

DOI: 10.37988/1811-153X_2024_1_136

[Т.В. Гайворонская](#)¹,

д.м.н., профессор, зав. кафедрой хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии

[А.В. Арутюнов](#)¹,

д.м.н., профессор, зав. кафедрой общей стоматологии

[Ф.С. Аюпова](#)¹,

к.м.н., доцент кафедры детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии

[В.В. Волобуев](#)¹,

к.м.н., доцент кафедры детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии

[Т.И. Мурашкина](#)²,

д.т.н., профессор кафедры приборостроения

[Ю.А. Васильев](#)¹,

ассистент кафедры общественного здоровья, здравоохранения и истории медицины

[Е.А. Бадеева](#)²,

д.т.н., доцент кафедры радиотехники и радиоэлектронных систем

[Е.Ю. Плотникова](#)³,

неонатолог отделения новорожденных № 1

[А.А. Зуб](#)¹,

ассистент кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии

[А.В. Оленская](#)¹,

старший преподаватель кафедры общественного здоровья, здравоохранения и истории медицины

[Д.В. Волобуев](#)⁴,

студент

¹ КубГМУ, 350063, Краснодар, Россия² ПГУ, 440026, Пенза, Россия³ Родильный дом г. Краснодар, 350063, Краснодар, Россия⁴ КубГУ, 350040, Краснодар, Россия

Волоконно-оптические системы для диагностики стоматологической патологии (обзор литературы). Часть I

Аннотация. Волоконно-оптические датчики и системы электрически пассивные, их применяют для измерений деформации, температуры, смещения, давления, электрических токов, магнитных полей и различных других свойств материалов и окружающей среды. Данные системы обладают рядом преимуществ перед своими электрическими аналогами — высокой пропускной способностью, небольшими размерами, легким весом, коррозионной стойкостью, геометрической гибкостью. Их можно стерилизовать тепловым паром, излучением или сухим газом, что важно для безопасности при медицинских манипуляциях. **Цель исследования** — систематизация данных об использовании волоконно-оптической аппаратуры в диагностических медицинских, в том числе стоматологических, целях. Для данного обзора было отобрано 22 публикации. Анализ литературы показал перспективность применения волоконной оптики в стоматологии для улучшения обзора рабочего поля. Волоконно-оптические химические сенсоры позволяют выявить активность микрофлоры, а мониторинг изменений, вызванных де- и реминерализацией, повышает эффективность профилактики кариеса зубов. Применение волоконно-оптической трансиллюминации

для своевременной диагностики и лечения кариеса и его осложнений в условиях первичной ежедневной медико-санитарной помощи способствует снижению распространенности наиболее известных стоматологических заболеваний. Недорогие и простые в эксплуатации системы открывают новые возможности для улучшения общественного здравоохранения и решения социально значимых проблем широкого международного сообщества.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы, стоматология, диагностика

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Гайворонская Т.В., Арутюнов А.В., Аюпова Ф.С., Волобуев В.В., Мурашкина Т.И., Васильев Ю.А., Бадеева Е.А., Плотникова Е.Ю., Зуб А.А., Оленская А.В., Волобуев Д.В. Волоконно-оптические системы для диагностики стоматологической патологии (обзор литературы). Часть I. — *Клиническая стоматология*. — 2024; 27 (1): 136—143. DOI: 10.37988/1811-153X_2024_1_136

[T.V. Gayvoronskaya](#)¹,

PhD in Medical Sciences, full professor of the Oral and maxillofacial surgery Department

[A.V. Arutyunov](#)¹,

PhD in Medical Sciences, full professor of the General Dentistry Department

[F.S. Ayupova](#)¹,

PhD in Medical Sciences, associate professor of the Pediatric dentistry, orthodontics and maxillofacial surgery Department

[V.V. Volobuev](#)¹,

PhD in Medical Sciences, associate professor of the Pediatric dentistry, orthodontics and maxillofacial surgery Department

[T.I. Murashkina](#)²,

PhD in Engineering, full professor of the Instrumentation Department

[Yu.A. Vasilev](#)¹,

assistant at the General health, public health and the history of medicine Department

[E.A. Badeeva](#)²,

PhD in Engineering, associate professor of the Radio engineering and radioelectronic systems Department

[E.Yu. Plotnikova](#)³,

neonatologist at the neonatal ward no. 1

[A.A. Zub](#)¹,

assistant at the Oral and maxillofacial surgery Department

[A.V. Olenskaya](#)¹,

senior lecturer at the General health, public health and the history of medicine Department

[D.V. Volobuev](#)⁴,

student

¹ Kuban State Medical University, 350063, Krasnodar, Russia² Penza State University, 440026, Penza, Russia³ Maternity Hospital of Krasnodar, 350063, Krasnodar, Russia⁴ Kuban State University, 350040, Krasnodar, Russia

