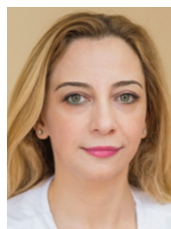


Оптическая когерентная томография в диагностике первичной открытоугольной глаукомы



Ю.Н. Юсеф



Э.Э. Казарян

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней имени М.М. Краснова»
ул. Россолимо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ

Офтальмология. 2024;21(4):650–657

Обзор литературы содержит сведения о возможностях и роли ОКТ-А в диагностике первичной открытоугольной глаукомы (ПОУГ). Необходимость в методах неинвазивной оценки глазной сосудистой сети привела к разработке ОКТ-ангиографии (ОКТ-А), которая обеспечивает предоставление информации о состоянии как структуры сетчатки, так и ее сосудистого русла путем анализа кровотока, что еще больше повышает ценность этого метода визуализации по сравнению с обычной ОКТ. Оценка кровотока с помощью ОКТ-А может использоваться для выявления многих сосудистых нарушений сетчатки, таких как определение области отсутствия перфузии, нефункционирующие сосуды, появление новых сосудов в областях, которые являются аваскулярными, увеличение васкуляризации, наличие микро- и макроаневризм, ремоделирование капилляров, макулярная телеангиэктазия и венозные мальформации. ОКТ-А является неинвазивным средством визуализации ретинальной и хориоидальной сосудистой сети, обеспечивая уникальное представление о сосудистой системе, которое можно объединить с данными, полученными от других методов визуализации, для дополнения и со временем предоставления уникальной информации, помогающей врачу-офтальмологу в отношении диагностики или эффективности вмешательства. Параметры ОКТ-А определяют в перипапиллярной области, мониторинг плотности перипапиллярных и макулярных сосудов может представить важную информацию для оценки прогрессирования ПОУГ и прогнозирования темпов ухудшения заболевания. Исследования показывают наличие сильной корреляционной связи между параметрами ОКТ и зрительными функциями при ПОУГ. В перспективе применение ОКТ-А в диагностике глаукомы с использованием искусственного интеллекта с прогнозированием структурных и функциональных особенностей на основе определения ранних сосудистых изменений обеспечит возможности для раннего выявления пациентов с высоким риском появления и быстрого прогрессирования глаукомы. Потенциально ОКТ-А может стать частью диагностики глаукомы.

Ключевые слова: глаукома, ОКТ-А, сосудистая сеть, диагностика

Для цитирования: Юсеф Ю.Н., Казарян Э.Э. Оптическая когерентная томография в диагностике первичной открытоугольной глаукомы. *Офтальмология*. 2024;21(4):650–657. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-4-650-657>

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

Конфликт интересов отсутствует.



Optical Coherence Tomography in the Diagnosis of Open-angle Glaucoma

Yu.N. Yusef, E.E. Kazaryan

M.M. Krasnov Research Institute of Eye Diseases
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation

ABSTRACT

Ophthalmology in Russia. 2024;21(4):650-657

This literature review provides information on the capabilities and role of OCT-A in the diagnosis of open-angle glaucoma. The need for non-invasive methods of assessing the ocular vasculature has led to the development of OCT-angiography (OCT-A), which provides information on the state of both the retinal structure and its vascular bed through blood flow analysis, further increasing the value of this imaging method compared to conventional OCT. Blood flow assessment with OCT-A can be used to detect many retinal vascular abnormalities, such as the definition of areas of non-perfusion, non-functioning vessels, the appearance of new vessels in areas that are avascular, increased vascularity, the presence of micro- and macroaneurysms, capillary remodeling, macular telangiectasia, and venous malformations. OCT-A is a non-invasive imaging tool for the retinal and choroidal vasculature, providing a unique view of the vascular system that can be combined with information from other imaging modalities to complement and eventually provide unique information to assist the eye care practitioner in diagnosing or evaluating the effectiveness of interventions. OCT-A parameters are measured in the peripapillary region, and monitoring peripapillary and macular vessel density can provide important information to assess glaucoma progression and predict the rate of disease worsening. Studies show a strong correlation between OCT parameters, OCT parameters, and visual function as measured by visual field analysis in glaucomatous eyes. Future prospects for OCT-A in glaucoma diagnostics using artificial intelligence to predict structural and functional features based on early vascular changes will provide opportunities for early identification of patients at high risk for developing and rapidly progressing glaucoma. OCT-A has the potential to become part of glaucoma diagnostics and treatment.

Keywords: glaucoma, OCT-A, vascular network, diagnostics

For citation: Yusef Yu.N., Kazaryan E.E. Optical Coherence Tomography in the Diagnosis of Open-angle Glaucoma. *Ophthalmology in Russia*. 2024;21(4):650-657. <https://doi.org/10.18008/1816-5095-2024-4-650-657>

Financial Disclosure: no author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

There is no conflict of interests.

Оптическая когерентная томография (ОКТ), являясь неинвазивным методом исследования, дает весьма ценную клиническую информацию. ОКТ позволяет визуализировать структуру глаза и количественно оценивать структурные параметры глаза, необходимые для диагностики и лечения заболеваний глаз [1–4]. Необходимость в методах неинвазивной оценки глазной сосудистой сети привела к разработке ОКТ-ангиографии (ОКТ-А), которая обеспечивает предоставление информации о состоянии как структуры сетчатки, так и ее сосудистого русла путем анализа кровотока, что еще больше повышает ценность этого метода визуализации в сравнении с обычной ОКТ [5–7]. Многократное получение изображений одного и того же локуса выполняется с помощью как ОКТ, так и ОКТ-А.

В ОКТ обработка изображений включает усреднение множественных сканирований в одно b-сканирование с высоким разрешением. Напротив, в ОКТ-А разница между сканами отражается как кровоток во времени, таким образом, позволяя анализировать сосудистую архитектуру. Оценка кровотока с помощью ОКТ-А может использоваться для выявления многих сосудистых нарушений сетчатки, таких как определение области отсутствия перфузии, нефункционирующих сосудов, появление новых сосудов в областях, которые являются аваскулярными, увеличение васкуляризации,

наличие микро- и макроаневризм, ремоделирование капилляров, макулярная телеангиэктазия и венозные мальформации [8].

