

ОПТИЧЕСКАЯ КОГЕРЕНТНАЯ ТОМОГРАФИЯ: КАК ВСЕ НАЧИНАЛОСЬ И СОВРЕМЕННЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДИКИ

© Ю. С. Астахов, С. Г. Белехова

ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова Минздрава РФ, Санкт-Петербург

✧ **Оптическая когерентная томография** — современный метод обследования глазного дна. Томографы имеют высокую разрешающую способность и позволяют в режиме реального времени *in vivo* проводить детальное исследование структур сетчатки, зрительного нерва и хориоидеи. Постоянное совершенствование данной техники открывает большие перспективы и представляет не только научный, но и практический интерес.

✧ **Ключевые слова:** оптическая когерентная томография; сетчатка; зрительный нерв; хориоидея.

На протяжении более чем 100 лет исследование глазного дна было ограничено лишь обычным осмотром — офтальмоскопией, предложенной Г. Гельмгольцем в 1851 году. Однако данная методика, при своей широкой доступности, не всегда позволяла диагностировать начальные изменения в сетчатке и зрительном нерве и была несовершенна для наблюдения в динамике за патологическими изменениями. В связи с этим вторая половина XX века ознаменовалась поисками технологий и разработками приборов, позволяющих получать детальное изображение глазного дна, регистрировать и проводить анализ полученных изображений.

С тех пор, как в 1991 году группа исследователей из Массачусетского технологического института, возглавляемая Fujimoto J. G., впервые продемонстрировала возможность получения срезов сетчатки при помощи оптической когерентной томографии (ОКТ), эта технология прочно вошла в клиническую практику офтальмологов [16]. На сегодняшний день ОКТ имеет высокую разрешающую способность и позволяет в режиме реального времени *in vivo* бесконтактным способом получить томографические срезы сетчатки и зрительного нерва [16, 38].

Родоначальником оптической когерентной томографии в России является институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), где в середине 1990-х годов, благодаря достижениям в области волоконно-оптической широкополосной интерферометрии и фемтосекундной оптике, были созданы первые лабораторные ОКТ установки.

Работа оптического когерентного томографа построена на принципе световой интерферометрии. Интерференция света — пространственное перераспределение энергии светового излучения при наложении двух или нескольких световых волн [4]. Впервые это явление было описано И. Ньютоном

в 1675 году. В основе первых приборов ОКТ лежит интерферометр Майкельсона. В нем луч низкой когерентности от суперлюминесцентного диода разделяется на две части, одна проходит через структуры глаза, отражается от различных по глубине участков исследуемой ткани и является основой для построения изображения. Вторая часть попадает на подвижный опорный отражатель (зеркало), положение которого регулируется исследователем. Луч, отраженный от зеркала, служит своеобразной мерой, так как параметры его временной задержки известны. Явление интерференции возникает при равенстве длины луча, отраженного от исследуемой ткани, и луча от опорного зеркала. Параметры интерференции регистрируются и измеряются фотодетектором (рис. 1) [1, 2, 3, 35]. Временная задержка световой волны от конкретной исследуемой точки может быть различна в зависимости от отражающих способностей тканей той или иной области. Проведя измерение в одной точке, опорное зеркало перемещается и выполняется исследование следующей точки. Причем в каждой точке за одно измерение получается один А-скан. Затем одиночные А-сканы суммируются в результате чего формируется двухмерное изображение. Данный принцип положен в основу всех временных оптических когерентных томографов (time-domain OCT, TD-OCT).

Основным фактором, снижающим разрешающую способность и увеличивающим время сканирования прибора, является необходимость постоянного перемещения подвижного опорного отражателя.

Разработанная в 1994 году Массачусетским технологическим институтом технология ОКТ [15, 34] была впоследствии передана компании Humphrey Systems (в настоящее время Carl Zeiss Meditec Inc., Дублин, Калифорния), которая в 1996 года создала первый серийный оптический когерентный томограф,

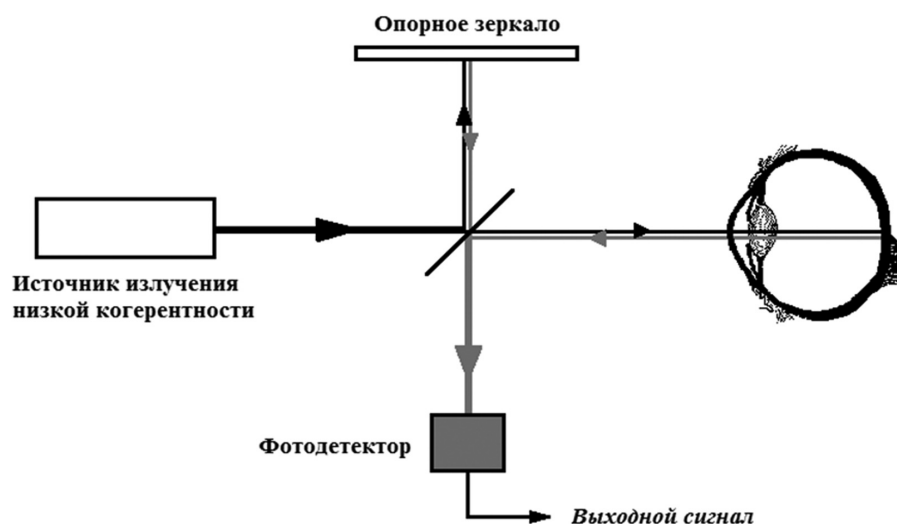


Рис. 1. Схематическое изображение устройства интерферометра Майкельсона

для применения в офтальмологии. Позднее «золотым стандартом» стала ОКТ на приборе Stratus OCT (Carl Zeiss Meditec). С 2002 года по 2006 год в мире было продано более 6000 экземпляров данного прибора [6]. На сегодняшний день это наиболее распространённая в клиниках модель временного оптического когерентного томографа. Максимальная продольная (аксиальная) разрешающая способность последней модификации Stratus OCT составляет 10 мкм при скорости сканирования 400 А-сканов в секунду.