Fiber-optic systems for the diagnosis of dental pathology: a review. Part I

Annotation. Fiber-optic sensors and systems are electrically passive, they are used to measure deformation, temperature, displacement, pressure, electric currents, magnetic fields and various other properties of materials and the environment. These systems have a number of advantages over their electrical counterparts — high throughput, small size, lightweight, corrosion resistance, geometric flexibility. They can be sterilized by thermal steam, radiation or dry gas, which is important for the safety of medical use. **The aim of the study** — systematization of data on the use of fiber-optic equipment for diagnostic medical, including dental ones, purposes. A total of 22 publications were selected. An analysis of the literature has shown the prospects of using fiber optics in dentistry to improve the visibility of the working field. The use of fiber optics in dentistry improves the visibility of the working field. Fiber-optic chemical sensors can detect the activity of microflora, and monitoring

of changes caused by demineralization and remineralization increases the effectiveness of prevention of dental caries. The use of fiber-optic transillumination for the timely diagnosis and treatment of caries and its complications in the conditions of primary daily health care helps to reduce the prevalence of the most common dental diseases.

Key words: fiber-optic systems, dentistry, diagnostics

FOR CITATION:

Gayvoronskaya T.V., Arutyunov A.V., Ayupova F.S., Volobuev V.V., Murashkina T.I., Vasilev Yu.A., Badeeva E.A., Plotnikova E.Yu., Zub A.A., Olen-skaya A.V., Volobuev D.V. Fiber-optic systems for the diagnosis of dental pathology: a review. Part I. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2024; 27 (1): 136—143 (In Russian). DOI: 10.37988/1811-153X_2024_1_136

ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические датчики — это устройства для измерения деформации, температуры, смещения, давления, электрических токов, магнитных полей и различных других свойств материалов и окружающей среды. Волоконная оптика (optical fiber) относится к гибким тонким цилиндрическим волокнам из стекла или пластика высокого оптического качества.

Теория волоконной оптики основана на единственном оптическом волокне, состоящем из стекла или пластика с внешней оболочкой из материала с более низким показателем преломления. Поскольку сердцевина волокна имеет более высокий показатель преломления, световые лучи отражаются обратно. Это явление основано на законе Снелла и называется полным внутренним отражением. Отдельные волокна группируются вместе, образуя волоконно-оптический пучок. Диаметр этих волокон может составлять всего 0,01 мм для стекла и 0,1 мм для пластика (Gorris H.H., Blicharz T.M., Walt D.R., 2007).

Общий принцип, лежащий в основе волоконно-оптических датчиков, довольно прост. В коммуникационных приложениях волоконной оптики нежелательно, чтобы световые волны, передаваемые по оптическому волокну, подвергались воздействию окружающей среды или отправляемое сообщение могло быть повреждено. Волоконно-оптический датчик определяет влияние выбранного свойства окружающей среды на свет, проходящий по оптическому волокну. Следовательно, измеряя изменения некоторых параметров света, выходящего из волоконно-оптического датчика, можно определить свойство окружающей среды, вызвавшее изменение на свету, и можно его измерить. Благодаря этому волоконно-оптические датчики обладают рядом преимуществ перед своими электрическими аналогами: высокой пропускной способностью, небольшими размерами, малым весом, коррозионной стойкостью,

геометрической гибкостью и врожденной устойчивостью к электромагнитным помехам. Волоконно-оптические датчики обладают не только исключительной чувствительностью, но и являются электрически пассивными (что важно для безопасности в некоторых областях применения, таких как медицинская сфера).

Волоконно-оптические датчики используются в самых разных областях применения, включая измерение деформации, давления, гироскопы, гидрофоны, датчики уровня жидкости, умные материалы, измерение температуры, медицинские приборы, умные автомобильные дороги и гражданские сооружения, мониторинг промышленных процессов и для широкого спектра аэрокосмических применений [1].

Оптические волокна привлекательны и удобны для биомедицинских применений, поскольку они тонкие, гибкие, диэлектрические (непроводящие), невосприимчивые к электромагнитным помехам, химически инертные, нетоксичные и легкие. Их также можно стерилизовать с использованием стандартных методов медицинской стерилизации: тепловым паром, излучением или сухим газом. С момента появления первого эндоскопа их внедрение в медицинскую сферу значительно расширилось — от визуализации и анализа биологических функций до обеспечения быстрого прогресса в новых медицинских процедурах, таких как малоинвазивная и роботизированная хирургия.

