

# ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ И АНГИОГРАФИЯ ЗАДНЕГО СЕГМЕНТА ГЛАЗА В НОРМЕ

## ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ МАКУЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ

Оптическая когерентная томография является методом, позволяющим получить изображение слоев сетчатки, наиболее близкое к гистологическому (Drexler W. et al., 2003). Следует, однако, отметить, при получении гистологических срезов используются специальные красители и фиксирующие агенты, которые могут внести некоторые артефакты. В свою очередь, при ОКТ изображение строится на основе различий в поглощении и отражении света различными слоями ткани *in vivo* (Schuman J.S., Puliafito C.A., 2004). Этим объясняются некоторые несоответствия между интерпретацией структуры сетчатки, основанной на классической гистологии, и современными данными, полученными при помощи ОКТ.

Ниже приводим наиболее распространенный вариант трактовки слоев заднего полюса глазного дна по данным ОКТ (De Smet M.D. et al., 2009) (рис. 1).

**Мембрана Бруха** (Bruch membrane) обычно не видна на ОКТ сетчатки здорового глаза, но становится хорошо различимой, когда происходит потеря ее адгезии с пигментным эпителием, например, при экссудативной отслойке пигментного эпителия. В таких случаях мембрана Бруха выглядит в виде тонкой среднерефлективной линии.

**Пигментный эпителий** (retinal pigment epithelium, RPE) сетчатки представляет собой гиперрефлективную линию, отделяющую хориоидею от наружных слоев сетчатки.

В непосредственной близости от ПЭС располагаются 3 тонких слоя, природа которых не до конца ясна и активно изучается:

- 1. Мембрана Вирхова.** Состоит из плотных соединений между клетками пигментного эпителия и наружными сегментами фоторецепторов (Srinivasan V.J. et al., 2006, 2008).
- 2. Линия IS/OS** или линия соединения между наружными и внутренними сегментами фоторецепторов (IS/OS junction) соответствует второму гиперрефлективному слою. Гипорефлективное пространство между мембраной Вирхова и линией IS/OS соответствует *наружным сегментам фоторецепторов* (outer segments of photoreceptors (OS)); гипорефлективное пространство между линией IS/OS и наружной пограничной мембраной соответствует *внутренним сегментам фоторецепторов* (inner segments of photoreceptors (IS)).
- 3. Наружная пограничная мембрана** (External limiting membrane, ELM) соответствует третьему гиперрефлективному слою.

**Наружный ядерный слой** (Outer Nuclear Layer, ONL). Гипорефлективный слой. Соответствует ядрам фоторецепторов.

**Наружный плексиформный слой** (Outer Plexiform Layer, OPL). Среднерефлективный слой. Соответствует синапсам биполярных клеток с фоторецепторами.

**Внутренний ядерный слой** (Inner Nuclear Layer, INL). Как и наружный ядерный слой, является гипорефлективным. Образован ядрами биполярных клеток, а также амакриновых, горизонтальных и мюллеровских клеток.

**Внутренний плексиформный слой** (Inner Plexiform Layer, IPL). Содержит синапсы между аксонами биполярных клеток и дендритами ганглиозных и амакриновых клеток.