Короткая продолжительность, в течение которой ОКТ-А фиксирует информацию о движении крови, означает, что изменения в течение более длительных периодов времени, например из-за выхода крови или жидкости за пределы русла, не могут быть оценены. Анализ состояний, при которых происходит нарушение гематоретинального барьера, остается задачей флуоресцентной ангиографии. Основным преимуществом ОКТ-А перед флуоресцентной ангиографией является отсутствие необходимости внутривенных инъекций контрастного красителя, что несет риск осложнений [5, 9]. А.Н. Kashani и соавт. [5] предоставляют подробный обзор различных методов ОКТ-А, который включает инструменты, использующие либо спектральный домен (длина волны ~800 нм), либо источник с разверткой (длина волны ~1000 нм). Увеличенная длина волны в инструментах с разверткой повышает проникновение в сетчатку за счет снижения разрешения [5]. ОКТ-А является неинвазивным средством визуализации ретинальной и хориоидальной сосудистой сети, обеспечивая уникальное представление о сосудистой системе, которое можно объединить с информацией из других методов визуализации для дополнения и со временем

предоставления уникальной информации, помогающей врачу-офтальмологу в отношении диагностики или эффективности вмешательства.

Принцип ОСТ-А заключается в использовании сигнала ОСТ от движущихся частиц — эритроцитов (RBC) в качестве «контраста» для визуализации кровотока [10, 11]. По существу, имеются два сигнала ОСТ, один из которых отражается от статической структуры ткани, а другой — от движущихся эритроцитов в сосудах. Сигнал от структуры ткани остается постоянным, в то время как сигнал от протекающей крови изменяется во времени из-за постоянного движения эритроцитов. Чтобы отличить движущиеся частицы от структуры ткани, выполняются повторные сканирования в одном и том же месте. Временные изменения сигнала ОСТ при последующих сканированиях, вызванные движущимися частицами, создают ангиографический контраст, предоставляя возможность визуализировать микрососудистую сеть. Примечательно, что любая движущаяся частица может генерировать сигнал-контраст движения; однако преобладающее движение в ткани сетчатки исходит от эритроцитов. Например, липидные частицы в растворе генерируют сигналы ОСТ-А в результате броуновского движения [12]. После преобразования Фурье сигнал ОСТ содержит амплитуду (интенсивность) и фазовую информацию, поэтому для техники ОСТ-А было разработано несколько алгоритмов с целью использования различных компонентов сигнала ОСТ. Их можно разделить на три категории: ОСТ-А на основе фазового сигнала, ОСТ-А на основе сигнала интенсивности и ОСТ-А на основе комплексного сигнала.

В ОСТ-А принцип измерения основан на алгоритме декорреляции амплитуды разделенного спектра (SSADA) [1]. Этот алгоритм обнаруживает движение эритроцитов независимо от направления движения. В то же время вся статическая (структурная) информация удаляется программным обеспечением. Таким образом, в отличие от флуоресцентной ангиографии, данные в ОСТ-А извлекаются из эритроцитов, а не из плазмы. Важно отметить, что «неперфузия» в ОСТ-А не обязательно означает отсутствие или закупорку сосудов или отсутствие капиллярной плазменной перфузии, это просто означает, что во время получения изображения в «неперфузируемых» областях не присутствовали движущиеся эритроциты.

Глаукома является основной причиной необратимой потери зрения и включает в себя группу хронических оптических нейропатий, характеризующихся прогрессирующей потерей ганглиозных клеток сетчатки (ГКС). Нарушения кровоснабжения зрительного нерва являются одной из сторон патогенеза этого распространенного офтальмологического заболевания.

Исследования с помощью ОСТ-А показали, что по сравнению со здоровыми глазами глаза с ПОУГ демонстрируют значительное ослабление перфузии диска зрительно-

го нерва и плотности перипапиллярных сосудов [13, 14]. Выявлено также, что при глаукоме имеет место снижение микроциркуляции в сравнении со здоровыми глазами. Параметры ОСТ-А отражают микроциркуляцию в перипапиллярной области [15, 16]. Мониторинг плотности перипапиллярных и макулярных сосудов может быть информативным для оценки прогрессирования глаукомы и прогнозирования темпов ухудшения заболевания [17]. Выявлено наличие сильной корреляционной связи между параметрами ОКТ и зрительными функциями, определяемыми с помощью анализа поля зрения, в глаукомных глазах [18].

Как для исследовательских целей, так и для практики лечения ПОУГ наиболее информативными параметрами являются плотность перипапиллярных сосудов в перипапиллярном слое нервных волокон сетчатки (RNFL) и поверхностная плотность перифовеолярных сосудов в макуле [19]. Плотность сосудов — это перфузируемая область, выраженная в процентах от общей исследуемой области или ее секторов в пределах интересующего слоя сетчатки [19, 20]. ОКТ-А области диска зрительного нерва технически доступна в большинстве систем, но наличие крупных сосудов, а также изменчивость и сложность трехмерной структуры головки зрительного нерва затрудняют интерпретацию полученных результатов, для которой необходимо использовать как изображение ОКТ-А, так и соответствующее структурное изображение (изображение en face ОСТ) [21, 22]. В самых современных системах плотность капиллярных сосудов и плотность всех сосудов измеряются отдельно для каждого слоя сетчатки [23, 24]. Ретинальная перфузия является ауторегулируемой, но для ПОУГ характерно наличие сосудистой дисфункции. Кроме того, системное артериальное давление и другие системные параметры могут меняться между визитами пациента, как это часто наблюдается у пожилых пациентов с глаукомой. Несколькими группами исследователей были изучены краткосрочная повторяемость и долгосрочная воспроизводимость измерений плотности сосудов в перипапиллярном слое нервных волокон сетчатки и поверхностном перифовеолярном макулярном слое [21, 25, 26]. В целом эти параметры проявляют высокую повторяемость и долгосрочную воспроизводимость как в нормальных, так и в глаукомных глазах, когда качество изображения является высоким. В исследовании А.Н. Kashani, и соавт. долгосрочная воспроизводимость параметров плотности перипапиллярных сосудов составила менее 4 %, а в другом исследовании воспроизводимость между визитами пациентов поверхностной перифовеолярной макулярной плотности сосудов составила менее 9 % [5]. Было показано, что долгосрочная воспроизводимость измерений плотности перипапиллярных сосудов не зависит от толщины слоя нервных волокон сетчатки, поэтому воспроизводимость одинакова в здоровых глазах, глазах с ранней и развитой глаукомой [21, 25]. Другой