Между тем, в последние годы в связи с появлением спектрального интерферометра произошли радикальные перемены в технологии оптической когерентной томографии. В спектральном интер-

ферометре используется широкополосный суперлюминесцентный диод, имеющий в своем луче одновременно несколько длин волн. Также, как и во временном томографе, луч низкой когерентности делится на два равных пучка света, один отражается от исследуемой ткани, другой от опорного зеркала. Отражённые пучки света складываются и регистрируются спектрометром. Однако, в отличие от интерферометра Майкельсона, проинтерферировавший луч раскладывается на спектральные составляющие, фиксируемые высокоскоростной CCD-камерой (CCD-charged-coupled device). С помощью математического преобразования Фурье происходит обработка полученного спектра интерференции и формирование линейного А-скана (рис. 2) [1, 3, 35].

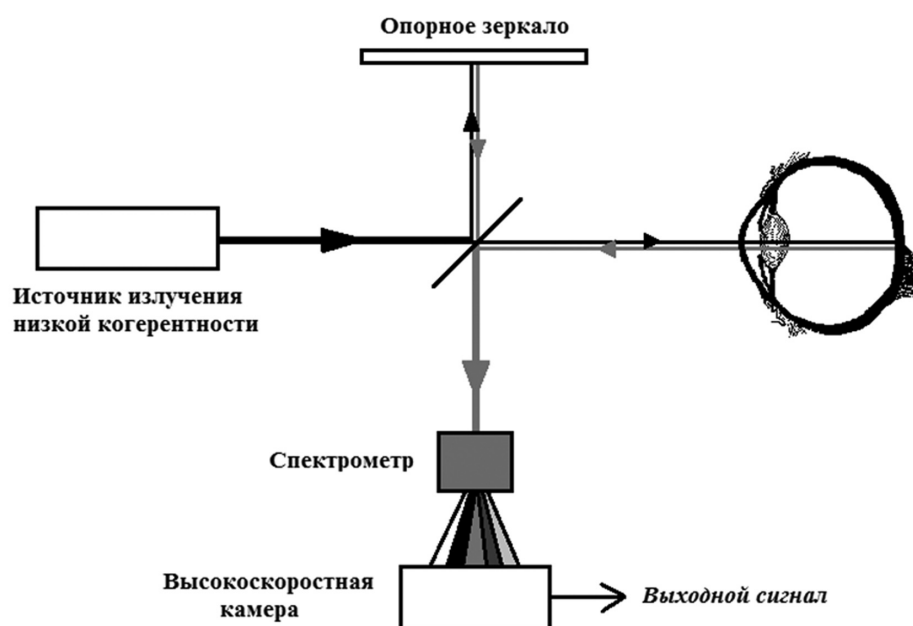


Рис. 2. Схема строения спектрального интерферометра

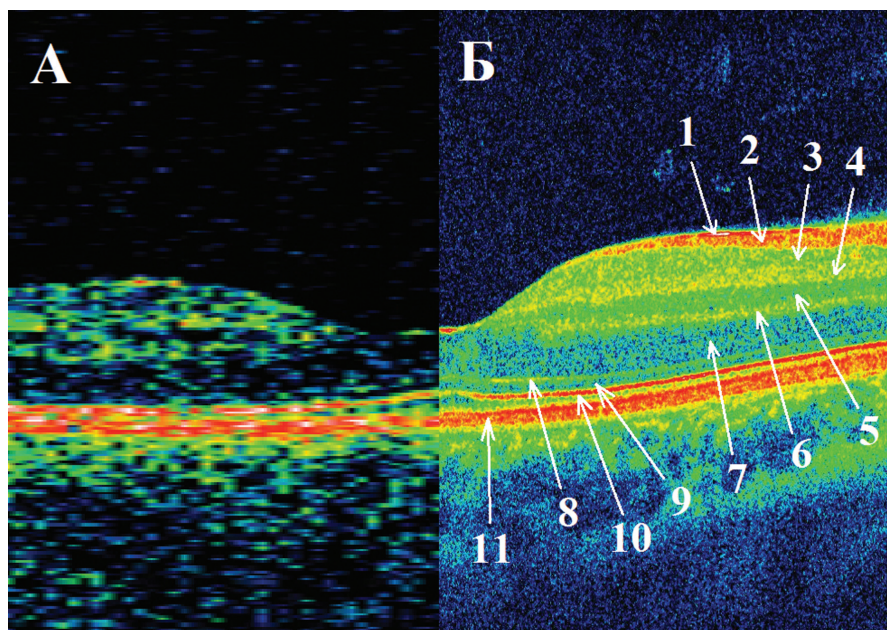


Рис. 3. Линейный скан макулярной области сетчатки в норме на временном оптическом когерентном томографе Stratus OCT (Carl Zeiss, США) (А) и спектральном томографе Cirrus HD-OCT 4000 (Carl Zeiss, США) (Б). Большая разрешающая способность спектрального томографа позволяет дифференцировать на скане все слои сетчатки: 1 — внутренняя пограничная мембрана; 2 — слой нервных волокон; 3 — слой ганглиозных клеток; 4 — внутренний плексиформный слой; 5 — внутренний ядерный слой; 6 — наружный плексиформный слой; 7 — наружный ядерный слой; 8 — наружная пограничная мембрана; 9 — внутренние сегменты фоторецепторов; 10 — наружные сегменты фоторецепторов; 11 — пигментный эпителий сетчатки

Таким образом, линейный А-скан, полученный на спектральном оптическом когерентном томографе формируется путём одномоментного измерения, отражённых лучей от каждой отдельной точки, а не вследствие последовательного суммирования А-сканов, как на временном когерентном томографе.

Спектральная интерферометрия легла в основу работы нового поколения томографов (spectral/Fourier-domain OCT, SD-OCT). В томографе данного типа опорное зеркало в ходе всего исследования остается неподвижным. Благодаря всем выше описанным модификациям прибора, удалось добиться увеличения его разрешающей способности, а также уменьшения времени сканирования. Скорость сканирования в спектральном томографе зависит от быстроты работы CCD-камеры, а аксиальная разрешающая способность — от чувствительности спектрометра. Таким образом, аксиальная разрешающая способность достигает в некоторых приборах 3 мкм, а скорость сканирования более 20 000 А-сканов в секунду. Вот почему качество изображения в них существенно выше, чем в томографах предыдущего поколения (рис. 3).

