Вестник офтальмологии
2023, Т. 139, №5, с. 113-120
https://doi.org/10.17116/oftalma2023139051113

Russian Annals of Ophthalmology =
Vestnik Oftal'mologii 2023, vol. 139, №5, pp. 113-120
https://doi.org/10.17116/oftalma2023139051113

Интраоперационная оптическая когерентная томография в витреоретинальной хирургии

© Ю.Н. ЮСЕФ[1, 2], Д.В. ПЕТРАЧКОВ[1]

[1]ФГБНУ «Научно-исследовательский институт глазных болезней им. М.М. Краснова» Минобрнауки России, Москва, Россия;
[2]ФГАОУ ВО «Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова» Минздрава России (Сеченовский университет), Москва, Россия

РЕЗЮМЕ

Данный обзор литературы посвящен использованию интраоперационной оптической когерентной томографии (ИОКТ) в витреоретинальной хирургии. Рассмотрены исторические аспекты развития данной технологии — от портативных устройств до интегрированных в хирургический микроскоп оптических когерентных томографов. Внимание уделено не только преимуществам, рассмотрены также ограничения и ряд недостатков этой технологии, которые в настоящее время ввиду накопленного опыта становятся очевидными. В обзоре также рассмотрены перспективы развития ИОКТ и возможные пути решения проблем.

Кроме того, приведены и систематизированы клинические находки, которые можно выявить при помощи ИОКТ при таких заболеваниях, как регматогенная отслойка сетчатки, осложнения пролиферативной диабетической ретинопатии, макулярная патология и др.

Ключевые слова: *интраоперационная оптическая когерентная томография, витреоретинальная хирургия, регматогенная отслойка сетчатки, пролиферативная диабетическая ретинопатия, эпимакулярный фиброз, сквозной макулярный разрыв.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:
Юсеф Ю.Н. — e-mail: 9695949@bk.ru; https://orcid.org/0000-0003-4043-456X
Петрачков Д.В. — e-mail: petrachkov@doctor.com; https://orcid.org/0000-0003-4757-5584
Автор ответственный за переписку: Петрачков Денис Валериевич — e-mail: petrachkov@doctor.com

КАК ЦИТИРОВАТЬ:
Юсеф Ю.Н., Петрачков Д.В. Интраоперационная оптическая когерентная томография в витреоретинальной хирургии. *Вестник офтальмологии*. 2023;139(5):113–120. https://doi.org/10.17116/oftalma2023139051113

Intraoperative optical coherence tomography in vitreoretinal surgery

© YU.N. YUSEF[1, 2], D.V. PETRACHKOV[1]

[1]Krasnov Research Institute of Eye Diseases, Moscow, Russia;
[2]I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenov University), Moscow, Russia

ABSTRACT

This article reviews literature on the use of intraoperative optical coherence tomography (iOCT) in vitreoretinal surgery, describes the historical aspects of the development of this technology from portable devices to optical coherence tomographs integrated into the surgical microscope, considers the advantages, limitations and disadvantages of this technology, which are now becoming obvious due to the accumulated experience. The review also explores the prospects for the development of iOCT and possible ways to solve its problems.

In addition, the review presents and systematizes clinical findings that can be revealed with iOCT in such diseases as rhegmatogenous retinal detachment, complications of proliferative diabetic retinopathy, macular pathology, etc.

Keywords: *intraoperative optical coherence tomography, vitreoretinal surgery, rhegmatogenous retinal detachment, proliferative diabetic retinopathy, epimacular fibrosis, penetrating macular hole.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:
Yusef Yu.N. — https://orcid.org/0000-0003-4043-456X
Petrachkov D.V. — https://orcid.org/0000-0003-4757-5584
Corresponding author: Petrachkov D.V. e-mail: petrachkov@doctor.com

TO CITE THIS ARTICLE:
Yusef YuN, Petrachkov DV. Intraoperative optical coherence tomography in vitreoretinal surgery. *Russian Annals of Ophthalmology = Vestnik oftal'mologii*. 2023;139(5):113–120. (In Russ.). https://doi.org/10.17116/oftalma2023139051113

Оптическая когерентная томография (ОКТ) является неинвазивным методом прижизненной визуализации, в котором используется принцип низкокогерентной интерферометрии для получения изображения среза сетчатки [1—4].

Исторические аспекты развития ОКТ

Впервые возможность получения срезов сетчатки при помощи ОКТ была продемонстрирована группой исследователей, возглавляемой J.G. Fujimoto, в 1991 г. Однако первые прототипы и коммерческие устройства имели низкую разрешающую способность и невысокую скорость сканирования, что наряду с громоздкостью устройств препятствовало их использованию в хирургии. Современные приборы для ОКТ имеют высокую разрешающую способность и позволяют в режиме реального времени *in vivo* бесконтактным способом получить томографические срезы сетчатки и зрительного нерва.

В 2009 г. P.N. Dayani и соавторы представили портативное устройство для интраоперационной ОКТ-диагностики при витреоретинальных операциях. Используя ручной зонд, ученые получили изображения сетчатки во время операций при эпимакулярном фиброзе (ЭМФ), сквозном макулярном разрыве (СМР) и витреомакулярном тракционном синдроме [5, 6]. Впервые в режиме реального времени удалось визуализировать взаимоотношение микроархитектоники тканей глаза и инструментов, которые невозможно обнаружить с помощью традиционной микроскопии [5, 7]. При этом имелся существенный недостаток — значительная потеря времени, связанная с необходимостью смены приборов (микроскопа и портативного томографа), что требовало определенного времени на настройку приборов. Кроме того, такой подход имел другие ограничения, например увеличение времени операции вследствие ожидания получения изображений, а также артефакты движения, проблемы со стабилизацией изображения и длительный период обучения [5, 6].