важный вопрос заключается в том, отражают ли значения плотности перипапиллярных сосудов перфузию перипапиллярного слоя нервных волокон сетчатки. Была обнаружена сильная связь между плотностью сосудов и глаукомным повреждением в зависимости от тяжести ПОУГ [21, 27, 28].

Слой нервных волокон сетчатки вот уже на протяжении нескольких лет остается ведущей анатомической структурой, исследование которой дает наиболее важную информацию как для выявления глаукомы (достигая чувствительности и специфичности 80–98 % [29]), так и для определения ее прогрессирования. Если принять во внимание, что потеря толщины слоя нервных волокон сетчатки, определяемая методом SD-OCT, как правило, существенно опережает появление функционального дефекта при ПОУГ, оценка данного структурного повреждения претендует на то, чтобы стать главным методом, позволяющим в ранний период выявлять прогрессирование заболевания [30].

Можно ли использовать измерения плотности сосудов для диагностики глаукомы? Для некоторых типов приборов и программного обеспечения дифференциальный диагноз ПОУГ на основании параметров плотности перипапиллярных сосудов или поверхностной перифовеолярной плотности макулярных сосудов соответствует или даже является более точным, чем с помощью оценки толщины слоя нервных волокон сетчатки [31]. Однако, судя по всему, инструментальные системы значительно различаются по точности определения параметров [31, 32–36]. При диагностике с помощью OCT-A различие между глазами с ПОУГ с наличием периметрических изменений и здоровыми глазами было больше в отношении плотности перипапиллярных сосудов, чем толщины слоя нервных волокон сетчатки [31]. Тем не менее противоположные данные были обнаружены при диагностике закрытоугольной глаукомы [34]. Изложенное предполагает, что для ПОУГ, при которой сосудистая дисрегуляция часто играет роль в развитии заболевания, определение плотности сосудов имеет преимущества при ранней диагностике, в отличие от закрытоугольной глаукомы. В работе Н.И. Курышевой и соавт. [37] была установлена корреляция между параметрами ОКТ-А, SAP и значениями внутриглазного давления (ВГД).

Для глаукомы, при которой повышение внутриглазного давления играет основную или исключительную патофизиологическую роль, структурные параметры имеют большое значение. Было показано, что локализованные дефекты пучков слоя нервных волокон сетчатки пространственно связаны с локализованным снижением плотности перипапиллярных сосудов даже при ранней и выраженной стадии ПОУГ [22]. Было также подтверждено наличие значительного соответствия между снижением плотности перипапиллярных сосудов и глубокими дефектами решетчатой пластинки [38]. Связь структуры и функции в OCT-A на самом деле является «связью

функции и структуры», при которой локальные и общие параметры OCT-A связаны с соответствующими значениями чувствительности или повреждения поля зрения. Однако наиболее интересной частью этих исследований является тот случай, когда в анализ включаются также структурные параметры (толщина слоя нервных волокон сетчатки, толщина сектора слоя нервных волокон сетчатки, толщина внутренней макулярной сетчатки и ее полутолщины).

В целом, для обеих систем при проведении периметрии (Humphrey и Octopus) была обнаружена сильная отрицательная связь между параметрами плотности перипапиллярных и макулярных сосудов и соответствующим ухудшением параметров поля зрения [39–42]. Еще более интересно, что при первичной открытоугольной глаукоме связь особенно сильна для плотности верхневисочных и нижневисочных перипапиллярных сосудов, пространственно соответствующих секторам поля зрения [40, 42]. Эти результаты подтверждают патофизиологическую гипотезу, которая предполагает причинную роль сосудистой дисрегуляции в развитии и прогрессировании первичной открытоугольной глаукомы, особенно в нижневисочной и верхневисочной перипапиллярных областях, где глаукомная потеря слоя нервных волокон сетчатки появляется рано и быстро прогрессирует [43].

В серии исследований была обнаружена достоверная связь между средними значениями дефекта парацентрального поля зрения при периметрии Octopus и значениями плотности перипапиллярных сосудов в височной области [44]. Височная перипапиллярная область (папилломакулярный пучок слоя нервных волокон сетчатки) считается особенно стабильным сектором слоя нервных волокон сетчатки, который не истончается до последних стадий глаукомы. Однако связь перфузии и функции предполагает, что некоторая легкая сосудистая дисфункция или повреждение могут начаться в папилломакулярной области гораздо раньше, чем считалось ранее. Были опубликованы данные о похожей связи поверхностной перифовеолярной макулярной плотности сосудов и средней чувствительности центрального поля зрения в пределах 10 градусов при проведении периметрии Хамфри [45]. Было также обнаружено соответствие между наличием центральных дефектов поля зрения и увеличенным размером фовеолярной аваскулярной зоны при глаукоме [24].

Поскольку на измерения толщины слоя нервных волокон сетчатки влияют миопия и атипичная морфология головки зрительного нерва, было важно изучить клиническую применимость измерений плотности сосудов в миопических глазах [46–48]. При глаукоме в сочетании с высокой миопией изменения параметров поля зрения значительно больше, чем изменения плотности перипапиллярных сосудов. В соответствии с толщиной слоя нервных волокон сетчатки перифовеолярная

перфузия изменяется при миопии с изменением состояния диска [48]. Таким образом, при ПОУГ в сочетании с миопией информативность и точность ОСТ-А не имеет большого преимущества в сравнении с ОСТ.

