

УДК 681.586.5

А.Т. ТузовПермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская ФедерацияПермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения
Российской академии наук, Пермь, Российская Федерация**ИСТОРИКО-НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
АКУСТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

Представлены описание и анализ исторического развития волоконно-оптического распределенного акустического мониторинга как области науки и техники. Обзор включает в себя предпосылки возникновения области исследований, проблемы, с которыми сталкивались ученые и изобретатели, а также методы, которыми они решались, а также и технологии, которые использовались. Приведены направления развития отрасли в настоящее время. На основании изложенного материала сделаны предположения о трендах дальнейшего развития сферы волоконно-оптических распределенных датчиков физических величин.

Ключевые слова: рэлеевское рассеяние, рефлектометрия, распределенный акустический датчик, исторический обзор, фазочувствительная оптическая рефлектометрия, датчик вибраций.

A. T. Turov

Perm national research polytechnic university, Perm, Russian Federation

Perm Federal Research Center of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation**HISTORICAL AND SCIENTIFIC ASPECTS OF FIBER-OPTIC
DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSORS DEVELOPMENT**

This paper presents a description and analysis of the historical development of fiber-optic distributed acoustic monitoring as a field of science and technology. The review includes the background to the emergence of such a field of research, the problems that scientists and inventors faced, as well as the methods by which they were solved and the technologies that were used. The directions of development of the industry at the present time are given. Based on all of the above material, assumptions were made about the trends in the further development of the field of fiber-optic distributed sensors of physical quantities.

Keywords: Rayleigh scattering, reflectometry, distributed acoustic sensor, historical overview, phase-sensitive optical reflectometry, vibration sensor.

Введение

К акустическим колебаниям относятся колебания упругой среды, распространяющиеся в пространстве. В их частотном диапазоне помимо звуковых можно выделить также инфразвуковые волны (с частотами менее 20 Гц) и ультразвуковые (с частотами более 20 000 Гц). Будучи слабыми вибрационными сигналами, эти волны играют значительную роль в жизни человека и могут переносить большое количество полезной информации. Так, например, жизненно важным оказывается получение информации о вибрациях в аэрокосмической отрасли, медицине [1], биологии, при строительстве и эксплуатации различных зданий и сооружений, в военной и научной сфере при проведении работ под водой. Наиболее распространённым способом получения такой информации до последнего времени являлись электроакустические датчики. Однако их применение во многих случаях ограничивалось небольшой стойкостью к сильным электромагнитным полям, коррозионным средам, невозможностью обеспечения должной безопасности при эксплуатации на взрыво- и пожароопасных объектах, высокой стоимостью технического обслуживания. Всё это приводило к невозможности полноценно проводить дистанционный контроль с использованием таких сенсоров.

Это стало толчком к развитию новых датчиков мониторинга акустических вибраций, одним из которых стал оптоволоконный. Оптоволоконные акустические сенсоры лишены большинства обозначенных ранее недостатков традиционных электроакустических датчиков и вместе с тем имеют ряд преимуществ, таких как низкий уровень потерь при передаче сигнала на большие расстояния (соответственно, возможность удаленного контроля), малая заметность, высокая чувствительность к таким внешним физическим воздействиям, как температура, напряжение, акустические вибрации, давление, ток; устойчивость к коррозионным средам, высоким температурам, электромагнитным полям; компактная геометрия; гибкость; небольшой вес. Кроме этого распределённые оптоволоконные датчики вибраций (DAS), использующие непосредственно оптическое волокно в качестве чувствительного элемента, позволяют получать информацию в режиме реального времени, обеспечивая высокую точность, динамический диапазон и пространственное разрешение.

Все это сделало возможным и эффективным их применение для контроля: хранилищ и систем транспортировки нефти и газа [2], электрических трансформаторов [3], присутствия на территориях [4], акустической обстановки под водой [5], композитных материалов [6].

Предпосылки

Несмотря на то, что способы передачи света, подобные оптическому волокну (ОВ), были известны ещё с XIX в., их развитию мешали большие потери. Это же не позволяло ОВ конкурировать с медными, электрическими линиями связи. По состоянию на 1966 г. лучшим достижением являлись ОВ с потерями в 1000 дБ/км, в то время как коаксиальный кабель обеспечивал потери 5–10 дБ/км. Главным образом, проблема заключалась в том, что стекло, из которого изготавливались светопроводящие волокна, содержало большое количество примесей. Лишь в 1970 г. сотрудники компании «Corning» R.D. Maurer и P.C. Schultz представили многомодовое ОВ, пригодное для использования в линиях связи [7]. Им удалось добиться потерь всего в 17 дБ/км.

Разработка технологий производства ОВ и развитие использующих его линий связи требовали контроля качества и при производстве, и при эксплуатации, и при проведении исследований. Поначалу наиболее распространённым методом оценки качества волокон было простое измерение потерь при пропускании света через исследуемый отрезок. Однако с последующим прогрессом в области стало понятно, что далеко не всегда оказывается удобным получение доступа к обоим концам волокна. К тому же возникла необходимость определять местоположение каждого отдельно взятого источника потерь и их величины.

