



Обзор

Оптическая когерентная томография в оториноларингологии: возможности и перспективы использования

Шахова М.А.^{1,2} • Фокеев В.А.^{1,2} • Меллер А.Е.¹ • Терентьева А.Б.¹ • Кириллин М.Ю.² • Шахов А.В.¹

Шахова Мария Андреевна – канд. мед. наук, доцент, зав. кафедрой болезней уха, горла и носа имени профессора В.Ю. Шахова¹; науч. сотр. лаборатории биофотоники²; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5377-8858> ✉ 603005, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10–1, Российская Федерация. E-mail: shahova_m@pimunn.net

Фокеев Вячеслав Александрович – аспирант кафедры болезней уха, горла и носа имени профессора В.Ю. Шахова¹; мл. науч. сотр. лаборатории биофотоники²; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4651-0828>. E-mail: s.fokeev1994@yandex.ru

Меллер Алина Ефимовна – ст. преподаватель кафедры болезней уха, горла и носа имени профессора В.Ю. Шахова¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7169-5266>. E-mail: mellalina@mail.ru

Терентьева Анна Борисовна – канд. мед. наук, доцент кафедры болезней уха, горла и носа имени профессора В.Ю. Шахова¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8375-4064>. E-mail: anna-t-nn@mail.ru

Кириллин Михаил Юрьевич – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. лаборатории биофотоники²; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6804-6369>. E-mail: kirillin@ipfran.ru

Шахов Андрей Владимирович – д-р мед. наук, доцент, профессор кафедры болезней уха, горла и носа имени профессора В.Ю. Шахова¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5969-8066>. E-mail: shakhovav54@yandex.ru

Разработка новых подходов к лечению ЛОР-заболеваний диктует необходимость внедрения в клиническую практику неинвазивных методов диагностики, способных предоставить информацию об исследуемых биотканях на тканевом уровне и пригодных для интраоперационного применения. Цель настоящего обзора – обобщение данных об использовании в оториноларингологии одного из методов оптической биомедицинской диагностики – оптической когерентной томографии (ОКТ). Эта методика позволяет получать дву- и трехмерные изображения биоткани с пространственным разрешением до 1 мкм на глубину до 2 мм. Применение метода в ЛОР-практике сопряжено с разработкой специализированных модификаций ОКТ и специальных зондов, в том числе совместимых со стандартными эндоскопами и/или интраоперационными микроскопами. ОКТ-диагностика может дать уникальную информацию в решении следующих клинических задач: дифференциальная диагностика неопухолевого и опухолевого патологий, в том числе на ранних стадиях, оценка особенностей патоморфологических характеристик при воспалительной патологии, мониторинг изменения тканей в ответ на терапию. Дополнение

стандартных диагностических процедур ОКТ-исследованием будет способствовать улучшению дифференциальной диагностики и оптимизации выбора лечебной тактики в ряде клинически значимых ситуаций. Применение мультимодальных ОКТ-установок, позволяющих получать не только структурную, но и функциональную информацию об исследуемом объекте, а также методов машинного обучения при интерпретации изображений – перспективное направление развития технологии ОКТ.

Ключевые слова: оптическая когерентная томография, оториноларингология, ОКТ-ангиография, слизистая оболочка, эпителий, собственная пластинка, хронические заболевания ЛОР-органов

Для цитирования: Шахова МА, Фокеев ВА, Меллер АЕ, Терентьева АБ, Кириллин МЮ, Шахов АВ. Оптическая когерентная томография в оториноларингологии: возможности и перспективы использования. Альманах клинической медицины. 2025;53(5):268–284. doi: 10.18786/2072-0505-2025-53-021.

Поступила 23.10.2025; доработана 11.11.2025; принята к публикации 13.11.2025; опубликована онлайн 28.11.2025

¹ ФГБОУ ВО «Приволжский исследовательский медицинский университет» Минздрава России; 603005, г. Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, 10–1, Российская Федерация

² ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»; 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, Российская Федерация

Основная проблема современной ЛОР-практики – существенная опора специалиста на результаты визуального осмотра, включая эндоскопию, так как врач может оценить лишь поверхностные изменения тканей, причем достаточно субъективно. Значительное преимущество в выборе тактики лечения даст дополнительная информация о состоянии тканей ЛОР-органов на клеточном и тканевом уровнях, поскольку она позволит более точно

охарактеризовать патоморфологические изменения, а также оценить отклик на лечение.

Структурные изменения тех или иных органов и тканей сопровождают практически любой патологический процесс, протекающий в организме. Изучение характера этих преобразований нередко является основополагающим как при установлении диагноза, так и при подборе метода лечения и контроле его эффективности. Гистологическое исследование, оставаясь золотым стандартом,



имеет ряд ограничений, связанных с инвазивностью, риском ошибок при взятии материала и невозможностью динамического наблюдения *in vivo*. Это определяет потребность в методах прижизненной морфологической диагностики [1–6]. Широко распространенные методы визуализации биологических тканей, а именно высокочастотный ультразвук, компьютерная и магнитно-резонансная томография, при всех своих явных преимуществах не имеют достаточной разрешающей способности, что существенно ограничивает возможность и целесообразность их применения, особенно если это касается раннего выявления неопластических процессов [7, 8]. Это актуализирует потребность в разработке и внедрении технологий визуализации тканей, обладающих высокой информативностью, безопасностью и доступностью к применению в реальной клинической практике. Все эти характеристики успешно сочетает в себе метод оптической когерентной томографии (ОКТ).

Возможности ОКТ впервые были продемонстрированы в 1991 г. группой ученых, возглавляемой J.G. Fujimoto [9]. Метод основан на низкокогерентной интерферометрии, позволяющей регистрировать распределение интенсивности обратно рассеянного излучения по глубине, а сканирование в поперечном направлении обеспечивает получение дву- или трехмерных изображений. Поскольку биоткани характеризуются различными рассеивающими свойствами, на получаемых ОКТ-изображениях они имеют контраст. Исходно была предложена корреляционная модификация ОКТ (англ. *time-domain optical coherence tomography – TD-OCT*), в которой зондирование по глубине осуществлялось с помощью движущегося зеркала интерферометра; однако позже скорость получения кадра удалось существенно повысить с помощью спектральной модификации метода (англ. *spectral-domain optical coherence tomography – SD-OCT*) [10, 11], где зеркало неподвижно, а регистрация осуществляется с помощью спектрометра. Для зондирования тканей используют источники ближнего инфракрасного диапазона с мощностью до 1,5 мВт, что позволяет говорить о неинвазивности диагностики. Стандартные ОКТ-изображения, получаемые в реальном времени, дают информацию о строении ткани на глубину до 2 мм – это вполне адекватно для оценки состояния покровных структур. Отличительной особенностью ОКТ от других методов томографии (рентгеновской, магнитно-резонансной, ультразвуковой) является ее высокое разрешение, составляющее от 1 до 15 мкм [12–14]. Благодаря столь явному преимуществу ОКТ получила широкое распространение в различных

областях клинической медицины: прежде всего в офтальмологии, где новая методика завоевала наибольшую популярность, а также в гинекологии, урологии, дерматологии, онкологии и оториноларингологии [15–20]. Отдельно следует отметить ряд российских пионерских работ, в рамках которых были апробированы различные варианты оптических когерентных томографов и показана принципиальная возможность и диагностическая ценность использования ОКТ в фундаментальных исследованиях и клинической практике [21–25]. Вместе с тем работы, обобщающие мировой опыт применения ОКТ в оториноларингологии, позволяющие оценить роль этого метода при решении широкого спектра клинических задач, в настоящий момент отсутствуют, тогда как критический анализ накопленного опыта мог бы стать отправной точкой для системного введения ОКТ в ЛОР-практику и разработку новых протоколов лечения, в том числе воплощающих принципы персонифицированной медицины.

Цель данного обзора – обобщение и критический анализ современных данных о применении метода ОКТ в различных разделах оториноларингологии для определения его текущей роли и будущего потенциала в диагностике и мониторинге состояния ЛОР-органов. Мы провели поиск и анализ англо- и русскоязычных научных работ, посвященных ОКТ и возможностям ее применения в оториноларингологии, размещенных в свободном доступе на платформах Scopus, PubMed, Google Scholar, eLibrary.Ru, КиберЛенинка, на сайтах издательств с открытым доступом, а также в других открытых интернет-источниках по следующим ключевым словам: *optical coherence tomography* / оптическая когерентная томография, *otorhinolaryngology* / оториноларингология, *mucous membrane* / слизистая оболочка, *epithelium* / эпителий, *lamina propria* / собственная пластинка, *chronic diseases of ENT organs* / хронические заболевания ЛОР-органов. Обзор применения метода ОКТ выполнен с делением по трем основным направлениям: ларингология [23, 26–43] (табл. 1), отит [44–64] (табл. 2) и ринология [65–77] (табл. 3).

Оптическая когерентная томография в ларингологии

Исследования, посвященные теоретическому обоснованию и практическому применению ОКТ-визуализации гортани в норме и при различных патологических состояниях, впервые в мире были проведены в 1997 г. В работе А.М. Sergeev и соавт. [26] с помощью ОКТ были изучены слизистые оболочки полых органов, в том числе



Таблица 1. Сравнительная характеристика применения оптической когерентной томографии в ларингологии

Первый автор, ссылка	Год	Клиническая задача	Количество пациентов	Информация, полученная с помощью ОКТ	Параметры ОКТ-системы
A.M. Sergeev [26]	1997	Принципиальная возможность ОКТ в оценке слизистой оболочки полых органов в норме и при патологии	15 (из них исследование гортани выполнено у 4)	Слизистая оболочка в норме имеет слоистую структуру с четкой стратификацией слоев, при опухолевой патологии – бесструктурное изображение. Перспектива ОКТ для ранней диагностики опухолей и точного направления эксцизионной биопсии	TD-ОКТ, зонд 2 мм интегрирован в биопсийный канал эндоскопа, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
F.I. Feldchtein [27]	1998	Изучение микроструктуры слизистой оболочки полых органов в норме и при патологии, сопоставление их с данными морфометрии	124 (из них исследование гортани выполнено у 15)	Эндоскопическая ОКТ хорошо визуализирует органы, покрытые эпителием, отделенным от подлежащей стромы гладкой базальной мембраной (например, мочевого пузыря, гортани и шейки матки), сформулированы возможности и ограничения по диагностической ценности ОКТ. Впервые показана эффективность лапароскопической ОКТ	TD-ОКТ, зонд 2 мм интегрирован в биопсийный канал эндоскопа и ригидный лапароскоп, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
A.V. Shakhov [23]	1999	Дифференциальная диагностика опухолевой, опухолеподобной и воспалительной патологии гортани, определение границ опухоли	Более 40	Выявлены ОКТ-признаки узелков и кист голосовых складок, опухолевых изменений при злокачественной патологии, границы опухоли / нормальная ткань, лучевого мукозита. Корреляция с результатами гистологического исследования	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
A.V. Shakhov [28]	2001	Интраоперационный контроль лазерной хирургии рака гортани	26	Визуализация изменений микроструктуры коллатеральных тканей при лазерном воздействии позволяет контролировать его режим	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
B.E. Bouma [29]	2002	Обобщение возможностей ОКТ в клинической медицине	Более 100	Детально описаны дифференциально-диагностические признаки опухолевой, опухолеподобной и хронической воспалительной патологии гортани, доказана диагностическая ценность ОКТ в выявлении дисплазии тяжелой степени, рака <i>in situ</i>	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп или в биопсийный канал эндоскопа, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
W.B. Armstrong [30]	2006	Изучение изменений микроструктуры слизистой оболочки гортани при раке	22	Выявлено нарушение базальной мембраны при раке гортани, переходные зоны на границе опухоли. Ограничение применения ОКТ при экзофитных очагах	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп с визуальным контролем или с микроскопом, разрешение 10 мкм, глубина визуализации 1,6 мм
M. Kraft [31]	2008	Оценка эффективности ОКТ-микроларингоскопии в определении степени дисплазии и глубины инвазии	193	Измерение толщины эпителия при ОКТ позволяет определить степень дисплазии. Ограничение применения ОКТ при выраженном кератозе	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп с визуальным контролем или с микроскопом, разрешение 10–15 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
J.M. Ridgway [32]	2008	Визуализация дыхательных путей новорожденных	12	Визуализирован поверхностный эпителий, подлежащая собственная пластинка и базальная мембрана в гортани и трахее. Выявлено изменение ОКТ-сигнала после интубации	TD-ОКТ, зонд 2 мм внутри эндотрахеальной трубки, разработаны индивидуальные гибкий и жесткий зонды ОКТ с учетом анатомических особенностей и технических особенностей эндотрахеальной трубки, разрешение около 7 мкм, глубина визуализации до 1,6 мм
B.J. Wong [33]	2009	Изучение микроструктуры слизистой оболочки гортани в норме и при доброкачественной патологии	82	Описаны микроструктурные особенности (кровеносные сосуды, протоки желез, скопление жидкости, тип эпителия), измерена толщина эпителия разных зон гортани и рассчитана его средняя величина	TD-ОКТ, зонд 2 мм вводился через ларингоскоп или в биопсийный канал эндоскопа, разрешение 15 мкм, глубина визуализации до 2 мм