В биомедицинских приложениях волоконно-оптические датчики конкурируют с ограниченным числом обычных электронных устройств. Их основным преимуществом является электрическая изоляция, обеспечиваемая диэлектрическими оптическими волокнами, что обеспечивает их безопасное использование, без риска поражения пациента электрическим током. Волоконно-оптические датчики также можно безопасно использовать во время выполнения пациентам магнитно-резонансной или компьютерной томографии или любого другого типа электромагнитного сканирования,

без риска возникновения электрического тока или выделения тепла из-за сильных магнитных полей. Еще одно ключевое преимущество — их небольшой размер, позволяющий интегрировать датчики с небольшими иглами, катетерами или хирургическими инструментами. В связи с вышесказанным волоконно-оптические датчики идеально подходят для широкого спектра инвазивных и неинвазивных применений в теоретических и клинических исследованиях, при медицинском мониторинге и диагностике [2]. При этом все биомедицинские оптические датчики можно разделить на четыре основных типа: физические, химические, биологические и визуализирующие.

Цель исследования — провести количественный обзор литературы с систематизацией данных (систематических обзоров, метаанализа данных, исследовательских статей) об использовании волоконно-оптической аппаратуры в диагностических медицинских целях. Особый акцент делали на литературные данные, касающиеся применения данных методов в стоматологической практике (саливадиагностика, диагностика кариеса зубов, определение давления жевательных мышц, мышц языка и щек).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проводили поиск источников в международных электронных базах библиотек PubMed, MEDLINE, Google Scholar, ResearchGate, Cochrane Library, опубликованных на всех языках, а также в российских научных электронных библиотеках КиберЛенинка и eLibrary. Глубина поиска составила 20 лет. Поисковый запрос включал следующие слова: optical fiber, optical fiber sensors, diagnostic, dentistry. В русскоязычных базах для поиска использовали ключевые слова в комбинациях: волоконная оптика, волоконно-оптическая аппаратура, волоконно-оптические датчики, диагностика, стоматология. После идентификации источника проводили скрининг названия и резюме потенциальных исследований, исключали дубликаты. В случае недостаточной информативности изучали полный текст статьи. Библиографию всех найденных статей изучали для выявления дополнительных, не найденных ранее публикаций.

Оценку публикаций на соответствие цели исследования проводили в три этапа: оценка заголовка, аннотации и полного текста статьи. В обзор были включены публикации, описывающие использование

Сведения об использовании волоконно-оптических датчиков в медицине

Information on the use of fiber-optic sensors in medicine

Автор (ы) (год)	Методика	Область применения	Суть методики
Mowbray S.E., Amiri A.M. (2019)	FOBS (волоконно-оптические биосенсоры)	Терапия	Использование брелоков для диагностики состояния при хронических соматических заболеваниях
Wang K.H. et al. (2019)	OFUS (система определения мочевины по оптоволокну)	Стоматология/терапия	Определение мочевины в слюне, отражающее содержание азота мочевины в крови у пациентов с хроническим заболеванием почек
Usha S.P. et al. (2017)	Датчик определения кортизола в слюне	Стоматология/терапия	Определение кортизола в слюне, который является биомаркером патологических процессов в надпочечниках
Abogazalah N. et al. (2019)	DIFOTI (просвечивающий аппарат для цифровой визуализации)	Стоматология	Визуализация апроксимального кариеса
Eom J.B., Park A. (2020)	Волоконно-оптическая интраоральная камера	Стоматология	Визуализация патологических процессов в зубах на основе оптики с высоким разрешением
Aydn E.B. et al. (2023)	FOCS (волоконно-оптические химические сенсоры)	Стоматология	Оценка активности <i>S. mutans</i> в слюне
Kishen A. et al. (2008)	FOBSS (система мониторинга деминерализации/реминерализации)	Стоматология	Обнаружение деминерализации/реминерализации эмали на ранних стадиях кариозного процесса
Kim J.H. et al. (2020)	FOTI (волоконно-оптическая трансиллюминация)	Стоматология	Обнаружение кариозного процесса на апроксимальных поверхностях и в естественных фиссурах зуба
Benjumea E. et al. (2018)	Волоконно-оптический датчик инфракрасного излучения	Стоматология	Обнаружение кариозного процесса на окклюзионных поверхностях зуба
Strassler H.E. et al. (2014)	FOTI (волоконно-оптическая трансиллюминация)	Стоматология	Обнаружение кариозного процесса на апроксимальных поверхностях и в естественных фиссурах зуба
Antipoviene A. et al. (2020)	FOTI (волоконно-оптическая трансиллюминация)	Стоматология	Диагностика кариеса, обнаружение зубных отложений, оценка окрашенных краев композитных пломб, оценка переломов и трещин в зубах, для освещения доступа и устьев корневых каналов
Iwasaki M. et al. (2022)	Емкостный датчик отображения давления (прикуса)	Стоматология	Измерение силы прикуса
Бадеева Е.А. и соавт. (2021)	Датчик силы мышц языка	Стоматология	Определение давления мышц языка на ткани полости рта

волоконно-оптических аппаратов в медицинских диагностических целях, в том числе в стоматологии. Рассматривались только опубликованные работы, в анализ не включали тезисы и материалы конференций. В итоге было отобрано 22 публикации (см. таблицу).