Первый спектральный оптический когерентный томограф был разработан в 2006 году, им стал RTVue 100 (Optovue, США). В 2012 году компания Carl Zeiss Meditec (Дублин, Калифорния, США) заявила о продаже 10 000 прибора CirrusHD-OCT, который является одним из самых распространённых

приборов данного типа в офтальмологических клиниках мира [8].

Благодаря постоянному совершенствованию оптических когерентных томографов, стало возможно детальное изучение анатомии исследуемой области сетчатки с выявлением мельчайших изменений в ее структуре, которые зачастую лежат вне пределов разрешения других методов исследования и даже могут быть невидны при офтальмоскопии. Это существенно расширяет возможности диагностики патологических изменений макулярной области сетчатки и зрительного нерва. Кроме того, некоторые приборы также позволяют проводить исследование переднего отрезка глаза [19].

На томограмме слои сетчатки дифференцируются согласно их светоотражающей способности и на итоговом изображении окрашиваются с использованием стандартной цветовой шкалы (рис. 3). Хорошо отражающие свет структуры окрашиваются в красные и белые цвета, слабоотражающие — в черный цвет. Толщина сетчатки измеряется путём определения расстояния от витреоретинального интерфейса до пигментного эпителия сетчатки (ПЭС). Важным моментом является то, что в одних томографах компьютерная программа проводит измерение толщины сетчатки до внутренней границы ПЭС, в других — до наружной границы. Вот почему, показатели толщины сетчатки могут варьироваться, что затрудняет сравнение данных, полученных на различных приборах.

Для получения томографического изображения диска зрительного нерва (ДЗН) используется продольное и циркулярное линейное сканирование. Оптическая когерентная томография позволяет оценить диаметр диска, размеры и глубину экскавации, соотношение экскавации и диска по площади, горизонтальному и вертикальному меридианам, толщину слоя нервных волокон в перипапиллярной зоне. Измерение толщины слоя нервных волокон проводят по результатам сканирования перипапиллярной зоны диаметром 3,4 мм концентрично окружности ДЗН. Полученные данные сравниваются с нормативной базой. На руки пациенту выдается итоговый протокол исследования.

Современные оптические когерентные томографы производятся в США, Германии и Японии, Польше и России. В России к наиболее распространённым на сегодняшний день моделям относятся: Stratus OCT (Carl Zeiss Meditec, США), Cirrus HD-OCT (Carl Zeiss Meditec, США), RTVue 100 (Optovue, США), Topcon 3D OCT 1000 (Topcon, Япония), Spectralis HRA + OCT (Heidelberg Engineering, Германия), Copernicus HR (Optopol, Польша). В России в г. Красногорске производится трехмерный оптический когерентный томограф (ОФ 3). Данные модели обладают различными параметрами, протоколами сканирования и программным обеспечением для обработки полученных данных. Очевидно, что встает вопрос о диагностических возможностях, преимуществах и недостатках данных приборов, воспроизводимости результатов. Актуальной проблемой остается возможность сопоставления данных, полученных на различных типах оптических когерентных томографов. С появлением нового поколения томографов в мире насчитывается уже более сотни исследований по сравнению полученных на них результатов [11, 23, 41]. Основные технические характеристики некоторых современных ОКТ представлены в таблице 1.

Следует помнить, что на качество итогового изображения в значительной степени влияют погрешности, вызванные микродвижениями глазного яблока [28]. Стандартное исследование макулярной области (512 А-сканов) на временном оптическом когерентном томографе длится более 1 секунды. За это время глаз совершает примерно 10 произвольных колебательных движений. В современных спектральных ОКТ, благодаря увеличению скорости сканирования (1024 А-скана выполняются в среднем за 0,05 секунды), влияния микродвижений глаза на качество конечной томограммы значительно уменьшилось (рис. 3). Кроме того, некоторые приборы (Spectralis OCT (TruTrack™); Cirrus HD-OCT (FastTrac™); RTVue 100) обладают функцией «Eye tracking», которая позволяет практически полностью ликвидировать артефакты, связанные с произвольными колебательными движениями глазного яблока в ходе исследования [10, 40]. Наряду с этим, технология «Eye tracking» запоминает область сканирования и автоматически выполняет позиционирование скана в том же самом месте при повторных визитах (рис. 4). Это позволяет улучшить качество наблюдения за патологически изменённой областью в динамике.

Помимо возросшей в несколько раз разрешающей способности в спектральных ОКТ появилась возможность трехмерной визуализации микроструктуры сетчатки и зрительного нерва (рис. 5). Полученное 3D-изображение позволяет оценить профиль поверхности изучаемой структуры, её внутреннюю топографию. Более того, некоторые приборы обладают специфическими протоколами сканирования. Так, например, в томографе RTVue-100 (Optovue) есть протокол анализа комплекса ганглиозных клеток сетчатки (GCC), который высокоинформативен при ранней диагностике глаукомной оптической нейропатии, рассеянного склероза и других нейродегенеративных заболеваний [13, 21, 39].

Таблица 1

Сравнительные характеристики оптических когерентных томографов

Параметр сравнения	Тип томографа	Аксиальное разрешение	Скорость сканирования	Дополнительные возможности прибора
Stratus OCT	временной (time domain)	10 мкм	400 А-сканов/сек	Модуль для исследования переднего отрезка глазного яблока
Cirrus HD-OCT	спектральный (spectral)	5 мкм	27 000 А-сканов/сек	—
RTVue 100	спектральный	5 мкм	26 000 А-сканов/сек	Модуль для исследования переднего отрезка глазного яблока
Topcon 3D OCT 1000	спектральный	6 мкм	20 000 А-сканов/сек	Немидриатическая фундус камера
Spectralis HRA + OCT	спектральный	7 мкм	40 000 А-сканов/сек	Лазерный сканирующий ангиограф HRA, позволяющий выполнить флюоресцентную ангиографии и ангиографии с индоцианином зеленым
Copernicus HR	спектральный	6 мкм	25 000 А-сканов/сек	Модуль анализа пигментного эпителия