Одним из направлений в совершенствовании интраоперационной ОКТ (ИОКТ) стало использование игольчатых зондов, диаметр которых позволял малоинвазивно манипулировать через хирургические порты, установленные в области плоской части цилиарного тела. Так, было разработано устройство с диаметром рабочего наконечника 21 G, устройство обеспечивало скорость B-сканирования 0,5 кадра в секунду с поперечным разрешением 7,6—10,4 мкм [7]. Позднее было предложено устройство с наконечниками диаметром 23 и 25 G, диапазоном поперечного сканирования 3—4 мм, латеральным разрешением 25—35 мкм и скоростью B-сканирования 5 кадров в секунду [8]. Используя этот зонд, исследователи успешно контролировали различные интраоперационные манипуляции и визуализировали микроархитектонику сетчатки [9].

Разработка игольчатых ОКТ-зондов сделала возможным совмещение ОКТ-технологий и витреоретинальных хирургических инструментов, что позволяет получить обратную связь с кончика рабочей части инструмента, установив волоконно-оптический ОКТ-зонд вдоль или внутри рабочей трубки пинцета или витреотома. ОКТ-зонд в основном использовали в качестве одноточечного осевого измерителя с разрешением в микрометровом масштабе. Практически на основе этого была реализована система активного подавления тремора, а также обеспечена обратная связь при использовании совместной платформы роботизированной хирургии [9—11].

Следующим шагом в развитии ИОКТ был переход к устройствам, установленным на микроскоп. Первым коммерчески доступным устройством, предлагающим эту функцию, стал Bioptigen EnVisu (Leica Microsystems, Германия) [12, 13].

Первое крупномасштабное проспективное многоцентровое исследование использования портативного устройства ИОКТ в офтальмохирургической практике — PIONEER (The Prospective Intraoperative and Perioperative Ophthalmic Imaging with Optical Coherence Tomography) [12]. Данное исследование показало возможность клинического использования ИОКТ, включая оценку влияния ИОКТ на принятие решений хирургом и безопасности портативной системы, установленной на микроскопе (Bioptigen). В исследование было включено 531 наблюдение (275 и 256 случаев хирургических вмешательств на переднем и заднем сегментах глаза соответственно) с использованием ИОКТ, которую удалось выполнить в 98% случаев [12].

ИОКТ использовали в процессе различных витреоретинальных вмешательств, но наиболее распространенной операцией был пилинг эпиретинальных мембран. Подход к этой процедуре был изменен в 8% случаев на основании результатов ИОКТ. Среднее время, в течение которого операция была приостановлена для выполнения ИОКТ, составляло 4,9 мин на сеанс сканирования, и каких-либо побочных эффектов, связанных с ИОКТ, отмечено не было. Таким образом, исследование PIONEER продемонстрировало безопасность, осуществимость и хирургическую полезность системы ИОКТ [12].

Основные положительные моменты установки портативного устройства ИОКТ на микроскоп связаны с высокой стабильностью сканирования и возможностью осуществления навигации при помощи педали микроскопа. Стабилизация микроскопа значительно ускорила получение изображений, улучшила качество сканов и повысила удобство использования. Однако сохранились потери времени операции из-за перехода между фокусировкой микроскопа и ИОКТ, что затрудняло интраопераци-

онный контроль хирургии в режиме реального времени [13—16].

С целью устранения вышеперечисленных недостатков ОКТ-устройств были разработаны интегрированные в микроскоп системы, которые обеспечивали обратную связь в режиме реального времени и позволяли контролировать анатомические изменения, происходящие во время хирургических манипуляций [13, 15, 16]. Интегрированная ИОКТ показала себя эффективным методом мониторинга в хирургии переднего и заднего сегмента глаза [17].

Второе большое исследование получило название DISCOVER (The Determination of Feasibility of Intraoperative Spectral-Domain Microscope Combined/Integrated OCT Visualization during En Face Retinal and Ophthalmic Surgery), оно явилось продолжением исследования PIONEER и было начато в 2014 г. для оценки осуществимости и полезности использования интегрированной в микроскоп ИОКТ во время офтальмохирургии. DISCOVER — это моноцентровое проспективное исследование с участием нескольких хирургов. В него было включено 820 пациентов, имеющих показания к оперативному лечению изменений переднего или заднего сегмента глаза, которым в течение 3-летнего периода была выполнена ИОКТ с помощью интегрированной в микроскоп системы (Zeiss Rescan 700, Carl Zeiss, Германия; Leica EnFocus, Leica Microsystems, Германия, или исследовательский прототип, разработанный в Cole Eye Institute, США). Клинические наблюдения были задокументированы, ИОКТ проводилась хирургом в соответствии с протоколом на заранее определенных этапах операции, и каждый хирург заполнял анкету после операции, чтобы оценить результат ИОКТ [18].

Исследование DISCOVER дополнительно подтвердило клиническую полезность ИОКТ. По мнению участников исследования, метод в 60% случаев дает ценную информацию и в 29,2% случаях влияет на хирургическую тактику. Отмечено, что ИОКТ наиболее полезна во время процедуры пилинга эпиретинальных мембран [18—21].

