<https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-2-90-95>

Оптическая когерентная томография — ангиография как метод неинвазивной диагностики патологии микроциркуляторного русла зрительного нерва и макулярной зоны сетчатки

М.С. Кривошеева¹ ✉, Е.Э. Иойлева^{2, 3}

¹ ГБУЗ Московской области «Сергиево-Посадская районная больница», Новоугличское шоссе, д. 62а, Московская область, Сергиев Посад, 141301, Россия

² ФГАУ НМИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова Минздрава России, Бескудниковский бульвар, д. 59а, Москва, 127486, Россия

³ ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1, Москва, 127473, Россия

В обзоре рассматриваются этапы становления и развития метода оптической когерентной томографии с функцией ангиографии, его преимущества, особенности и перспективы применения в диагностике патологии глазного дна.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография — ангиография; технология SWEPT- source; микроциркуляторное русло; зрительный нерв; макулярная зона сетчатки

Конфликт интересов: отсутствует.

Прозрачность финансовой деятельности: никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Для цитирования: Кривошеева М.С., Иойлева Е.Э. Оптическая когерентная томография — ангиография как метод неинвазивной диагностики патологии микроциркуляторного русла зрительного нерва и макулярной зоны сетчатки. Российский офтальмологический журнал. 2021; 14 (2): 90-5. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-2-90-95>

Optical coherence tomography-angiography as a non-invasive method of pathology diagnosis of the microcirculatory bed of the optic nerve and macula

Maria S. Krivosheeva¹ ✉, Elena E. Ioyleva^{2, 3}

¹ Sergiev Posad District Hospital, 62a, Novouglichscoe shosse, Sergiev Posad, Moscow Region, 141301, Russia

² S. Fyodorov Eye Microsurgery Center, 59a, Beskudnikovsky Blvd., Moscow, 127486, Russia

³ A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, 20, Bldg. 1, Delegatskaya St., Moscow, 127473, Russia
krivosheeva_ms@mail.ru

The review discusses the development of optical coherence tomography with the function of angiography, focusing on its advantages, features, and prospects for the diagnosis of fundus pathologies.

Keywords: optical coherence tomography-angiography; SWEPT-source technology; microvasculature; optic nerve; macular area

Conflict of interests: there is no conflict of interests.

Financial disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

For citation: Krivosheeva M.S., Ioyleva E.E. Optical coherence tomography-angiography as a non-invasive method of pathology diagnosis of the microcirculatory bed of the optic nerve and macula. Russian ophthalmological journal. 2021; 14 (2): 90-5 (In Russian). <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2021-14-2-90-95>

Современные визуализационные технологии позволяют обнаруживать микрососудистые изменения структуры и перфузии головки зрительного нерва и макулярной зоны сетчатки. В настоящее время одной из наиболее перспективных технологий является оптическая когерентная томография (ОКТ) с функцией ангиографии (ОКТА), позволяющая оценить структуру и функциональные характеристики микроциркуляции глазного дна без применения контрастного вещества. ОКТА в мире используется с 2014 г., в Российской Федерации — с 2015 г. Таким образом, представляется актуальным обобщить основные позиции накопленного мирового опыта использования ОКТА в современной офтальмологии.

История развития метода ОКТА. Основными прототипами создания ОКТА можно считать две визуализационные технологии: конфокальную сканирующую лазерную офтальмоскопию и конфокальную томографическую ангиографию, которые уже в 1997 г. описываются в статье израильских ученых как новые достижения в диагностике и контроле поражения диска зрительного нерва при глаукоме [1]. Данные технологии наравне с поляриметрией слоев нервных волокон сетчатки, оптической когерентной топографией и лазерной доплеровской флоуметрией легли в основу создания современной технологии ОКТА. В сообщении 2000 г. авторы показали, что ОКТ и топографическая ангиография при совместном применении обеспечивают визуализацию морфологических изменений в нейросенсорной сетчатке и сосудистой оболочке, вызванных ее периферической атрофией [2]. В 2004 г. американские ученые на основании опыта использования цифровой ангиографии заявили о достижениях в области ОКТ с высоким разрешением. При этом интеграция сканирующего лазерного офтальмоскопа и ОКТ позволила создать новый динамический инструмент — офтальмоскоп ОКТ, который одновременно отображает глазное дно множеством способов с точечной корреляцией, обеспечивает почти гистологическое разрешение структур сетчатки, а также передачу изображений в реальном времени по всему миру [3]. В 2005 г. ученые продемонстрировали, что усреднение множественных В-сканирований с помощью ОКТ в достаточной степени улучшает качество визуализации сетчатки. Использование метода ОКТ-сканирования для получения трехмерного изображения позволяет визуализировать детали, что сравнимо с результатами, полученными при использовании ОКТ сверхвысокого разрешения. Это явилось прямой предпосылкой к созданию метода ОКТА [4]. Так, в 2006 г. высокоскоростной оптический когерентный томограф впервые был применен для сканирования сосудов макулярной зоны сетчатки, а в 2007 г. и хориоидеи [5–7]. До появления технологии ОКТ такого рода визуализация данных структур без применения дополнительных методов визуализации не представлялась возможной. Постоянное усовершенствование технологии ОКТ способствовало появлению в 2014 г. нового метода исследования в офтальмологии — ОКТ-ангиографии, позволяющей с одинаковой чувствительностью регистрировать поперечный и аксиальный кровоток на всей глубине сканирования. ОКТА объединяет возможности ОКТ с высоким разрешением с методикой неинвазивной ангиографии [7].