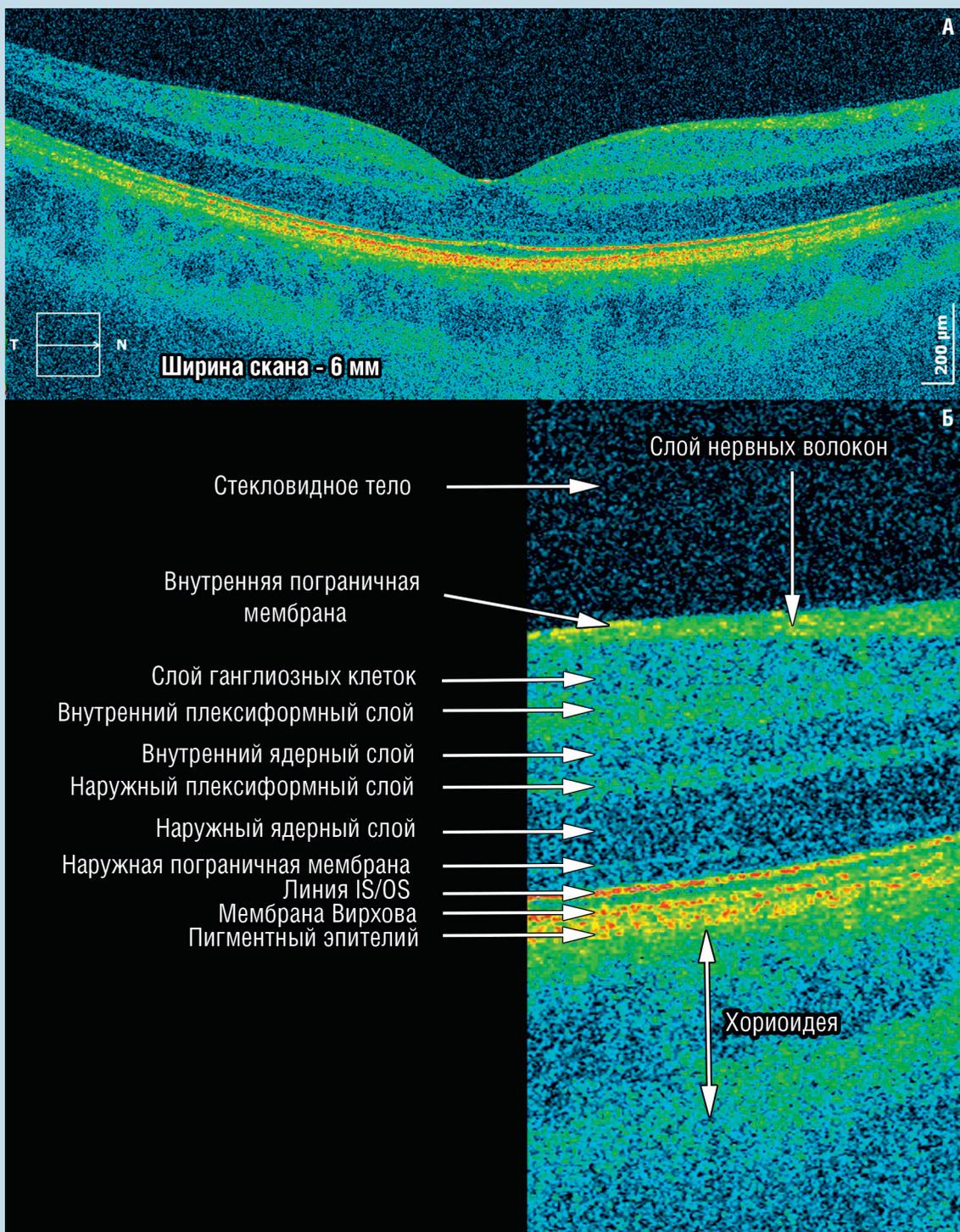


Рисунок 1. Нормальная ОКТ-анатомия зоны фовеа и «классическая» номенклатура ретинальных слоев.

А — Скан макулярной области.

Б — Микроанатомия ретинальных слоев.

**Слой ганглиозных клеток** (Ganglion Cell Layer, GCL). Гипорефлективный слой. Образован ядрами ганглиозных клеток.

**Слой нервных волокон** (Retinal Nerve Fiber Layer, RNFL). Гиперрефлективный слой. Представляет собой аксоны ганглиозных клеток. Толщина слоя увеличивается по направлению к диску зрительного нерва.

**Внутренняя пограничная мембрана** (Internal Limiting Membrane, ILM). В большинстве случаев не видна на ОКТ, либо видна лишь на некоторых участках. Становится заметной при увеличении ее плотности, и в этом случае выглядит как тонкая гиперрефлективная линия, плотно прилегающая к внутренней поверхности сетчатки.

**Задняя гиалоидная мембрана стекловидного тела** (Posterior Hyaloid Membrane). В норме прилежит к внутренней поверхности сетчатки и не видна. Становится заметной при возникновении отслоек стекловидного тела и может играть важную роль в формировании витреоретинальных тракций.

**Ретинальные сосуды** видны на стандартных ОКТ-сканах в виде округлых образований на внутренней поверхности сетчатки и частично в толще слоя нервных волокон. Отличительными ОКТ-признаками ретинальных сосудов является то, что они всегда дают вертикальную тень на глубжележащие структуры, а также присутствуют на всех соседних ОКТ-сканах.

**Хориоидея** (Choroid). Современные ОКТ-системы позволяют измерять толщину хориоидеи, оценивать ее рефлективность, плотность сосудистого рисунка. Применение источника света с большей длиной волны (1050 нм) улучшает визуализацию хориоидеи за счет более глубокого проникновения светового луча за пигментный эпителий (Chen Y. et al., 2008; Ikuno Y. et al., 2009, 2011).

### Особенности ОКТ-анатомии фовеолярного углубления

Зона фовеолярного углубления отличается особой архитектурой ретинальных слоев. По направлению к центру фовеолы наблюдается увеличение толщины наружного ядерного слоя и постепенное исчезновение внутренних слоев нейроэпителиальной сетчатки. Кроме того, расстояние между пигментным эпителием, мембраной Вирхова и линией IS/OS в центре фовеа увеличено за счет большей длины наружных сегментов колбочек (рис. 2).

Непрерывное развитие технологий ОКТ постоянно повышает разрешающую способность, степень визуализации мелких объектов, глубину сканирования, делает более удобным и функциональным программное обеспечение. Данные усовершенствования дают возможность открывать новые нюансы микроанатомии глазного дна. В 2014 году Международной комиссией по номенклатуре ОКТ (International Nomenclature for Optical Coherence Tomography Panel) (Staurengli G. et al., 2014) предложен уточненный вариант трактовки нормальной ОКТ-анатомии сетчатки, представленный на рис. 3, табл. 1.

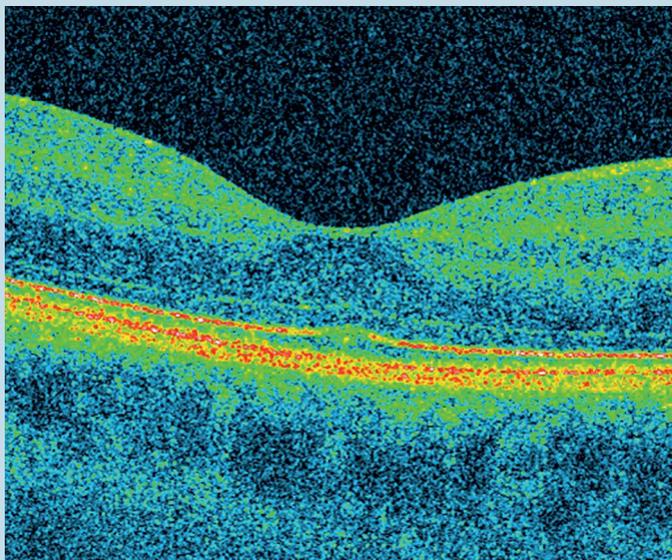


Рисунок 2. ОКТ-анатомия зоны фовеолярного углубления здорового глаза.