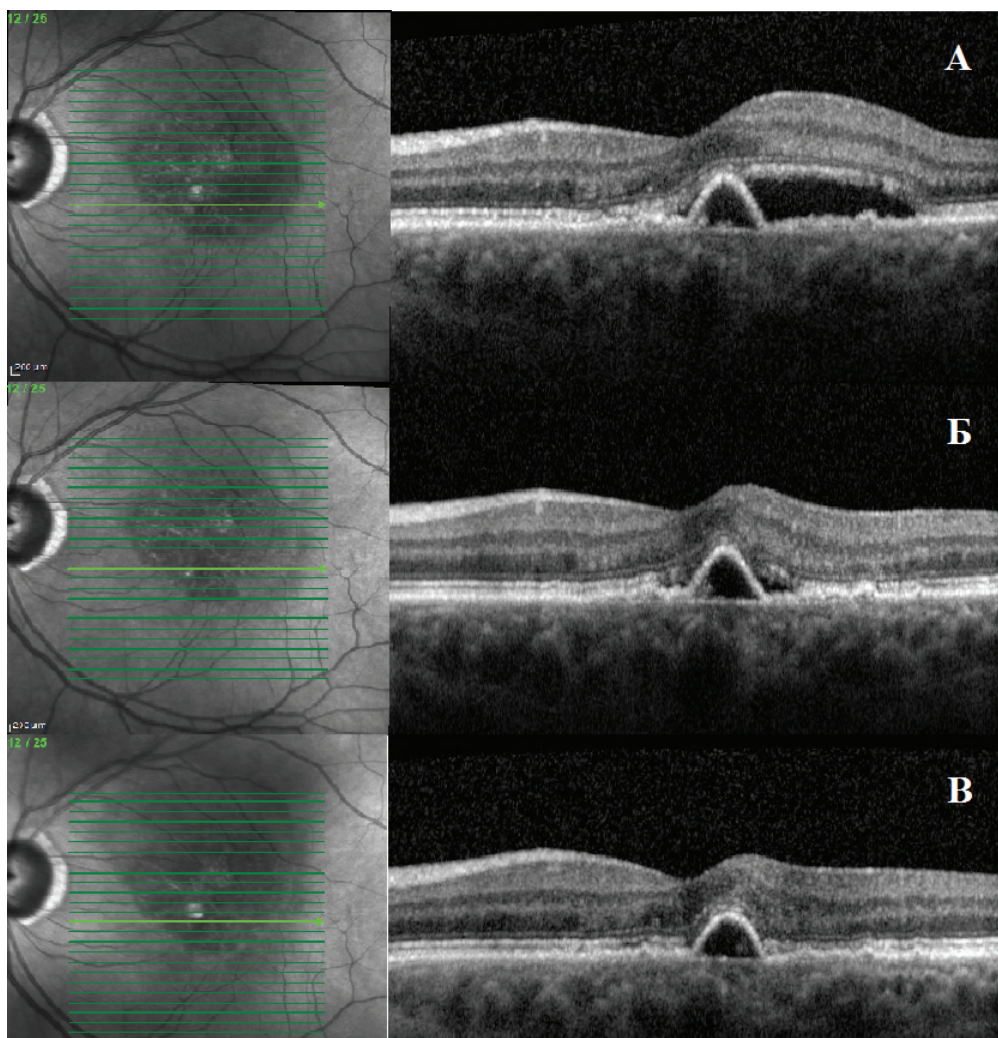


Рис. 4. Данные ОКТ у пациентки с «влажной» формой возрастной макулярной дегенерации до лечения (А) и на фоне анти-VEGF терапии (Б — через 5 недель, В — через 10 недель). На фоне лечения наблюдается уменьшение отслойки нейроэпителия сетчатки. При повторных наблюдениях томографические сканы выполнялись в том же самом месте, что и при первом обследовании, благодаря наличию функции «Eye tracking» на приборе Spectralis ОСТ

Важным аспектом работы оптических когерентных томографов является использование в их основе инфракрасного луча со средней длиной волны 830 нм, что позволяет получить послойные срезы сетчатки, количественно оценить её толщину, а также разме-

ры и протяженность патологических её изменений, но из-за экранирующего эффекта комплекса «пигментный эпителий сетчатки — мембрана Бруха — хориокапилляры» нет возможности визуализации хориоидеи [14].

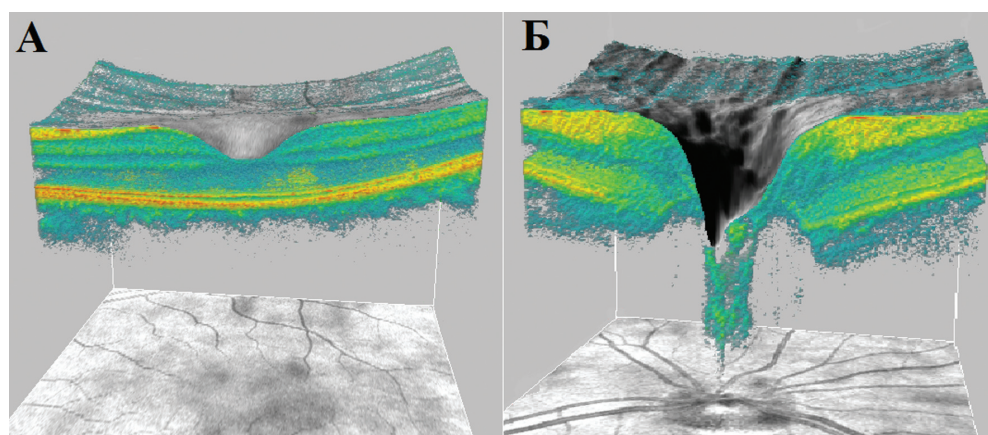


Рис. 5. Трехмерное изображение макулярной области сетчатки (А) и зрительного нерва (Б), полученное в результате обработки более тысячи единичных линейных А-сканов на приборе Cirrus HD-OCT 4000