Принцип действия технологии ОКТА. ОКТА — современная модификация метода ОКТ, основой которой является технология *fourier-domain*, обладающая преимуществами по сравнению с технологией *time-domain*, применявшейся ранее в аппаратах ОКТ. Технология *time-domain* имела более низкую скорость сканирования, что делало получение ОКТА-изображений невозможным. В ряде аппаратов, таких как OPTOVUE, в настоящее время используется алгоритм декорреляционной амплитудной ангиографии с разделением спектра (*split-spectrum amplitude decorrelation angiography — SSADA*) [8]. Принцип амплитудной декорреляции основан на анализе разницы амплитуд зондирующего луча, отраженного/рассеянного от выбранной точки в исследуемом объеме сетчатки, полученных при первом и повторном сканировании. Амплитуда отраженного/рассеянного света сильнее варьирует от скана к скану только в точках, соответствующих проекциям сосудов, где есть движение эритроцитов, на которых и происходит отражение/рассеяние луча. Оценка кровотока происходит на уровне поверхностного и глубокого сосудистых слоев сетчатки, а также слоя хориоидальных капилляров.

Поверхностный слой ОКТА внутренней сетчатки включает в себя сосуды ее поверхностного сосудистого сплетения, слоя ганглиозных клеток и сосудистую сеть в слое нервных волокон, начиная с 3 мкм ниже поверхности внутренней пограничной мембраны и до уровня 15 мкм ниже внутреннего плексиформного слоя (рис. 1). Глубокий слой расположен ниже уровня 15 мкм внутреннего плексиформного слоя до уровня 70 мкм. В этот слой входят сосуды глубокого сосудистого сплетения, расположенные преимущественно во внутреннем ядерном слое и вблизи его границы с наружным плексиформным слоем. Слой наружной сетчатки располагается от уровня 70 мкм ниже внутреннего плексиформного слоя до уровня 30 мкм ниже поверхности пигментного эпителия сетчатки. Слой хориоидальных капилляров расположен между уровнями 30 и 60 мкм ниже поверхности пигментного эпителия сетчатки. Специальная программа, основанная на расчете индекса кровотока и плотности сосудистой сети, позволяет провести не только качественный, но и количественный анализ сосудистых изменений [7]. Параметры кровоснабжения диска зрительного нерва (ДЗН) оцениваются по протоколу *Angio Disc Quick Vue* с измерением плотности капилляров по всей площади ДЗН, его внутренней части, перипапиллярной области с проведением оценки плотности капилляров по квадрантам (рис. 2).

Рис. 1. Ангиоархитектоника парафовеальной зоны сетчатки поверхностного сосудистого сплетения в норме
Fig. 1. Normal angioarchitecture of the parafoveal zone of the retinal superficial vascular plexus

Рис. 2. Ангиоархитектоника перипапиллярной зоны сетчатки в норме
Fig. 2. Normal angioarchitecture of the retinal peripapillary zone

Кроме того, преимуществами метода ОКТА является возможность его многократного применения и отсутствие необходимости использования флуоресцентных красителей. Получение трехмерного изображения и возможность количественной оценки глазного кровотока в сосудах сетчатки, перипапиллярных капилляров и хориоидеи на всей толщине позволяет не только визуализировать комплекс сосудов, но и измерять их площадь, определять форму, ветвистость, наличие анастомозов и петель. Таким образом, при обследовании методом ОКТА кровотоки сосудов сетчатки являются «внутренним контрастом», что дает значительные преимущества по сравнению с методом флуоресцентной ангиографии (ФАГ), так как позволяет неинвазивно определять движение крови в сосудах сетчатки и хориоидеи и тем самым дает четкое представление о форме, размерах, структуре и локализации новообразованных сосудов при различной патологии и, в отличие от ФАГ, позволяет осуществлять неинвазивный мониторинг динамики патологического процесса *in vivo*. Неинвазивность метода исключает вероятность развития побочных эффектов и осложнений [8–10].

Для анализа изображений ОКТА важным является возможность оценить кровотоки в разных слоях сетчатки и сосудистой оболочки, что обеспечивает формирование трехмерного изображения. Кроме того, использование алгоритма амплитудно-декорреляционной ангиографии (SSADA) с расщепленным спектром позволяет количественно оценить перфузию головки зрительного нерва и макулярной зоны сетчатки [11].

Создание технологии SWEPT-source в ОКТА-ангиографах последнего поколения стало возможным благодаря использованию специального узкополосного лазерного источника, способного перестраивать длину волны. Так, томограф DRI OCT Triton за счет способности менять длину волны в диапазоне 100 нм, а также за счет использования двойного балансного фотодетектора обладает на сегодняшний день уникальной скоростью сканирования в 100 тыс. А-сканов/с. Прибор принадлежит последнему поколению fourier-domain ОКТА, при этом спектральные компоненты кодируются не по пространственному ориентированию, а по времени. Излучение с длиной волны в 1050 нм лучше проникает в глуболежащие слои сетчатки, что позволяет достичь широкой области сканирования — 2,7 мм. Технология SWEPT-source позволяет проводить ОКТА в режиме ангиографии.