В исследовании DISCOVER мембранопилинг был выполнен 272 пациентам (45% случаев) по различным показаниям (в основном ЭМФ, СМР, пролиферативная витреоретинопатия). Интересно, что у 35 пациентов (19,8% случаев), у которых, по мнению хирурга, эпиретинальная мембрана была удалена полностью, по данным ИОКТ были выявлены остаточные мембраны (следует отметить, что витальные красители не применялись). И напротив, в 95 случаях, в которых, по мнению хирургов, остались фрагменты мембран после пилинга, ИОКТ показала полное удаление у 38 (40,0%) пациентов, что позволило исключить ненужные хирургические манипуляции [18].

Во время отделения задней гиалоидной мембраны (ЗГМ) у 15 (15,8%) пациентов ИОКТ позволила идентифицировать наличие СМР, что потребовало пилинга внутренней пограничной мембраны (ВПМ) и газовой тампонады [18].

Кроме того, исследование DISCOVER выявило различия ИОКТ-стратегии при вмешательствах на переднем и заднем сегментах глаза. В исследовании была представлена возможность двух типов визуализации: первый — выведение изображения в высоком разрешении на экран монитора, второй — технология heads-up display для отображения ИОКТ-изображений в окулярах микроскопа [18, 22].

В процессе хирургического вмешательства на переднем сегменте глаза участники исследования предпочитали ИОКТ в режиме реального времени посредством heads-up display, что позволяло проводить манипуляции под контролем ИОКТ. Большую часть оперативных вмешательств составила сквозная кератопластика, в процессе которой большинство хирургических манипуляций выполняют «под» интересующими тканями, что приводит к минимальному затенению от хирургических инструментов и позволяет получать непрерывную визуализацию. В процессе хирургии заднего сегмента металлические инструменты, расположенные над поверхностью сетчатки, приводят к значительному затенению. Исходя из этого, витреоретинальные хирурги предпочитали статическую визуализацию на экране монитора (в 69% случаев). Кроме того, при таком типе хирургии требуется ИОКТ максимально высокого разрешения для визуализации тонкой архитектоники сетчатки, которую не может дать инжекция в окуляры микроскопа [22].

С учетом вышеперечисленных проблем логичным шагом была интеграция ИОКТ с 3D-системами визуализации (стереомонитор, шлем виртуальной реальности и т.д.), которая позволила совместить достоинство высокоразрешающих мониторов и одновременное наблюдение за хирургическим полем и данными ИОКТ в режиме реального времени. Иногда такую компоновку называют 4D-визуализацией, имея в виду, что к пространственному восприятию хирургического поля дополнительно добавляется ИОКТ. Однако чаще под технологией 4D-хирургической визуализации понимают четырехмерную ИОКТ — объемная ОКТ в режиме реального времени может отображать до 10 объемных сканов в секунду [23—25]. Помимо этого 4D-ИОКТ позволяет хирургу точно оценивать расстояние инструментов от поверхности интересующей ткани и контролировать взаимодействие между инструментами и сетчаткой/преретинальными мембранами практически в реальном времени [24, 26].

Визуализация 4D-ИОКТ была применена в процессе 48 операций на глазах человека, и было продемонстрировано, что она обеспечивает визуализацию зоны интереса в соответствии с предоперационным диагнозом в 93% случаев на сетчатке и в 100% случаев на структурах переднего сегмента глаза [23, 25].

Крайне важным для технологии ИОКТ, интегрированной в микроскоп, является выведение изображения и управление ИОКТ, особенно при получении данных в режиме реального времени. В настоящее время этот принцип реализован в нескольких вариантах выведения изображения [1, 9, 23, 26, 27].

Преимущества и недостатки основных технологий ИОКТ

Выведение на отдельный дисплей:

— преимущества — возможность детально рассмотреть ОКТ-картину с высоким разрешением;

— недостаток — отсутствие возможности получать данные ИОКТ в онлайн-режиме, что требует остановки операции; при этом необходимо отметить, что через год использования ОКТ-картины потребность наблюдения ОКТ «вживую» снижается с 45 до 20% (что объясняли прекращением wow-эффекта).

Heads-up display:

— преимущества — возможность наблюдения одновременно как за операционным полем, так и за ОКТ-картиной;

— недостатки — изображение в окулярах не позволяет получить высокое разрешение; кроме того, изображение в окулярах имеет определенную яркость и поэтому засвечивает все хирургическое поле, что уменьшает его видимость.

Интеграция ОКТ изображения с 3D-визуализирующими системами (стереомонитор, шлем виртуальной реальности). В настоящее время является наиболее перспективной и позволяет хирургу получать ИОКТ-изображение в высоком разрешении в режиме реального времени.

Клиническое применение ИОКТ в витреоретинальной хирургии

Макулярная патология

Хирургия ЭМФ является одним из наиболее частых показаний к витреоретинальной хирургии и требует высокого уровня визуализации как эпиретинальных мембран, так и поверхности сетчатки. C. Leisser и соавторы в проспективном исследовании с использованием ИОКТ, интегрированной в операционный микроскоп, во время процедуры пилинга мембраны показали способность ИОКТ улучшать визуализацию нижележащих мембран и фиксировать тонкие изменения архитектоники после пилинга [28].

Исследование C.I. Falkner-Radler и соавторов показало, что пилинг мембраны с обратной ИОКТ-связью можно проводить без использования адъювантных красителей в 31% случаев, тем самым сокращая время операции и риск изменений сетчатки из-за использования этих красителей [29]. Возможность удаления эпиретинальных мембран без окрашивания с ИОКТ-контролем в последующем была подтверждена и в других исследованиях [30, 31].