Таблица 1. Сопоставление «классической» и новой номенклатуры ретинальных слоев (Шпак А.А. 2015)

Старое название	Новое название
Внутренние сегменты фоторецепторов	Миоидная зона фоторецепторов
Линия IS/OS (соединение между наружными и внутренними сегментами фоторецепторов)	Эллипсоидная зона фоторецепторов
Мембрана Вирхова (линия вершин колбочек)	Зона сочленения колбочек с пигментным эпителием
Пигментный эпителий	Комплекс «пигментный эпителий — мембрана Бруха»
(Ранее не выделялся, соответствует внутренним отделам наружного ядерного слоя)	Слой волокон Генле
Хориоида	1. Слой хориокапилляров 2. Слой Саттлера 3. Слой Галлера

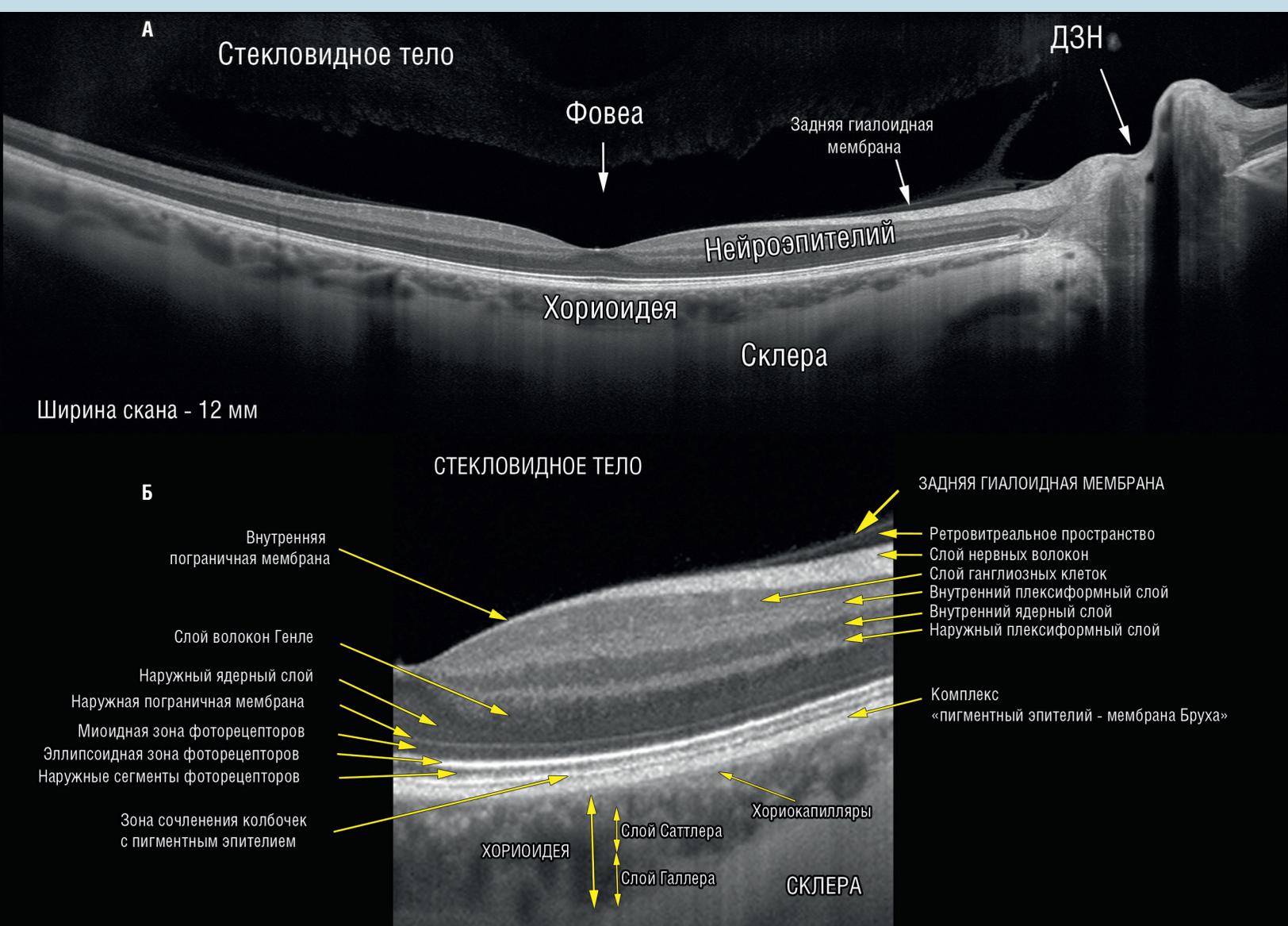


Рисунок 3. Нормальная ОКТ-анатомия сетчатки с учетом данных, полученных с помощью последнего поколения спектральных оптических когерентных томографов (Optovue Avanti XR).

А — Широкоформатный скан высокого разрешения.

Б — Микроанатомия ретинальных слоев (Starengi G. et al., 2014; Шпак А. А., 2015).

### ОКТ-ангиография макулярной области

ОКТ-ангиография дает возможность послойной визуализации сосудистых структур. При исследовании сосудистой микроанатомии сетчатки программное обеспечение томографа Optovue Avanti XR позволяет видеть как полнослойную проекцию сосудистого рисунка (рис. 4), так и автоматически разделять объемную ОКТ-реконструкцию сетчатки на 4 слоя (рис. 5) (De Carlo T.E. et al., 2015):

1. Поверхностное внутреннее сосудистое сплетение (superficial inner retina) — сосудистая сеть слоя нервных волокон и слоя ганглиозных клеток;
2. Глубокое внутреннее сосудистое сплетение (deep inner retina) — сосудистая сеть внутреннего ядерного слоя;
3. «Наружная» сетчатка (outer retina) — ограничивается наружной пограничной мембраной и пигментным эпителием;
4. Хориокапилляры (choroid capillary) — соответствует хориокапиллярному слою сосудистой оболочки.

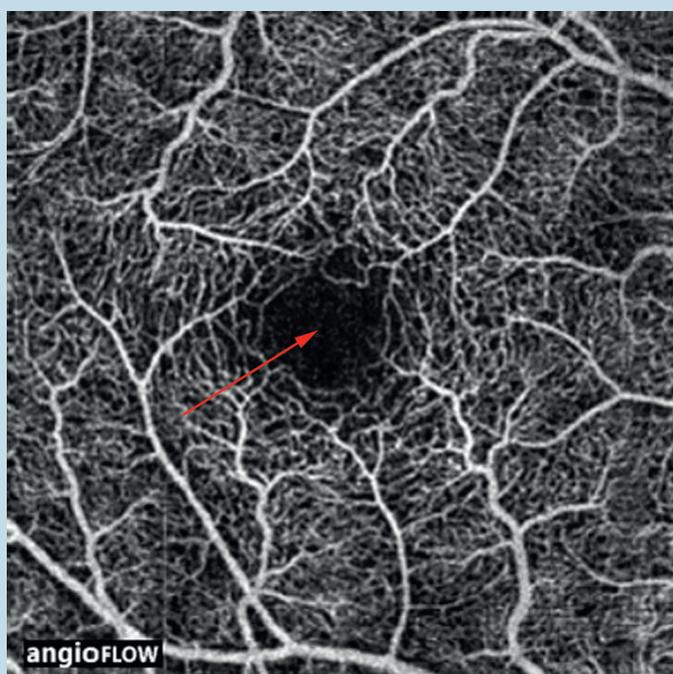


Рисунок 4. Полнослойное изображение сосудистого рисунка макулярной области здорового человека. Стрелкой обозначена фовеолярная аваскулярная зона. Размер зоны сканирования — 3×3 мм.