БИОХИМИЧЕСКАЯ САЛИВАДИАГНОСТИКА СОМАТИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ

Саливадиагностика может являться одним из простых и неинвазивных методик диагностики и мониторинга ряда соматических заболеваний. Биомаркерами в данном случае могут выступать различные химические соединения, повышение концентрации которых в слюне может явно свидетельствовать о наличии патологии. Однако для определения данных биомаркеров зачастую требуются длительные дорогостоящие исследования. Поэтому один из возможных путей решения проблемы для проведения экспресс-диагностики — это использование портативных селективных волоконно-оптических систем/датчиков.

Команда ученых К.Н. Wang и соавт. (2019) разработала недорогую и простую в управлении систему измерения мочевины в реальном времени (система определения мочевины по оптоволокну, OFUS) для определения мочевины в слюне. Наличие мочевины в слюне является ключевым биомаркером, отражающим содержание азота мочевины в крови у пациентов с хроническим заболеванием почек. Система состоит из простого трехмерного печатного резервуара, соединяемого с двумя оптическими волокнами, одно из них соединяется с коммерческим светодиодом для подачи входного светового сигнала, другое — с коммерческой фотопроводящей ячейкой из сульфида кадмия для обнаружения сигнала датчика. Для обеспечения возможности обнаружения на месте, без предварительной обработки образца, необходимо смешать всего 1 мкл слюны с 10 мкл раствора уреазы и 90 мкл индикатора в реакционном резервуаре, а время обнаружения составляет всего 20 секунд. Для подтверждения результата авторы описали прямую корреляционную связь между уровнем мочевины в слюне и содержанием азота мочевины в крови [3].

S.P. Usha и соавт. в 2017 г. разработали волоконно-оптический датчик определения кортизола в слюне — биомаркера наличия патологических процессов в надпочечниках. В разработке используется современный подход резонанса в режиме потерь и молекулярного отпечатка нанокompозитов оксида цинка и полипиррола, он структурирован для концентраций от 0 до 10^{-6} г/мл кортизола. Компоненты полимерного препарата и нанокompозит полимера с оксидом цинка оптимизированы для создания молекулярного отпечатанного слоя датчика. Данное соотношение обеспечивает высочайшую чувствительность — датчик показывает наилучший предел обнаружения, о котором когда-либо сообщалось, с лучшей стабильностью, повторяемостью и временем отклика. Впервые представленный датчик определения кортизола в слюне на основе резонанса

в режиме потерь с использованием нанокompозитного молекулярного отпечатанного слоя повышает специфичность анализа. Авторы отмечают, что внедрение датчика по оптоволокну добавляет и другие преимущества: мониторинг в режиме реального времени и онлайн наряду с возможностями дистанционного зондирования, что делает датчик пригодным для активного клинического применения [4].

ДОНОЗОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА КАРИЕСА

Волоконная оптика чаще используется в стоматологической практике для дополнительной подсветки других устройств, таких как наконечники и ультразвуковые скейлеры, а также крепится к увеличительным лупам [5]. Однако есть и иные, более специфичные направления использования данных систем в работе врача-стоматолога [6].

Кариес зубов — это многофакторное инфекционное заболевание, которое характеризуется деминерализацией неорганической части и разрушением органического вещества зуба. Считается, что количественный показатель стрептококка является надежным показателем для прогнозирования истинной активности кариеса. Поэтому раннее распознавание высокой активности микрофлоры позволяет врачу-стоматологу сформулировать план профилактических мероприятий для таких пациентов. По оценкам, содержание бактерий в слюне человека приближается к 10^9 КОЕ/мл (Bowen, 1996). Более ранние исследования показали, что ацидогенные бактерии, такие как *Streptococcus mutans* и лактобациллы, в количестве 10^5 КОЕ/мл являются предикторами риска кариеса (Kneist, 1998).

Для количественного и качественного анализа микробной нагрузки активно используются химические датчики.

Химический датчик — это устройство, которое используется для измерения концентрации или активности химического вещества в интересующем образце. В идеале это устройство должно непрерывно и обратимо работать непосредственно в образце. Предел прочности идеального химического датчика заключается в способности предоставлять информацию в режиме реального времени о пространственном и временном распределении конкретных молекулярных или ионных соединений. Недавняя доступность высококачественных и недорогих оптических волокон привела к появлению нового подкласса химических сенсоров, называемых волоконно-оптическими химическими сенсорами (Fiber-optic chemical sensors, FOCS).

Волоконная оптика значительно улучшает конструкцию химического датчика, поскольку оптическая трансдукция позволяет использовать широкий спектр схем химического обнаружения, которые ранее были невозможны. Кроме того, потенциал использования FOCS в сочетании со спектроскопией позволяет провести быстрые, селективные и количественные измерения конкретных химических параметров на месте.