L. Yu [34]	2009	Возможность ОКТ-обследования гортани при непрямой ларингоскопии у бодрствующих пациентов	н/д	Получены четкие ОКТ-изображения гортани без артефактов движения	SD-ОКТ, зонд совмещен с эндоскопом (разные оптические каналы), ручная фокусировка
T. Just [35]	2010	Сопоставление ОКТ-изображений доброкачественных и диспластических поражений гортани с гистологическими изображениями	61	ОКТ-критерии доброкачественных и диспластических процессов, в том числе оценка базальной мембраны. Прецизионность биопсии	2 модификации: - TD-ОКТ, зонд 3 мм интегрирован в эндоскоп, разрешение 15 мкм, глубина визуализации до 2,5 мм; - SD-ОКТ, зонд 3 мм интегрирован в микроскоп, разрешение 12 мкм, глубина визуализации до 1–2 мм
T. Just [36]	2011	Улучшение визуализации базальной мембраны, повышение качества изображений слизистой оболочки гортани	н/д	ПЧ-ОКТ улучшает визуализацию базальной мембраны, особенно в здоровой слизистой оболочке. Нарушение целостности базальной мембраны является признаком опухолевой инвазии в собственную пластинку. Конфокальная эндоскопия визуализирует эпителий, но не базальную мембрану. Сочетание ОКТ с ПЧ-ОКТ и конфокальной эндоскопией повышает точность диагностики	2 модификации: - TD-ОКТ, зонд 3 мм интегрирован в эндоскоп, разрешение 15 мкм, глубина визуализации до 2,5 мм; - SD-ОКТ с ПЧ-ОКТ, зонд 3 мм интегрирован в микроскоп, разрешение 12 мкм, глубина визуализации до 1–2 мм, в сочетании с конфокальной эндоскопией
J.A. Burns [37]	2011	Повышение качества дифференциальной диагностики злокачественных и доброкачественных образований гортани с помощью ПЧ-ОКТ	23	Более четкое определение границ опухоли и глубины инвазии, отличие здоровой ткани от рубца	2 модификации TD-ОКТ, стандартная и ПЧ, зонд 2 мм, разрешение 15 мкм, глубина визуализации до 2 мм
G.K. Sharma [38]	2015	Визуализация изменений микроструктуры и толщины стенки дыхательных путей у новорожденных после интубации	72	Корреляция продолжительности интубации с изменениями толщины стенки и микроструктуры гортани. Детектирование тканей позволит прогнозировать риск развития стеноза гортани	SD-ОКТ с длиннофокусным преобразователем, зонд 0,7 мм с круговым вращением расположен внутри эндотрахеальной трубки, разрешение 10 мкм, глубина визуализации до 1,6 мм
V. Volgger [39]	2015	Визуализация подскладочного пространства у интубированных детей	46	Оценена послыная микроанатомия слизистой оболочки гортани и выполнена 3D-ОКТ-реконструкция подскладочного пространства для прогнозирования риска развития постинтубационного стеноза	SD-ОКТ с длиннофокусным преобразователем, зонды 0,7 и 1,2 мм с круговым вращением, расположены внутри эндотрахеальной трубки, разрешение 10 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
S. Donner [40]	2015	Возможность ОКТ-обследования гортани при непрямой ларингоскопии у бодрствующих пациентов с оценкой вибраторной функции голосовых складок	7 добровольцев	Получены четкие ОКТ-изображения гортани без артефактов движения и изображения во время фонации	SD-ОКТ, зонд интегрирован в ригидный эндоларингоскоп, один оптический канал, автоматическая фокусировка
J.A. Garcia [41]	2016	Разработка алгоритма оценки степени зрелости голосовой складки	10	Получены относительные коэффициенты затухания ОКТ-сигнала в различных точках голосовых складок у пациентов разных возрастов	TD-ОКТ, зонд 3,7 мм, разрешение 12 мкм, глубина визуализации до 2 мм
Z. Xin [42]	2021	Неинвазивная оценка степени инвазии опухоли гортани ex vivo	12 гортаней	Снижение двойного лучепреломления в зависимости от стадии опухоли, корреляция с данными гистологического исследования	ПЧ-ОКТ, разрешение 8,1 мкм, глубина визуализации до 2 мм
X. Li [43]	2025	Интраоперационная дифференциальная диагностика лейкоплакии и рака гортани	12	Получены численные характеристики признаков лейкоплакии	SD-ОКТ, зонд 3 мм, аксиальное разрешение 16,24 мкм, глубина визуализации $2,12 \pm 0,43$ мм

SD-ОКТ (spectral-domain optical coherence tomography) – оптическая когерентная томография в спектральном режиме, TD-ОКТ (time-domain optical coherence tomography) – оптическая когерентная томография в режиме временной области, н/д – нет данных, ОКТ – оптическая когерентная томография, ПЧ-ОКТ – поляризационно-чувствительная оптическая когерентная томография



гортани *in vivo*. Это стало возможным благодаря созданию новой эндоскопической ОКТ-системы (ЭОКТ) с интеграцией оптоволоконного интерферометра в стандартный эндоскоп с использованием его биопсийного канала для доставки низкокогерентного излучения к биоткани, размер разработанного торцевого ОКТ-щупа соответствовал размеру биопсийного канала. Были получены и проанализированы изображения опухолевых тканей в сравнении со здоровыми. Тогда впервые было показано, что ОКТ-изображения слизистой оболочки гортани в условиях нормы и патологии имеют совершенно различные характеристики, что достоверно коррелировало с результатами гистологического исследования. И хотя в исследование было включено всего 15 пациентов, из которых только у 4 выполнена ОКТ гортани, эти данные позволили предположить перспективность ОКТ для ранней диагностики опухолей и прицельного выполнения биопсии и легли в основу дальнейших исследований. Так, в работе [27] возможности ЭОКТ для визуализации гортани были изучены у 15 пациентов с различной патологией голосовых складок. Были выявлены ОКТ-признаки узелков и кист голосовых складок, а при злокачественной патологии были не только описаны ОКТ-признаки опухолевых изменений, но и показана возможность ОКТ детектировать границы опухоль / нормальная ткань. Кроме того, для определения *in vivo* влияния ионизирующего излучения на ткани гортани был проведен прижизненный ЭОКТ-мониторинг слизистой оболочки голосовых складок гортани при γ -лучевой терапии рака. Отмечена корреляция изображений ЭОКТ с известной информацией о вариантах морфологической реакции тканей на облучение. В работах [23, 29, 78] по данным ОКТ были детально охарактеризованы опорные дифференциально-диагностические признаки опухолевой, опухолеподобной и хронической воспалительной патологии гортани и, что наиболее важно, была доказана диагностическая ценность ОКТ-исследования в выявлении дисплазии тяжелой степени, рака *in situ* с высокой чувствительностью и специфичностью. B.J. Wong и соавт. позднее описали ОКТ-признаки микроструктур различных зон гортани в норме и при нескольких вариантах доброкачественной патологии, а также дали их числовую характеристику, выполнив оптическую морфометрию [33].

В вышеприведенных исследованиях была показана польза ОКТ в дифференциальной диагностике опухолевой и неопухолевой патологии гортани, однако не раскрыты недостатки и ограничения

метода. Исследования, посвященные дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований гортани на основании анализа ОКТ-изображений, в последующем проводились неоднократно. W.B. Armstrong и соавт. [30] удалось четко выявить повреждение базальной мембраны при раке гортани, а также переходные зоны на границе опухоли. Вместе с тем исчезновение базальной мембраны может наблюдаться и при других состояниях, например при лучевом мукозите. Авторы говорят о необходимости использования устройств ОКТ сверхвысокого разрешения, которые позволят различать субклеточные детали для дифференциации реактивных или гиперпластических поражений от дисплазии и рака *in situ*. Еще одно ограничение применения ОКТ, по мнению W.B. Armstrong и соавт., связано с обширными экзофитными образованиями, при которых увеличено обратное рассеяние на поверхности и ограничено распространение света в более глубокие слои тканей. Это говорит о целесообразности применения ОКТ при оценке малозаметных образований с небольшой глубиной инвазии. К похожему заключению приходят и M. Kraft и соавт. [31], говоря о том, что при выраженном кератозе невозможно визуализировать базальную мембрану из-за сильного поглощения зондирующего излучения, а значит, при ОКТ-исследовании инвазивный рак нельзя исключить, а язвенное поражение слизистой оболочки гортани можно ошибочно принять за него вследствие отсутствия базальной мембраны. Более того, авторы сомневаются в преимуществах ОКТ относительно других известных методов при дифференциальной диагностике злокачественных новообразований и эпителиальной дисплазии, считая эти заболевания очевидными уже клинически. Они предлагают использовать ОКТ только для определения степени дисплазии, измеряя толщину эпителия.

В работе T. Just и соавт. [35] проводилась сравнительная оценка доброкачественных и диспластических изменений гортани с измерением эпителиального пласта как основного критерия степени дисплазии с помощью двух модификаций ОКТ-томографов: временной (TD-OCT) эндоскопической установки и спектральной (SD-OCT) модификации, интегрированной в операционный микроскоп. Было показано, что интраоперационная ОКТ повышает точность биопсии, улучшая качество диагностики. При использовании спектральной установки увеличилась скорость получения изображений, их качество и обработка, но снизилась глубина зондирования из-за технических особенностей микроскопа. Основным недостаток



такой методики – «ручной» выбор точек визуализации, при котором возможно пропустить важные области исследования. Избежать этого позволит сканирование всего объема голосовой складки.

Интересна работа, в которой интраоперационное применение ОКТ рассматривается в качестве способа повышения эффективности и прецизионности микрохирургического лечения заболеваний гортани [28]. Здесь ОКТ была использована для интраоперационного контроля при лазерной хирургии рака гортани: информация о структурных изменениях слизистой оболочки гортани, полученная с помощью ОКТ, позволила не только точно определить границы опухоли, но и проводить мониторинг лазерного воздействия, избегая драматических повреждений биотканей. В свою очередь, контроль хода хирургического лечения рака гортани существенно повышает функциональные исходы подобных вмешательств [36].