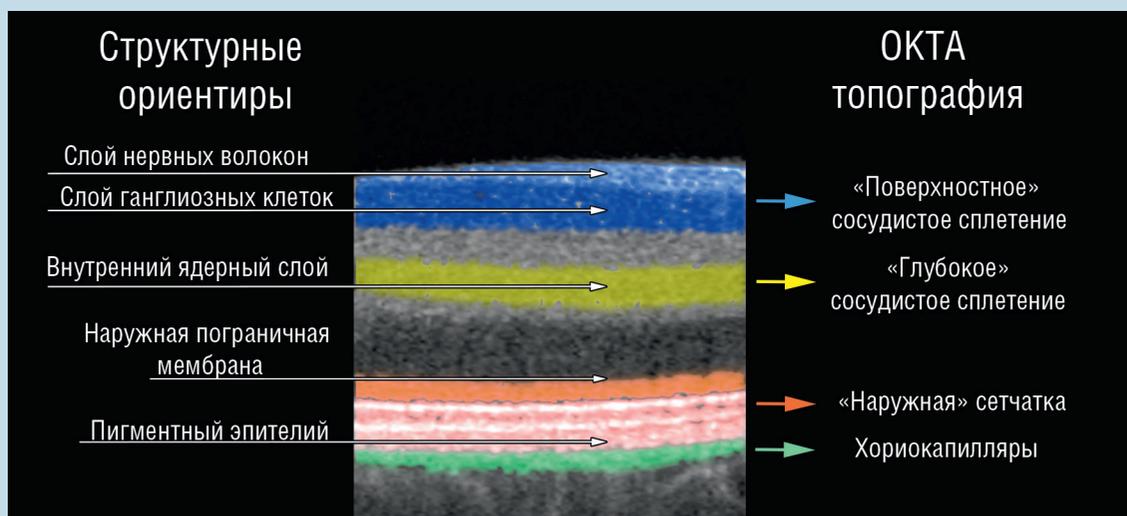


Рисунок 5. Уровни визуализации сосудов сетчатки на томографе Optovue Avanti XR при автоматической сегментации.

Кроме того, используя функцию послойного исследования ОКТА-реконструкции в режиме ручной установки глубины и толщины среза, врач получает более широкие возможности для исследования структур сетчатки, что дополняет автоматическую сегментацию.

Сосудистая сеть на уровне «наружной» сетчатки в норме не видна, однако исследование данного слоя является полезным в случае подозрения на патологию с субретинальной локализацией (например, классическая хориоидальная неоваскуляризация).

Использование ОКТ-ангиограмм малого размера (2×2 мм, 3×3 мм) позволяет лучше визуализировать мелкую сосудистую сеть, ретинальные капилляры и хориокапилляры, в то время как изображения большего размера (6×6 мм, 8×8 мм) дают более полное представление о ходе крупных сосудов (рис. 6).

SSADA-алгоритм ангиографии позволяет рассчитывать индекс кровотока (flow index), который пропорционален плотности сосудистого рисунка и скорости кровотока (рис. 7).