Нельзя не коснуться качества изображения и артефактов при проведении ОСТ-А. Подобно структурным измерениям ОСТ, ОСТ-А серьезно подвержена влиянию артефактов изображения, чаще всего речь идет о плавающих помутнениях стекловидного тела. Помутнения, которые часто встречаются при глаукоме [49], могут вызывать эффект тени, блокируя отражение света от сетчатки [29]. Эффект тени приводит к тому, что изображение ОСТ и значения плотности сосудов ложно имитируют сниженную или отсутствующую перфузию. Другие артефакты, известные при структурной визуализации ОСТ, также могут оказывать значительное влияние на качество изображения ОСТ-А и полученные значения [50, 51].

Можно ли использовать оптическую когерентную томографию-ангиографию для дифференциального диагноза ПОУГ от других заболеваний зрительного нерва? Перипапиллярные изменения при ОСТ-А, к сожалению, не являются специфичными для заболевания. Снижение перфузии определяется тяжестью, а не типом заболевания [51]. Различные заболевания головки зрительного нерва выглядят очень похожими на изображениях ОСТ-А. Таким образом, детальная оценка состояния головки зрительного нерва и перипапиллярной сетчатки остается обязательной для классификации заболеваний даже в эпоху современной технологии ОСТ-А.

Возвращаясь к вопросу о влиянии внутриглазного давления на значения плотности сосудов, следует отметить, что потенциальная связь между внутриглазным давлением или снижением внутриглазного давления и перипапиллярной перфузией была важным вопросом в лечении глаукомы на протяжении десятилетий. Структурные параметры (толщина слоя нервных волокон сетчатки и толщина макулярной сетчатки) не реагируют активно на лечение, направленное на снижение внутриглазного давления. В сравнительном исследовании, проведенном на здоровых глазах у пациентов с недавно поставленным диагнозом ПОУГ и глазной гипертензии, у которых внутриглазное давление было высоким, но снизилось по крайней мере на 50 %, до 18 мм рт. ст. или менее в ходе лечения, было обнаружено достоверное улучшение изначально сниженной плотности перипапиллярных сосудов [52]. Эти данные были подтверждены исследователями, которые проводили наблюдения при ОСТ-А на фоне снижения внутриглазного давления. [53, 54].

Результаты, которые были проанализированы при снижении внутриглазного давления, показали, что при относительно ранней глаукоме изменение плотности сосудов может потенциально использоваться для оценки эффективности вмешательств и сохранения поля зрения. Встает вопрос, можно ли использовать анализ плотности сосудов для определения прогрессирования глаукомы.

Текущим стандартом обнаружения и прогнозирования прогрессирования глаукомы является последовательное тестирование поля зрения и анализ прогрессирования изменений поля зрения на основе программного обеспечения. Однако структурные параметры ОКТ (толщина слоя нервных волокон сетчатки, толщина макулярной сетчатки) также были исследованы на предмет их применимости для измерения прогрессирования глаукомы.

В последнее время определение структурных изменений стало частью мониторинга глаукомы и прогнозирования прогрессирования. В некоторых исследованиях проанализировано раннее (2-летнее) прогрессирование глаукомы с помощью определения плотности перипапиллярных сосудов и толщины слоя нервных волокон сетчатки [23, 55]. Прогрессирование было более точно обнаружено с помощью анализа изменений толщины слоя нервных волокон сетчатки. Статистически значимое изменение плотности перипапиллярных капиллярных сосудов было обнаружено в 17 % исследуемых глаз, и в половине случаев это соответствовало изменениям толщины слоя нервных волокон сетчатки [24].

Важно отметить, что, в отличие от структурных параметров ОКТ, которые не находятся под влиянием физиологической регуляции, плотность сосудов отражает изменения внутриглазного давления, состояние системной перфузии, глаукомную сосудистую дисрегуляцию, оксигенацию сетчатки и гиперкапнию. Таким образом, показатели плотности сосудов менее стабильны, чем параметры толщины слоя нервных волокон сетчатки. В связи с этим не следует ожидать наличия простой для понимания картины прогрессирования плотности сосудов, когда постепенные изменения перфузии, связанные с глаукомой, невелики.

В другом исследовании было оценено потенциальное влияние задержки дыхания на измерение плотности сосудов с использованием стандартизированной и экстремальной формы задержки дыхания, пробы Вальсальвы [24]. Задержка дыхания и проба Вальсальвы, действительно, влияют на перфузию сетчатки. Из-за повышенного интраорбитального давления венозный отток глаза уменьшается и, как следствие, перфузия сетчатки временно снижается. Поскольку измерения плотности сосудов требуют много времени (получение изображения для перипапиллярных измерений может занять до 16 сек.), необходимо учитывать снижение капиллярной перфузии в слое нервных волокон сетчатки. Однако результаты ясно показали, что проба Вальсальвы не влияет на полученные значения плотности перипапиллярных сосудов при проведении ОСТ-А. Этот результат не означает, что задержка дыхания не влияет на глазной кровоток, но он ясно показывает, что с программным обеспечением SSADA замедление движения эритроцитов не влияет на измеренную плотность сосудов, пока эритроциты продолжают двигаться в капиллярах перипапиллярного слоя нервных волокон сетчатки.

Результаты, полученные с помощью одной версии программного обеспечения или оборудования, могут быть недействительны для новых версий, которые обычно превосходят предыдущие. Таким образом, в настоящее время невозможно принять окончательное решение о пригодности использования различных параметров ОСТ-А для измерения прогрессирования ПОУГ или перехода глазной гипертензии в глаукому, их диагностической ценности при перепериметрической стадии глаукомы или их полезности в качестве индикаторов сохранения поля зрения после вмешательств по снижению внутриглазного давления. Однако эти ограничения временные. В ближайшие годы ОСТ-А останется одной из самых интересных областей клинических исследований, которая заслуживает внимания как специалистов по глаукоме, так и врачей общей практики, лечащих пациентов с глаукомой.