В конструкции FOCS оптическое волокно используется для передачи электромагнитного излучения в чувствительную область, которая непосредственно контактирует с образцом, и из нее. Одновременно фаза химического распознавания используется для генерации зависящего от анализа спектроскопически детектируемого сигнала в области восприятия оптического волокна. Химические изменения, которые происходят из-за взаимодействия между анализируемым веществом и иммобилизованным индикатором, измеряются спектроскопически путем анализа электромагнитного излучения, которое возвращается из области обнаружения.

Волоконно-оптический биосенсор (FOBS) представляет собой модифицированный FOCS. В FOBS поглощение затухающих волн на границе раздела ядро—оболочка оптического волновода используется для мониторинга химических параметров, связанных с активностью *S. mutans* в слюне. Для иммобилизации светочувствительного индикатора используется золь-гель-технология, в то время как принципы селективной бактериальной среды используются для создания сенсорной среды, специфичной для мутантных стрептококков. FOBS позволяет быстро оценить активность *S. mutans* в слюне [7].

A. Kishen и соавт. (2008) использовали прямую волоконно-оптическую сенсорную систему для мониторинга изменений, вызванных де- и реминерализацией (FOBSS), в свете обратного рассеяния с поверхности эмали при наличии патологических процессов. Кариез зубов — по сути, медленно прогрессирующий процесс с возможным потенциалом реминерализации эмали. Однако к предварительным факторам содействия реминерализации при кариесе относятся раннее выявление процесса деминерализации и тщательный мониторинг очага поражения. Авторы использовали волоконно-оптический пучковый зонд, в котором некоторые волокна служат для освещения ткани, в то время как другие волокна служат для получения обратно рассеянного света от ткани. Для освещения ткани использовался источник видимого света широкого спектра действия, а спектрофотометр высокого разрешения используется для получения полного спектра обратного рассеяния света.

Это исследование подчеркивает потенциал датчиков FOBSS для обнаружения и мониторинга де- и реминерализации зуба на месте. Система FOBSS может не только обнаруживать де- и реминерализацию эмали на ранних стадиях, но и предоставлять полезную количественную информацию, которую можно использовать для мониторинга изменений в зубе за определенный период времени или для сравнения зубов между собой [8].

ДИАГНОСТИКА КАРИЕСА

Кариез зубов является острой социальной проблемой и самым распространенным хроническим заболеванием во всем мире, представляющим серьезную проблему для общественного здравоохранения. Текущие данные показывают, что распространенность нелеченого кариеса

постоянных зубов во всем мире (в среднем для всех возрастов) составляет 40% [9]. Распространенность кариеса молочных зубов у детей в мире в среднем составляет 46,2%, а распространенность кариеса постоянных зубов — 53,8% [10]. Отечественные авторы указывают на еще большие показатели распространенности и интенсивности кариозного процесса как в общем по России, так и в Краснодарском крае [11, 12]. Кариозному процессу особо подвержены молодые зубы с гипоминерализованной эмалью [13].

Для диагностики кариозного процесса используются методы определения электропроводности тканей зуба, которые основаны на концепции, согласно которой измерения в зонах с кариесом значительно более чувствительны, чем в интактных зонах. При выявлении пораженных кариесом окклюзионных поверхностей они оказались более эффективными, чем рентгенографические или просвечивающие методы. Но из-за разнородности глубин содержание минерального компонента в эмали и морфологии окклюзионных поверхностей адекватная интерпретация данных, как правило, затруднена, поскольку участки здоровой эмали могут ошибочно интерпретироваться как деминерализованные. Оптические методы утверждают, что при освещении зуба свет может поглощаться тканями зуба или рассеиваться. Просвечивание с помощью волоконной оптики во всех ее формах основано на том, что свет распространяется от источника света к зубу через оптические волокна и эти воздействия должны быть достаточно интенсивными, чтобы проходить через структуры зуба. На данных принципах была разработана методика волоконно-оптической трансиллюминации (Fibre-Optic Transillumination, FOTI), для повышения ее чувствительности используется программное обеспечение для получения и обработки изображений [14].

E. Benjumea и соавт. (2018) изучили структуру кариозных и некариозных участков, подвергнув их воздействию инфракрасного света с длиной волны 830 нм. В процедуре использовалась экспериментальная система, оснащенная волоконно-оптическим датчиком и инфракрасным излучением, с помощью которого были получены измерения оптической мощности от каждого стоматологического блока. Процесс отбора проб проводился на зубах пациентов, у которых ранее профессиональный стоматолог диагностировал кариес. Внедренный датчик выявил 100% кариеса в окклюзионных зонах, где он был протестирован. Данный подход оказался эффективным и практичным, он помогает свести к минимуму экономические затраты. Однако эта система нуждается в дальнейших исследованиях, чтобы найти методы дифференциации отражательной способности амальгам, пломб и кариозных участков, что приведет к более точной диагностике, избегая ложных срабатываний. Точно так же остаются нерешенными вопросы о глубине проникновения инфракрасного излучения в зубы и возможная индуцированная инфракрасная флуоресценция, вызванная облучением кариозной зоны инфракрасным светом с длиной волны 830 нм [15].