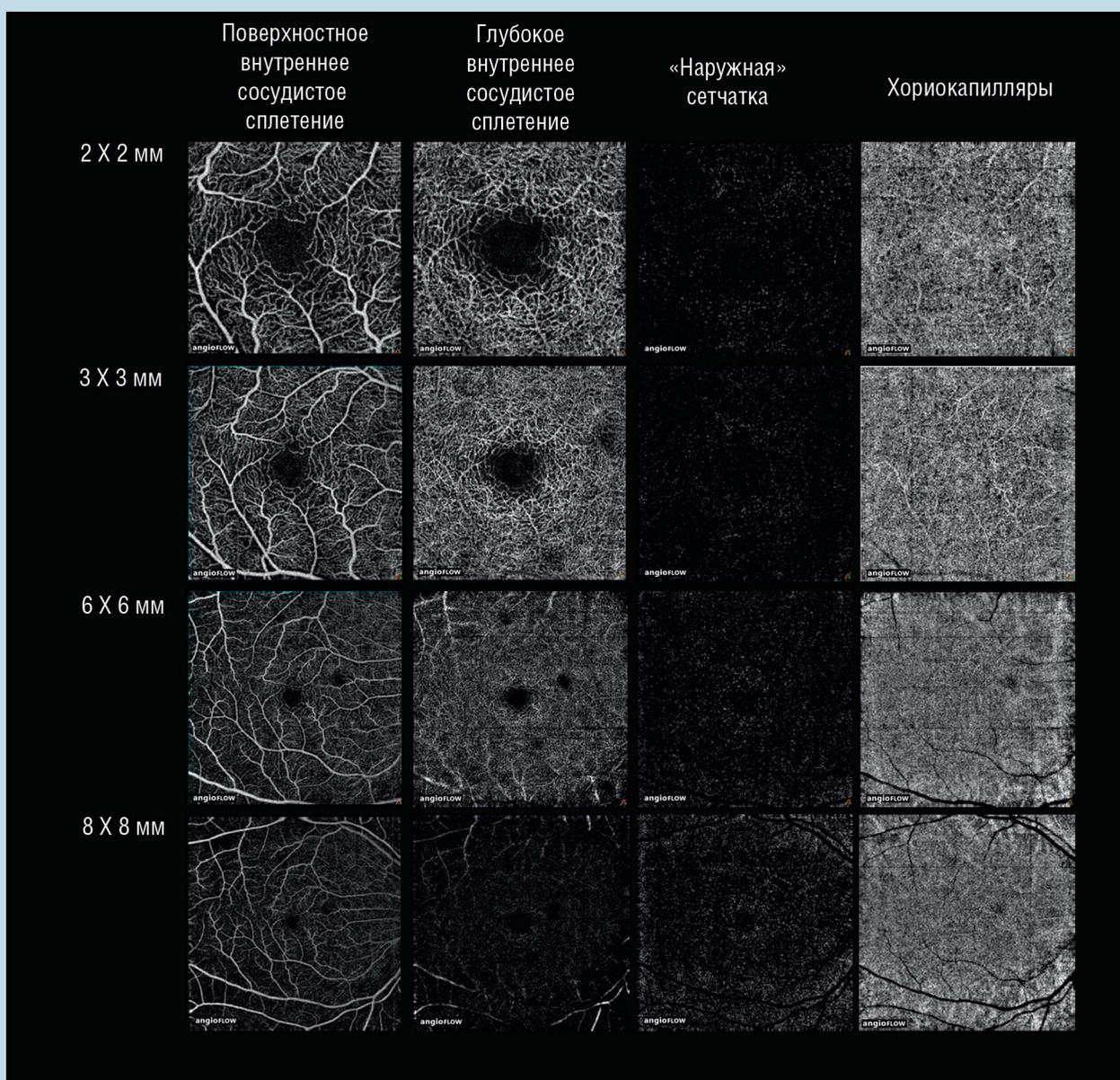
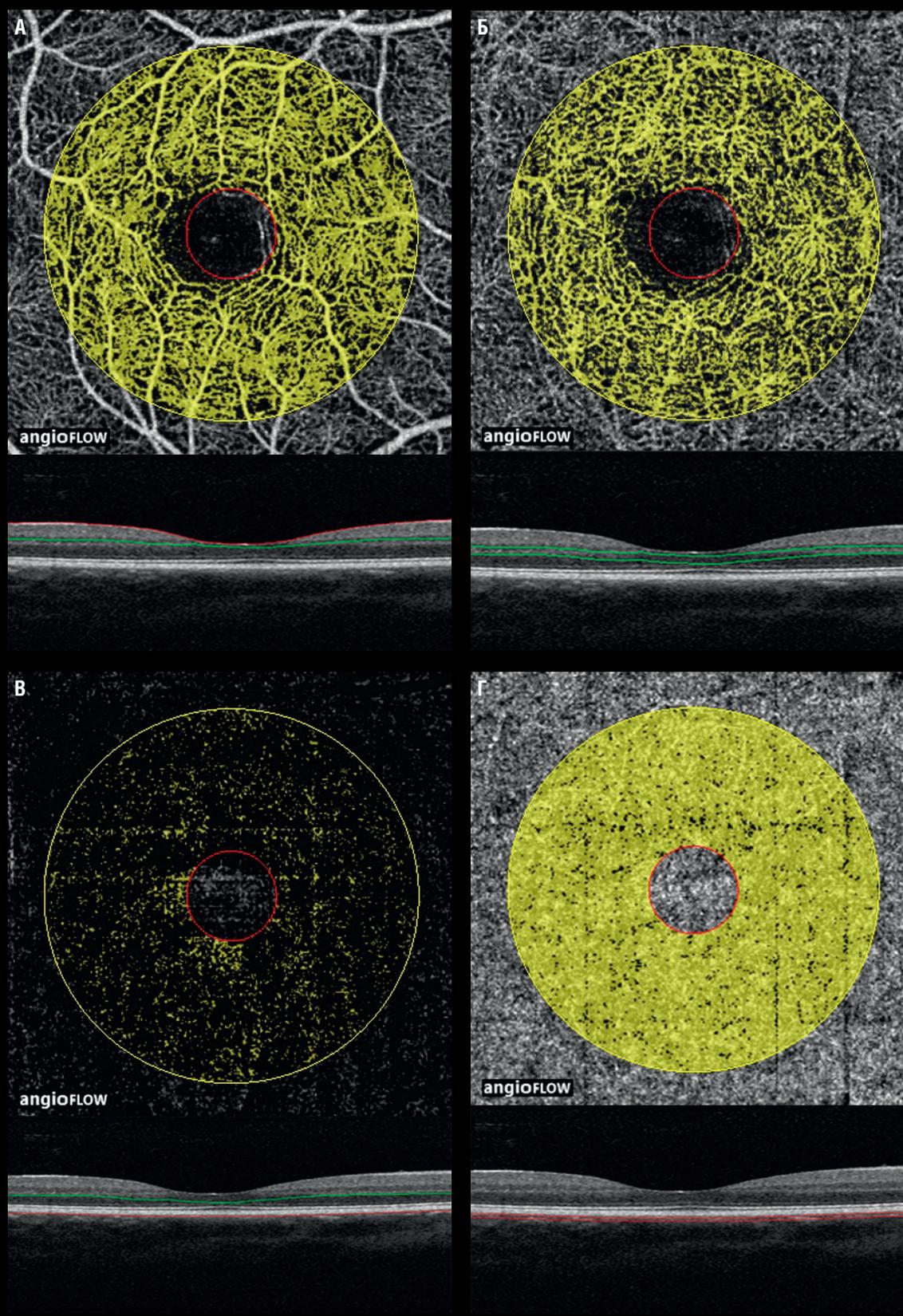


Рисунок 6. ОКТ-ангиография макулярной области на различных уровнях и с различной площадью сканирования (Optovue Avanti XR).