Благодаря визуализации микроструктурных изменений гортани в ходе различных вмешательств или после них можно оценить риск таких осложнений, как развитие хондроперихондрита, рубцовых деформаций, постинтубационной гранулемы. В работе [32] показана возможность ОКТ в оценке дыхательных путей новорожденных. У интубированных пациентов было отмечено снижение уровня ОКТ-сигнала от структур гортани и трахеи с нарастанием изменений в разные сроки интубации по сравнению с неинтубированными новорожденными. По мнению авторов, такая информация может быть полезной при уходе за пациентами, требующими длительной интубации. Исследование выполняли через ларингоскоп или эндотрахеальную трубку, при этом важно отметить, что визуальная оценка состояния внутренней поверхности дыхательного тракта и, соответственно, сопоставление эндоскопических и ОКТ-изображений были возможны только в первом случае. Достаточно низкая скорость получения изображения и радиальное сканирование затрудняли исследование. Кроме того, относительно малое число пациентов ($n = 12$) не позволяет достоверно определить диагностическую ценность ОКТ, хотя перспективность метода показана. G.K. Sharma и соавт. обследовали 72 интубированных новорожденных [38]. С помощью ОКТ с длиннофокусным преобразователем удалось распознать и количественно оценить состояние слизистой оболочки и подслизистого слоя стенки дыхательных путей и установить связь между выраженностью этих изменений и продолжительностью интубации. Прибор, разработанный этой группой авторов, имел ряд преимуществ по сравнению с более ранними исследованиями: бесконтактность, высокая скорость,

возможность кругового сканирования на 360°. Это позволило обосновать целесообразность использования длиннофокусной ОКТ в мониторинге состояния дыхательных путей при интубации для снижения рисков осложнений. Оптимизировать время самого исследования можно было бы в случае автоматизированного распознавания и измерения тканей при сканировании дыхательного тракта. К недостаткам метода можно отнести относительно большой объем исключенных из исследования наборов изображений (почти 30%) в связи с недостаточной глубиной зондирования или артефактами движения, что, по всей видимости, связано с получением ОКТ-изображений через интубационную трубку и износом зонда при высокоскоростном вращении. Практически одновременно аналогичное исследование провела другая группа авторов [39]. ОКТ-исследование дыхательных путей с использованием длиннофокусной модификации прибора было выполнено 46 детям, перенесшим интубацию. В этом случае более 50% наборов изображений были признаны непригодными для включения в исследование.

Артефакты движения, затрудняющие выполнение ОКТ у пациентов под наркозом, делали эту процедуру практически бессмысленной у бодрствующих пациентов. Однако L. Yu и соавт. [34] увеличили скорость получения изображений до 40 кадров в секунду, использовали динамическую фокусировку и скользящий источник излучения и получили ОКТ-изображения при прямой ларингоскопии у бодрствующих пациентов как на вдохе, так и при фонации. Правда, это был двухканальный эндоскоп с ручной регулировкой фокуса. S. Donner и соавт. объединили оптические пути двух устройств, интегрировав ОКТ в эндоларингоскоп, и компенсировали движения за счет автоматического изменения диапазона сканирования и автофокусировки [40].

Использование поляризационно-чувствительной модификации ОКТ (ПЧ-ОКТ), основанной на эффекте двойного лучепреломления в коллагенсодержащих тканях, позволяет получить дополнительную информацию. Изменение коллагеновых волокон в голосовых складках, которое возникает как при опухолевой, так и при неопухолевой патологии, нарушает характерный паттерн на поляризационно-чувствительном изображении. В исследовании *in vivo* [37] показано, что использование ПЧ-ОКТ в дифференциальной диагностике доброкачественных и злокачественных новообразований совместно со стандартной модификацией не дает принципиально новой информации в отношении морфологической характеристики



образования, но помогает более четко определить линейные границы опухоль / нормальная ткань, метод может быть полезен в определении степени инвазии опухоли. Интенсификация сигнала двойного лучепреломления позволила отличить здоровую ткань от области рубцовых изменений, что делает перспективным использование ПЧ-ОКТ в диагностике этой патологии. Вместе с тем корреляция интенсивности сигнала и непосредственного содержания коллагена пока остается неизученной. ПЧ-ОКТ может быть использована в мониторинге коррекции рубцовых изменений гортани, например, для более прецизионного введения биоматериала в голосовую складку. Принципиальная возможность использования стандартной модификации ОКТ для контроля имплантатов в голосовой складке животных *ex vivo* и *in vivo* показана в работе [79].

Были предприняты попытки изучить с помощью ОКТ возрастные особенности и определить маркеры развития голосовых складок [41]. Однако малая выборка ($n = 20$), сканирование определенных участков, а не всей голосовой складки, а также использование только стандартной модификации ОКТ не позволили сделать достоверных выводов.

В последние годы исследования применения ОКТ в ларингологии сосредоточены на повышении качества дифференциальной диагностики предопухолевой и ранних стадий опухолевой патологии за счет дополнительной информации, получаемой с помощью модификаций технологии ОКТ (в частности, ПЧ-ОКТ с численной обработкой) и машинного обучения [42, 43].

Подводя итог, отметим: в настоящее время с наибольшим успехом различные модификации ОКТ в ларингологии могут быть использованы в целях дифференциальной диагностики злокачественной и доброкачественной патологии, определения линейных границ злокачественной опухоли, контроля биопсии, мониторинга лазерного воздействия при хирургии, а также детектирования рубцовых изменений голосовых складок. Возможность ОКТ-мониторинга посттравматических, рубцовых изменений гортани, а также их коррекции перспективна, но еще ждет своего изучения. ОКТ-оценка возрастных особенностей развития гортани пока остается на стадии пилотного эксперимента.

Оптическая когерентная томография в отиатрии

Исследования, посвященные изучению фундаментальных и прикладных аспектов применения ОКТ в отиатрии, весьма многочисленны.

Одна из первых работ, изучавших возможности ОКТ как метода визуализации анатомических структур среднего уха, выполнена С. Pitris и соавт. в 2001 г. на материале *ex vivo* [44]. Тогда впервые удалось получить высококачественные изображения неповрежденной барабанной перепонки и того, что находится непосредственно за ней: элементов оссиккулярной цепи, сухожилий мышц среднего уха, а также медиальной стенки барабанной полости. Дальнейшие исследования были направлены на интеграцию и адаптацию технологии ОКТ к практической отиатрии. Как только появились компактные ОКТ-зонды, была показана польза метода в обнаружении биопленок, образующихся на внутренней поверхности барабанной перепонки у пациентов с различными формами воспаления среднего уха [47]. Позже был предложен оригинальный способ дифференциальной диагностики острого и хронического среднего отита на основании измерения толщины барабанной перепонки на ОКТ-изображениях [48–50, 52]. Так, толщина барабанной перепонки в подобных исследованиях представлялась как совокупная величина, отражающая толщину собственно барабанной перепонки и того, что располагается на ее внутренней поверхности, то есть бактериальной агломерации или биопленки. Показано, что у пациентов с острым средним отитом имеет место утолщение барабанной перепонки, тогда как у пациентов с хроническим средним отитом подобных изменений не наблюдается, но суммарный показатель толщины барабанной перепонки значительно превышает таковой при остром процессе, по-видимому, за счет разрастания биопленок в условиях хронического воспаления.

В продолжение темы о значимости ОКТ в диагностике хронических воспалительных заболеваний среднего уха важно отметить, что в исследовании Н.Р. Djalilian и соавт. [46] были описаны отличия холестеатомы от нормальной и воспаленной слизистой оболочки. Более того, в этой работе впервые показаны возможности интеграции ОКТ в систему операционного микроскопа. В более поздних исследованиях с помощью этой методики была детально оценена микроархитектоника барабанной перепонки в условиях хронического воспаления (так называемого хронического мiringита), а также четко дифференцированы друг от друга слои тимпанальной мембраны [51, 59, 80]. К. Park и соавт. [56] использовали ОКТ для визуализации особенностей микроструктурных изменений барабанной перепонки при различных патологических состояниях. Авторы смогли

**Таблица 2.** Сравнительная характеристика применения оптической когерентной томографии в отиатрии

Первый автор, ссылка	Год	Клиническая задача	Количество пациентов	Информация, полученная с помощью ОКТ	Параметры ОКТ-системы
C. Pitris [44]	2001	Исследование микроструктуры тканей среднего уха и слуховых косточек <i>ex vivo</i>	<i>Ex vivo</i> образец	Возможность визуализации структур среднего уха	TD-OCT, 1300 нм, волоконно-оптический зонд, разрешение 15 мкм, глубина визуализации 2–3 мм
T. Just [45]	2009	Характеристика ниши овального окна	5 <i>ex vivo</i> , 8 <i>in vivo</i>	Диагностика отосклероза, тимпаносклероза, мониторинг результатов тимпанопластики	TD-OCT, 840 нм, разрешение 24 мкм
H.R. Djalilian [46]	2010	Диагностика холестеатомы	10	Визуализация холестеатомы, определение границ между холестеатомой и окружающими тканями	TD-OCT, 1300 нм, волоконно-оптический зонд диаметром 2,7 мм, разрешение 10–20 мкм, глубина визуализации 1,5 мм
C.T. Nguyen [47]	2012	Детектирование биопленок в среднем ухе при хроническом среднем отите	20 (4 здоровых, 16 пациентов)	Показано присутствие биопленок в среднем ухе у пациентов с хроническим средним отитом и их отсутствие у пациентов в норме	TD-OCT, 830 нм, разрешение 3 мкм
N.H. Cho [48]	2015	Диагностика и дифференциальная диагностика среднего отита	45 (6 здоровых, 39 пациентов)	Определены морфологические особенности барабанной перепонки в норме и при патологии. Показана возможность ОКТ-визуализации перфорации барабанной перепонки	SD-OCT, 870 нм, разрешение 6 мкм
G.L. Monroy [49]	2015	Дифференциальная диагностика среднего отита	34	Определена толщина барабанной перепонки, присутствие биопленок в полостях в среднем ухе	TD-OCT, 830 нм, разрешение 4 мкм
Z. Hubler [50]	2015	Диагностика и дифференциальная диагностика среднего отита	н/д	Определена толщина барабанной перепонки с помощью сегментации ОКТ-изображения, детектирование биопленок в полостях среднего уха за барабанной перепонкой	SD-OCT, 860 нм, разрешение 2,4 мкм
E. Guder [51]	2015	Диагностика хронического мiringита	36	Определена толщина барабанной перепонки, детектирование морфологических изменений, показана разница в толщине барабанной перепонки в норме, при мiringите, при атрофии и мiringосклерозе	ОКТ-камера, совмещенная с хирургическим микроскопом, разрешение 7,5 мкм, глубина визуализации 5–30 мм
P. Pande [52]	2016	Комплексная характеристика барабанной перепонки	6	Определено пространственное распределение толщины барабанной перепонки, проведена реконструкция карты рельефа барабанной перепонки <i>in vivo</i>	SD-OCT, 940 нм, разрешение 2,4 мкм
G.L. Monroy [53]	2017	Мониторинг результатов хирургического лечения хронического среднего отита	25	Визуализация структур барабанной перепонки и биопленок, оценка результатов хирургического вмешательства	SD-OCT, 860 нм, разрешение 2,4 мкм
G.L. Monroy [54]	2017	Диагностика и дифференциальная диагностика среднего отита	2	Определена толщина барабанной перепонки, детектирование биопленок в среднем ухе, определение коэффициента вязкости экссудата	SD-OCT, 860 нм, разрешение 2,4 мкм
G.L. Monroy [55]	2018	Диагностика и дифференциальная диагностика отита	38	Прямой анализ агломератов бактерий и биопленок, прикрепленных к барабанной перепонке	SD-OCT, разрешение 2,4 мкм, глубина визуализации 3 мм
K. Park [56]	2018	Оценка структуры барабанной перепонки при различных состояниях	120	Оценка краев перфорации, степени ретракции барабанной перепонки, процесса заживления барабанной перепонки после тимпанопластики	SD-OCT, разрешение 15 мкм, глубина визуализации до 2 мм
G.L. Monroy [57]	2019	Диагностика и дифференциальная диагностика среднего отита	58	Автоматическая дифференциация нормы, наличия биопленок, присутствия экссудата	SD-OCT, 860 нм, разрешение 2,4 мкм
D. MacDougall [58]	2019	Диагностика нарушений слуха	55	Оценка колебаний барабанной перепонки в норме и при отосклерозе	SD-OCT, доплеровская модификация, совмещенная с микроскопом