Н.Е. Strassler и соавт. (2014) оценили использование волоконно-оптической трансиллюминации в качестве диагностического инструмента в общей стоматологической практике. FOTI — это безрисковая, малоинвазивная, безболезненная процедура, которую можно многократно использовать во время обычных стоматологических осмотров. Волоконно-оптическая трансиллюминация в качестве диагностического инструмента не нова. Однако цель авторов состояла в том, чтобы оценить данный инструмент в условиях первичной медико-санитарной помощи и получить обратную связь от врачей общей практики относительно ценности метода при использовании на ежедневной основе. В исследовании приняли участие стоматологи общего профиля, в ходе которого все они оценивали апроксимальные участки зубов у добровольцев в два этапа: при первичном посещении использовался только клинический осмотр, при повторном он был дополнен методом FOTI. Отзывы врачей свидетельствуют о том, что для выявления апроксимального кариеса FOTI является полезным инструментом, хотя они отметили, что устройство, использованное в исследовании, было весьма громоздким и оно требует модификации. Данное исследование хорошо демонстрирует, насколько потенциально ценными могут быть клинические диагностические инструменты для точной оценки кариозных поражений в учреждениях первичной медико-санитарной помощи. Система помогает предоставить клиницисту возможность диагностировать ранее не выявленные, начальные межпроксимальные поражения [16].

Область применения волоконно-оптической трансиллюминации довольно широка, она включает использование в качестве дополнительного диагностического средства для диагностики межпроксимального и окклюзионного кариеса, обнаружения зубных отложений, оценки окрашенных краев композитных пломб, переломов и трещин в зубах, для освещения доступа и устьев корневых каналов во время эндодонтического лечения, в качестве инструмента для улучшенной оценки повреждений мягких тканей, для оценки цельнокерамических реставраций, чтобы исключить любые переломы перед цементированием, для клинической оценки трещин и линий деформации цельнокерамических реставраций, реставраций и естественных зубов, а также для оценки глубины внешнего окрашивания для определения соответствующих рекомендаций по лечению [17].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕВАТЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ, ДАВЛЕНИЯ МЫШЦ ЯЗЫКА, ГУБ

В ближайшие годы биомедицинские и биомеханические приложения *in vivo* выиграют от широкого спектра готовых волоконно-оптических сенсорных систем для обнаружения и измерения практически любых физических величин. Эти системы состоят из четырех основных компонентов: источник света, оптическое волокно, чувствительный элемент и детектор света.

Источник света обеспечивает электромагнитное излучение, энергия которого передается через волокно к чувствительному элементу, как правило, по принципу полного внутреннего отражения. Система или преобразователь — это модулятор света, т.е. объект, который вызывает изменение свойств света (например, амплитуды или оптической мощности, фазы, поляризации и длины волны или оптической частоты) под воздействием определенной физической величины. Таким образом, физическая величина (например, давление) может изменять физические свойства чувствительного элемента, что, в свою очередь, приводит к изменению свойств света. Детектор света необходим, для того чтобы прочитать и проанализировать изменение свойств света. Поскольку четыре свойства света в большинстве случаев можно рассматривать как независимые параметры, предлагается широкий спектр решений для измерения нескольких физических величин [18, 19].

Жевательное давление — важный параметр для измерения в стоматологии, показатель функционального состояния жевательной системы. Однако доступные датчики относительно велики по размеру, что может приводить к чрезмерному открытию рта и получению ложных параметров жевательного давления.

При разработке датчиков силы прикуса используется несколько методик. Некоторые преобразователи используют пьезоэлектрический или тензометрический датчик, резисторы для измерения силы и датчики давления [20]. Однако волоконная оптика обладает определенными преимуществами перед своими электронными аналогами: невосприимчивостью к электромагнитным помехам, малыми весом и габаритами, высокой чувствительностью, широкой полосой пропускания и простой реализации мультиплексированных или распределенных датчиков [2].