Спектр применения метода ОКТА в офтальмологии. ОКТА играет ведущую роль в диагностике патологии макулярной области, поскольку дает представление об этиопатогенезе поражения центральной зоны сетчатки. Французскими учеными методом ОКТА показан регресс макулярного отека в процессе лечения тромбоза центральной вены сетчатки, снижение средней плотности макулярного сосудистого сплетения [12]. Согласно результатам М.В. Будзинской и соавт. [13], ОКТА является высокоинформативным методом диагностики нарушений перфузии во всех сосудистых слоях центральной зоны сетчатки и микроваскулярных аномалий у пациентов с ретинальными венозными окклюзиями. Другие авторы отметили, что ОКТА позволяет визуализировать хориоретинальный кровоток при диагностике различных форм центральной серозной хориоретинопатии, оценить степень и характер структурных изменений сетчатки с учетом гемодинамических нарушений. Выявленные изменения ретинального пигментного эпителия и хориоидеи, являясь классификационными и прогностическими критериями заболевания, определяют эффективность лечебных мероприятий и функциональный прогноз заболевания [14].

Метод ОКТА позволяет с большой точностью оценить протяженность и морфологию хориоидальной неоваскуляризации (ХНВ) [15]. По сравнению с ОКТА применение технологии ОКТА дает высокоинформативное представление о наличии ХНВ, что играет решающую роль в определении тактики лечения пациентов с «влажной» формой возрастной макулярной дегенерации [16].

По результатам исследования С.Н. Тульцевой и соавт. [17] у больных с тромбозом центральной вены сетчатки при сравнении с непораженным глазом определяется значимое снижение плотности капилляров в поверхностном и глубоком капиллярных сплетениях, уменьшение flow area хориокапилляров и расширение фовеолярной аваскулярной зоны в глубоком капиллярном сплетении.

В доступной литературе встречаются единичные работы, посвященные применению ОКТА в офтальмоонкологии [18–26]. Так, описано использование метода при остеома хориоидеи, осложненной интравитреальным кровоизлиянием. В этом случае ФАГ оказалась неинформативной при диагностике субретинальной неоваскулярной мембраны над образованием из-за экранирующего ее субретинального кровоизлияния. Однако методом ОКТА был выявлен патологический сосудистый кровоток во внутренних слоях сетчатки, связанный с мембраной II типа [19]. Другие исследователи изучали макулярную зону у больных после брахитерапии увеальной меланомы и показали увеличение аваскулярной зоны и уменьшение парафовеолярной плотности капилляров в поверхностном и глубоком капиллярном сплетении даже при клиническом отсутствии макулопатии [20, 21]. Целью работы А. Valverde-Megías и соавт. [22] послужило исследование макулярной зоны у больных с меланомой и невусом хориоидеи: измерение толщины сетчатки в фовеа, площади поверхностной и глубокой аваскулярной зоны макулы, плотности поверхностного и глубокого сосудистых сплетений парамакулярной зоны пораженного и парного глаз. Авторы выявили, что у пациентов с невусом хориоидеи показатели пораженного и здорового глаз не различались [22]. В 2018 г. были представлены данные об особенностях диагностики феномена куполообразной макулы у пациентов с миопией средней и высокой степени и особенности дифференциальной диагностики данного феномена с гемангиомой хориоидеи методом ОКТА [25]. Таким образом, по мнению современных офтальмологов, ОКТА позволяет решить ряд диагностических проблем начальных новообразований хориоидеи, что дает возможность уточнить диагноз на ранних стадиях развития опухоли и провести своевременное адекватное органосохраняющее лечение [18].

Метод ОКТА является высокоинформативным в решении диагностических задач при общих заболеваниях. Показано, что для ангиоретинопатии при сахарном диабете (СД) I типа характерным является снижение парафовеолярной капиллярной перфузии глубокого сосудистого сплетения макулярной зоны [27]. По данным других специалистов, анализ фовеолярной аваскулярной зоны (ФАЗ), основанный на оценке соотношения площади зоны отсутствия внутреннего ядерного слоя и площади ФАЗ на изображениях ОКТА, обладает большей диагностической ценностью и точностью в диагностике непролиферативной диабетической ретинопатии (ДР) при СД II типа по сравнению с традиционной оценкой площади ФАЗ [28]. ОКТА позволяет выявлять микрососудистые изменения в макулярной зоне при СД даже на самых ранних стадиях заболевания, когда на глазном дне еще отсутствуют проявления ДР. Наиболее ранним маркером изменений микроциркуляторного русла сетчатки при СД являются качественные и количественные изменения в ФАЗ и сни-

жение плотности капиллярной сети поверхностного сосудистого сплетения при площади сканирования 3×3 мм [27].

S. Bolukbasi и соавт. [29] продемонстрировали различные типы накоплений в слое ганглиозных клеток сетчатки при болезни Ниманна — Пика типа В, а также в слое нервных волокон сетчатки и субфовеолярной области с помощью мультимодальной визуализации. При ОКТА-сканировании показаны области капиллярного кровотока сетчатки в поверхностном сплетении, повышенная извилистость сосудов и деформированная ФАЗ [29]. В ряде сообщений отмечена значимость ОКТА в диагностике болезни Альцгеймера (БА) на доклинической стадии, а также важность обследования данных пациентов врачом-офтальмологом, так как у пациентов с БА хориоидея тоньше, чем в среднем в популяции. В исследовании маркер-позитивных лиц в доклинической стадии БА показано увеличение площади средней ФАЗ с ее истончением, снижение общей толщины и слоя внутреннего сосудистого сплетения фовеолы. Таким образом, нейроны сетчатки при БА подвергаются дегенеративным изменениям раньше, чем наступит стадия когнитивных нарушений [30, 31].