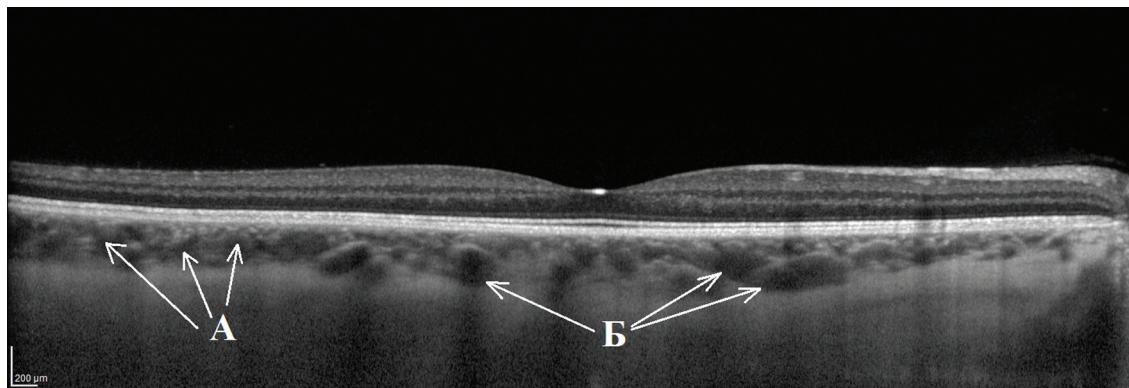


Рис. 6. Оптическая когерентная томография в режиме улучшенной глубины изображения (EDI-OCT) на томографе Spectralis OCT (Heidelberg Engineering, Германия). Хориоидальные сосуды на томограмме гипорефлективны и различимы в виде двух слоев: средних сосудов Саттлера (А) и крупных сосудов Галлера (Б)

В 2008 году Spaide R.F. и соавт. описали разработанную ими технологию улучшенной глубины изображения (Enhanced Depth Imaging, EDI-OCT) для спектрального оптического когерентного томографа Spectralis OCT (Heidelberg Engineering, Германия) [37]. Благодаря увеличению длины волны светового луча до 1060 нм, повысилась его проникающая способность и появилась возможность не только визуализировать собственно сосудистую оболочку, но и проводить количественную оценку её толщины (рис. 6) [32, 33]. В настоящее время данная технология есть в двух спектральных оптических когерентных томографах: Spectralis OCT (Heidelberg Engineering) и Cirrus HD-OCT (Carl Zeiss Meditec).

На протяжении последних лет в мире проводятся десятки исследований с целью выявления изменений толщины хориоидеи в норме и при различных заболеваниях. Так, Margolis R. и ряд других авторов установили отрицательную зависимость толщины хориоидеи от возраста пациентов [17, 26, 27]. Исследование Fujiwara T. и соавт. показало, что при миопии высокой степени наблюдается истончение хориоидеи [12].

Данные о толщине собственно сосудистой оболочки у пациентов с возрастной макулярной дегенерацией (ВМД) весьма противоречивы [20, 25, 30, 36]. В работе McCourt E.A. и соавт. было отмечено уменьшение толщины хориоидеи у пациентов с ВМД по сравнению с группой контроля [30]. Однако, Jonas J. B. и соавт. значимых различий в толщине сосудистой оболочки в группах с «сухой», «влажной» формами ВМД и контрольной группой без патологии не выявили [20].

Ряд исследований показал, что при центральной серозной хориоретинопатии происходит увеличение толщины хориоидеи [18, 24, 29], аналогичные изменения выявлены и у пациентов с полипозной хорио-

идальной васкулопатией [7, 22, 42]. В своих работах Ayton L. N. и Dhoot D. S. обнаружили, что при наличии пигментного ретинита происходит значительное истончение хориоидеи [5, 9].

Появление технологии улучшенной глубины изображения позволило визуализировать решетчатую пластинку диска зрительного нерва, производить измерение её толщины и оценивать структурные изменения. Недавние исследования показали, что эта методика позволяет выявлять изменения в ДЗН на более ранних стадиях у пациентов с первичной открытоугольной глаукомой (ПОУГ), проводить дифференциальную диагностику между ПОУГ и глаукомой псевдонормального давления [31]. В своей работе You J. Y. и Park S. Ch. с соавт. обнаружили взаимосвязь между появлением локальных дефектов в решетчатой пластинке и истончением перипапиллярного слоя нервных волокон сетчатки у пациентов с ПОУГ [43].

Так или иначе все эти исследования являются пилотными и проведены на небольшом количестве пациентов. Дальнейшие исследования в этой области возможно прольют свет на патогенез развития многих заболеваний заднего отрезка глаза.

В заключении можно сказать, что современная оптическая когерентная томография, несомненно, является «золотым стандартом» в исследовании глазного дна, имеет огромные диагностические возможности и перспективы развития, что в будущем позволит выявлять заболевания на ранних (субклинических) стадиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев В. Н., Гуров И. П. Сравнительный анализ методов оптической когерентной томографии. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007; N 7: 30–40.
2. Гуров И. П., Козлов С. А. ред. Проблемы когерентной и нелинейной оптики. СПбГУ ИТМО. СПб.; 2004.