**Рисунок 7. Индекс кровотока перифовеальных сосудов макулярной зоны на разных уровнях (размер ОКТ-ангиограммы 3×3 мм).**

**А** — Поверхностное внутреннее сосудистое сплетение, индекс кровотока = 0,066.

**Б** — Глубокое внутреннее сосудистое сплетение, индекс кровотока = 0,047.

**В** — Наружные слои нейроэпителия, индекс кровотока = 0,008.

**Г** — Слой хориокапилляров, индекс кровотока = 0,112.

В норме сосудистый рисунок *поверхностной капиллярной сети* выглядит в виде белых линейных структур, ориентированных центростремительно к фовеальной ямке, вблизи которой они образуют перифовеолярную аркаду, ограничивающую фовеальную аваскулярную зону. Крупные ветви делятся на более и более мелкие веточки, образуя густую сеть. *Глубокая капиллярная сеть* состоит из более однородных по диаметру капилляров с большим количеством как горизонтальных, так и вертикальных анастомозов.

### Оптическая когерентная томография диска зрительного нерва

ОКТ в режиме сканирования диска зрительного нерва позволяет получать поперечные срезы диска зрительного нерва и оценивать его стереометрические параметры, а также измерять толщину слоя нервных волокон вокруг диска. На данный момент ОКТ является наиболее современным методом, предоставляющим исследователю максимально полную информацию о состоянии диска зрительного нерва и объединяющим в одном приборе функционал методов лазерной сканирующей томографии (HRT) и лазерной сканирующей поляриметрии (GDx).

Большинство современных ОКТ-систем предлагают пользователю автоматизированный алгоритм анализа диска зрительного нерва. Данный алгоритм, как правило, основывается на трехмерной реконструкции диска (рис. 8), измерении его стереоскопических параметров и сравнении полученных результатов с данными нормативной базы.

Ниже приводим наиболее распространенные параметры диска зрительного нерва, исследуемые при компьютерном анализе.

1. **Диаметр диска зрительного нерва** (рис. 9) — линия, соединяющая точки на границе пигментного эпителия и проходящая через центр экскавации. Измеряется в горизонтальном и вертикальном меридианах (рис. 11).
2. **Диаметр экскавации диска зрительного нерва** (рис. 10, А). На расстоянии 150 мкм по направлению к внутренней поверхности сетчатки параллельно диаметру ДЗН проводится дополнительная линия. Расстояние между точками пересечения данной линии с поверхностью экскавации ДЗН и соответствует диаметру экскавации. Также измеряется как в горизонтальном, так и вертикальном меридианах (рис. 11).

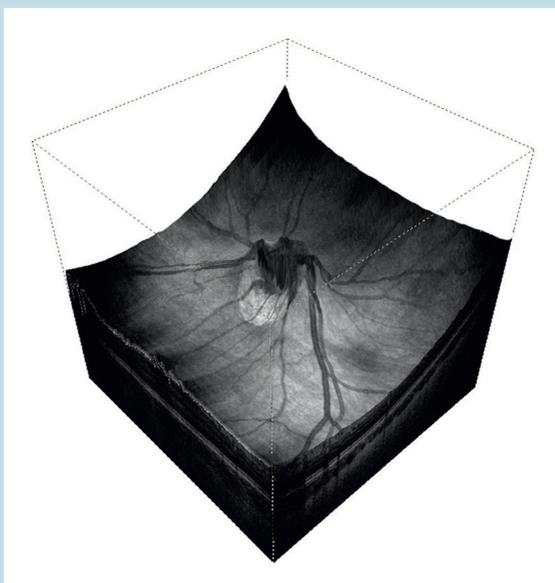


Рисунок 8. 3D-реконструкция диска зрительного нерва.

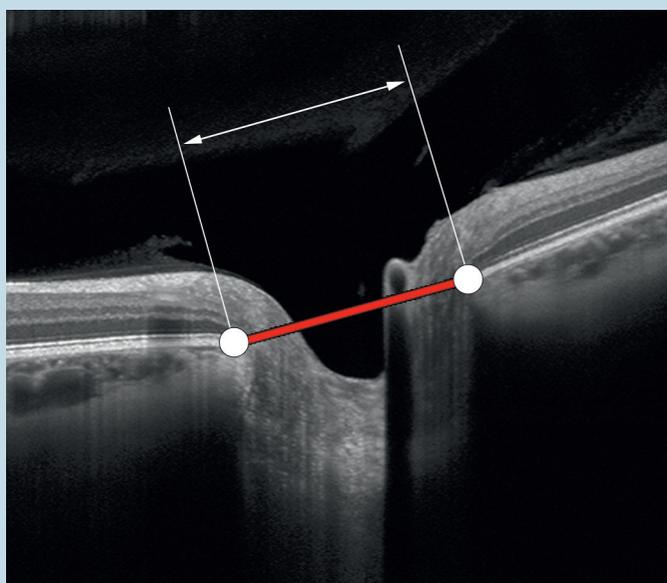


Рисунок 9. Диаметр диска зрительного нерва (выделен красным цветом).

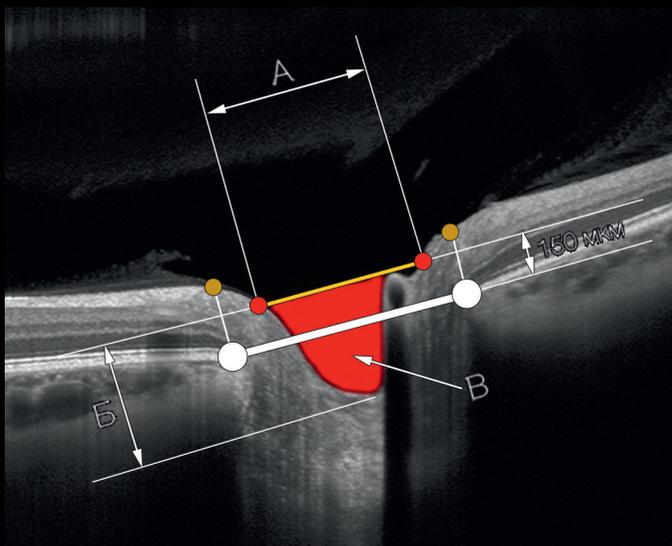


Рисунок 10. Границы экскавации диска зрительного нерва.