Неоценимую важность метод ОКТА приобрел в диагностике микроциркуляторных нарушений при глаукоме. Современные исследователи получили возможность определить не только выраженность перфузионных нарушений макулярной зоны сетчатки и перипапиллярных капилляров, но и оценивать эффективность фармакологического воздействия гипотензивных препаратов, что позволит корректировать схему лекарственной терапии. Показана приоритетность изучения микроциркуляции в макулярной зоне методом ОКТА в ранней диагностике глаукомы любого типа [32]. По данным S. Philip и соавт., плотность сосудистого сплетения макулы при псевдоэкзофиативной глаукоме снижена в большей степени, чем при первичной открытоугольной глаукоме [33]. Y. Wang и соавт. [34] высказали предположение, что снижение индекса кровотока и плотности сосудов в перипапиллярной области может служить прогностическим критерием истончения слоя ганглиозных клеток сетчатки при глаукоме. Выявлено снижение индекса кровотока на $8,87 \pm 3,09$ % и показателя плотности сосудов макулярной зоны сетчатки на $2,61 \pm 1,50$ % в условиях гипероксии при глаукоме [35]. Авторы отмечают, что плотность перипапиллярных капилляров у пациентов с глаукомой также снижена, при этом диагностическая ценность перипапиллярной плотности капилляров выше, чем сосудистая плотность самого ДЗН и макулярной области. Гиперперфузионные участки совпадают топографически с истончениями слоя нервных волокон, при этом технология SWEPT-source ОКТ нагляднее демонстрирует истончение комплекса ганглиозных клеток и слоя нервных волокон, чем спектральная ОКТ. Таким образом, при глаукоме перспективна количественная оценка с помощью ОКТА макулярной зоны сетчатки, перипапиллярных капилляров и изменений слоя капилляров хориоидеи с дальнейшим применением автоматической сегментации хориоидеи. Эти данные демонстрируют целесообразность внедрения ОКТА в рутинную клиническую практику ведения пациентов с глаукомой в дополнение к компьютерной периметрии.

Метод спектральной ОКТА в последние 10 лет широко используется во всем мире для неинвазивной визуализации и клинической диагностики заболеваний глазного дна, в том числе при поражении зрительного нерва вследствие рассеянного склероза (РС) [36–39]. В 2019 г. нами было установлено, что при атрофии зрительного нерва (АЗН) вследствие РС имеется нарушение гемодинамики поверхностного сосудистого сплетения макулярной зоны сетчатки

и ДЗН по сравнению с возрастной нормой, что обусловлено снижением кровотока в центральной артерии сетчатки [40]. Наши наблюдения выявили гипоперфузию как звено патогенеза поражения микроциркуляторного русла при РС. В связи с этим всем пациентам с АЗН вследствие РС в курс комплексной консервативной терапии необходимо включать вазоактивные препараты [40].

Особенности и ограничения применения метода ОКТА в клинической практике. Применение ОКТА имеет определенные ограничения. Например, F. Pichi и соавт. [41] при изучении увеита показали, что, в отличие от обычной ФАГ, которая может динамически определять воспаление и утечку красителя из сосудов сетчатки, ОКТА позволяет неинвазивно обнаруживать хориоидальную неоваскуляризацию, которая осложняет течение увеита, а также идентифицировать и количественно определять гипоперфузию как проявление ишемии и/или воспалительной реакции. Авторы утверждают, что во избежание ошибок диагностики при оценке внутренних слоев хориоидеи с помощью ОКТА должны быть исключены блокирующие или скрывающие артефакты [41]. В проведенном нами ранее анализе сообщений о применении метода ОКТА и собственных наблюдений здоровых лиц молодого возраста указывается, что при оценке параметров ОКТА у пациентов с заболеваниями глазного дна следует учитывать несколько факторов, влияющих на заключение: 1) индивидуальные особенности общего и регионарного кровотока пациента, морфологическую вариабельность строения сетчатки [9, 38, 40]; 2) асимметрию кровотока между правым и левым глазами пациента; 3) артефакты, определяемые при исследовании методом ОКТ, которые могут влиять на параметры ангиомодуля [42].

Кроме того, существуют особенности анализа и интерпретации данных ОКТА. К ограничениям метода относят небольшое аксиальное разрешение, что не позволяет идентифицировать сосуды мелкого калибра, и малая зона сканирования, которая ограничивает выявление ишемии на периферии, наличие артефактов, таких как наложение двух капиллярных сплетений друг на друга или теней крупных сосудов поверхностного сплетения на глубокую капиллярную сеть. Эти ограничения необходимо учитывать при количественной оценке и интерпретации полученных результатов при обследовании пациентов с патологией глазного дна.

Перспективы применения ОКТА. На основании результатов исследования свойств оптического когерентного томографа-ангиографа нового типа, работающего на основе технологии SWEPT-source, сотрудниками кафедры офтальмологии факультета фундаментальной медицины МГУ им. М.В. Ломоносова было определено, что ее преимуществом является не только возможность детальной оценки состояния кровеносного русла во всех слоях сетчатки и перипапиллярных капилляров, но и хориоидеи. Технология SWEPT-source позволяет визуализировать все слои хориоидеи, а также в автоматическом режиме распознавать ее границы и строить карты с определением толщины в каждом секторе в проекции макулярной зоны сетчатки [43, 44]. Публикации последних лет показывают перспективность широкого внедрения технологии SWEPT-source в клиническую практику для анализа различных патологических состояний с вовлечением сосудистой оболочки глаза [45–52]. Основной тенденцией развития метода ОКТА в диагностической офтальмологии будет применение мультимодального подхода для оценки состояния глазного дна, включающего сочетанное применение микропериметрии и других визуализационных методов диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОКТА обеспечивает визуализацию и детализацию патологических изменений глазного дна на качественно более высоком уровне, чем предшествующие визуализационные технологии, в том числе благодаря применению новейшей технологии SWEPT-source. Вектором развития данного метода стало получение информации об ангиоархитектонике, начиная от слоя поверхностных сосудов до решетчатой пластинки, неинвазивная оценка перипапиллярного кровотока, гемоперфузии ДЗН и всех слоев хориоидеи. ОКТА в своем общеклиническом и научно-исследовательском значении — это универсальная высокоинформативная прогрессивная технология диагностики сосудистой патологии, применимая не только в офтальмологии, но и в других областях медицины.