С тех пор как в 2016 году начали использовать ОСТ-А, появилось значительное количество литературы и доказательств, указывающих на то, как показатели ОСТ-А могут играть роль в диагностике и определении стадий некоторых сосудистых заболеваний сетчатки и прогнозировании прогрессирования заболевания, а также в оценке эффективности лечения. Однако, учитывая сложность трехмерной информации, получаемой с помощью ОСТ-А, возрастающее количество получаемых данных, классификация и анализ могут представлять собой трудоемкую задачу и, следовательно, делают широкое применение ОСТ-А для диагностики ПОУГ довольно сложным. В последние годы модели на основе DL были внедрены при ОСТ-А для дальнейшей реализации его потенциала в контроле качества изображений, сегментации и классификации. Тем не менее следует отметить, что почти все исследования еще находятся на стадии «доказательства концепции» без оценки в реальных условиях. Кроме того, существуют важные проблемы как в клинической, так и в технической области, которые следует дополнительно рассмотреть и оценить перед использованием ОКТ-А в реальных клинических условиях.

С клинической точки зрения необходима, в первую очередь, стандартизация номенклатуры показателей

ОКТ-А. Хотя количественные показатели ОКТ-А могут предоставлять важную клиническую информацию, разнообразные термины, используемые в текущей литературе, могут быть по-разному обозначены и даже вводить в заблуждение. Например, различные термины были представлены для количественной оценки состояния перфузии сетчатки: плотность сосудистой перфузии, плотность сосудов, процент площади, занятой перфузируемыми бинаризованными сосудами [56], и плотность сосудов [57]. Кроме того, показатели ОКТ-А не используются единообразно на всех устройствах. Взяв в качестве примера измерение площади FAZ, Zeiss Angioplex предлагает анализ параметров FAZ, таких как округлость, размер и площадь, в то время как Optovue позволяет проводить оценку по-другому, включая площадь FAZ, периметр и AI/FD (индекс округлости/FD-300 (плотность сосудов в 300 мкм от фовеа)) [58].

Более того, различные стратегии сегментации сетчатки обуславливают еще большую неоднородность, поскольку некоторые устройства определяют середину внутреннего ядерного слоя (например, Optovue), в то время как другие используют верхнюю часть внутреннего ядерного слоя (например, Topcon) в качестве границы для сегментации DCP. Все это делает сравнение данных ОСТ-А при использовании различных устройств невозможным. Все больше усилий направлено на стандартизацию международной номенклатуры ОСТ-А [59, 60]. В результате это позволит выработать алгоритмы исследований на основе ОСТ-А для использования как в клинических, так и в научных исследованиях [61, 62].

Перспективы в отношении ОКТ-А при диагностике глаукомы с использованием искусственного интеллекта с прогнозированием структурных и функциональных особенностей на основе определения ранних сосудистых изменений обеспечат возможности для раннего выявления пациентов с высоким риском появления и быстрого прогрессирования глаукомы [63]. Потенциально ОКТ-А может стать важным исследованием в комплексной диагностике глаукомы.

УЧАСТИЕ АВТОРОВ:

Юсеф Ю. — концепция, редактирование текста;
Казарян Э.Э. — написание текста, составление библиографии.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Huang D, Swanson EA, Lin CP Optical coherencetomography. Science. 1991;254:1178–1181. doi: 10.1126/science.1957169.
- Ly A, Phu J, Katalinic P. An evidence-based approach to the routine use of optical coherence tomography. Clin Exp Optom. 2019;102:242–259. doi: 10.1111/cxo.12847.
- Pichi F, Invernizzi A, Tucker WR. Optical coherence tomography diagnostic signs in posterior uveitis. Prog Retin Eye Res. 2020;75:100797. doi: 10.1016/j.preteyeres.2019.100797.
- Spaide RF, Fujimoto JG, Waheed NK Optical coherencetomography angiography. Prog Retin Eye Res. 2018;64:1–55. doi: 10.1016/j.preteyeres.2017.11.003.
- Kashani AH, Chen CL, Gahm JK Optical coherence tomography angiography: a comprehensive review of current methods and clinical applications. Prog Retin Eye Res. 2017;60:66–100. doi: 10.1016/j.preteyeres.2017.07.002.
- Ferrara D, Waheed NK, Duker JS. Investigating the choriocapillaris and choroidal vasculature with new optical coherence tomography technologies. Prog Retin Eye Res. 2016;52:130–155. doi: 10.1016/j.preteyeres.2015.10.002.
- Ho S, Ly A, Ohno-Matsui K. Diagnostic accuracy of OCTA and OCT for myopic choroidal neovascularisation: a systematic review. Clinical and experimental optometry 495 and meta-analysis. Eye (Lond). 2023;37:21–29. doi: 10.1038/s41433-022-02227-8.
- Ong CJT, Wong MYZ, Cheong KX. Optical coherence tomography angiography in retinal vascular disorders. Diagnostics (Basel). 2023;13:1620. doi: 10.3390/diagnostics13091620.
- Kornblau IS, El-Annan JF. Adverse reactions to fluorescein angiography: a comprehensive review of the literature. Surv Ophthalmol. 2019;64:679–693. doi: 10.1016/j.survophthal.2019.02.004.
- Wang RK, Jacques SL, Ma Z, Hurst S, Hanson SR, Gruber A. Three dimensional optical angiography. Opt Express. 2007;15(7):4083–4097. doi: 10.1364/oe.15.004083.
- Zhang A, Zhang Q, Chen CL, Wang RK. Methods and algorithms for optical coherence tomography based angiography: a review and comparison. J Biomed Opt. 2015;20(10):100901.
- Fingler J, Schwartz D, Yang C, Fraser SE. Mobility and transverse flow visualization using phase variance contrast with spectral domain optical coherence tomography. Opt Express. 2007;15(20):12636–12653. doi: 10.1364/oe.15.012636.