3. Кальянов А. Л., Лычагов В. В., Лякин Д. В., Перепелицына О. А., Рябухо В. П. Оптическая низкокогерентная интерферометрия и томография. Специальный оптический практикум. 2009; 86.
4. Ландсберг Г. С. Оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2003.
5. Ayton L. N., Guymer R. H., Luu C. D. Choroidal thickness profiles in retinitis pigmentosa. *Clin. Experiment Ophthalmol.* 2013; 41 (4): 396–403.
6. Carl Zeiss Meditec Announces Installation of 6000th Stratus OCT. Carl Zeiss Meditec, Inc. Dublin, CA. 2006.
7. Chung S. E., Kang S. E., Lee J. H., Kim Y. T. Choroidal thickness in polypoidal choroidal vasculopathy and exudative age-related macular degeneration. *Ophthalmology.* 2011; 118 (5): 840–5.
8. Cirrus Hd-Oct Record Number of 10000 Installations and Prestigious Award for Oct Inventors. Carl Zeiss Meditec, Inc., Dublin, CA; 2012.
9. Dhoot D. S., Huo S., Yuan A., Xu D., Srivastava S., Ehlers J. P. et al. Evaluation of choroidal thickness in retinitis pigmentosa using enhanced depth imaging optical coherence tomography. *Br. J. Ophthalmol.* 2012; 97: 66–9.
10. Ferguson R. D., Hammer D. X., Paunescu L. A., Beaton S., Schuman J. S. Tracking optical coherence tomography. *Opt. Lett.* 2004; 29 (18): 2139–41.
11. Forte R., Cennamo G. L., Finelli M. L., Crecchio G. Comparison of Time Domain Stratus OCT and Spectral Domain SLO/OCT for Assessment of Macular Thickness and Volume. *Eye.* 2009; 23 (11): 2071–8.
12. Fujiwara T., Imamura Y., Margolis R., Slakter J. S. et al. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in highly myopic eyes. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 148 (3): 445–50.
13. Garas A., Vargha P., Hollo G. Diagnostic accuracy of nerve fibre layer, macular thickness and optic disc measurements made with the RTVue-100 optical coherence tomograph to detect glaucoma. *Eye.* 2011; 25: 57–65.
14. Geitzenauer W., Hitzenger C. K., Schmidt-Erfurth U. M. Retinal optical coherence tomography: past, present and future perspectives. *Br. J. Ophthalmol.* 2011; 95 (2): 171–7.
15. Hee M. R., Izatt J. A., Swanson E. A., Huang D., Schuman J. S., Lin C. P., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Optical coherence tomography of the human retina. *Arch. Ophthalmol.* 1995; 113: 325–32.
16. Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W., Hee M. R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Optical coherence tomography. *Science.* 1991; 254: 1178–81.
17. Ikuno Y., Kawaguchi K., Yasuno Y., Nouchi T. Choroidal Thickness in Healthy Japanese Subjects. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2010; 51 (4): 2173–6.
18. Imamura Y., Fujiwara T., Margolis R., Spaide R. F. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in central serous chorioretinopathy. *Retina.* 2009; 28: 1469–73.
19. Izatt J. A., Hee M. R., Swanson E. A., Lin C. P., Huang D., Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye in vivo with optical coherence tomography. *Arch. Ophthalmol.* 1994; 11: 1584–9.
20. Jonas J. B., Forster T. M., Steinmetz P., Schlichtenbrede F. C., Harder B. C. Choroidal thickness in age-related macular degeneration. *Retina.* 2014; 34(6): 1149–55.
21. Khanifar A. A., Parlitsis G. J., Ehrlich J. R. et al. Retinal nerve fiber layer evaluation in multiple sclerosis with spectral domain optical coherence tomography. *Clinical Ophthalmology.* 2010; 4: 1007–1013.
22. Kim S. W., Oh J., Kwon S. S., Yoo J., Huh K. Comparison of choroidal thickness among patients with healthy eyes, early age-related maculopathy, neovascular age-related macular degeneration, central serous chorioretinopathy, and polypoidal choroidal vasculopathy. *Retina.* 2011; 31: 1904–1911.
23. Leung C. K., Cheung C. Y., Weinreb R. N., Lee G. et al. Comparison of Macular Thickness Measurements between Time Domain and Spectral Domain Optical Coherence Tomography. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2008; 49 (11): 4893–7.
24. Manjunath V., Fujimoto J. G., Duker J. S. Cirrus HD-OCT high definition imaging is another tool available for visualization of the choroid and provides agreement with the finding that the choroidal thickness is increased in central serous chorioretinopathy in comparison to normal eyes. *Retina.* 2010; 30 (8): 1320–1.
25. Manjunath V., Goren J., Fujimoto J. G., Duker J. S. Analysis of choroidal thickness in age-related macular degeneration using spectral-domain optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2011; 152: 663–8.
26. Manjunath V., Taha M., Fujimoto J. G., Duker J. S. Choroidal thickness in normal eyes measured using Cirrus HD optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2010; 150 (3): 325–31.
27. Margolis R., Spaide R. F. A pilot study of enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in normal eyes. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 147 (5): 811–5.
28. Martinez-Conde S., Macknik S. L., Hubel D. H. The role of fixational eye movements in visual perception. *Nat. Rev. Neurosci.* 2004; 5 (3): 229–40.
29. Maruko I., Iida T., Sugano Y., Ojima A., Ogasawara M., Spaide R. F. Subfoveal choroidal thickness after treatment of central serous chorioretinopathy. *Ophthalmology.* 2010; 117 (9): 1792–9.
30. McCourt E. A., Cadena B. C., Barnett C. J., Ciardella A. P. et al. Measurement of subfoveal choroidal thickness using spectral domain optical coherence tomography. *Ophthalmic Surg. Lasers Imaging.* 2010; 41: 28–33.
31. Park H. Y., Park C. K. Diagnostic capability of lamina cribrosa thickness by enhanced depth imaging and factors affecting thickness in patients with glaucoma. *Ophthalmology.* 2013; 120 (4): 745–52.
32. Povazay B., Bizheva K., Hermann B. et al. Enhanced visualization of choroidal vessels using ultrahigh resolution ophthalmic OCT at 1050 nm. *Opt. Express.* 2003; 11 (17): 1980–1986.
33. Povazay B., Hermann B., Unterhuber A. et al. Three-dimensional optical coherence tomography at 1050 nm versus 800 nm in retinal pathologies: enhanced performance and choroidal penetration in cataract patients. *J. Biomed Opt.* 2007; 12 (4).
34. Puliafito C. A., Hee M. R., Lin C. P. et al. Imaging of macular diseases with optical coherence tomography. *Ophthalmology.* 1995; 102: 217–29.
35. Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. et al. Optical Coherence Tomography of Ocular Diseases 2nd ed. Thorofare, NJ: SLACK, Inc. 2004.