Влияние результатов ИОКТ на принятие решений хирургом при ЭМФ было продемонстрировано во многих исследованиях [1, 13, 18—21, 28, 31, 32]. Визуализация ЭМФ в некоторых случаях довольно затруднительна, что приводит к неполному удалению мембраны. Несколько исследований показали несоответствие между изображением с операционного микроскопа и данными ИОКТ. В 12—19% случаев ИОКТ выявила субклинические остаточные мембраны, что потребовало дополнительного пилинга мембраны [12, 18].

В исследовании DISCOVER ИОКТ-изображения были получены в 149 случаях (98,6%); сбои в работе микроскопа и программного обеспечения ограничили визуализацию в двух случаях. Хирурги предпочли статическую обратную связь (на отдельном мониторе) в процессе 102 (68,9%) операций, обратную связь в режиме реального времени (инжекция изображения в окуляры микроскопа) — в 37 (25%), комбинацию — в одном случае (0,7%). В целом хирурги сообщили, что ИОКТ обеспечила ценную обратную связь при проведении 111 (75%) операций при ЭМФ [33].

ИОКТ при ЭМФ может быть полезна в следующих клинических ситуациях [1, 31—33]:

— подтверждение полного пилинга;

— идентификация края мембраны для начала пилинга;

— подтверждение отсутствия СМР;

— выявление субклинической отслойки сетчатки;

— выявление субретинальной жидкости (СРЖ) со СМР.

ИОКТ позволила изучить анатомические изменения, происходящие во время операции [10, 13, 34]. Исследования показали, что удаление ВПМ во время операции при СМР может вызвать изменения геометрии отверстия и внешней архитектоники сетчатки [34]. В частности, субретинальная гипорефлективность между эллипсоидной зоной и пигментным эпителием сетчатки наблюдалась на ИОКТ в различные моменты хирургического вмешательства [34]. Предварительные исследования показали, что расширение эллипсоидной зоны до высоты пигментного эпителия сетчатки после пилинга ВПМ может быть связано со скоростью анатомической нормализации после хирургического восстановления, и было показано, что оно коррелирует с восстановлением зрения [34]. Эти изменения, в свою очередь, могут иметь значение для анатомического успеха, определяемого как первичное закрытие макулярного отверстия [34].

В контролируемом исследовании (95 случаев СМР) было показано, что применение ИОКТ

возможно при пилинге ВПМ без использования витальных красителей и позволяет во всех случаях контролировать удаление мембран, что повышает частоту закрытия макулярных разрывов и обеспечивает более высокие функциональные результаты. Кроме того, данные ИОКТ позволяют более точно определять выбор метода тампонады при СМР [31].

Целью операции при витреомакулярном тракционном синдроме является отделение ЗГМ, однако при этом довольно часто хирург может потерять «крышу» так называемой «кисты», что приводит к развитию СМР. Применение ИОКТ является полезным при данном типе хирургии, так как обеспечивает в режиме реального времени [10, 29, 35]:

— оценку степени витреомакулярной адгезии и разрешение тракции;

— визуализацию «кисты без крыши» после подъема ЗГМ;

— идентификацию субклинического СМР;

— фиксацию неполного отслоения мембран.

Эти результаты могут помочь в принятии хирургом решений, например, об использовании газовой тампонады или пилинге ВПМ [29, 35].

L.M. Lytvynchuk и соавторы использовали ИОКТ в хирургическом лечении синдрома «утреннего сияния» (от англ. morning glory syndrome; увеличение диска и ямки зрительного нерва и связанные с ним отслойка сетчатки и ретиношизис в центральной зоне). В ходе операции при помощи ИОКТ была выявлена плотная адгезия между задним уплотненным стекловидным телом, эпипапиллярной областью и макулой. В результате было высказано предположение, что сила тракции стекловидного тела была основной причиной отслойки сетчатки [36].

Регматогенная отслойка сетчатки (РОС)

L.B. Lee и S.K. Srivastava при помощи ИОКТ продемонстрировали на клиническом материале наличие остаточной СРЖ, несмотря на визуальное прилегание сетчатки под перфторорганическими соединениями (ПФОС) [37].

Исследование DISCOVER показало, что данные ИОКТ влияют на принятие хирургами решений в 21% случаев РОС и позволяют идентифицировать оптимальное место дренирования на основе высоты СРЖ. Выявленные диагностические находки на основе ИОКТ в хирургии РОС: СРЖ — 65 случаев (54,2%), субклинический СМР — 6 случаев (5%), окультные суб- и преретинальные мембраны — 21 случай (17,5%) [18, 20].

Таким образом, ИОКТ во время лечения РОС позволяет визуализировать [18, 20, 36, 38]:

— СРЖ;

— центральные и периферические разрывы сетчатки;

— остаточное преретинальное или субретинальное ПФОС;

— суб- и преретинальные пролиферативные мембраны;

— витреоретинальные тракции.

Также ИОКТ позволяет дифференцировать:

— ретиношизис и отслойку сетчатки;

— СРЖ и хориоидальное кровоизлияние;

— контузионные изменения сетчатки и дегемоглобинизированное преретинальное кровоизлияние.

Субмакулярная хирургия. Еще одной областью применения ИОКТ являются субмакулярные операции, включая генную терапию, имплантацию протеза сетчатки и субретинальную инъекцию активатора плазминогена при субмакулярном кровоизлиянии [39—41].