W. Kim [59]	2019	Оценка структур среднего и внутреннего уха, функциональная оценка подвижности элементов слуховой цепи	2	Получены изображения структур среднего уха, оценена вибрационная чувствительность	SD-OCT, совмещенная с микроскопом, разрешение 10 мкм
D. Preciado [60]	2020	Диагностика и дифференциальная диагностика экссудативного среднего отита	70	Наличие и характеристики экссудата за барабанной перепонкой	SD-OCT, 860 нм, разрешение 2,4 мкм
A.A. Новожилов [61]	2020	Диагностика и дифференциальная диагностика экссудативного среднего отита	24	Наличие и тип экссудата (жидкий / вязкий) в полостях среднего уха	SD-OCT, глубина визуализации 15–25 мм
T.E. Abubakirov [62]	2021	Диагностика параганглиомы	1	Визуализация параганглиомы	SD-OCT, глубина визуализации 15–25 мм
J. Wang [63]	2022	Визуализация кохлеарного импланта	1	Визуализирован электрод и его особенности	Специально разработанная система SD-OCT для среднего уха со сканирующим источником, длина волны 1550 нм
D.W. Pan [64]	2025	Оценка барабанной перепонки и содержимого барабанной полости	20	Визуализированы барабанная перепонка, слуховые косточки, барабанная хорда, мыс улитки. Выявлены объемные образования барабанной полости, проведена точная оценка степени васкуляризации	SD-OCT и ОКТ-ангиография, зонд совмещен с видеокамерой, разрешение около 30 мкм

SD-OCT (spectral-domain optical coherence tomography) – оптическая когерентная томография в спектральном режиме, TD-OCT (time-domain optical coherence tomography) – оптическая когерентная томография в режиме временной области, н/д – нет данных, ОКТ – оптическая когерентная томография

измерить толщину перфорации по краям, получили точную оценку степени ретракции барабанной перепонки, а также сумели отследить процесс послеоперационного заживления барабанной перепонки.

Интересны работы, оценивающие роль ОКТ в диагностике экссудативного среднего отита (ЭСО). Среди большого числа публикаций по данной проблеме выделяются труды G.L. Монгоу и соавт. [53–55, 57], в которых детально описывается ОКТ-картина изменений в барабанной полости в условиях скопления в ней негнойного жидкостного субстрата. Так, у пациентов с ЭСО обычно выявляются многочисленные включения за барабанной перепонкой, при этом на основании их количества и размера можно предположить степень вязкости и характер экссудата, что в свою очередь принципиально важно для определения подхода к лечению данной патологии. Численный критерий оценки для объективизации ОКТ-изображений экссудата предложили ввести и А.А. Новожилов и соавт. [61]. Использование ОКТ позволило разработать оригинальные алгоритмы диагностики и классификации среднего отита. В рамках исследования [60] авторами были доказаны высокие чувствительность (91%) и специфичность (90%)

ОКТ-исследования в диагностике ЭСО, несмотря на некоторую субъективность методики.

Применение ОКТ изучали в диагностике ряда других негнойных заболеваний среднего уха. В частности, в работе T. Just и соавт. описано исследование с помощью ОКТ ниши овального окна в норме и при патологиях. У пациентов с отосклерозом и тимпаносклерозом выявлено неоднородное утолщение подножной пластинки стремени [45].

Интеграция ОКТ в операционный микроскоп расширила возможности метода. К примеру, в хирургическом лечении отосклероза с помощью ОКТ можно визуализировать область овального окна, оценить циркулярную связку, а также рассчитать длину протеза и контролировать его расположение [81–85].

Комплементарное использование ОКТ и виброметрии позволяет оценить не только анатомию, но и функцию звукопроводящей системы, измерив движения структур среднего уха (барабанной перепонки и слуховых косточек), а также определить эффективность передачи звуковых колебаний в улитку. В эксперименте на лабораторном животном это показали W. Dong и соавт. [86], а коллективы под руководством D. MacDougall



[58] и W. Kim [59] попробовали использовать ОКТ-виброметрию в клинической практике. Отметим, что метод может иметь ряд ограничений в зависимости от технических характеристик ОКТ-установки, поскольку произвольные движения пациента, его грудной клетки и сердечный ритм могут искажать результаты.

В наблюдении Т.Э. Абубакирова и соавт. ОКТ была вспомогательным методом диагностики гломусной опухоли среднего уха [62]. Однако исследователи использовали стандартную модификацию ОКТ, которая позволяет лишь обнаружить присутствие масс биоткани в среднем ухе, но не верифицировать образование. Применение ОКТ-ангиографии позволит с большей точностью диагностировать гломусную опухоль, выявляя высокую плотность сосудистой сети [64].

Работы, посвященные детальной ОКТ-визуализации структур внутреннего уха, на сегодняшний день носят скорее экспериментальный, нежели прикладной характер. Так, в эксперименте удалось получить ОКТ-изображения внутреннего уха крыс, а также сопоставить полученные результаты с гистологическими срезами микропрепаратов [87–89]. Технические ограничения неинвазивного исследования улитки человека *in vivo* пока не позволяют транслировать метод в реальную клиническую практику. Тем не менее в последних работах предприняты попытки не просто детектировать структуры внутреннего уха, но и контролировать продвижение и положение импланта при кохлеарной имплантации [63, 90].

Таким образом, ОКТ-исследование в отиатрической практике может быть наиболее полезным в диагностике экссудата барабанной полости и в оценке его вязкости для определения показаний к хирургическому лечению, а также в изучении структурных особенностей барабанной перепонки при различных патологических состояниях и после хирургического вмешательства. Комплементарное применение других методик, таких как ОКТ-ангиография и виброметрия, позволит расширить показания для использования ОКТ при патологии уха.

Оптическая когерентная томография в ринологии

Публикации, посвященные различным аспектам применения методик ОКТ в ринологической практике, немногочисленны. По результатам исследования, проведенного U. Mahmood и соавт., были детально описаны ОКТ-особенности морфологии слизистой оболочки полости носа

в норме и у пациентов, длительно применявших деконгестанты [65]. Эта работа позволяет рассматривать ОКТ как перспективный метод не только для неинвазивного изучения слизистой оболочки, но и для динамической оценки изменений, возникающих в тканях носа при различной патологии и в результате терапии.

Интересны работы, в которых ОКТ используют для анатомической визуализации верхних дыхательных путей с последующим созданием объемных моделей. Это может помочь хирургам выявлять и оценивать зоны обструкции и рационально выбирать способ коррекции. Так, J. Jing и соавт. с помощью функциональной эндоскопической ОКТ-системы получили изображения верхних дыхательных путей от полости носа до перстневидного хряща *in vivo* с их трехмерным преобразованием [66]. Однако для получения количественной информации необходимо использовать методы численного моделирования. С.М. Waters и соавт. использовали ОКТ на образцах *post mortem* с последующей 3D-реконструкцией и сопоставлением с компьютерной томографией для объективной оценки состояния внутреннего носового клапана (ВНК) [75], а именно для получения данных о его геометрии и площади во время дыхания. Вместе с тем малое количество образцов ($n = 4$) и технические затруднения, не позволившие провести полную реконструкцию области ВНК, а также чрезвычайно долгий процесс компьютерного моделирования не способствуют внедрению этого опыта в клиническую практику. Другая группа авторов [74] провела динамическую оценку состояния ВНК у 8 добровольцев. Выявлена корреляция между площадью его внутреннего сечения и показателями внутрипросветного давления. По мнению исследователей, хирурги, определив, насколько функционально значимым является сужение ВНК, смогут оптимизировать хирургическую тактику. Однако, как и предыдущие работы в этой области, и эта методика еще нуждается в доказательствах. В частности, для того чтобы понимать, какие показатели считать патологией, целесообразно получить с помощью ОКТ значения площади ВНК в норме.

Еще одной точкой приложения ОКТ в ринологии может быть прижизненная неинвазивная оценка обонятельного эпителия, которая будет полезна в рамках диагностики неврологических расстройств и нейродегенеративных заболеваний. Т. Ueda и соавт. изучили при помощи ОКТ морфологию обонятельного эпителия мышей [70], а Т.Т. Pham и соавт. получили ОКТ-изображения обонятельного

**Таблица 3.** Сравнительная характеристика применения оптической когерентной томографии в ринологии

Первый автор, ссылка	Год	Клиническая задача	Количество пациентов	Информация, полученная с помощью ОКТ	Параметры ОКТ-системы
U. Mahmood [65]	2006	Оценка микроструктуры слизистой оболочки полости носа в норме	44	Получены ОКТ-изображения эпителия, собственной пластинки и костно-хрящевой основы, кровеносных сосудов и протоков желез, выполнена морфометрия; выявлены морфологические изменения слизистой оболочки при длительном употреблении деконгестантов	SD-ОКТ, модификация 1,3 мкм, зонд интегрирован в эндоскоп, разрешение 8–10 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
J. Jing [66]	2012	Получение структурных и анатомических данных верхних дыхательных путей	5	ОКТ-изображения структур верхних дыхательных путей сопоставлены с эндоскопическими видеоизображениями с последующей 3D-реконструкцией	SD-ОКТ с длиннофокусным преобразователем, бесконтактное получение изображения, круговое сканирование, зонд 1 мм фиксирован к эндоскопу, разрешение 10 мкм, глубина визуализации до 1,5–2 мм
L. Tóth [67]	2013	Выявление биопленок у пациентов с хроническим риносинуситом с полипами	27	Слой биопленки, респираторный эпителий, субэпителиальный слой были визуализированы с помощью ОКТ, выявлена корреляция с данными гистопатологического исследования	SD-ОКТ, разрешение 10–20 мкм, глубина визуализации до 2 мм
U. Oltmanns [68]	2016	Оценка микроструктуры слизистой оболочки полости носа у пациентов с муковисцидозом	25	Визуализированы микроструктуры слизистой оболочки полости носа у здоровых и больных муковисцидозом, описаны отличия. Выявлены изменения слизистой оболочки на фоне антибактериального лечения	SD-ОКТ, разрешение 15 мкм, глубина визуализации 1,4 мм, зонд 2,5 мм
H. Schulz-Hildebrandt [69]	2018	Оценка состояния эпителия нижней носовой раковины в норме и при хроническом рините	Несколько образцов <i>ex vivo</i> , 1 <i>in vivo</i>	Визуализирована клеточная структура эпителия нижней носовой раковины, движение ресничек, определена скорость мукоцилиарного транспорта	Микро-ОКТ, зонд 2,75 мм, разрешение 1,25 мкм
T. Ueda [70]	2019	Оценка состояния обонятельного эпителия <i>ex vivo</i>	48 мышей	Описаны микроструктурные особенности обонятельного и респираторного эпителия, измерена толщина эпителия. Показана корреляция с данными гистологического исследования	SD-ОКТ, разрешение 9 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
M.A. Шахова [71]	2019	Дифференциальная диагностика различных форм хронического ринита	51	Описаны ОКТ-признаки, характерные для разных форм хронического ринита	SD-ОКТ, разрешение 15 мкм, глубина визуализации 1,4 мм, зонд 2,4 мм
H.M. Leung [72]	2019	Оценка состояния эпителия верхних дыхательных путей при муковисцидозе	20	Выявлено снижение скорости мукоцилиарного транспорта, истощение перилиарного слоя, потеря ресничек	Микро-ОКТ, зонд 2,4 мм, разрешение 1,3 мкм
N. Soloviev [73]	2020	Повышение объективизации ОКТ-диагностики	78	Показаны результаты сравнительного анализа нескольких методов машинного обучения. Выделены методы, имеющие преимущества	SD-ОКТ, разрешение 15 мкм, глубина визуализации 1,4 мм, зонд 2,4 мм
A.A. Hakimi [74]	2021	Динамическая оценка изменений внутреннего носового клапана	8	Измерена площадь сечения внутреннего носового клапана по данным ОКТ, проведено сопоставление с показателями внутрипросветного давления, выявлена корреляция	SD-ОКТ с длиннофокусным преобразователем, бесконтактное получение изображения, спиральное сканирование, зонд 1 мм фиксирован к эндоскопу, разрешение 13 мкм, глубина визуализации до 1,5–2 мм
C.M. Waters [75]	2022	Оценка состояния внутреннего носового клапана при разных вариантах хирургических вмешательств <i>ex vivo</i>	4 <i>post-mortem</i> -образца	ОКТ-данные сопоставимы с КТ-изображениями для получения информации для анализа гидродинамических вычислений	SD-ОКТ с длиннофокусным преобразователем, бесконтактное получение изображения, разрешение 10 мкм, глубина визуализации до 1,6 мм
T.T. Pham [76]	2022	Визуализация и оценка обонятельного эпителия, обонятельной щели и решетчатой пластинки <i>ex vivo</i> с 3D-реконструкцией	4 кролика	Получены ОКТ-изображения обонятельного эпителия, собственной пластинки, решетчатой пластинки, выполнена морфометрия. ОКТ-изображения коррелировали с гистологическими данными. Описаны ОКТ-критерии повреждения эпителия и его регенерации	SD-ОКТ, 2 модификации – 1,3 и 1,7 мкм, зонд интегрирован в микроскоп, разрешение 8 мкм, глубина визуализации 1,5–2 мм
K. Vijaykumar [77]	2023	Оценка состояния эпителия верхних дыхательных путей при вирусной инфекции (COVID-19)	13	Выявлено значительное уменьшение количества функциональных ресничек, снижение частоты биения ресничек и аномальная активность ресничек	Микро-ОКТ, зонд 2,3 мм, разрешение 1,1 мкм