13. Jia Y, Wei E, Wang X, Zhang X, Morrison JC, Parikh M, Lombardi LH, Gattley DM, Armour RL, Edmunds B. Optical coherence tomography angiography of optic disc perfusion in glaucoma. *Ophthalmology*. 2014 Jul;121(7):1322–1332. doi: 10.1016/j.ophtha.2014.01.021.
14. Lin TP, Wang YM, Ho K, Wong CYK, Chan PP, Wong MOM, Chan NCY, Tang F, Lam A, Leung DYL, Wong TY, Cheng CY, Cheung CY, Tham CC. Global assessment of arteriolar, venular and capillary changes in normal tension glaucoma. *Sci Rep*. 2020 Nov 5;10(1):19222. doi: 10.1038/s41598-020-75784-1.
15. Tham YC, Li X, Wong TY, Quigley HA, Aung T, Cheng CY. Global prevalence of glaucoma and projections of glaucoma burden through 2040: a systematic review and meta-analysis. *Ophthalmology*. 2014 Nov;121(11):2081–2090. doi: 10.1016/j.ophtha.2014.05.013.
16. Flammer J, Mozaffarieh M. Autoregulation, a balancing act between supply and demand. *Can J Ophthalmol*. 2008 Jun;43(3):317–321. doi: 10.3129/08-056.
17. Lee EJ, Lee KM, Lee SH, Kim TW. OCT Angiography of the Peripapillary Retina in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016 Nov 1;57(14):6265–6270. doi: 10.1167/iovs.16-20287.
18. Holló G. Optical Coherence Tomography Angiography in Glaucoma. *Turk J Ophthalmol*. 2018 Aug;48(4):196–201. doi: 10.4274/tjo.53179.
19. Tan ACS, Tan GS, Denniston AK, Keane PA, Ang M, Milea D, Chakravarthy U, Cheung CMG. An overview of the clinical applications of optical coherence tomography angiography. *Eye (Lond)*. 2018 Feb;32(2):262–286. doi: 10.1038/eye.2017.181.
20. Jia Y, Morrison JC, Tokayer J, Tan O, Lombardi L, Baumann B, Lu CD, Choi W, Fujimoto JG, Huang D. Quantitative OCT angiography of optic nerve head blood flow. *Biomed Opt Express*. 2012;3:127–137.
21. Holló G. Intrastress and Between-Visit Variability of Sector Peripapillary Angiography Vessel Density Values Measured with the AngiVue Optical Coherence Tomograph in Different Retinal Layers in Ocular Hypertension and Glaucoma. *PLoS One*. 2016 Aug 18;11(8):e0161631. doi: 10.1371/journal.pone.0161631.
22. Holló G. Vessel density calculated from OCT angiography in 3 peripapillary sectors in normal, ocular hypertensive, and glaucoma eyes. *Eur J Ophthalmol*. 2016 Apr 12;26(3):e42–45. doi: 10.5301/ejo.5000717.
23. Holló G. Valsalva Maneuver and Peripapillary OCT Angiography Vessel Density. *J Glaucoma*. 2018 Jul;27(7):e133–e136. doi: 10.1097/IJG.0000000000000983.
24. Holló G. Influence of Removing the Large Retinal Vessels-related Effect on Peripapillary Vessel Density Progression Analysis in Glaucoma. *J Glaucoma*. 2018 Aug;27(8):e137–e139. doi: 10.1097/IJG.0000000000000990.
25. Venugopal JP, Rao HL, Weinreb RN, Pradhan ZS, Dasari S, Riyazuddin M, Puttaiah NK, Rao DAS, Devi S, Mansouri K, Webers CA. Repeatability of vessel density measurements of optical coherence tomography angiography in normal and glaucoma eyes. *Br J Ophthalmol*. 2018 Mar;102(3):352–357. doi: 10.1136/bjophthalmol-2017-310637.
26. Manalastas PIC, Zangwill LM, Saunders LJ, Mansouri K, Belghith A, Suh MH, Yarmohammadi A, Penteado RC, Akagi T, Shoji T, Weinreb RN. Reproducibility of Optical Coherence Tomography Angiography Macular and Optic Nerve Head Vascular Density in Glaucoma and Healthy Eyes. *J Glaucoma*. 2017 Oct;26(10):851–859. doi: 10.1097/IJG.0000000000000768.
27. Geyman LS, Garg RA, Suwan Y, Trivedi V, Krawitz BD, Mo S, Pinhas A, Tantraworasin A, Chui TYP, Ritch R, Rosen RB. Peripapillary perfused capillary density in primary open-angle glaucoma across disease stage: an optical coherence tomography angiography study. *Br J Ophthalmol*. 2017 Sep;101(9):1261–1268. doi: 10.1136/bjophthalmol-2016-309642.
28. Lommatzsch C, Rothaus K, Koch JM, Heinz C, Grisanti S. OCTA vessel density changes in the macular zone in glaucomatous eyes. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2018 Aug;256(8):1499–1508. doi: 10.1007/s00417-018-3965-1.
29. Leung CK, Lam S, Weinreb RN, et al. Retinal nerve fiber layer imaging with spectral-domain optical coherence tomography: analysis of the retinal nerve fiber layer map for glaucoma detection. *Ophthalmology*. 2010;117:1684–1691. doi: 10.1016/j.ophtha.2010.01.026.
30. Курешева НИ, Никитина АД. Оптическая когерентная томография и оптическая когерентная томография-ангиография в определении прогрессирования глаукомы. Часть 1. Методы исследования, вариативность показателей и роль возрастных изменений. *Вестник офтальмологии* 2023;139(1):122–128. Kurysheva NI, Nikitina AD. Optical coherence tomography and optical coherence tomography angiography for detecting glaucoma progression. Part 1. Study methods, measurement variability and the role of age-related changes. *Annals of Ophthalmology*. 2023;139(1):122–128 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma202313901122.
31. Yarmohammadi A, Zangwill LM, Diniz-Filho A, Suh MH, Manalastas PI, Fatehee N, Yousefi S, Belghith A, Saunders LJ, Medeiros FA, Huang D, Weinreb RN. Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density in Healthy, Glaucoma Suspect, and Glaucoma Eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016 Jul 1;57(9):OCT451–459. doi: 10.1167/iovs.15-18944.
32. Rao HL, Kadambi SV, Weinreb RN, Puttaiah NK, Pradhan ZS, Rao DAS, Kumar RS, Webers CAB, Shetty R. Diagnostic ability of peripapillary vessel density measurements of optical coherence tomography angiography in primary open-angle and angle-closure glaucoma. *Br J Ophthalmol*. 2017 Aug;101(8):1066–1070. doi: 10.1136/bjophthalmol-2016-309377.
33. Rao HL, Dasari S, Riyazuddin M, Puttaiah NK, Pradhan ZS, Weinreb RN, Mansouri K, Webers CAB. Diagnostic Ability and Structure-function Relationship of Peripapillary Optical Microangiography Measurements in Glaucoma. *J Glaucoma*. 2018 Mar;27(3):219–226. doi: 10.1097/IJG.0000000000000873.