Литература/References

1. Melamed S., Levkovitch-Verbin H. Laser scanning tomography and angiography of the optic nerve head for the diagnosis and follow-up of glaucoma. *Curr. Opin. Ophthalmol.* 1997; (2): 7–12. <https://doi.org/10.1097/00055735-199704000-00003>
2. Meyer C.H., Hoerauf H., Schmidt-Erfurth U., et al. Correlation of morphologic changes between optical coherence tomography and topographic angiography in a case of gyrate atrophy. *Ophthalmology.* 2000; 97 (1): 41–6. <https://doi.org/10.1007/s003470050009>
3. Yannuzzi L.A., Ober M.D., Slakter J.S., et al. Ophthalmic fundus imaging: today and beyond. *Am. J. Ophthalmol.* 2004; 137 (3): 511–24. <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2003.12.035>
4. Sander B., Larsen M., Thrane L., Hougaard J.L., Jorgensen T.M. Enhanced optical coherence tomography imaging by multiple scan averaging. *Br. J. Ophthalmol.* 2005; 89 (2): 207–12. <https://doi.org/10.1136/bjo.2004.045989>
5. Makita S., Hong Y., Yamanari M., et al. Optical coherence angiography. *Opt. Express.* 2006; 14 (17): 7821–40. <https://doi.org/10.1364/oe.14.007821>
6. Yasuno Y., Hong Y., Makita S., et al. In vivo high-contrast imaging of deep posterior eye by 1-microm swept source optical coherence tomography and scattering optical coherence angiography. *Opt. Express.* 2007; 15: 6121–39. <https://doi.org/10.1364/oe.15.006121>
7. Шаимов Т.Б., Панова И.Е., Шаимов Р.Б. и др. Оптическая когерентная томография — ангиография в диагностике неоваскулярной формы возрастной макулярной дегенерации. *Вестник офтальмологии.* 2015; 131 (5): 4–13. [Shaimov T.B., Panova I.E., Shaimov R.B., et al. Optical coherence tomography angiography in the diagnosis of neovascular age-related macular degeneration. *Vestnik oftal'mologii.* 2015; 131 (5): 4–13 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17116/oftalma201513154-12>
8. Lira R., Oliveira C., Marques M., Silva A., Pessoa C. Adverse reactions of fluorescein angiography: a prospective study. *Arquivos Brasileiros de Ophthalmologia.* 2007; 70 (4): 615–18. <https://doi.org/10.1590/s0004-27492007000400011>
9. Нойлева Е.Э., Кривошеева М.С., Андрусякова Е.П. Параметры ОКТА-ангиографии макулярной зоны сетчатки и диска зрительного нерва у здоровых лиц молодого возраста. *Российская детская офтальмология.* 2019; 3: 38–42. [Ioyleva E.E., Krivosheeva M.S., Andrusyakova E.P. Parameters OCT-angiography of the macular area of the retina and optic nerve in healthy young people. *Rossiyskaya detskaya oftal'mologiya.* 2019; 3: 38–42 (in Russian)]. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2019-3-38-42>
10. Yia Y., Tan O., Tokayer J., et al. Split — spectrum amplitude decorrelation angiography with optical coherence tomography. *Opt. Express.* 2012; 20 (4): 4710. <https://doi.org/10.1364/OE.20.004710>
11. Lumbroso B., Huang D., Yia Y., Fujimoto J.A., Rispoli M. Clinical guide to Angio-OCT. New Delhi: Jaypee Brothers Medical Publ.; 2015.
12. Sellam A., Glacet-Bernard A., Coscas F., et al. Qualitative and quantitative follow-up using optical coherence tomography angiography of retinal vein occlusion treated with anti-VEGF: Optical Coherence Tomography Angiography follow-up of retinal vein occlusion. *Retina.* 2017; 37 (6): 1176–184. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001334>
13. Будзинская М.В., Шеланкова А.В., Михайлова М.А. и др. Изменения центральной зоны глазного дна при ретинальных венозных окклюзиях по данным оптической когерентной томографии — ангиографии. *Вестник офтальмологии.* 2016; 132 (5): 15–22. [Budzinskaya M.V., Shelankova A.V., Mikhaylova M.A., et al. Analysis of changes in central macular thickness based on optical coherence tomography angiography findings in retinal vein occlusion. *Vestnik oftal'mologii.* 2016; 132 (5): 15–22 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17116/oftalma2016132515-22>
14. Жукова С.И., Злобина А.Н., Юрьева Т.Н., Шуко А.А. Оптическая когерентная томография сетчатки в оценке хориоретинального кровотока у больных с центральной серозной хориоретинопатией. *Регионарное кровообращение и микроциркуляция.* 2016; 15: 4 (60): 39–47. [Zhukova S.I., Zlobina A.N., Iureva T.N., Shchuko A.A. Optical coherence tomography in assessment chorioretinal blood flow in patients with central serous chorioretinopathy. *Regionarnoye krovoobrashcheniye i mikrotsirkulyatsiya.* 2016; 15: 4 (60): 39–47 (in Russian)]. <https://doi.org/10.24884/1682-6655-2016-15-4-39-47>
15. Чибрикова Ю.А., Мельникова Ю.А. Оценка эффективности интравитреального введения афлиберцепта при неоваскулярной форме ВМД с помощью ангиоОКТ. *Бюллетень медицинских интернет-конференций.* 2019; 9 (1): 10. [Chibrikova Yu.A., Melnikova Yu.A. Evaluation of the effectiveness of intravitreal administration of aflibercept in the neovascular form of AMD using angio-OCT. *Bulletin of Medical Internet Conferences.* 2019; 9 (1): 10 (in Russian)].