36. Spaide R. F. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of retinal pigment epithelial detachment in age-related macular degeneration. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 147 (4): 644–52.
37. Spaide R. F., Koizumi H., Pozzoni M. C. Enhanced depth imaging spectral-domain optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2008; 146 (4): 496–500.
38. Swanson E. A., Izatt J. A., Hee M. R., Huang D., Lin C. P., Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography. *Optics Letters.* 1993; 18(21): 1864–6.
39. Tan O., Chopra V., Tzu-Hui A. L. Detection of Macular Ganglion Cell Loss in Glaucoma by Fourier-Domain Optical Coherence Tomography. *Ophthalmology.* 2009; 116: 2305–14.
40. Vienola K. V., Braaf B., Sheehy C. K., Yang Q. et al. Real-time eye motion compensation for OCT imaging with tracking SLO. *Biomed Opt Express.* 2012; 3 (11): 2950–63.
41. Vizzeri G., Weinreb R. N., Gonzalez-Garcia A. O., Bowd C. et al. Agreement between spectral-domain and time-domain OCT for measuring RNFL thickness. *Br. J. Ophthalmol.* 2009; 93: 775–8.
42. Yannuzzi L. A., Freund K. B., Goldbaum M., Scassellati-Sforzolini B., Guyer D. R., Spaide R. F. et al. Polypoidal choroidal vasculopathy masquerading as central serous chorioretinopathy. *Ophthalmology.* 2000; 107: 767–77.
43. You J. Y., Park S. C., Su D., Teng C. C., Liebmann J. M., Ritch R. Focal lamina cribrosa defects associated with glaucomatous rim thinning and acquired pits. *JAMA Ophthalmol.* 2013; 131 (3): 314–20.
44. Kal'yanov A. L., Lychagov V. V., Lyakin D. V., Perepelitsyna O. A., Ryabukho V. P. Opticheskaya nizkokogerentnaya interferometriya i tomografiya. [Optical low-coherence interferometry and tomography] Spetsial'nyy opticheskiy praktikum. 2009; 86. (in Russian)
45. Landsberg G. S. Optika. [Optics] M.: FIZMATLIT; 2003. (in Russian)
46. Ayton L. N., Guymer R. H., Luu C. D. Choroidal thickness profiles in retinitis pigmentosa. *Clin. Experiment Ophthalmol.* 2013; 41 (4): 396–403.
47. Carl Zeiss Meditec Announces Installation of 6000th Stratus OCT. Carl Zeiss Meditec, Inc. Dublin, CA. 2006.
48. Chung S. E., Kang S. E., Lee J. H., Kim Y. T. Choroidal thickness in polypoidal choroidal vasculopathy and exudative age-related macular degeneration. *Ophthalmology.* 2011; 118 (5): 840–5.
49. Cirrus Hd-Oct Record Number of 10000 Installations and Prestigious Award for Oct Inventors. Carl Zeiss Meditec, Inc., Dublin, CA; 2012.
50. Dhoot D. S., Huo S., Yuan A., Xu D., Srivistava S., Ehlers J. P. et al. Evaluation of choroidal thickness in retinitis pigmentosa using enhanced depth imaging optical coherence tomography. *Br. J. Ophthalmol.* 2012; 97: 66–9.
51. Ferguson R. D., Hammer D. X., Paunescu L. A., Beaton S., Schuman J. S. Tracking optical coherence tomography. *Opt. Lett.* 2004; 29 (18): 2139–41.
52. Forte R., Cennamo G. L., Finelli M. L., Crecchio G. Comparison of Time Domain Stratus OCT and Spectral Domain SLO/OCT for Assessment of Macular Thickness and Volume. *Eye.* 2009; 23 (11): 2071–8.
53. Fujiwara T., Imamura Y., Margolis R., Slakter J. S. et al. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in highly myopic eyes. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 148 (3): 445–50.
54. Garas A., Vargha P., Hollo G. Diagnostic accuracy of nerve fibre layer, macular thickness and optic disc measurements made with the RTVue-100 optical coherence tomograph to detect glaucoma. *Eye.* 2011; 25: 57–65.
55. Geitzenauer W., Hitzenberger C. K., Schmidt-Erfurth U. M. Retinal optical coherence tomography: past, present and future perspectives. *Br. J. Ophthalmol.* 2011; 95 (2): 171–7.
56. Hee M. R., Izatt J. A., Swanson E. A., Huang D., Schuman J. S., Lin C. P., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Optical coherence tomography of the human retina. *Arch. Ophthalmol.* 1995; 113: 325–32.
57. Huang D., Swanson E. A., Lin C. P., Schuman J. S., Stinson W. G., Chang W., Hee M. R., Flotte T., Gregory K., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Optical coherence tomography. *Science.* 1991; 254: 1178–81.
58. Ikuno Y., Kawaguchi K., Yasuno Y., Nouchi T. Choroidal Thickness in Healthy Japanese Subjects. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2010; 51 (4): 2173–6.
59. Imamura Y., Fujiwara T., Margolis R., Spaide R. F. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in central serous chorioretinopathy. *Retina.* 2009; 28: 1469–73.
60. Izatt J. A., Hee M. R., Swanson E. A., Lin C. P., Huang D., Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. Micrometer-scale resolution imaging of the anterior eye in vivo with optical coherence tomography. *Arch. Ophthalmol.* 1994; 11: 1584–9.

OPTICAL COHERENCE TOMOGRAPHY: HOW IT ALL BEGAN, AND PRESENT-TIME DIAGNOSTIC CAPABILITIES OF THE METHOD

Astakhov Yu. S., Belekova S. G.

✧ **Summary.** The optical coherence tomography is a modern method to assist the ophthalmologist examine the eye fundus. Tomographs have a very high resolution and give the ophthalmologist a in real-time mode in vivo a detailed examination of retinal, optic nerve and choroidal structures. A continual improvement of this technique offers great opportunities and is not only of scientific but also of practical interest.

✧ **Key words:** optical coherence tomography; retina; optic nerve; choroid.