Субретинальные инъекции могут вызывать серьезные осложнения, включая хориоидальные кровоизлияния, РОС, гемофтальм и рефлюкс терапевтических средств [42]. Эти операции требуют точности, и ИОКТ помогает подтвердить, что фармакологический препарат был введен в субретинальное, а не в супрахориоидальное пространство. N.Z. Gregori и соавторы показали, что интегрированная в микроскоп ИОКТ помогает визуализировать микроанатомию сетчатки во время создания небольшого субретинального пузырька со сбалансированным солевым раствором в рамках подготовки к проведению субретинальной генной терапии. При помощи ИОКТ можно непосредственно наблюдать за увеличением субретинального пузырька, так как при генной терапии необходимо избегать попадания препарата под пигментный эпителий сетчатки или в супрахориоидальное пространство [40, 43].

Под контролем ИОКТ также возможно более точно позиционировать протез сетчатки [39]. Три имплантата Argus II были введены с использованием обратной связи посредством ИОКТ при лечении пигментного ретинита. Во всех случаях позиционирование имплантата было подтверждено до и после установки ретинального штифта [18].

Лечение осложнений пролиферативной диабетической ретинопатии (ПДР). Наиболее частыми осложнениями ПДР, которые требуют витреоретинального вмешательства, являются гемофтальм и тракционная отслойка сетчатки. В частности, при гемофтальме использование ИОКТ имеет наибольшую информативность, ввиду того что при этой патологии невозможно оценить состояние макулярной зоны на дооперационном этапе [1].

В одном из исследований было выявлено, что 4D-ИОКТ во время витрэктомии при осложнениях ПДР была полезна для определения плоскостей ткани и полного рассечения фиброваскулярных мембран и оценки необходимости дальнейшего отслаивания мембран. При этом в 20% случаев не удалось получить качественного изображения ввиду высокой отслойки сетчатки и невозможности сфокусировать изображение [24].

ИОКТ позволяла оценить изменения макулярной области у пациентов с ПДР после удаления гемофтальма, степень изменения сетчатки при ЭМФ и вид макулярного разрыва. Важной при ПДР является дифференциальная диагностика шизиса и отслойки сетчатки, которую ИОКТ позволяет выполнять на высоком качественном уровне [24].

При тяжелых формах тракционной отслойки сетчатки при ПДР эффективным методом диссекции пролиферативных мембран является вискодиссекция, однако наиболее частой проблемой при этом становится введение вискоэластика не между сетчаткой и пролиферативной мембраной, в полость гиалоидошизиса. При выполнении вискодиссекции ИОКТ позволяет определить плоскость распространения вискоэластика и при необходимости внести коррективы [24].

Во время процедур, направленных на лечение ПДР, ИОКТ позволяет идентифицировать хирургические плоскости тканей и дифференцировать фиброваскулярную пролиферативную ткань, приводящую к тракционной отслойке сетчатки. Примеры обратной связи ИОКТ, которые изменили принятие хирургических решений во время операций при осложнениях ПДР, включали идентификацию скрытых разрывов сетчатки, подтверждение отсутствия разрыва сетчатки, визуализацию оптимальных плоскостей рассечения и дифференциацию между разрывом или растяжением и отслойкой сетчатки [18].

Использование ИОКТ для визуализации внутриглазных опухолей

При биопсии новообразований сетчатки и хориоидеи ИОКТ использовали для определения зоны биопсии и оценки ткани после биопсии. Результаты ИОКТ повлияли на тактику в шести случаях из восьми [18].

Ограничения ИОКТ

Несмотря на то что за последние несколько лет в использовании ИОКТ были достигнуты значительные успехи, у этого диагностического подхода есть несколько ограничений. В современных системах микроскопов поле зрения хирурга и размер ОКТ-изображений ограничены размером хирургических окуляров [44].

Представление ОКТ-изображений на внешнем мониторе может быть полезным благодаря большему размеру и высокому разрешению дисплея, но это требует от хирурга отведения взгляда от операционного поля, что приведет к кратковременной потере контроля за операцией. Интеграция ИОКТ в 3D-системы визуализации для витреоретинальной хирургии является потенциальным направлением для дальнейшего развития [1].

Современные металлические хирургические инструменты создают абсолютное затенение, ограничивая визуализацию подлежащих тканевых структур и взаимодействие инструмента с тканью. Так, J.P. Ehlers и соавт. (2017) сообщили об использовании разработанных ими новых инструментов, совместимых с ИОКТ, включая мембранные скребки и витреоретинальные пинцеты [45]. Эти инструменты сделаны из полупрозрачного жесткого пластика, что позволяет уменьшить светорассеяние, улучшить видимость ткани, лежащей непосредственно под инструментами, и видимость всего кончика инструмента [24, 45]. Дальнейшее развитие инструментов, совместимых с ИОКТ, и усовершенствование программных алгоритмов для минимизации артефактов позволят проводить более точные манипуляции с тканями [46]. Кроме того, будет полезна разработка автоматизированного отслеживания рабочей зоны инструментов ИОКТ, что позволит свести к минимуму нагрузку хирурга, связанную с ручным наведением ИОКТ-сканов во время операции [45].