16. Вирста А.М., Каменских Т.Г., Нугаева Н.Р., Колбенов И.О., Гилева Е.В. Флюоресцентная ангиография и оптическая когерентная томография с ангиографией глазного дна у пациентов с «влажной» формой возрастной макулярной дегенерации. *Саратовский научно-медицинский журнал.* 2017; 13 (2): 345–9. [Virsta A.M., Kamenskikh T.G., Nugaeva N.R., Kolbenov I.O., Gileva E.V. Fluorescent angiography and optical coherence tomography with angiography of the ocular fundus in patients with “the wet” form of an age-related macular degeneration. *Saratov Journal of Medical Scientific Research.* 2017; 13 (2): 345–9 (in Russian)].
17. Тульцева С.Н., Астахов Ю.С., Руховец А.Г., Титаренко А.И. Информативность ОКТА-ангиографии в сочетании с исследованиями регионарной гемодинамики при окклюзии вен сетчатки. *Офтальмологические ведомости.* 2017; 10 (2): 40–8. [Tultseva S.N., Astakhov Y.S., Rukhovets A.G., Titarenko A.I. Diagnostic value OF oct-angiography AND regional hemodynamic assessment in patients with retinal vein occlusion. *Oftal'mologicheskiye vedomosti.* 2017; 10 (2): 40–8 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17816/OV10240-48>
18. Нероев В.В., Саакян С.В., Мякошина Е.Б., Охотимская Т.Д., Фадеева В.А. Оптическая когерентная томография — ангиография в диагностике начальной меланомы и отграниченной гемангиомы хориоидеи. *Вестник офтальмологии.* 2018; 134 (3): 4–18. [Neroev V.V., Saakyan S.V., Myakoshina E.B., Okhotsimskaya T.D., Fadeeva V.A. Role of optical coherence tomography angiography in diagnostics of early choroidal melanoma and circumscribed choroidal hemangioma. *Vestnik oftal'mologii.* 2018; 134 (3): 4–18 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17116/oftalma201813434>
19. Szelog J.T., Bonini Filho M.A., Lally D.R., de Carlo T.E., Duker J.S. Optical Coherence Tomography Angiography for detecting choroidal neovascularization secondary to choroidal osteoma. *Ophthalmic Surg. Lasers Imaging Retina.* 2016; 47 (1): 69–72. <https://doi.org/10.3928/23258160-20151214-10>
20. Shields C.L., Say E.A., Samara W.A., et al. Optical coherence tomography angiography of the macula after plaque radiotherapy for choroidal melanoma: Comparison of irradiated versus nonirradiated eyes in 65 patients. *Retina.* 2016; 36 (8): 1493–505. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001021>
21. Say E.A., Samara W.A., Khoo C.T., et al. Parafoveal capillary density after plaque radiotherapy for choroidal melanoma: Analysis of eyes without radiation maculopathy. *Retina.* 2016; 36 (9): 1670–8. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001085>
22. Valverde-Megias A., Say E.A., Ferenczy S.R., Shields C.L. Differential macular features on optical coherence tomography angiography in eyes with choroidal nevus and melanoma. *Retina.* 2017; 37 (4): 731–40. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001233>
23. Maloca P., Gyger C., Hasler P.W. A pilot study to image the vascular network of small melanocytic choroidal tumors with speckle noise-free 1050-nm swept source optical coherence tomography (OCT choroidal angiography). *Graefes's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology.* 2016; 254 (6): 1201–10. <https://doi.org/10.1007/s00417-015-3259-9>
24. Veverka K.K., Abou Chehade J.E., Iezzi R.Jr., Pulido J.S. Noninvasive grading of radiation retinopathy: The Use of Optical Coherence Tomography Angiography. *Retina.* 2015; 35 (11): 2400–10. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000844>
25. Мелихова М.В., Гацу М.В. Феномен куполообразной макулы. *Офтальмологические ведомости.* 2018; 11 (1): 71–7. [Melikhova M.V., Gatsu M.V. Dome-shaped macula phenomenon. *Ophthalmology Journal.* 2018; 11 (1): 71–7 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17816/OV11171-77>
26. Pechauer A., Jia Y., Liu L., et al. Optical Coherence Tomography Angiography of peripapillary retinal blood flow response to hyperoxia. *Invest. Ophthalmol Vis Sci.* 2015; 56 (5): 3287–91 (in Russian)]. <https://doi.org/10.1167/iovs.15-16655>
27. Simonetti J.M., Scarinci F., Picconi F., et al. Early microvascular retinal changes in optical coherence tomography angiography in patients with type 1 diabetes mellitus. *Acta Ophthalmol.* 2017; 95 (8): 751–55. <https://doi.org/10.1111/aos.13404>
28. Нероев В.В., Охотимская Т.Д., Фадеева В.А. Оценка микрососудистых изменений сетчатки при сахарном диабете методом ОКТА-ангиографии. *Российский офтальмологический журнал.* 2017; 10 (2): 40–5. [Neroev V.V., Okhotsimskaya T.D., Fadeeva V.A. An account of retinal microvascular changes in diabetes acquired by OCT angiography. *Russian ophthalmological journal.* 2017; 10 (2): 40–5 (in Russian)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2017-10-2-40-45>
29. Bolukbasi S., Dogan C., Kiykim E., et al. Multimodal imaging including optical coherence tomography angiography in patients with type B Niemann–Pick disease. *Int. Ophthalmol.* 2019; 39 (11): 2545–52. <https://doi.org/10.1007/s10792-019-01102-y>
30. Белодурин А.Д. Перспективы диагностики доклинической стадии болезни Альцгеймера врачами-офтальмологами. *Вестник Совета молодых ученых и*