SD-ОКТ (spectral-domain optical coherence tomography) – оптическая когерентная томография в спектральном режиме, КТ – компьютерная томография, ОКТ – оптическая когерентная томография



эпителия, решетчатой пластики и выполнили 3D-ОКТ-реконструкцию на кроликах *ex vivo* [76]. Однако повторить эти исследования в клинической практике пока не удалось.

М.А. Шахова и соавт. показали возможности ОКТ в дифференциальной диагностике различных форм хронического ринита [71]. Установлено, что ОКТ позволяет не только оценить слоистую структуру слизистой оболочки нижней носовой раковины, но и различать патоморфологические особенности разных форм хронического ринита. Для объективизации информации авторы предложили использовать численную обработку изображений, что позволило повысить чувствительность метода [73]. Включение ОКТ в комплекс стандартной диагностики при хроническом рините улучшит дифференциальную диагностику его различных форм, тем самым позволит оптимизировать лечебную тактику.

L. Tóth и соавт. использовали ОКТ с целью обнаружения бактериальных и грибковых биопленок у пациентов с хроническим полипозным риносинуситом [67]. U. Oltmanns и соавт. по данным ОКТ описали морфологические изменения слизистой оболочки полости носа при муковисцидозе [68]. Информация о состоянии и функции ресничек мерцательного эпителия, количестве серомуцинозных желез могла бы внести дополнительный вклад в лечение таких пациентов. Однако описанная методика ОКТ не позволяет ее получить. В работе [69] показана эндомикроскопическая система ОКТ с разрешением до 1,25 мкм, с помощью которой изучена слизистая оболочка нижних носовых раковин, получены данные на клеточном уровне и отслежена динамика транспорта слизи. Авторы отметили, что различить отдельные клетки было не всегда возможно из-за сложностей расположения эндоскопа. Актуальные исследования применения ОКТ в ринологии связаны именно с увеличением разрешающей способности метода [72, 77].

К ограничениям использования ОКТ в данной области ринологии следует отнести сложную архитектуру, относительно небольшой объем полости носа, затрудняющий манипуляции оптическим зондом при ОКТ-исследовании. В связи с этим бесконтактные методики с круговым сканированием имеют преимущество, а повышение разрешающей способности ОКТ-установок позволит оценивать состояние слизистой оболочки на клеточном уровне, определяя эндотип синоназальной патологии, и персонифицировать лечение.

Перспективы применения оптической когерентной томографии в оториноларингологии

В последнее время внедряются методы мультимодальной ОКТ, позволяющие получать одновременно морфологическую и функциональную информацию об исследуемой биоткани. Особый акцент следует сделать на ОКТ-ангиографии (ОКТ-А), с помощью которой параллельно с непосредственно ОКТ-изображением можно получить карту активного микроциркуляторного русла в биоткани [91]. Поскольку построение ОКТ-изображений основано на принципах интерферометрии, наличие движущихся объектов (эритроцитов и других форменных элементов крови) в исследуемой биоткани приводит к локальному динамическому изменению спекл-структуры изображения. Именно поэтому анализ динамики спеклов позволяет определить области, в которых присутствует кровоток. Метод ОКТ-А имеет высокий потенциал применения в оториноларингологии, поскольку анализ активности микроциркуляторного русла может помочь как в изучении фундаментальной патофизиологии ЛОР-органов, так и в вопросах диагностики и дифференциальной диагностики, а также в оценке состояния биотканей в процессе или в результате лечения. Например: поскольку классические признаки воспаления при развитии риносинуситов, отитов, тонзиллофарингитов и других ЛОР-заболеваний и есть проявления нарушения микроциркуляции, контроль за развитием капиллярной проницаемости, сосудистого стаза, экссудации позволит оценить тяжесть воспаления и, при необходимости, эффективность лечения. Исключительная чувствительность кохлеовестибулярного анализатора к ишемии, лежащая в основе сосудистой теории возникновения острой нейросенсорной тугоухости, болезни Меньера и других кохлеовестибулопатий, диктует необходимость использования методов, способных детектировать тромбоз или спазм лабиринтных артерий, нарушение микроциркуляции в сосудистой полоске для контроля гипоксии волосковых клеток и предотвращения их гибели. А, например, оценка микроциркуляции в послеоперационном периоде после тимпано-, рино- или септопластики даст возможность спрогнозировать риски некрозов, отторжения трансплантатов и скорректировать тактику. Однако применение такого подхода сопряжено с разработкой специализированных зондов, в том числе эндоскопических, без которых невозможно осуществить такую диагностику.



Отдельно следует отметить применение при интерпретации ОКТ-изображений методов машинного обучения, получающих все большее распространение. Эти подходы широко используются для решения двух типов задач при применении ОКТ: 1) сегментации ОКТ-изображений, заключающейся в автоматическом выделении структурных элементов и их характеризации, и 2) классификации, заключающейся в автоматизированном определении наличия патологии по диагностическому ОКТ-изображению. Обе задачи решались в работах по офтальмологии [92], где в силу слабого рассеяния в тканях изображения наиболее просты для анализа, и по дерматологии [93–95], где многократное рассеяние в коже приводит к существенному затуханию ОКТ-сигнала с глубиной и ограничивает глубину зондирования. Наиболее близкими к применению в ЛОР-практике следует считать работы, в которых ОКТ используется для исследования слизистых оболочек [96–98]. Применение таких подходов в оториноларингологии пока ограничено [43, 57, 71, 73], но представляется перспективным.

Заключение

В данном обзоре показано, что ОКТ – высокоинформативный неинвазивный метод, который в режиме реального времени позволяет оценить состояние слизистой оболочки глотки и гортани, носовой полости, а также структур

среднего уха и предоставляет возможность дифференцировать патоморфологические особенности заболеваний ЛОР-органов. Дополнение стандартных диагностических мероприятий ОКТ-исследованием позволит улучшить диагностику воспалительной ЛОР-патологии, идентифицировав ее патоморфологические варианты, включая латентные формы, а также повысит информативность диагностики ранних стадий онкозаболеваний, в свою очередь возможность мониторинга проводимого лечения будет способствовать его оптимизации. Однако следует отметить, что результаты ОКТ-исследования в значительной степени зависят от ряда факторов. Ключевое значение имеет опыт и квалификация исследователя: как и большинство других методов визуализации, использование ОКТ требует знания анатомии и морфологии, а также обширного практического опыта в конкретном применении метода. Не менее важны и технические параметры ОКТ-установок (временная / спектральная модификации, разрешающая способность, тип зонда, интеграция в эндоскоп или микроскоп). Работа мультидисциплинарной команды специалистов, внедрение автоматизированного анализа изображений, технические инновации, стандартизация протоколов исследования несомненно повысят ценность ОКТ в клинической практике, в том числе в оториноларингологии. ©

Дополнительная информация

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-15-00175, <https://rscf.ru/project/24-15-00175/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Участие авторов

М.А. Шахова – концепция и дизайн исследования, поиск и анализ источников, написание текста; В.А. Фокеев – поиск и анализ источников в области ларингологии, написание текста; А.Е. Меллер – поиск и анализ источников

в области ринологии, редактирование рукописи; А.Б. Терентьева – поиск и анализ источников в области отиатрии, редактирование рукописи; М.Ю. Кириллин – концепция и дизайн исследования, поиск и анализ источников в области применения модификаций ОКТ и обработки данных, написание текста, утверждение итогового варианта текста рукописи; А.В. Шахов – концепция и дизайн статьи, редактирование текста, утверждение итогового варианта текста рукописи. Все авторы прочли и одобрили финальную версию статьи перед публикацией, согласны нести ответственность за все аспекты работы и гарантируют, что ими надлежащим образом были рассмотрены и решены вопросы, связанные с точностью и добросовестностью всех частей работы.

Список литературы / References

1. Brezinski ME, Tearney GJ, Bouma BE, Izatt JA, Hee MR, Swanson EA, Southern JF, Fujimoto JG. Optical coherence tomography for optical biopsy. Properties and demonstration of vascular pathology. *Circulation*. 1996;93(6):1206–1213. doi: 10.1161/01.cir.93.6.1206.
2. Nordstrom RJ, Burke L, Niloff JM, Myrtle JF. Identification of cervical intraepithelial neoplasia (CIN) using UV-excited fluorescence and diffuse-reflectance tissue spectroscopy. *Lasers Surg Med*. 2001;29(2):118–127. doi: 10.1002/lsm.1097.
3. Sarosdy MF, deVere White RW, Soloway MS, Sheinfeld J, Hudson MA, Schellhammer PF, Jarowenko MV, Adams G, Blumenstein BA. Results of a multicenter trial using the BTA test to monitor for and diagnose recurrent bladder cancer. *J Urol*. 1995;154(2 Pt 1):379–383; discussion 383–384. doi: 10.1097/00005392-199508000-00013.
4. Fortunato L, Amini M, Farina M, Rapacchietta S, Costarelli L, Piro FR, Alessi G, Pompili P, Bianca S, Vitelli CE. Intraoperative examination of sentinel nodes in breast cancer: Is the glass half full or half empty? *Ann Surg Oncol*. 2004;11(11):1005–1010. doi: 10.1245/ASO.2004.12.005.
5. Niu Y, Fu XL, Yu Y, Wang PP, Cao XC. Intra-operative frozen section diagnosis of breast lesions: A retrospective analysis of 13,243 Chinese patients. *Chin Med J (Engl)*. 2007;120(8):630–635.