34. Rao HL, Pradhan ZS, Weinreb RN, Riyazuddin M, Dasari S, Venugopal JP, Puttaiah NK, Rao DAS, Devi S, Mansouri K, Webers CAB. Vessel Density and Structural Measurements of Optical Coherence Tomography in Primary Angle Closure and Primary Angle Closure Glaucoma. *Am J Ophthalmol*. 2017 May;177:106–115. doi: 10.1016/j.ajo.2017.02.020.
35. Wan KH, Lam AKN, Leung CK. Optical Coherence Tomography Angiography Compared With Optical Coherence Tomography Macular Measurements for Detection of Glaucoma. *JAMA Ophthalmol*. 2018 Aug 1;136(8):866–874. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2018.1627.
36. Richter GM, Madi I, Chu Z, Burkemper B, Chang R, Zaman A, Sylvester B, Reznik A, Kashani A, Wang RK, Varma R. Structural and Functional Associations of Macular Microcirculation in the Ganglion Cell-Inner Plexiform Layer in Glaucoma Using Optical Coherence Tomography Angiography. *J Glaucoma*. 2018 Mar;27(3):281–290. doi: 10.1097/IJG.0000000000000888.
37. Курешева НИ, Печенкина АА, Гончарова АС. Методы обследования больных глаукомой в период пандемии COVID-19. *Вестник офтальмологии*. 2021;137(2):75–83. Kurysheva NI, Pechenkina AA, Goncharova AS. Methods of examination of patients with glaucoma during the COVID-19 pandemic. *Annales of ophthalmology*. 2021;137(2):75–83 (In Russ.). doi: 10.17116/oftalma202113702175.
38. Suh MH, Zangwill LM, Manalastas PI, Belghith A, Yarmohammadi A, Medeiros FA, Diniz-Filho A, Saunders LJ, Yousefi S, Weinreb RN. Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density in Glaucomatous Eyes with Focal Lamina Cribrosa Defects. *Ophthalmology*. 2016 Nov;123(11):2309–2317. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.07.023.
39. Holló G. Relationship between optical coherence tomography sector peripapillary angioflow-density and Octopus visual field cluster mean defect values. *PLoS One*. 2017 Feb 2;12(2):e0171541. doi: 10.1371/journal.pone.0171541.
40. Rao HL, Pradhan ZS, Weinreb RN, Dasari S, Riyazuddin M, Raveendran S, Puttaiah NK, Venugopal JP, Rao DAS, Devi S, Mansouri K, Webers CAB. Relationship of Optic Nerve Structure and Function to Peripapillary Vessel Density Measurements of Optical Coherence Tomography Angiography in Glaucoma. *J Glaucoma*. 2017 Jun;26(6):548–554. doi: 10.1097/IJG.0000000000000670.
41. Yarmohammadi A, Zangwill LM, Diniz-Filho A, Suh MH, Yousefi S, Saunders LJ, Belghith A, Manalastas PI, Medeiros FA, Weinreb RN. Relationship between Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density and Severity of Visual Field Loss in Glaucoma. *Ophthalmology*. 2016 Dec;123(12):2498–2508. doi: 10.1016/j.ophtha.2016.08.041.
42. Ангелов Б, Петрова К. Оптическая когерентная томография и ее роль в диагностике глаукомы при гипертензии, периферической и периметрической глаукомы. *Офтальмология*. 2015;12(1):46–56. Angelov B, Petrova K. Optical coherence tomography and its role in the diagnosis of ocular hypertension, preperimetric and perimetric glaucoma. *Ophthalmology in Russia*. 2015;12(1):46–56 (In Russ.). doi: 10.1808/1816-5095-2015-1-46-5643.
43. Grieshaber MC, Mozaffarieh M, Flammer J. What is the link between vascular dysregulation and glaucoma? *Surv Ophthalmol*. 2007 Nov;52 Suppl 2:S144–154. doi: 10.1016/j.survophthal.2007.08.010.
44. Holló G. Relationship Between OCT Angiography Temporal Peripapillary Vessel Density and Octopus Perimeter Paracentral Cluster Mean Defect. *J Glaucoma*. 2017 May;26(5):397–402. doi: 10.1097/IJG.0000000000000630.
45. Penteado RC, Zangwill LM, Daga FB, Saunders LJ, Manalastas PIC, Shoji T, Akagi T, Christopher M, Yarmohammadi A, Moghimi S, Weinreb RN. Optical Coherence Tomography Angiography Macular Vascular Density Measurements and the Central 10-2 Visual Field in Glaucoma. *J Glaucoma*. 2018 Jun;27(6):481–489. doi: 10.1097/IJG.0000000000000964.
46. Shin JW, Kwon J, Lee J, Kook MS. Relationship between vessel density and visual field sensitivity in glaucomatous eyes with high myopia. *Br J Ophthalmol*. 2018 Jun 1;bjophthalmol-2018-312085. doi: 10.1136/bjophthalmol-2018-312085.
47. Suwan Y, Fard MA, Geyman LS, Tantraworasin A, Chui TY, Rosen RB, Ritch R. Association of Myopia With Peripapillary Perfusion Capillary Density in Patients With Glaucoma: An Optical Coherence Tomography Angiography Study. *JAMA Ophthalmol*. 2018 May 1;136(5):507–513. doi: 10.1001/jamaophthalmol.2018.0776.
48. Sung MS, Lee TH, Heo H, Park SW. Association Between Optic Nerve Head Deformation and Retinal Microvasculature in High Myopia. *Am J Ophthalmol*. 2018 Apr;188:81–90. doi: 10.1016/j.ajo.2018.01.033.
49. Schwab C, Glatz W, Schmidt B, Lindner E, Oettl K, Riedl R, Wedrich A, Ivastinovic D, Velikay-Parel M, Mossboeck G. Prevalence of posterior vitreous detachment in glaucoma patients and controls. *Acta Ophthalmol*. 2017 May;95(3):276–280. doi: 10.1111/aos.13339.
50. Ghasemi Falavarjani K, Al-Sheikh M, Akil H, Sadda SR. Image artefacts in swept-source optical coherence tomography angiography. *Br J Ophthalmol*. 2017 Jan;101(5):564–568. doi: 10.1136/bjophthalmol-2016-309104.
51. Holló G. Optical coherence tomography angiography and glaucoma. In: Chow DR, de Oliveira RPC, eds. *OCT angiography*. New York: Thieme Medical Publishers Inc; 2017:112–126.
52. Holló G. Influence of Large Intraocular Pressure Reduction on Peripapillary OCT Vessel Density in Ocular Hypertensive and Glaucoma Eyes. *J Glaucoma*. 2017 Jan;26(1):e7–e10. doi: 10.1097/IJG.0000000000000527.
53. Shin JW, Sung KR, Uhm KB, Jo J, Moon Y, Song MK, Song JY. Peripapillary Microvascular Improvement and Lamina Cribrosa Depth Reduction After Trabeculectomy in Primary Open-Angle Glaucoma. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2017 Nov 1;58(13):5993–5999. doi: 10.1167/iovs.17-22787.
54. Alnawaiseh M, Müller V, Lahme L, Merté RL, Eter N. Changes in Flow Density Measured Using Optical Coherence Tomography Angiography after