- специалистов Челябинской области. 2018; 2 (3): 84–7. [Belodurina A.D. Prospects for the diagnosis of pre-clinical Alzheimer's disease by ophthalmologists. Vestnik Soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti. 2018; 2 (3): 84–7 (in Russian)].
31. O'Bryhim B.E., Apte R.S., Kung N., Coble D., Van Stavern G.P. Association of preclinical Alzheimer Disease with Optical Coherence Tomographic Angiography findings. *JAMA Ophthalmol.* 2018; 136 (11): 1242–48. <https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2018.3556>
 32. Курешева Н.И., Трубилина А.В., Маслова Е.В. Оптическая когерентная томография — ангиография и паттерн-электроретинография в ранней диагностике глаукомы. *Новости глаукомы.* 2017; 1: 66–9. [Kuryseva N.I., Trubilina A.V., Maslova E.V. Optical coherence tomography-angiography, pattern electroretinography in the early diagnosis of glaucoma. *Glaucoma News.* 2017; 1: 66–9 (in Russian)].
 33. Philip S., Najafi A., Tantraworasin A., et al. Macula vessel density and foveal avascular zone parameters in exfoliation glaucoma compared to primary open-angle glaucoma. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* 2019; 60 (4): 1244–53. <https://doi.org/10.1167/iov.18-259>
 34. Wang Y., Bower B.A., Izatt J.A., Tan Ou., Huang D. In vivo total retinal blood flow measurement by Fourier domain Doppler optical coherence tomography. *J. Biomed. Opt.* 2007 Jul-Aug; 12 (4): 041215. <https://doi.org/10.1117/1.2772871>
 35. Samara W.A., Say E.A., Khoo C.T., et al. Correlation of foveal avascular zone size with foveal morphology in normal eyes using optical coherence tomography angiography. *Retina.* 2015; 35 (11): 2188–95. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000847>
 36. Lanzillo R., Cennamo G., Criscuolo C., et al. Optical coherence tomography angiography retinal vascular network assessment in multiple sclerosis. *Mult. Scler.* 2018; 24 (13): 1706–14. <https://doi.org/10.1177/1352458517729463-2017>
 37. Spain R.I., Liu L., Zhang X., et al. Optical coherence tomography angiography enhances the detection of optic nerve damage in multiple sclerosis. *Br. J. Ophthalmol.* 2018; 102 (4): 520–24. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2017-310477>
 38. Кривошеева М.С., Иойлева Е.Э. Оценка диагностической и дифференциально-диагностической значимости методов спектральной оптической когерентной томографии и микропериметрии у пациентов со зрительными нарушениями вследствие рассеянного склероза. *Российский офтальмологический журнал.* 2020; 13 (3): 21–9. [Krivosheeva M.S., Ioyleva E.E. Evaluation of the diagnostic and differential diagnostic value of SOCT and microperimetry methods in patients with visual disturbances due to multiple sclerosis. *Russian ophthalmological journal.* 2020; 13 (3): 21–9 (in Russian)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2020-13-3-21-29>
 39. Wang X., Jia Y., Spain R., et al. Optical coherence tomography angiography of optic nerve head and parafovea in multiple sclerosis. *Br. J. Ophthalmol.* 2014; 98 (10): 1368–73. <https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304547>
 40. Иойлева Е.Э., Кривошеева М.С., Андрусак Е.П. Оптическая когерентная томография — ангиография в диагностике микроциркуляторных нарушений. *Российская детская офтальмология.* 2019; 4: 24–8. [Ioyleva E.E., Krivosheeva M.S., Andrusyak E.P. Optical coherence tomography-angiography in the diagnosis of microcirculatory disorders. *Rossiyskaya detskaya oftalmologiya.* 2019; 4: 24–8 (in Russian)]. <https://doi.org/10.25276/2307-6658-2019-4-24-2>
 41. Pichi F., Sarraf D., Morara M., et al. Pearls and pitfalls of optical coherence tomography — angiography in the multimodal evaluation of uveitis. 2017; 7 (1): 20. <https://doi.org/10.1186/s12348-017-0138-z>
 42. Шпак А.А., Коробкова М.В. Артефакты оптической когерентной томографии. *Российский офтальмологический журнал.* 2019; 12 (1): 75–80. [Shpak A.A., Korobkova M.V. Artifacts of optical coherence tomography. *Russian ophthalmological journal.* 2019; 12 (1): 75–80. (in Russian)]. <https://doi.org/10.21516/2072-0076-2019-12-1-75-80>
 43. Kaidonis G., Silva R.A., Sansilo S.R., Leng T. The superficial and deep retinal capillary plexus in cases of fovea plana imaged by spectral-domain optical coherence tomography angiography. *Am. J. Ophthalmol. Case Rep.* 2016; 25 (6): 41–4. <https://doi.org/10.1016/j.ajoc.2016.09.007>
 44. Семенова Н.С., Ларичев А.В., Аконян В.С. Swept source — оптическая когерентная томография: обзор технологии. *Вестник офтальмологии.* 2020; 136 (1): 111–6. [Semenova N.S., Larichev A.V., Akopyan V.S. Swept source optical coherence tomography: a technology review. *Vestnik oftal'mologii.* 2020; 136 (1): 111–6 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17116/oftalma202013601111>
 45. Бунашьева М.А., Куликов А.Н., Мальцев Д.С. Персонализированный анализ аваскулярной зоны с помощью оптической когерентной томографии — ангиографии. *Офтальмологические ведомости.* 2017; 10 (4): 32–40. [Burnasheva M.A., Kulikov A.N., Maltsev D.S. Personalized analysis of foveal avascular zone with optical coherence tomography angiography. *Oftal'mologicheskiye vedomosti.* 2017; 10 (4): 32–40 (in Russian)]. <https://doi.org/10.17816/OV10432-40>
 46. Ghasemi Falavarjani K., Tian J.J., Akil H., et al. Swept-source optical coherence tomography angiography of the optic disk in optic neuropathy. *Retina.* 2016; Suppl. 1: 168–77. <https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001259>
 47. Азнабаев Б.М., Мухаммадеев Т.Р., Дибеев Т.И. Оптическая когерентная томография + ангиография глаза. *Цветной атлас.* Москва; 2015. [Aznabae B.M., Muhamadeev T.R., Dibaev T.I. Optical coherent tomography + angiography of the eye. *Color Atlas.* Moscow; 2015 (in Russian)].
 48. Аникина М.А., Матненко Т.Ю., Лебедев О.И. Оптическая когерентная томография — ангиография: перспективный метод в офтальмологической диагностике. *Практическая медицина.* 2018; 3 (114): 7–10. [Anikina M.A., Matnenko T.Yu., Lebedev O.I. Optical coherence tomography — angiography: a promising method in the ophthalmological diagnostics. *Prakticheskaya meditsina.* 2018; 3 (114): 7–10 (in Russian)].
 49. Сафоненко А.Ю., Иойлева Е.Э. Современные технологии визуализации в диагностике патологии зрительного нерва. *Практическая медицина.* 2018; 3 (114): 156–60. [Safonenko A.Yu., Ioyleva E.E. Modern visualization technologies in diagnosing the optic nerve pathologies. *Prakticheskaya meditsina.* 2018; 3 (114): 156–60 (in Russian)].
 50. Гаврилова Н.А., Иойлева Е.Э., Гаджиева Н.С. и др. Диагностические возможности оптической когерентной томографии сетчатки при компрессии в хиазмально-селлярной области. *Офтальмология.* 2020; 17 (1): 5–12. [Gavrilova N.A., Ioyleva E.E., Gadzhieva N.S., et al. Diagnostic possibilities of Optical Coherent Tomography of the retina during compression in the chiasm-sellar region. *Ophthalmology in Russia.* 2020; 17 (1): 5–12 (in Russian)]. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2020-1-5-12>
 51. Ioyleva E., Krivosheeva M. Analysis of the localization of demyelinating plaques in patients with optic nerve atrophy due to multiple sclerosis. *Neuro-Ophthalmology.* 2019; 43 (1): 158–59. <https://doi.org/10.1080/01658107.2019.1608780>
 52. Ioyleva E., Kabanova E., Krivosheeva M. Measurement of macular ganglion cell-innerplexiform layer with spectral-domain optical coherence tomography in patients with optic nerve head drusen and papilledema. *Acta Ophthalmologica.* 2018; 96 (261): 55.