6. Povoski SP, Young DC, Walker MJ, Carson WE, Yee LD, Agnese DM, Farrar WB. Re-emphasizing the concept of adequacy of intraoperative assessment of the axillary sentinel lymph nodes for identifying nodal positivity during breast cancer surgery. *World J Surg Oncol*. 2007;5:18. doi: 10.1186/1477-7819-5-18.
7. Boppart SA, Herrmann J, Pitris C, Stampfer DL, Brezinski ME, Fujimoto JG. High-resolution optical coherence tomography-guided laser ablation of surgical tissue. *J Surg Res*. 1999;82(2):275–284. doi: 10.1006/jsre.1998.5555.
8. Ferris DG, Lawhead RA, Dickman ED, Holtzaple N, Miller JA, Grogan S, Bambot S, Agrawal A, Faupel ML. Multimodal hyperspectral imaging for the noninvasive diagnosis of cervical neoplasia. *J Low Genit Tract Dis*. 2001;5(2):65–72. doi: 10.1046/j.1526-0976.2001.005002065.x.
9. Huang D, Swanson EA, Lin CP, Schuman JS, Stinson WG, Chang W, Hee MR, Flotte T, Gregory K, Puliafito CA, et al. Optical coherence tomography. *Science*. 1991;254(5035):1178–1181. doi: 10.1126/science.1957169.
10. Тучин ВВ. Оптика биологических тканей: методы рассеяния света в медицинской диагностике. М.: Физматлит, 2012. 811 с.
Tuchin VV. Optics of biological tissues: methods of light scattering in medical diagnostics. Moscow: Fizmatlit, 2012. 811 p. Russian.
11. Гладкова НД, Геликонов ГВ, Киселева ЕБ, ред. Мультимодальная оптическая когерентная томография в клинической медицине. М.: Физматлит, 2022. 336 с.
Gladkova ND, Gelikonov GV, Kiseleva EB, eds. Multimodal optical coherence tomography in clinical medicine. Moscow: Fizmatlit, 2022. 336 p. Russian.
12. Hee MR, Puliafito CA, Wong C, Duker JS, Reichel E, Rutledge B, Schuman JS, Swanson EA, Fujimoto JG. Quantitative assessment of macular edema with optical coherence tomography. *Arch Ophthalmol*. 1995;113(8):1019–1029. doi: 10.1001/archophth.1995.01100080071031.
13. Adhi M, Duker JS. Optical coherence tomography – current and future applications. *Curr Opin Ophthalmol*. 2013;24(3):213–221. doi: 10.1097/ICU.0b013e32835f8bf8.
14. Boppart SA. Optical coherence tomography: Technology and applications for neuroimaging. *Psychophysiology*. 2003;40(4):529–541. doi: 10.1111/1469-8986.00055.
15. Gambichler T, Moussa G, Sand M, Sand D, Altmeyer P, Hoffmann K. Applications of optical coherence tomography in dermatology. *J Dermatol Sci*. 2005;40(2):85–94. doi: 10.1016/j.jdermsci.2005.07.006.
16. Cohen SY, Miere A, Nghiem-Buffet S, Fajnkuchen F, Souied EH, Mrejen S. Clinical applications of optical coherence tomography angiography: What we have learnt in the first 3 years. *Eur J Ophthalmol*. 2018;28(5):491–502. doi: 10.1177/1120672117753704.
17. Wang J, Xu Y, Boppart SA. Review of optical coherence tomography in oncology. *J Biomed Opt*. 2017;22(12):1–23. doi: 10.1117/1.JBO.22.12.121711.
18. Hartmann K, Stein KP, Neyazi B, Sandalcioğlu IE. Theranostic applications of optical coherence tomography in neurosurgery? *Neurosurg Rev*. 2022;45(1):421–427. doi: 10.1007/s10143-021-01599-x.
19. Ascencio M, Collinet P, Cosson M, Mordon S. Place et intérêt de la tomographie par cohérence optique en gynécologie [The role and value of optical coherence tomography in gynecology]. *J Gynecol Obstet Biol Reprod (Paris)*. 2007;36(8):749–755. French. doi: 10.1016/j.jgyn.2007.07.005.
20. Wang HW, Chen Y. Clinical applications of optical coherence tomography in urology. *Intravital*. 2014;3(1):e28770. doi: 10.4161/intv.28770.
21. Gladkova ND, Petrova GA, Nikulin NK, Radenska-Lopovok SG, Snopova LB, Chumakov YP, Nasonova VA, Gelikonov VM, Gelikonov GV, Kuranov RV, Sergeev AM, Feldchtein FI. In vivo optical coherence tomography imaging of human skin: Norm and pathology. *Skin Res Technol*. 2000;6(1):6–16. doi: 10.1034/j.1600-0846.2000.006001006.x.
22. Gladkova ND, Shakhova NM, Shakhov BE, Gelikonov GV. Opticheskaia kogerentnaia tomografiia – novaia vysokorazreshaushchaia tekhnologiia vizualizatsii struktury tkanei. Soobshchenie 1. Printsip metoda. Ob"ekty prilozheniia OKT i tekhnicheskie resheniia dlia ikh issledovaniia [Optic coherent tomography: a new high-resolution technology of visualization of tissue structures. Part 1. Principle of the technique. Objects of OCT applications and technical decisions for their study]. *Vestn Rentgenol Radiol*. 2002;(2):39–47. Russian.
23. Shakhov A, Terentjeva A, Gladkova N. Capabilities of optical coherence tomography in laryngology. *Proc SPIE*. 1999;3590:250–260. doi: 10.1117/12.350971.
24. Shlivko IL, Kamensky VA, Donchenko EV, Agba P. Morphological changes in skin of different phototypes under the action of topical corticosteroid therapy and tacrolimus. *Skin Res Technol*. 2014;20(2):136–140. doi: 10.1111/srt.12095.
25. Петрова ГА, Дерпалюк ЕН, Гладкова НД, Никулин НК, Геликонов ВМ, Геликонов ГВ, Иксанов РР, Каменский ВА. Оптическая когерентная томография – эффективный метод прижизненного исследования структуры кожи в норме и при патологии. Экспериментальная и клиническая дерматокосметология. 2005;(2):8–16.
Petrova GA, Derpalyuk EN, Gladkova ND, Nikulin NK, Gelikonov VM, Gelikonov GV, Iksanov RR, Kamensky VA. [Optical coherence tomography – an effective method for intravital study of skin structure in health and disease]. *Experimental and Clinical Dermatocosmetology*. 2005;(2):8–16. Russian.
26. Sergeev A, Gelikonov V, Gelikonov G, Feldchtein F, Kuranov R, Gladkova N, Shakhova N, Snopova L, Shakhov A, Kuznetzova I, Denisenko A, Pochinko V, Chumakov Y, Streltsova O. In vivo endoscopic OCT imaging of precancer and cancer states of human mucosa. *Opt Express*. 1997;1(13):432–440. doi: 10.1364/oe.1.000432.
27. Feldchtein F, Gelikonov G, Gelikonov V, Kuranov R, Sergeev A, Gladkova N, Shakhov A, Shakhova N, Snopova L, Terent'eva A, Zagainova E, Chumakov Y, Kuznetzova I. Endoscopic applications of optical coherence tomography. *Opt Express*. 1998;3(6):257–270. doi: 10.1364/oe.3.000257.
28. Shakhov AV, Terentjeva AB, Kamensky VA, Snopova LB, Gelikonov VM, Feldchtein FI, Sergeev AM. Optical coherence tomography monitoring for laser surgery of laryngeal carcinoma. *J Surg Oncol*. 2001;77(4):253–258. doi: 10.1002/jso.1105.
29. Bouma BE, Tearney GJ, eds. Handbook of optical coherence tomography. New York, Basel: Marcel Dekker, 2002. Pp. 705–724.
30. Armstrong WB, Ridgway JM, Vokes DE, Guo S, Perez J, Jackson RP, Gu M, Su J, Crumley RL, Shibuya TY, Mahmood U, Chen Z, Wong BJ. Optical coherence tomography of laryngeal cancer. *Laryngoscope*. 2006;116(7):1107–1113. doi: 10.1097/01.mlg.0000217539.27432.5a.
31. Kraft M, Glanz H, von Gerlach S, Wisweh H, Lubatschowski H, Arens C. Clinical value of optical coherence tomography in laryngology. *Head Neck*. 2008;30(12):1628–1635. doi: 10.1002/hed.20914.
32. Ridgway JM, Su J, Wright R, Guo S, Kim DC, Barretto R, Ahuja G, Sepehr A, Perez J, Sills JH, Chen Z, Wong BJ. Optical coherence tomography of the newborn airway. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 2008;117(5):327–334.
33. Wong BJ, Jackson RP, Guo S, Ridgway JM, Mahmood U, Su J, Shibuya TY, Crumley RL, Gu M, Armstrong WB, Chen Z. In vivo optical coherence tomography of the human larynx: Normative and benign pathology in 82 patients. *Laryngoscope*. 2005;115(11):1904–1911. doi: 10.1097/01.MLG.0000181465.17744.BE. Erratum in: *Laryngoscope*. 2006;116(3):507.
34. Yu L, Liu G, Rubinstein M, Saidi A, Wong BJ, Chen Z. Office-based dynamic imaging of vocal cords in awake patients with swept-source optical coherence tomography. *J Biomed Opt*. 2009;14(6):064020. doi: 10.1117/1.3268442.
35. Just T, Lankenau E, Prall F, Hüttmann G, Pau HW, Sommer K. Optical coherence tomography allows for the reliable identification of laryngeal epithelial dysplasia and for precise biopsy: A clinicopathological study of 61 patients undergoing microlaryngoscopy. *Laryngo-*