- istEnt Insertion in Combination with Phacoemulsification in Patients with Open-Angle Glaucoma. *J Ophthalmol*. 2018 Jan 31;2018:2890357. doi: 10.1155/2018/2890357.
55. Holló G. Comparison of Peripapillary OCT Angiography Vessel Density and Retinal Nerve Fiber Layer Thickness Measurements for Their Ability to Detect Progression in Glaucoma. *J Glaucoma*. 2018 Mar;27(3):302–305. doi: 10.1097/IJG.0000000000000868.
56. Hsiao CC, Hsu HM, Yang CM, Yang CH. Correlation of retinal vascular perfusion density with dark adaptation in diabetic retinopathy. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2019 Jul;257(7):1401–1410. doi: 10.1007/s00417-019-04321-2.
57. Lommatzsch C, Rothaus K, Koch JM, Heinz C, Grisanti S. OCTA vessel density changes in the macular zone in glaucomatous eyes. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*. 2018 Aug;256(8):1499–1508. doi: 10.1007/s00417-018-3965-1.
58. Munk MR, Giannakaki-Zimmermann H, Berger L, Huf W, Ebner A, Wolf S, Zinkernagel MS. OCT-angiography: A qualitative and quantitative comparison of 4 OCT-A devices. *PLoS One*. 2017 May 10;12(5):e0177059. doi: 10.1371/journal.pone.0177059.
59. Munk MR, Kashani AH, Tadayoni R, Korobelnik JE, Wolf S, Pichi F, Tian M. Standardization of OCT Angiography Nomenclature in Retinal Vascular Diseases: First Survey Results. *Ophthalmol Retina*. 2021 Oct;5(10):981–990. doi: 10.1016/j.oret.2020.12.022.
60. Pichi F, Salas EC, D de Smet M, Gupta V, Zierhut M, Munk MR. Standardisation of optical coherence tomography angiography nomenclature in uveitis: first survey results. *Br J Ophthalmol*. 2021 Jul;105(7):941–947. doi: 10.1136/bjophthalmol-2020-316881.
61. Kalloniatis M, Wang H, Phu J, Tong J, Armitage J. Optical coherence tomography angiography in the diagnosis of ocular disease. *Clin Exp Optom*. 2024 Jul;107(5):482–498. doi: 10.1080/08164622.2024.2323603.
62. Yang D, Ran AR, Nguyen TX, Lin TPH, Chen H, Lai TYY, Tham CC, Cheung CY. Deep Learning in Optical Coherence Tomography Angiography: Current Progress, Challenges, and Future Directions. *Diagnostics (Basel)*. 2023 Jan 16;13(2):326. doi: 10.3390/diagnostics13020326.
63. Braun M, Saini C, Sun JA, Shen LQ. The Role of Optical Coherence Tomography Angiography in Glaucoma. *Semin Ophthalmol*. 2024 Aug;39(6):412–423. doi: 10.1080/08820538.2024.2343049.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней им. М.М. Краснова»
Юсеф Наим Юсеф
доктор медицинских наук, директор
ул. Россолимо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-4043-456X>

ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней им. М.М. Краснова»
Казарян Элина Эдуардовна
доктор медицинских наук, старший научный сотрудник отдела современных методов лечения в офтальмологии
ул. Россолимо, 11а, б, Москва, 119021, Российская Федерация
<https://orcid.org/0000-0003-0391-4695>

ABOUT THE AUTHORS

M.M. Krasnov Research Institute of Eye Diseases
Yusef Naim Y.
MD, Head of Research Institute of Eye Diseases
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-4043-456X>

M.M. Krasnov Research Institute of Eye Diseases
Kazaryan Elina E.
MD, Senior Research Officer of the Modern Treatment Methods in Ophthalmology Department
Rossolimo str., 11A, B, Moscow, 119021, Russian Federation
<https://orcid.org/0000-0003-0391-4695>