Заключение

За последнее десятилетие ИОКТ стала ценным методом визуализации в витреоретинальной хирургии, позволяющим получать обратную связь в режиме реального времени. ИОКТ обеспечивает дополнительную информацию об изменениях микроархитектоники сетчатки в процессе хирургических манипуляций, тем самым уменьшая их количество, и способствует безопасной хирургической технике. Решение таких вопросов, как оптимизация обратной связи на 3D-дисплее, разработка инструментов, совместимых с ОКТ, и улучшение навигации обеспечит широкую интеграцию и использование этой технологии в клинической практике.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interest.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Ung C, Miller JB. Intraoperative Optical Coherence Tomography in Vitreoretinal Surgery. *Semin Ophthalmol.* 2019;34(4):312-316. https://doi.org/10.1080/08820538.2019.1620811
2. Ringel MJ, Tang EM, Tao YK. Advances in multimodal imaging in ophthalmology. *Ther Adv Ophthalmol.* 2021;13:25158414211002400. Published 2021 Mar 19. https://doi.org/10.1177/25158414211002400
3. Benda T, Studený P. Intraoperative optical coherence tomography — available technologies and possibilities of use. A review. *Cesk Slov Oftalmol.* 2022 Winter;2(Ahead of Print):1001-1010.
4. Аветисов К.С., Большунов А.В., Аветисов С.Э., Юсеф Ю.Н., Иванов М.Н., Соболь Э.Н., Сакалова Е.Д. Гибридная (фемтолазерная) факохирургия и состояние макулярной зоны сетчатки. *Вестник офтальмологии.* 2017;4(133):97-102.

Avetisov KS, Bol'shunov AV, Avetisov SE, Yusef YuN, Ivanov MN, Sobol EN, Sakalova ED. Hybrid (femtosecond laser-assisted) phaco surgery and the state of the macula. *Russian Annals of Ophthalmology = Vestnik oftal'mologii*. 2017;4(133):97-102. (In Russ.).
https://doi.org/10.17116/oftalma2017133497-102