- scope. 2010;120(10):1964–1970. doi: 10.1002/lary.21057.
36. Just T, Pau HW, Lankenau E, Hüttmann G. OCT in the field of laryngology: Further perspectives. *Proc SPIE*. 2011;7883. doi: 10.1117/12.886959.
37. Burns JA, Kim KH, deBoer JF, Anderson RR, Zeitels SM. Polarization-sensitive optical coherence tomography imaging of benign and malignant laryngeal lesions: An in vivo study. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2011;145(1):91–99. doi: 10.1177/0194599811403078.
38. Sharma GK, Ahuja GS, Wiedmann M, Osann KE, Su E, Heidari AE, Jing JC, Qu Y, Lazarow F, Wang A, Chou L, Uy CC, Dhar V, Cleary JP, Pham N, Huoh K, Chen Z, Wong BJ. Long-range optical coherence tomography of the neonatal upper airway for early diagnosis of intubation-related subglottic injury. *Am J Respir Crit Care Med*. 2015;192(12):1504–1513. doi: 10.1164/rccm.201501-0053OC.
39. Volgger V, Sharma GK, Jing JC, Peaks YS, Loy AC, Lazarow F, Wang A, Qu Y, Su E, Chen Z, Ahuja GS, Wong BJ. Long-range Fourier domain optical coherence tomography of the pediatric subglottis. *Int J Pediatr Otorhinolaryngol*. 2015;79(2):119–126. doi: 10.1016/j.ijporl.2014.11.019.
40. Donner S, Bleeker S, Ripken T, Ptok M, Jungheim M, Krueger A. Automated working distance adjustment enables optical coherence tomography of the human larynx in awake patients. *J Med Imaging (Bellingham)*. 2015;2(2):026003. doi: 10.1117/1.JMI.2.2.026003.
41. Garcia JA, Benboujja F, Beaudette K, Guo R, Boudoux C, Hartnick CJ. Using attenuation coefficients from optical coherence tomography as markers of vocal fold maturation. *Laryngoscope*. 2016;126(6):E218–E223. doi: 10.1002/lary.25765.
42. Xin Z, Kim SW, Oak K, Kwon DY, Choi JH, Ko TY, Kim JH, Tang S, Ahn YC. Investigation of the clinical potential of polarization-sensitive optical coherence tomography in a laryngeal tumor model. *Tissue Eng Regen Med*. 2021;18(1):81–87. doi: 10.1007/s13770-020-00323-y.
43. Li X, Sun S, Zhang Y, Liu C, Yan Y, Song W, Chen X, Hong W, Yue S. Accurate and timely intraoperative classification of vocal cord leukoplakia by machine learning assisted handheld OCT. *Biomed Opt Express*. 2025;16(10):4190–4202. doi: 10.1364/BOE.572598.
44. Pitris C, Saunders KT, Fujimoto JG, Brezinski ME. High-resolution imaging of the middle ear with optical coherence tomography: A feasibility study. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*. 2001;127(6):637–642. doi: 10.1001/archotol.127.6.637.
45. Just T, Lankenau E, Hüttmann G, Pau HW. Optical coherence tomography of the oval window niche. *J Laryngol Otol*. 2009;123(6):603–608. doi: 10.1017/S0022215109004381.
46. Djalilian HR, Rubinstein M, Wu EC, Naemi K, Zardouz S, Karimi K, Wong BJ. Optical coherence tomography of cholesteatoma. *Otol Neurotol*. 2010;31(6):932–935. doi: 10.1097/mao.0b013e3181e711b8.
47. Nguyen CT, Jung W, Kim J, Chaney EJ, Novak M, Stewart CN, Boppart SA. Noninvasive in vivo optical detection of biofilm in the human middle ear. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2012;109(24):9529–9534. doi: 10.1073/pnas.1201592109.
48. Cho NH, Lee SH, Jung W, Jang JH, Boppart SA, Kim J. Optical coherence tomography for the diagnosis and evaluation of human otitis media. *J Korean Med Sci*. 2015;30(6):834. doi: 10.3346/jkms.2015.30.6.834. Erratum for: *J Korean Med Sci*. 2015;30(3):328–335. doi: 10.3346/jkms.2015.30.3.328.
49. Monroy GL, Shelton RL, Nolan RM, Nguyen CT, Novak MA, Hill MC, McCormick DT, Boppart SA. Noninvasive depth-resolved optical measurements of the tympanic membrane and middle ear for differentiating otitis media. *Laryngoscope*. 2015;125(8):E276–E282. doi: 10.1002/lary.25141.
50. Hubler Z, Shemonski ND, Shelton RL, Monroy GL, Nolan RM, Boppart SA. Real-time automated thickness measurement of the in vivo human tympanic membrane using optical coherence tomography. *Quant Imaging Med Surg*. 2015;5(1):69–77. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2014.11.32.
51. Guder E, Lankenau E, Fleischhauer F, Schulz-Hildebrandt H, Hüttmann G, Pau HW, Just T. Microanatomy of the tympanic membrane in chronic myringitis obtained with optical coherence tomography. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2015;272(11):3217–3223. doi: 10.1007/s00405-014-3373-z.
52. Pande P, Shelton RL, Monroy GL, Nolan RM, Boppart SA. A mosaicking approach for in vivo thickness mapping of the human tympanic membrane using low coherence interferometry. *J Assoc Res Otolaryngol*. 2016;17(5):403–416. doi: 10.1007/s10162-016-0576-6.
53. Monroy GL, Pande P, Nolan RM, Shelton RL, Porter RG, Novak MA, Spillman DR, Chaney EJ, McCormick DT, Boppart SA. Noninvasive in vivo optical coherence tomography tracking of chronic otitis media in pediatric subjects after surgical intervention. *J Biomed Opt*. 2017;22(12):1–11. doi: 10.1117/1.JBO.22.12.121614.
54. Monroy GL, Pande P, Shelton RL, Nolan RM, Spillman DR Jr, Porter RG, Novak MA, Boppart SA. Non-invasive optical assessment of viscosity of middle ear effusions in otitis media. *J Biophotonics*. 2017;10(3):394–403. doi: 10.1002/jbio.201500313.
55. Monroy GL, Hong W, Khampang P, Porter RG, Novak MA, Spillman DR, Barkalifa R, Chaney EJ, Kerschner JE, Boppart SA. Direct analysis of pathogenic structures affixed to the tympanic membrane during chronic otitis media. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2018;159(1):117–126. doi: 10.1177/0194599818766320.
56. Park K, Cho NH, Jeon M, Lee SH, Jang JH, Boppart SA, Jung W, Kim J. Optical assessment of the in vivo tympanic membrane status using a handheld optical coherence tomography-based otoscope. *Acta Otolaryngol*. 2018;138(4):367–374. doi: 10.1080/00016489.2017.1395515.
57. Monroy GL, Won J, Dsouza R, Pande P, Hill MC, Porter RG, Novak MA, Spillman DR, Boppart SA. Automated classification platform for the identification of otitis media using optical coherence tomography. *NPJ Digit Med*. 2019;2:22. doi: 10.1038/s41746-019-0094-0.
58. MacDougall D, Morrison L, Morrison C, Morris DP, Bance M, Adamson RBA. Optical coherence tomography Doppler vibrometry measurement of stapes vibration in patients with stapes fixation and normal controls. *Otol Neurotol*. 2019;40(4):e349–e355. doi: 10.1097/MAO.0000000000002193.
59. Kim W, Kim S, Huang S, Oghalai JS, Applegate BE. Picometer scale vibrometry in the human middle ear using a surgical microscope based optical coherence tomography and vibrometry system. *Biomed Opt Express*. 2019;10(9):4395–4410. doi: 10.1364/BOE.10.004395.
60. Preciado D, Nolan RM, Joshi R, Krakovsky GM, Zhang A, Pudik NA, Kumar NK, Shelton RL, Boppart SA, Bauman NM. Otitis media middle ear effusion identification and characterization using an optical coherence tomography otoscope. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 2020;162(3):367–374. doi: 10.1177/0194599819900762.
61. Новожилов АА, Шилигин ПА, Абубакиров ТЭ, Дилениан АЛ, Климычева МБ, Геликонов ГВ, Ксенофонтов СЮ, Геликонов ВМ, Шахов АВ. Бесконтактная оптическая когерентная томография – эффективный метод визуализации экссудата среднего уха. *Вестник оториноларингологии*. 2020;85(4):16–23. doi: 10.17116/otorino20208504116.
- Novozhilov AA, Shilyagin PA, Abubakirov TE, Dilenyan AL, Klimycheva MB, Helikonov GV, Ksenofontov SY, Helikonov VM, Shakhov AV. [Non-contact optical coherence tomography – an effective method for visualizing the exudate of the middle ear]. *Russian Bulletin of Otorhinolaryngology*. 2020;85(4):16–23. Russian. doi: 10.17116/otorino20208504116.
62. Абубакиров ТЭ, Новожилов АА, Шилигин ПА, Дилениан АЛ, Хасянова ЮА, Шахов АВ. Оптическая когерентная томография в диагностике тимпанальной параганглиомы. *Клинический случай. Экспериментальная и клиническая оториноларингология*. 2021;(2):63–65.
- Abubakirov TE, Novozhilov AA, Shilyagin PA, Dilenyan AL, Khasyanova YA, Shakhov AV. Optical coherent tomography in tympanic paraganglioma diagnosis. Case report. *Experimental and Clinical Otorhinolaryngology*. 2021;(2):63–65. Russian.
63. Wang J, Chawdhary G, Farrell J, Yang X, Farrell M, MacDougall D, Trudel M, Shoman N, Morris DP,