Вклад авторов в работу: М.С. Кривошеева — идея, концепция и написание обзора; Е.Э. Иойлева — консультирование и окончательное редактирование текста.

Author's contribution: M.S. Krivosheeva — concept, design and writing the review; E.E. Ioyleva — final editing of the review.

Поступила: 06.05.2020. Переработана: 02.09.2020. Принята к печати: 02.09.2020

Originally received: 06.05.2020. Final revision: 02.09.2020. Accepted: 02.09.2020

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

ГБУЗ Московской области «Сергиево-Посадская районная больница», 141301, Московская область, Сергиев Посад, Новоуличское шоссе, д. 62а

Мария Сергеевна Кривошеева — канд. мед. наук, врач-офтальмолог хирургического отделения поликлиники

¹ ФГАУ НМИЦ МНТК «Микрохирургия глаза» им. акад. С.Н. Федорова Минздрава России, Бескудниковский бульвар, д. 59а, Москва, 127486, Россия

² ФГБОУ ВО МГМСУ им. А.И. Евдокимова Минздрава России, ул. Делегатская, д. 20, стр. 1, Москва, 127473, Россия

Елена Эдуардовна Иойлева — д-р мед. наук, ученый секретарь¹, профессор кафедры глазных болезней²

Для контактов: Мария Сергеевна Кривошеева, krivosheeva_ms@mail.ru

State Budgetary Healthcare Institution of the Moscow Region “Sergiev Posad District Hospital” 62a, Novoulicheskoe shosse, Sergiev Posad, Moscow region, 141301, Russia

Maria S. Krivosheeva — Cand. of Med. Sci., ophthalmologist of the surgical department of the polyclinic

¹ S. Fyodorov Eye Microsurgery Federal State Institution, 59a, Beskudnikovsky bul., Moscow, 127486, Russia

² A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, 1, 20, Delegatskaya st., Moscow, 127473, Russia

Elena E. Ioyleva — Dr. of Med. Sci., scientific secretary¹, professor of chair of ophthalmology²

Contact information: Maria S. Krivosheeva, krivosheeva_ms@mail.ru