А — диаметр экскавации  
 Б — глубина экскавации  
 В — объем экскавации

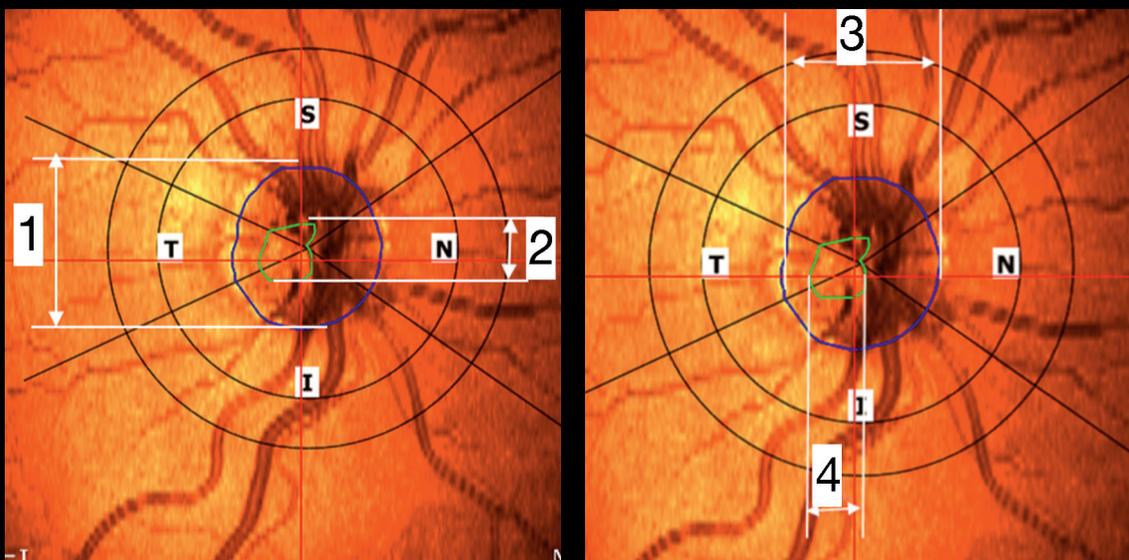


Рисунок 11. Горизонтальные и вертикальные диаметры диска зрительного нерва (1, 3) и экскавации (2, 4).

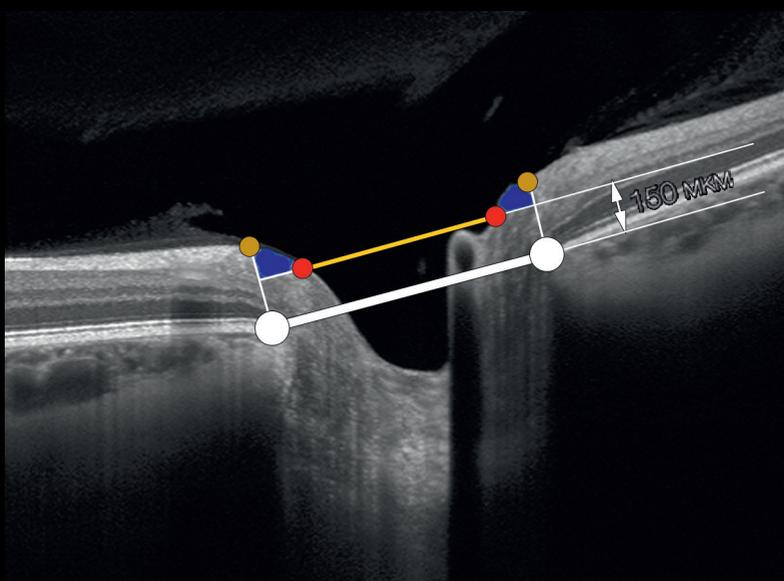


Рисунок 12. Границы нейро-ретинального пояса (выделены синим цветом), определяемые методом ОКТ.

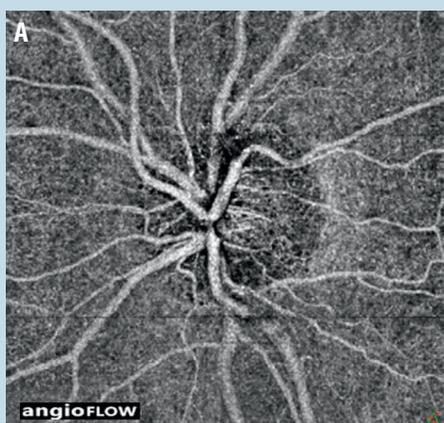
3. **Глубина, площадь и объем экскавации диска зрительного нерва** (рис. 10, Б, В) — рассчитываются с помощью специальных компьютерных алгоритмов на основании объемного анализа томограмм.
4. **Площадь и объем нейроретинального пояса** (рис. 12). Нейроретинальным пояском (НРП) называют ткань между внешним краем экскавации и внутренним краем ДЗН. По результатам компьютерного анализа обычно измеряются площадь и объем НРП.
5. **Анализ толщины перипапиллярного слоя нервных волокон вокруг диска зрительного нерва (анализ TSNIT).**

### ОКТ-ангиография диска зрительного нерва

ОКТА позволяет исследовать сосудистую сеть головки зрительного нерва от поверхностных ретинальных сосудов до решетчатой пластины. В программном обеспечении томографа Optovue Avanti XR заложена функция сегментации ОКТА-реконструкции ДЗН и перипапиллярной сетчатки на 3 слоя (рис. 13):

1. Поверхностная капиллярная сеть.
2. Капиллярная сеть слоя нервных волокон.
3. Хориокапилляры.

Возможности ОКТА для регистрации и количественной оценки перипапиллярного кровотока представлены на рис. 14.