- Adamson RBA. Transtympanic visualization of cochlear implant placement with optical coherence tomography: A pilot study. *Otol Neurotol.* 2022;43(8):e824–e828. doi: 10.1097/MAO.0000000000003635.
64. Pan DW, Morán MA, Kim W, Yang Z, Applegate BE, Oghalai JS. Optical coherence tomography imaging and angiography of skull base tumors presenting as a middle ear mass in clinic. *Diagnostics (Basel).* 2025;15(6):732. doi: 10.3390/diagnostics15060732.
 65. Mahmood U, Ridgway J, Jackson R, Guo S, Su J, Armstrong W, Shibuya T, Crumley R, Chen Z, Wong B. In vivo optical coherence tomography of the nasal mucosa. *Am J Rhinol.* 2006;20(2):155–159.
 66. Jing J, Zhang J, Loy AC, Wong BJ, Chen Z. High-speed upper-airway imaging using full-range optical coherence tomography. *J Biomed Opt.* 2012;17(11):110507. doi: 10.1117/1.jbo.17.11.110507.
 67. Tóth L, Vajás A, Csomor P, Berta A, Sziklai I, Karosi T. Optical coherence tomography for biofilm detection in chronic rhinosinusitis with nasal polyposis. *Eur Arch Otorhinolaryngol.* 2013;270(2):555–563. doi: 10.1007/s00405-012-2051-2.
 68. Oltmanns U, Palmowski K, Wielpütz M, Kahn N, Baroke E, Eberhardt R, Wege S, Wiebel M, Kreuter M, Herth FJ, Mall MA. Optical coherence tomography detects structural abnormalities of the nasal mucosa in patients with cystic fibrosis. *J Cyst Fibros.* 2016;15(2):216–222. doi: 10.1016/j.jcf.2015.07.003.
 69. Schulz-Hildebrandt H, Pieper M, Stehmar C, Ahrens M, Idel C, Wollenberg B, König P, Hüttmann G. Novel endoscope with increased depth of field for imaging human nasal tissue by microscopic optical coherence tomography. *Biomed Opt Express.* 2018;9(2):636–647. doi: 10.1364/BOE.9.000636.
 70. Ueda T, Sakamoto T, Kobayashi M, Kuwata F, Ishikawa M, Omori K, Nakagawa T. Optical coherence tomography for observation of the olfactory epithelium in mice. *Auris Nasus Larynx.* 2019;46(2):230–237. doi: 10.1016/j.anl.2018.08.009.
 71. Шахова МА, Меллер АЕ, Соловьев НА, Терентьева АБ, Шахов АВ, Куракина ДА, Кириллин МЮ. Дифференциальная диагностика различных форм хронического ринита на основе данных оптической когерентной томографии. *Российская ринология.* 2019;27(3):127–133. doi: 10.17116/rosrino201927031127.
 - Shakhova MA, Meller AE, Solov'ev NA, Terentyeva AB, Shakhov AV, Kurakina DA, Kirillin Mlu. [Differential diagnosis of various forms of chronic rhinitis based on optical coherence tomography]. *Russian Rhinology.* 2019;27(3):127–133. Russian. doi: 10.17116/rosrino201927031127.
 72. Leung HM, Birket SE, Hyun C, Ford TN, Cui D, Solomon GM, Shei RJ, Adewale AT, Lenzie AR, Fernandez-Petty CM, Zheng H, Palermo JH, Cho DY, Woodworth BA, Yonker LM, Hurley BP, Rowe SM, Tearney GJ. Intranasal micro-optical coherence tomography imaging for cystic fibrosis studies. *Sci Transl Med.* 2019;11(504):eaav3505. doi: 10.1126/scitranslmed.aav3505.
 73. Soloviev N, Khilov A, Shakhova M, Meller A, Perkatova V, Sergeeva E, Kirillin M. Machine learning aided automated differential diagnostics of chronic rhinitis based on optical coherence tomography. *Laser Phys Lett.* 2020;17(11):115608. doi: 10.1088/1612-202X/abbf48.
 74. Hakimi AA, Sharma GK, Ngo T, Heidari AE, Badger CD, Tripathi PB, Hong EM, Chen Z, Wong BJF. Coupling pressure sensing with optical coherence tomography to evaluate the internal nasal valve. *Ann Otol Rhinol Laryngol.* 2021;130(2):167–172. doi: 10.1177/0003489420944199.
 75. Waters CM, Stepp WH, Conduff J, Balakrishnan S, Bu R, Oldenburg AL, Kimbell JS, Shockley WW, Clark JM. Anatomic optical coherence tomography (aOCT) for evaluation of the internal nasal valve. *Laryngoscope.* 2022;132(11):2148–2156. doi: 10.1002/lary.29979.
 76. Pham TT, Heidari AE, Hakimi AA, Li Y, Heilbronn CM, Hong EM, Mo JH, Kuan EC, Chen Z, Wong BJ. Visualization of ex vivo rabbit olfactory mucosa and foramina with three-dimensional optical coherence tomography. *Lasers Med Sci.* 2022;37(8):3203–3211. doi: 10.1007/s10103-022-03598-w.
 77. Vijaykumar K, Leung HM, Barrios A, Fernandez-Petty CM, Solomon GM, Hathorne HY, Wade JD, Monroe K, Slaten KB, Li Q, Leal SM Jr, Moates DB, Pierce HM, Olson KR, Currier P, Foster S, Marsden D, Tearney GJ, Rowe SM. COVID-19 causes ciliary dysfunction as demonstrated by human intranasal micro-optical coherence tomography imaging. *Am J Respir Cell Mol Biol.* 2023;69(5):592–595. doi: 10.1165/rcmb.2023-0177LE.
 78. Шахов АВ. Оптическая когерентная томография в диагностике заболеваний гортани: дис. ... д-ра мед. наук. Нижний Новгород, 2003.
 - Shakhov AV. [Optical coherence tomography in diagnostics of larynx diseases]: diss. ... Doc. of Med. Sci. Nizhny Novgorod, 2003. Russian.
 79. Burns JA, Kim KH, Kobler JB, deBoer JF, Lopez-Guerra G, Zeitels SM. Real-time tracking of vocal fold injections with optical coherence tomography. *Laryngoscope.* 2009;119(11):2182–2186. doi: 10.1002/lary.20654.
 80. Burakgazi G, Bayarogullari H, Öztürk F, Arli C, Motor VK, Yanmaz R, Atci N. Radiological imaging of rare intracranial complications secondary to otitis media and mastoiditis. *J Craniofac Surg.* 2017;28(3):620–624. doi: 10.1097/SCS.00000000000003391.
 81. Just T, Lankenau E, Hüttmann G, Pau HW. Intraoperative Anwendung der Optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) zur Darstellung der ovalen Fensternische [Intraoperative application of optical coherence tomography (OCT) for visualization of the oval window niche]. *Laryngorhinootologie.* 2009;88(3):168–173. German. doi: 10.1055/s-2008-1077530.
 82. Chang EW, Cheng JT, Rösli C, Kobler JB, Rosowski JJ, Yun SH. Simultaneous 3D imaging of sound-induced motions of the tympanic membrane and middle ear ossicles. *Hear Res.* 2013;304:49–56. doi: 10.1016/j.heares.2013.06.006.
 83. Heermann R, Hauger C, Issing PR, Lenarz T. Erste Anwendungen der optischen Kohärenztomographie (OCT) in der Mittelohrchirurgie [Application of optical coherence tomography (OCT) in middle ear surgery]. *Laryngorhinootologie.* 2002;81(6):400–405. German. doi: 10.1055/s-2002-32213.
 84. Cho NH, Jang JH. Future directions of optical coherence tomography in otology: A morphological and functional approach. *Clin Exp Otorhinolaryngol.* 2020;13(2):85–86. doi: 10.21053/ceo.2020.00031.
 85. Just T, Lankenau E, Hüttmann G, Pau HW. Optische Kohärenztomographie in der Mittelohrchirurgie [Optical coherence tomography in middle ear surgery]. *HNO.* 2009;57(5):421–427. German. doi: 10.1007/s00106-009-1907-2.
 86. Dong W, Xia A, Raphael PD, Puria S, Applegate B, Oghalai JS. Organ of Corti vibration within the intact gerbil cochlea measured by volumetric optical coherence tomography and vibrometry. *J Neurophysiol.* 2018;120(6):2847–2857. doi: 10.1152/jn.00702.2017.
 87. Burwood GWS, Fridberger A, Wang RK, Nuttall AL. Revealing the morphology and function of the cochlea and middle ear with optical coherence tomography. *Quant Imaging Med Surg.* 2019;9(5):858–881. doi: 10.21037/qims.2019.05.10.
 88. Tona Y, Sakamoto T, Nakagawa T, Adachi T, Taniguchi M, Torii H, Hamaguchi K, Kitajiri S, Ito J. In vivo imaging of mouse cochlea by optical coherence tomography. *Otol Neurotol.* 2014;35(2):e84–e89. doi: 10.1097/MAO.0000000000000252.
 89. Oh SJ, Lee IW, Wang SG, Kong SK, Kim HK, Goh EK. Extratympanic observation of middle and inner ear structures in rodents using optical coherence tomography. *Clin Exp Otorhinolaryngol.* 2020;13(2):106–112. doi: 10.21053/ceo.2019.00766.
 90. Jiramongkolchai P, Amaral MM, Paul R, Matt A, Nie M, Hao S, Adkins AJ, Liang H, Holden T, Buchman CA, Zhou C. Application of spectral domain optical coherence tomography to guide cochlear implant electrode array. *bioRxiv [Preprint].* 2025 Jun 1:2025.05.27.656464. doi: 10.1101/2025.05.27.656464.
 91. Deegan AJ, Talebi-Liasi F, Song S, Li Y, Xu J, Men S, Shinohara MM, Flowers ME, Lee SJ,



- Wang RK. Optical coherence tomography angiography of normal skin and inflammatory dermatologic conditions. *Lasers Surg Med*. 2018;50(3):183–193. doi: 10.1002/lsm.22788.
92. Zhang H, Yang B, Li S, Zhang X, Li X, Liu T, Higashita R, Liu J. Retinal OCT image segmentation with deep learning: A review of advances, datasets, and evaluation metrics. *Comput Med Imaging Graph*. 2025;123:102539. doi: 10.1016/j.compmedimag.2025.102539.
93. Del Amor R, Morales S, Colomer A, Mogensen M, Jensen M, Israelsen NM, Bang O, Naranjo V. Automatic segmentation of epidermis and hair follicles in optical coherence tomography images of normal skin by convolutional neural networks. *Front Med (Lausanne)*. 2020;7:220. doi: 10.3389/fmed.2020.00220.
94. Lin CH, Lukas BE, Rajabi-Estarabadi A, May JR, Pang Y, Puyana C, Tsoukas M, Avanaki K. Rapid measurement of epidermal thickness in OCT images of skin. *Sci Rep*. 2024;14(1):2230. doi: 10.1038/s41598-023-47051-6.
95. Shishkova VA, Gromov NV, Mironycheva AM, Kirillin MY. Segmentation of 3D OCT images of human skin using neural networks with U-net architecture. *Sovrem Tekhnologii Med*. 2025;17(1):6–16. doi: 10.17691/stm2025.17.1.01.
96. Albrecht M, Schnabel C, Mueller J, Golde J, Koch E, Walther J. In vivo endoscopic optical coherence tomography of the healthy human

oral mucosa: Qualitative and quantitative image analysis. *Diagnostics (Basel)*. 2020;10(10):827. doi: 10.3390/diagnostics10100827.

97. Kirillin M, Panteleeva O, Yunusova E, Donchenko E, Shakhova N. Criteria for pathology recognition in optical coherence tomography of fallopian tubes. *J Biomed Opt*. 2012;17(8):081413–1. doi: 10.1117/1.JBO.17.8.081413.
98. Adams DC, Pahlevaninezhad H, Szabari MV, Cho JL, Hamilos DL, Kesimer M, Boucher RC, Luster AD, Medoff BD, Suter MJ. Automated segmentation and quantification of airway mucus with endobronchial optical coherence tomography. *Biomed Opt Express*. 2017;8(10):4729–4741. doi: 10.1364/BOE.8.004729.

Optical coherence tomography in otolaryngology: current opportunities and perspectives for use

M.A. Shakhova^{1,2} • V.A. Fokeev^{1,2} • A.E. Meller¹ • A.B. Terentyeva¹ • M.Yu. Kirillin² • A.V. Shakhov¹

The development of new strategies to treatment of ENT disorders makes it necessary to implement non-invasive diagnostic methods into clinical practice; these methods should be able to provide the information on the biological tissues and be applicable to the intra-operational use. The aim of this review is to summarize the data on the use of optical coherent tomography (OCT) in the otolaryngology. This method gives two- and three-dimensional images of a biological tissue with resolution of 1 μm up to the depth of 2 mm. The use of this method in the ENT practice is associated with the development of specialized OCT modifications and special probes, including those compatible with standard endoscopes and/or intraoperational microscopes. OCT diagnostics may provide unique information for the solution of the following clinical tasks: the differential diagnosis between tumours and non-tumours, including their early stages, assessment of particular pathomorphological characteristics in inflammatory disorders, monitoring of tissue response to treatment. The addition of OCT

to standard diagnostic algorithms would facilitate an improvement in the differential diagnosis and optimisation of treatment choice in a number of clinically significant ENT disorders. Multi-mode OCT equipment which allow both structural and functional information, as well as machine learning methods for image interpretation is a promising area of the OCT techniques.

Key words: optical coherence tomography, otolaryngology, OCT angiography, mucous membrane, epithelium, lamina propria, chronic ENT disorders

For citation: Shakhova MA, Fokeev VA, Meller AE, Terentyeva AB, Kirillin MYu, Shakhov AV. Optical coherence tomography in otolaryngology: current opportunities and perspectives for use. *Almanac of Clinical Medicine*. 2025;53(5):268–284. doi: 10.18786/2072-0505-2025-53-021.

Received October 23, 2025; revised November 11, 2025; accepted for publication November 13, 2025; published online November 28, 2025

Funding

The study was performed under the grant from the Russian Research Foundation # 24-15-00175 (<https://rscf.ru/project/24-15-00175/>).

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding this article.

Authors' contribution

M.A. Shakhova, the study concept and design, literature search and analysis, text writing; V.A. Fokeev, literature search and analysis in laryngology, text writing; A.E. Meller, literature search and analysis in rhinology, text editing; A.B. Terentyeva, literature search and analysis in otology, text editing; M.Yu. Kirillin, the study concept and design, literature search and analysis of the application and processing of OCT modifications, text writing, approval of the final version of the manuscript; A.V. Shakhov, the paper concept and design, text editing, approval of the final version of the manuscript. All the authors have read and approved the final version of the manuscript before submission, agreed to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Mariia A. Shakhova – MD, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Ear, Throat, and Nose Diseases named after Professor V.Yu. Shakhov¹; Research Fellow, Laboratory of Biophotonics²; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5377-8858>
✉ Ploshchad Minina i Pozharskogo 10–1, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation.
E-mail: shakhova_m@pimunn.net

Vyacheslav A. Fokeev – Postgraduate Student, Department of Ear, Throat, and Nose Diseases named after Professor V.Yu. Shakhov¹; Junior Research Fellow, Laboratory of Biophotonics²; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4651-0828>.
E-mail: s.fokeev1994@yandex.ru

Alina E. Meller – Senior Teacher, Department of Ear, Throat, and Nose Diseases named after Professor V.Yu. Shakhov¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7169-5266>. E-mail: mellina@mail.ru

Anna B. Terentyeva – MD, PhD, Associate Professor, Department of Ear, Throat, and Nose Diseases named after Professor V.Yu. Shakhov¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8375-4064>.
E-mail: anna-t-nn@mail.ru

Mikhail Yu. Kirillin – PhD (in Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Laboratory of Biophotonics²; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6804-6369>.
E-mail: kirillin@ipfran.ru

Andrei V. Shakhov – MD, PhD, Associate Professor, Professor of the Department of Ear, Throat, and Nose Diseases named after Professor V.Yu. Shakhov¹; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5969-8066>.
E-mail: shakhovav54@yandex.ru

¹Privolzhsky Research Medical University; ploshchad Minina i Pozharskogo 10–1, Nizhny Novgorod, 603005, Russian Federation

²Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences; ul. Ulyanova 46, Nizhny Novgorod, 603950, Russian Federation