Авторами данного обзора разработан и внедрен в работу волоконно-оптический датчик для определения давления силы мышц языка на окружающие ткани полости рта (рис. 1; патент № 2741274). Прибор можно

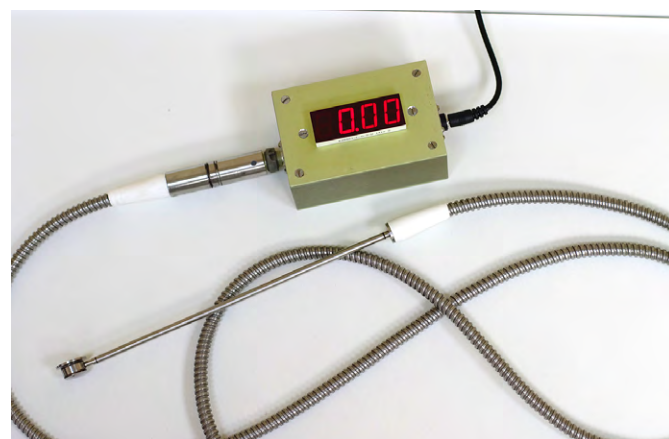


Рис. 1. Оптико-волоконный датчик для определения силы мышц языка
Fig. 1. Fibre-optic sensor for detecting tongue muscle strength



Рис. 2. Определение силы мышц языка у взрослых
Fig. 2. Determining tongue muscle strength in adults



Рис. 3. Определение силы мышц языка у новорожденных
Fig. 3. Determining tongue muscle strength in newborns

использовать как у взрослых пациентов (рис. 2), так и у детей, в том числе у новорожденных (рис. 3). Изобретение поможет в перспективных исследованиях, направленных на понимание механизмов давления мышц языка и губ у пациентов с врожденными пороками лица и зубочелюстно-лицевыми аномалиями (патент № 212978) [21, 22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данный обзор показал перспективность использования волоконно-оптической аппаратуры и датчиков в стоматологической практике. Они неоценимы для быстрого неизвального выявления не только стоматологической патологии, но и проявлений в полости рта соматических заболеваний. Развитие данного технического направления позволит расширить диагностическую базу и повысить качество проводимого лечения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Грант № 22-15-20069 Российского научного фонда и Кубанского научного фонда.

FUNDING

Grant No. 22-15-20069 of the Russian Science Foundation and the Kuban Science Foundation.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Поступила: 18.09.2023 **Принята в печать:** 02.02.2024

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.
Received: 18.09.2023 **Accepted:** 02.02.2024

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

- Correia R., James S., Lee S.W., Morgan S.P., Korposh S. Biomedical application of optical fibre sensors. — *J. Opt.* — 2018; 20: 073003. DOI: [10.1088/2040-8986/aac68d](https://doi.org/10.1088/2040-8986/aac68d)
- Mowbray S.E., Amiri A.M. A brief overview of medical fiber optic biosensors and techniques in the modification for enhanced sensing ability. — *Diagnostics (Basel)*. — 2019; 9 (1): 23. PMID: [30818830](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30818830/)
- Wang K.H., Hsieh J.C., Chen C.C., Zan H.W., Meng H.F., Kuo S.Y., Nguyễn M.T.N. A low-cost, portable and easy-operated salivary urea sensor for point-of-care application. — *Biosens Bioelectron.* — 2019; 132: 352—359. PMID: [30897542](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30897542/)
- Usha S.P., Shrivastav A.M., Gupta B.D. A contemporary approach for design and characterization of fiber-optic-cortisol sensor tailoring LMR and ZnO/PPY molecularly imprinted film. — *Biosens Bioelectron.* — 2017; 87: 178—186. PMID: [27551998](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27551998/)
- Abogazalah N., Eckert G.J., Ando M. In vitro visual and visible light transillumination methods for detection of natural non-cavitated approximal caries. — *Clin Oral Investig.* — 2019; 23 (3): 1287—1294. PMID: [29987636](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29987636/)
- Eom J.B., Park A. Applications of optical imaging system in dentistry. — *Medical Lasers.* — 2020; 9 (1): 25—33. DOI: [10.25289/ML.2020.9.1.25](https://doi.org/10.25289/ML.2020.9.1.25)
- Aydın E.B., Aydın M., Sezgintürk M.K. Biosensors for saliva biomarkers. — *Adv Clin Chem.* — 2023; 113: 1—41. PMID: [36858644](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36858644/)
- Kishen A., Shrestha A., Rafique A. Fiber optic backscatter spectroscopic sensor to monitor enamel demineralization and remineralization in vitro. — *J Conserv Dent.* — 2008; 11 (2): 63—70. PMID: [20142887](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20142887/)
- Kassebaum N.J., Bernabé E., Dahiya M., Bhandari B., Murray C.J., Marcenes W. Global burden of untreated caries: a systematic review and metaregression. — *J Dent Res.* — 2015; 94 (5): 650—8. PMID: [25740856](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25740856/)
- Kazeminia M., Abdi A., Shohaimi S., Jalali R., Vaisi-Raygani A., Salari N., Mohammadi M. Dental caries in primary and permanent teeth in children's worldwide, 1995 to 2019: a systematic review and meta-analysis. — *Head Face Med.* — 2020; 16 (1): 22. PMID: [33023617](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33023617/)
- Аюпова Ф.С., Волобуев В.В., Собирова Ж.В. Структура патологии полости рта у детей, обратившихся за стоматологической помощью в периоде временного прикуса. — *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки.* — 2022; 1: 144—147.