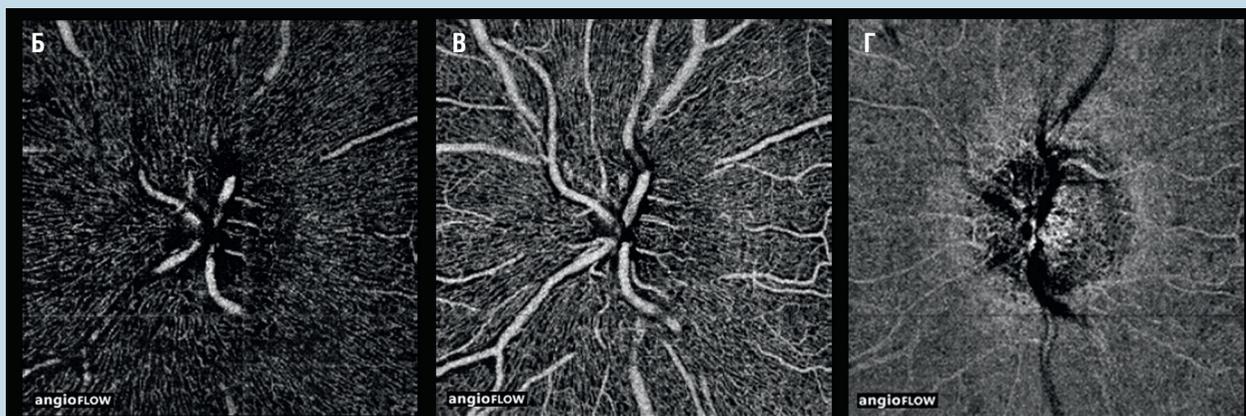
**Рисунок 13. Сосудистая сеть ДЗН здорового человека по данным ОКТА.**

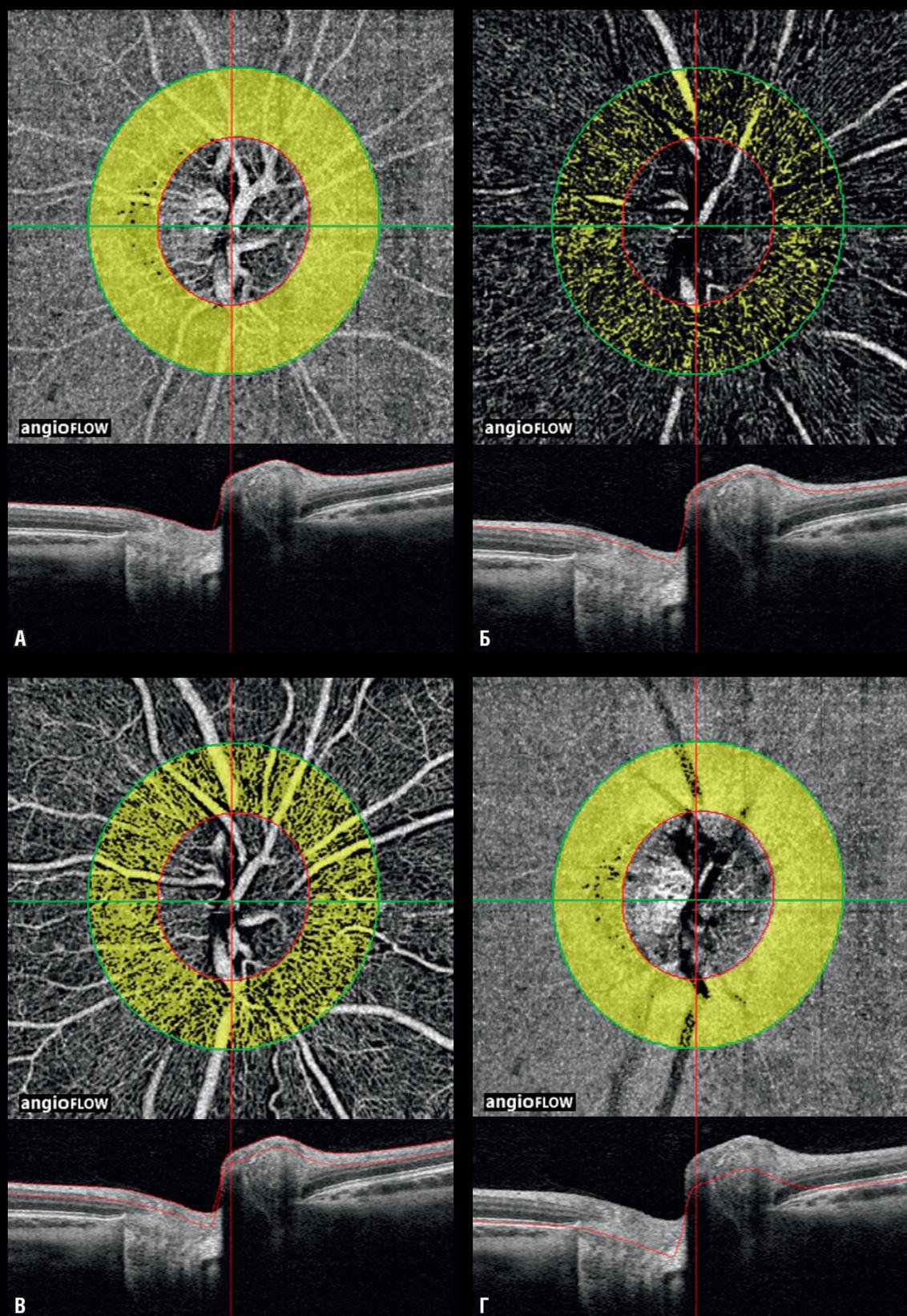
**А** — Полнослойная ОКТ-ангиограмма.

**Б** — ОКТ-ангиограмма на уровне поверхности сетчатки.

**В** — ОКТ-ангиограмма на уровне капиллярной сети слоя нервных волокон.

**Г** — ОКТ-ангиограмма на уровне хориокапилляров.





**Рисунок 14. Индекс кровотока перипапиллярных сосудов диска зрительного нерва на разных уровнях (размер ОКТ-ангиограммы 4,5×4,5 мм).**

**А** — Полнослойная ОКТ-ангиограмма, индекс кровотока = 0,167.

**Б** — Поверхностная капиллярная сеть, индекс кровотока = 0,023.

**В** — Капиллярная сеть слоя нервных волокон, индекс кровотока = 0,008.

**Г** — Слой хориокапилляров, индекс кровотока = 0,162.