5. Dayani PN, Maldonado R, Farsiu S, Toth CA. Intraoperative use of handheld spectral domain optical coherence tomography imaging in macular surgery. *Retina*. 2009;29(10):1457-1468.
https://doi.org/10.1097/IAE.0b013e3181b266bc
6. Branchini LA, Gurley K, Duker JS, Reichel E. Use of handheld intraoperative spectral-domain optical coherence tomography in a variety of vitreoretinal diseases. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2016;47(1):49-54.
https://doi.org/10.3928/23258160-20151214-07
7. Joos KM, Shen JH. Miniature real-time intraoperative forward-imaging optical coherence tomography probe. *Biomed Opt Express*. 2013;4(8):1342-1350.
https://doi.org/10.1364/BOE.4.001342
8. Asami T, Terasaki H, Ito Y, Sugita T, Kaneko H, Nishiyama J, Namiki H, Kobayashi M, Nishizawa N. Development of a fiber-optic optical coherence tomography probe for intraocular use. Invest *Ophthalmol Vis Sci*. 2016;57(9):OCT568.
https://doi.org/10.1167/iovs.15-18853
9. Carrasco-Zevallos OM, Viehland C, Keller B, Draelos M, Kuo AN, Yoth CA, Izatt JA. Review of intraoperative optical coherence tomography: technology and applications [Invited]. *Biomed Opt Express*. 2017;8(3):1607-1637.
https://doi.org/10.1364/BOE.8.001607
10. Байбородов Я.В., Балашевич Л.И. Микроинцизионное хирургическое лечение первой стадии макулярного разрыва без витрэктомии под интраоперационным ОКТ-контролем. *Офтальмохирургия*. 2017;(1):53-58.
Bayborodov YaV, Balashevich LI. Microinvasive surgical treatment of macular hole of stage I without vitrectomy under the intra-operative OCT control. *Fyodorov Journal of Ophthalmic Surgery = Oftal'mokhirurgiya*. 2017;(1):53-58. (In Russ.).
https://doi.org/10.25276/0235-4160-2017-1-53-58
11. Ahronovich EZ, Simaan N, Joos KM. A Review of Robotic and OCT-Aided Systems for Vitreoretinal Surgery. *Adv Ther*. 2021;38(5):2114-2129.
https://doi.org/10.1007/s12325-021-01692-z
12. Ehlers JP, Dupps WJ, Kaiser PK, Goshe J, Singh RP, Petkovsek D, Srivastava SK. The prospective intraoperative and perioperative ophthalmic imaging with optical coherence tomography (PIONEER) study: 2-year results. *Am J Ophthalmol*. 2014;158(5):999-1007.
https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.07.034
13. Ray R, Baranano DE, Fortun JA, Schwent BJ, Cribbs BE, Bergstrom CS, Hubbard GB, Srivastava SK. Intraoperative microscope-mounted spectral domain optical coherence tomography for evaluation of retinal anatomy during macular surgery. *Ophthalmology*. 2011;118(11):2212-2217.
https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2011.04.012
14. Binder S, Falkner-Radler CI, Hauger C, Matz H, Glittenberg C. Feasibility of intrasurgical spectral-domain optical coherence tomography. *Retina*. 2011;31(7):1332-1336.
https://doi.org/10.1097/IAE.0b013e3182019c18
15. Ehlers JP, Tao YK, Farsiu S, Maldonado R, Izatt JA, Toth CA. Visualization of real-time intraoperative maneuvers with a microscope-mounted spectral domain optical coherence tomography system. *Retina*. 2013;33(1):232-236.
https://doi.org/10.1097/IAE.0b013e31826e86f5
16. Hahn P, Migacz J, O'Connell R, Maldonado RS, Izatt JA, Toth CA. The use of optical coherence tomography in intraoperative ophthalmic imaging. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging*. 2011;42(suppl):85-94.
https://doi.org/10.3928/15428877-20110627-08
17. Zakir R, Iqbal K, Hassaan Ali M, Mirza UT, Mahmood K, Riaz S, Hashmani N. The outcomes and usefulness of Intraoperative Optical Coherence Tomography in vitreoretinal surgery and its impact on surgical decision making. *Rom J Ophthalmol*. 2022;66(1):55-60.
https://doi.org/10.22336/rjo.2022.12
18. Ehlers JP, Modi YS, Pecen PE, Goshe J, Dupps WJ, Rachitskaya A, Sharma S, Yuan A, Singh R, Kaiser PK, Reese JL, Calabrise C, Watts A, Srivastava SK. The DISCOVER Study 3-Year Results: Feasibility and Usefulness of Microscope-Integrated Intraoperative OCT during Ophthalmic Surgery. *Ophthalmology*. 2018;125(7):1014-1027.
https://doi.org/10.1016/j.ophtha.2017.12.037
19. Ehlers JP, Kaiser PK, Srivastava SK. Intraoperative optical coherence tomography using the RESCAN 700: preliminary results from the DISCOVER study. *Br J Ophthalmol*. 2014;98(10):1329-1332.
https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2014-305294
20. Ehlers JP, Goshe J, Dupps WJ, Kaiser PK, Singh RP, Gans R, Eisengart J, Srivastava SK. Determination of feasibility and utility of microscope-integrated optical coherence tomography during ophthalmic surgery: the DISCOVER study RESCAN results. *JAMA Ophthalmol*. 2015;133(10):1124-1132.
https://doi.org/10.1001/jamaophthalmol.2015.2376
21. Runkle A, Srivastava SK, Ehlers JP. Microscope-Integrated OCT Feasibility and Utility With the EnFocus System in the DISCOVER Study. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2017;48(3):216-222.
https://doi.org/10.3928/23258160-20170301-04
22. Ehlers JP, Srivastava SK, Feiler D, Noonan AI, Rollins AM, Tao YK. Integrative advances for OCT-guided ophthalmic surgery and intraoperative OCT: microscope integration, surgical instrumentation, and heads-up display surgeon feedback. *PLoS One*. 2014;9(8):e105224.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105224
23. Carrasco-Zevallos OM, Keller B, Viehland C, Shen L, Seider MI, Izatt JA, Toth CA. Optical coherence tomography for retinal surgery: perioperative analysis to real-time four-dimensional image-guided surgery. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. 2016;57(9):OCT37-50.
https://doi.org/10.1167/iovs.16-19277
24. Gabr H, Chen X, Zevallos-Carrasco OM, Viehland C, Dandrige A, Sarin N, Mahmoud TH, Vajzovic L, Izatt JA, Toth CA. Visualization from intraoperative swept-source microscope-integrated optical coherence tomography in vitrectomy for complications of proliferative diabetic retinopathy. *Retina*. 2018;38(suppl 1):110-120.
https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000002021
25. Carrasco-Zevallos OM, Keller B, Viehland C, Shen L, Waterman G, Todorich B, Shieh C, Hahn P, Farsiu S, Kuo AN, Toth CA, Izatt JA. Live volumetric (4D) visualization and guidance of in vivo human ophthalmic surgery with intraoperative optical coherence tomography. *Sci Rep*. 2016;6:31689. Published 2016 Aug 19.
https://doi.org/10.1038/srep31689
26. Tang EM, El-Haddad MT, Patel SN, Tao YK. Automated instrument-tracking for 4D video-rate imaging of ophthalmic surgical maneuvers. *Biomed Opt Express*. 2022;13(3):1471-1484.
https://doi.org/10.1364/BOE.450814
27. El-Haddad MT, Tao YK. Automated stereo vision instrument tracking for intraoperative OCT guided anterior segment ophthalmic surgical maneuvers. *Biomed Opt Express*. 2015;6(8):3014-3031.
https://doi.org/10.1364/BOE.6.003014
28. Leisser C, Hackl C, Hirnschall N, Luft N, Döller B, Draschl P, Rigal K, Findl O. Visualizing macular structures during membrane peeling surgery with an intraoperative spectral-domain optical coherence tomography device. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2016;47(4):328-332.
https://doi.org/10.3928/23258160-20160324-04
29. Falkner-Radler CI, Glittenberg C, Gabriel M, Binder S. Intrasurgical microscope-integrated spectral domain optical coherence tomography-assisted membrane peeling. *Retina*. 2015;35(10):2100-2106.
https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000596
30. Азнабаев Б.М., Дибаев Т.И., Мухамадеев Т.Р., Багданурова А.Р. Интраоперационная оптическая когерентная томография в изучении микроструктурных изменений заднего отдела глаза при витрэктомии. *Медицинский вестник Башкортостана*. 2018;1(73):19-22. Ссылка активна на 05.07.22.
Aznabaev BM, Dibaev TI, Mukhamadeev TR, Bagdanurova AR. Intraoperative optical coherence tomography in the study of microstructural changes of posterior segment of the eye during vitrectomy. *Medicinskij vestnik Bashkortostana*. 2018;1(73):19-22. Accessed 05.07.22 (In Russ.).
https://cyberleninka.ru/article/n/intraoperatsionnaya-opticheskaya-kogerentnaya-tomografiya-v-izuchenii-mikrostrukturnyh-izmeneniy-zadnego-otdela-glaza-pri
31. Байбородов Я.В. Концепция анатомической реконструкции фовеолы в хирургическом лечении сквозных макулярных разрывов с использованием интраоперационного ОКТ-контроля. *Офтальмологические ведомости*. 2017;10(3):12-17.
Bayborodov YaV. The concept of the foveola anatomical reconstruction in the surgical treatment of full-thickness macular tears using intraoperative oct control. *Ophthalmology Journal = Oftal'mologicheskie vedomosti*. 2017;10(3):12-17 (In Russ.).
https://doi.org/10.17816/OV10312-17
32. Азнабаев Б.М., Мухамадеев Т.Р., Дибаев Т.И. Интраоперационная ОКТ-визуализация в хирургии переднего и заднего отрезка глаза. *Медицинский вестник Башкортостана*. 2016;1(61):151-154. Ссылка активна на 05.07.22.
Aznabaev BM, Mukhamadeev TR, Dibaev TI. Intraoperative oct imaging in anterior and posterior eye segment surgery. *Medicinskij vestnik Bashkortostana*. 2016;1(61):151-154. Accessed 05.07.22 (In Russ.).
https://cyberleninka.ru/article/n/intraoperatsionnaya-okt-vizualizatsiya-v-hirurgii-perednego-i-zadnego-otrezka-glaza