- [Ayupova F.S., Volovuev V.V., Sobirova Zh.V. The structure of the pathology of the oral cavity in children who sought dental care during of occlusion in primary dentition. — *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. — 2022; 1: 144—147 (In Russian)]. [eLibrary ID: 48183929](#)
12. Кузьмина Э.М., Янушевич О.О., Кузьмина И.Н., Лапатина А.В. Тенденции распространенности и интенсивности кариеса зубов среди населения России за 20-летний период. — *Dental Forum*. — 2020; 3 (78): 2—8.
[Kuzmina E.M., Yanushevich O.O., Kuzmina I.N., Lapatina A.V. Tendency in the prevalence of dental caries among the Russian population over a 20-year period. — *Dental Forum*. — 2020; 3 (78): 2—8 (In Russian)]. [eLibrary ID: 43825063](#)
13. Волобуев В.В., Митропанова М.Н., Павловская О.А., Аюпова Ф.С., Арутюнов А.В., Фатталъ Р.К. Использование воздушно-абразивного метода при герметизации фиссур постоянных зубов у детей. — *Стоматология детского возраста и профилактика*. — 2023; 2 (86): 153—159.
[Volobuev V.V., Mitropanova M.N., Pavlovskaya O.A., Ayupova F.S., Arutyunov A.V., Fattal' R.K. Air abrasion with additional water supply for sealing fissures of permanent teeth in children. — *Pediatric Dentistry and Profilaxis*. — 2023; 2 (86): 153—159 (In Russian)]. [eLibrary ID: 54091420](#)
14. Kim J.H., Eo S.H., Shrestha R., Ihm J.J., Seo D.G. Association between longitudinal tooth fractures and visual detection methods in diagnosis. — *J Dent*. — 2020; 101: 103466. [PMID: 32882335](#)
15. Benjumea E., Díaz L., Torres C. Tooth decay detection using a fiber optic sensor. — *Revista Facultad de Odontología Universidad de Antioquia*. — 2018; 29 (2): 405—419. [DOI: 10.17533/udea.rfo.v29n2a9](#)
16. Strassler H.E., Pitel M.L. Using fiber-optic transillumination as a diagnostic aid in dental practice. — *Compend Contin Educ Dent*. — 2014; 35 (2): 80—8. [PMID: 24571557](#)
17. Antipoviene A., Girijotaite M., Bendoraitiene E.A. Assessment of the depth of clinically detected approximal caries lesions using digital imaging fiber-optic transillumination in comparison to periapical radiographs. — *J Oral Maxillofac Res*. — 2020; 11 (1): e3. [PMID: 32377327](#)
18. Roriz P., Silva S., Frazão O., Novais S. Optical fiber temperature sensors and their biomedical applications. — *Sensors (Basel)*. — 2020; 20 (7): 2113. [PMID: 32283622](#)
19. Perezcampos Mayoral C., Gutiérrez Gutiérrez J., Cano Pérez J.L., Vargas Treviño M., Gallegos Velasco I.B., Hernández Cruz P.A., Torres Rosas R., Tepech Carrillo L., Arnaud Ríos J., Apreza E.L., Rojas Laguna R. Fiber optic sensors for vital signs monitoring. A review of its practicality in the health field. — *Biosensors (Basel)*. — 2021; 11 (2): 58. [PMID: 33672317](#)
20. Iwasaki M., Maeda I., Kokubo Y., Tanaka Y., Ueno T., Takahashi W., Watanabe Y., Hirano H. Capacitive-type pressure-mapping sensor for measuring bite force. — *Int J Environ Res Public Health*. — 2022; 19 (3): 1273. [PMID: 35162299](#)
21. Мурашкина Т.И., Бадеева Е.А., Истомина Т.В., Гайворонская Т.В., Плотникова Е.Ю., Паршикова Т.В. Волоконно-оптический сканер для определения морфометрических параметров неба пациента. — *Медицинская техника*. — 2023; 1 (337): 15—18. [eLibrary ID: 50415976](#)
[Murashkina T.I., Badeeva E.A., Istomina T.V., Gayvoronskaya T.V., Plotnikova E.Yu., Parshikova T.V. Method and fiber-optic scanner to determine morphometric parameters patient's palate. — *Biomedical Engineering*. — 2023; 57: 18—22]. [DOI: 10.1007/s10527-023-10260-4](#)
22. Gaivoronskaya T.V., Badeeva E.A., Vasil'ev Yu.A., Murashkina T.I., Arutyunov A.V., Ayupova F.S. An interdisciplinary approach to the comprehensive diagnosis and rehabilitation of children with congenital facial malformations and dentoalveolar anomalies. — *Clinical Practice in Pediatrics*. — 2021; 16 (2): 80—85. [DOI: 10.20953/1817-7646-2021-2-80-85](#)