optical coherence tomography of macular holes* // *Ophthalmology*. 1995 May; 102(5):748-56
- [6] Takahashi A, Nagaoka T, Ishiko S, et al. *Foveal anatomic changes in a progressing stage 1 macular hole documented by spectral-domain optical coherence tomography* // *Ophthalmology*. 2010 Apr; 117(4):806-10. DOI: 10.1016/j.ophtha.2009.09.022
- [7] Hirano M, Morizane Y, Kimura S, et al. *Assessment of Lamellar Macular Hole and Macular Pseudohole With a Combination of En Face and Radial B-scan Optical Coherence Tomography Imaging* // *Am J Ophthalmol*. 2018 Apr; 188:29-40. DOI: 10.1016/j.ajo.2018.01.016
- [8] Steel DH, Dinah C, White K, et al. *The relationship between a dissociated optic nerve fiber layer appearance after macular hole surgery and Muller cell debris on peeled internal limiting membrane* // *Acta Ophthalmol*. 2017 Mar; 95(2):153-157. DOI: 10.1111/aos.13195

## Заключение

*Развитие метода ОКТ движется по пути создания высокоскоростных машин. Этот тренд охватил всю индустрию медицинской инженерии. Ведется разработка оборудования, способного выполнять обследование намного быстрее и эффективнее, чем это сегодня делает человек. Полная автоматизация является неизбежным и очень недалеким будущим офтальмодиагностики. Получаемые данные могут храниться в облаке и быть интегрированы с электронной историей болезни, нейросети будут анализировать результаты и делать прогноз течения заболевания.*

*Возможно важнейшим шагом к этому станет создание оптического когерентного томографа одномоментного тотального сканирования всего глазного яблока. Время покажет. Ясно одно: серьёзное и углубленное освоение лучших образцов современных ОКТ-технологий сделает вас подготовленными к этому переломному событию. Желаем удачи!*

**Оптическая когерентная томография:  
от спектральной к swept source**

**Семенова Н.С.**

**под редакцией Акопяна В.С.**

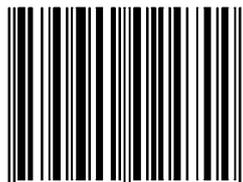
**Техническая редакция:**

**Корректор: Кузина Т.М.**

**Верстка: Тимохина И.М.**

**Дизайн обложки: Ардабьевская Ю.В.**

ISBN 978-5-600-02470-0



9 785600 024700

Подготовлено к печати и отпечатано  
в ООО «Печатный дом «Магистраль»  
119530, г. Москва, Очаковское шоссе, д. 32  
Тел.: (495) 786 8010, [www.mag-print.ru](http://www.mag-print.ru)

Подписано в печать 14.05.2019. Формат 210 × 245 мм.  
Печать офсетная. Бумага мелованная. Тираж экз.  
Заказ