REFERENCES

1. Vasil'ev V. N., Gurov I. P. Sravnitel'nyy analiz metodov opticheskoy kogerentnoy tomografii. [Comparative analysis of the methods of optical coherent tomography] *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie.* 2007; N 7: 30–40. (in Russian)
2. Gurov I. P., Kozlov S. A. red. Problemy kogerentnoy i nelineynoy optiki. [Problems of coherent and nonlinear optics] SPbGU ITMO. SPb.; 2004. (in Russian)

20. Jonas J. B., Forster T. M., Steinmetz P., Schlichtenbrede F. C., Harder B. C. Choroidal thickness in age-related macular degeneration. *Retina*. 2014; 34(6): 1149–55.
21. Khanifar A. A., Parlitsis G. J., Ehrlich J. R. et al. Retinal nerve fiber layer evaluation in multiple sclerosis with spectral domain optical coherence tomography. *Clinical Ophthalmology*. 2010; 4: 1007–1013.
22. Kim S. W., Oh J., Kwon S. S., Yoo J., Huh K. Comparison of choroidal thickness among patients with healthy eyes, early age-related maculopathy, neovascular age-related macular degeneration, central serous chorioretinopathy, and polypoidal choroidal vasculopathy. *Retina*. 2011; 31: 1904–1911.
23. Leung C. K., Cheung C. Y., Weinreb R. N., Lee G. et al. Comparison of Macular Thickness Measurements between Time Domain and Spectral Domain Optical Coherence Tomography. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci*. 2008; 49 (11): 4893–7.
24. Manjunath V., Fujimoto J. G., Duker J. S. Cirrus HD-OCT high definition imaging is another tool available for visualization of the choroid and provides agreement with the finding that the choroidal thickness is increased in central serous chorioretinopathy in comparison to normal eyes. *Retina*. 2010; 30 (8): 1320–1.
25. Manjunath V., Goren J., Fujimoto J. G., Duker J. S. Analysis of choroidal thickness in age-related macular degeneration using spectral-domain optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2011; 152: 663–8.
26. Manjunath V., Taha M., Fujimoto J. G., Duker J. S. Choroidal thickness in normal eyes measured using Cirrus HD optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2010; 150 (3): 325–31.
27. Margolis R., Spaide R. F. A pilot study of enhanced depth imaging optical coherence tomography of the choroid in normal eyes. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 147 (5): 811–5.
28. Martinez-Conde S., Macknik S. L., Hubel D. H. The role of fixational eye movements in visual perception. *Nat. Rev. Neurosci.* 2004; 5 (3): 229–40.
29. Maruko I., Iida T., Sugano Y., Ojima A., Ogasawara M., Spaide R. F. Subfoveal choroidal thickness after treatment of central serous chorioretinopathy. *Ophthalmology*. 2010; 117 (9): 1792–9.
30. McCourt E. A., Cadena B. C., Barnett C. J., Ciardella A. P. et al. Measurement of subfoveal choroidal thickness using spectral domain optical coherence tomography. *Ophthalmic Surg. Lasers Imaging*. 2010; 41: 28–33.
31. Park H. Y., Park C. K. Diagnostic capability of lamina cribrosa thickness by enhanced depth imaging and factors affecting thickness in patients with glaucoma. *Ophthalmology*. 2013; 120 (4): 745–52.
32. Povazay B., Bizheva K., Hermann B. et al. Enhanced visualization of choroidal vessels using ultrahigh resolution ophthalmic OCT at 1050 nm. *Opt. Express*. 2003; 11 (17): 1980–1986.
33. Povazay B., Hermann B., Unterhuber A. et al. Three-dimensional optical coherence tomography at 1050 nm versus 800 nm in retinal pathologies: enhanced performance and choroidal penetration in cataract patients. *J. Biomed Opt.* 2007; 12 (4).
34. Puliafito C. A., Hee M. R., Lin C. P. et al. Imaging of macular diseases with optical coherence tomography. *Ophthalmology*. 1995; 102: 217–29.
35. Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. et al. *Optical Coherence Tomography of Ocular Diseases* 2nd ed. Thorofare, NJ: SLACK, Inc. 2004.
36. Spaide R. F. Enhanced depth imaging optical coherence tomography of retinal pigment epithelial detachment in age-related macular degeneration. *Am. J. Ophthalmol.* 2009; 147 (4): 644–52.
37. Spaide R. F., Koizumi H., Pozzoni M. C. Enhanced depth imaging spectral-domain optical coherence tomography. *Am. J. Ophthalmol.* 2008; 146 (4): 496–500.
38. Swanson E. A., Izatt J. A., Hee M. R., Huang D., Lin C. P., Schuman J. S., Puliafito C. A., Fujimoto J. G. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography. *Optics Letters*. 1993; 18(21): 1864–6.
39. Tan O., Chopra V., Tzu-Hui A. L. Detection of Macular Ganglion Cell Loss in Glaucoma by Fourier-Domain Optical Coherence Tomography. *Ophthalmology*. 2009; 116: 2305–14.
40. Vienola K. V., Braaf B., Sheehy C. K., Yang Q. et al. Real-time eye motion compensation for OCT imaging with tracking SLO. *Biomed Opt Express*. 2012; 3 (11): 2950–63.
41. Vizzeri G., Weinreb R. N., Gonzalez-Garcia A. O., Bowd C. et al. Agreement between spectral-domain and time-domain OCT for measuring RNFL thickness. *Br. J. Ophthalmol.* 2009; 93: 775–8.
42. Yannuzzi L. A., Freund K. B., Goldbaum M., Scassellati-Sforzolini B., Guyer D. R., Spaide R. F. et al. Polypoidal choroidal vasculopathy masquerading as central serous chorioretinopathy. *Ophthalmology*. 2000; 107: 767–77.
43. You J. Y., Park S. C., Su D., Teng C. C., Liebmann J. M., Ritch R. Focal lamina cribrosa defects associated with glaucomatous rim thinning.

Сведения об авторах:

Астахов Юрий Сергеевич — д. м. н., профессор кафедры офтальмологии. Кафедра офтальмологии ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова Минздрава России. 197022, Санкт-Петербург, ул. Л. Толстого, д. 6–8, корпус 16. E-mail: astakhov73@mail.ru.

Белехова Светлана Георгиевна — аспирант кафедры офтальмологии. ПСПбГМУ им. акад. И. П. Павлова Минздрава России. 197022, Санкт-Петербург, ул. Л. Толстого, д. 6–8, корпус 16. E-mail: beleksv@yandex.ru.

Astakhov Yuriy Sergeyevich — MD, doctor of medical science, professor, head of the department. Department of Ophthalmology. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. 197022, Saint-Petersburg, Lev Tolstoy st., 6–8, building 16. E-mail: astakhov73@mail.ru.

Belekhova Svetlana Georgiyevna — Postgraduate student. Department of Ophthalmology. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. 197022, Saint-Petersburg, Lev Tolstoy st., 6–8, building 16. E-mail: beleksv@yandex.ru.