33. Tuifua TS, Sood AB, Abraham JR, Srivastava SK, Kaiser PK, Sharma S, Rachitskaya A, Singh RP, Reese J, Ehlers JP. Epiretinal Membrane Surgery Using Intraoperative OCT-Guided Membrane Removal in the DISCOVER Study versus Conventional Membrane Removal. *Ophthalmol Retina*. 2021; 5(12):1254-1262.
https://doi.org/10.1016/j.oret.2021.02.013

34. Ehlers JP, Xu D, Kaiser PK, Singh RP, Srivastava SK. Intrasurgical dynamics of macular hole surgery: an assessment of surgery-induced ultrastructural alterations with intraoperative optical coherence tomography. *Retina*. 2014; 34(2):213-221.
https://doi.org/10.1097/IAE.0b013e318297daf3

35. Ehlers JP, Tam T, Kaiser PK, Martin DF, Smith GM, Srivastava SK. Utility of intraoperative optical coherence tomography during vitrectomy surgery for vitreomacular traction syndrome. *Retina*. 2014;34(7):1341-1346.
https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000000123

36. Lytvynchuk LM, Glittenberg CG, Ansari-Shahrezaei S, Binder S. Intraoperative optical coherence tomography assisted analysis of pars Plana vitrectomy for retinal detachment in morning glory syndrome: a case report. *BMC Ophthalmol*. 2017;17(1):134.
https://doi.org/10.1186/s12886-017-0533-0

37. Lee LB, Srivastava SK. Intraoperative spectral-domain optical coherence tomography during complex retinal detachment repair. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging*. 2011;42 Online:e71-74.
https://doi.org/10.3928/15428877-20110804-05

38. Muni RH, Kohly RP, Charonis AC, Lee TC. Retinoschisis detected with handheld spectral-domain optical coherence tomography in neonates with advanced retinopathy of prematurity. *Arch Ophthalmol*. 2010;128(1):57-62.
https://doi.org/10.1001/archophthalmol.2009.361

39. Rachitskaya AV, Yuan A, Marino MJ, Reese J, Ehlers JP. Intraoperative OCT imaging of the Argus II retinal prosthesis system. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2016;47(11):999-1003.
https://doi.org/10.3928/23258160-20161031-03

40. Gregori NZ, Lam BL, Davis JL. Intraoperative Use of Microscope-Integrated Optical Coherence Tomography for Subretinal Gene Therapy Delivery. *Retina*. 2019;39(suppl 1):9-12.
https://doi.org/10.1097/IAE.0000000000001646

41. Xue K, Groppe M, Salvetti AP, MacLaren RE. Technique of retinal gene therapy: delivery of viral vector into the subretinal space. *Eye* (Lond). 2017; 31(9):1308-1316.
https://doi.org/10.1038/eye.2017.158

42. Westenskow PD, Kurihara T, Bravo S, Feitelberg D, Sedillo ZA, Aguilar E, Friedlander M. Performing subretinal injections in rodents to deliver retinal pigment epithelium cells in suspension. *J Vis Exp*. 2015;(95):52247.
https://doi.org/10.3791/52247

43. Mandai M, Watanabe A, Kurimoto Y, Hirami Y, Morinaga C, Daimon T, Fujihara M, Akimaru H, Sakai N, Shibata Y, Terada M, Nomiya Y, Tanishima S, Nakamura M, Kamao H, Sugita S, Onishi A, Ito T, Fujita K, Kawamata S, Go MJ, Shinohara C, Hata KI, Sawada M, Yamamoto M, Ohta S, Ohara Y, Yoshida K, Kuwahara J, Kitano Y, Amano N, Umekage M, Kitaoka F, Tanaka A, Okada C, Takasu N, Ogawa S, Yamanaka S, Takahashi M. Autologous Induced Stem-Cell-Derived Retinal Cells for Macular Degeneration. *N Engl J Med*. 2017;376(11):1038-1046.
https://doi.org/10.1056/NEJMoa1608368

44. Pfau M, Michels S, Binder S, Becker MD. Clinical experience with the first commercially available intraoperative optical coherence tomography system. *Ophthalmic Surg Lasers Imaging Retina*. 2015;46(10):1001-1008.
https://doi.org/10.3928/23258160-20151027-03

45. Ehlers JP, Uchida A, Srivastava SK. Intraoperative optical coherence tomography-compatible surgical instruments for real-time image-guided ophthalmic surgery. *Br J Ophthalmol*. 2017;101(10):1306-1308.
https://doi.org/10.1136/bjophthalmol-2017-310530

46. Rico-Jimenez JJ, Hu D, Tang EM, Oguz I, Tao YK. Real-time OCT image denoising using a self-fusion neural network. *Biomed Opt Express*. 2022;13(3): 1398-1409.
https://doi.org/10.1364/BOE.451029

Поступила 30.09.2022
Received 30.09.2022
Принята к печати 17.10.2022
Accepted 17.10.2022