В 1976 г. M.K. Barnoski и S.M. Jensen представили технологию оптической рефлектометрии с разрешением во времени (OTDR), удовлетворявшую эти потребности [8]. Схематически установка, использовавшаяся в работе, представлена на рис. 1, а. Принцип её работы заключается в том, что в каждый момент времени импульс света, распространяющийся по оптическому волокну, частично претерпевает рассеяние во всех направлениях на неоднородностях меньше длины волны. Некоторая доля этих неоднородностей является принципиально неустранимой, поскольку представлена равномерно

вмороженными в структуру ОВ флуктуациями показателя преломления, которые, в свою очередь, индуцируются флуктуациями энтропии и повышенной температурой в процессе вытяжки ОВ на производстве. Рассеяние на таких неоднородностях называется рэлеевским и является упругим, поскольку длина волны излучения при этом остается неизменной. При этом энергия рассеянного света оказывается прямо пропорциональна энергии исходного импульса в этом же месте.

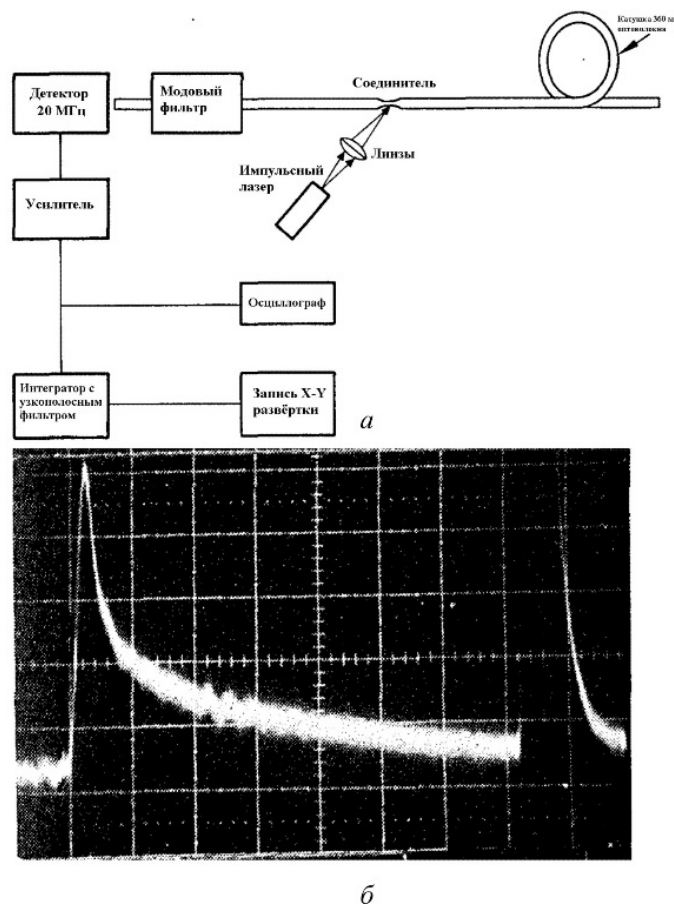


Рис. 1. Схема установки для оптической рефлектометрии (а); полученная зависимость интенсивности отраженного света импульса от времени (б) (рефлектограмма исследуемого волокна)

Часть рассеянного света продолжает движение в исходном направлении вместе со световым импульсом. Часть покидает ОВ, а часть начинает движение в обратном направлении, к источнику излучения. Поскольку в этом направлении распространяется только

так называемое излучение обратного рэлеевского рассеяния, несущее в себе, в силу прямой пропорциональности, информацию о потерях в каждой точке ОВ, целесообразно и осуществимо именно его детектирование. Оптические циркуляторы или направленные оптические разветвители позволяют пропускать свет от источника излучения только в ОВ, а сигнал обратно направленного рассеяния из него только к фотодетектору. Этот сигнал представляет собой зависимость интенсивности обратного рассеяния от времени, прошедшего с момента запуска импульса в ОВ – рефлектограмму (рис. 1, б). Показатель преломления ОВ (n , значит, и скорость света в нём), как правило, известен, поэтому зависимость нетрудно перевести из временной области в пространственную, получив фактически распределение величины оптических потерь в ОВ по его длине. Таким образом, технология OTDR по своей сути является аналогом LiDAR (Light detection and ranging) для ОВ, поскольку LiDAR измеряет расстояние с помощью излучения света и замера времени возвращения этого отражённого света на приёмник [9]. Предложенная технология оптической рефлектометрии не только открывала обозначенные новые возможности, которых не имели методы измерения потерь, существовавшие на тот момент, но и имела над ними преимущество. По заявлениям компании «Corning», точность измерения общих потерь в оптоволокне, проводимого по традиционной для того времени методике, составляла $\pm 1 - 0,5$ дБ/км [10]. Авторам статьи удалось добиться точности на порядок выше – около 0,05 дБ/км.

Ещё в начале XX в. многими группами учёных исследовалось влияние механических вибраций, акустических колебаний на характеристики среды и света, распространяющегося в ней. Так, С. V. Raman и N.S. Nath в 1935 г. в статье «The diffraction of light by sound waves of high frequency: part II.» описывали, как высокочастотные звуковые волны, например ультразвуковые, вызывают возникновение неоднородностей показателя преломления среды, внутри которой распространяется свет. Последний в связи с этим претерпевает дифракцию. Внимание этой группы исследователей было сосредоточено на составлении теоретического описания наблюдаемых явлений и изучении влияния угла между исходным световым лучом и направлением распространения акустических волн на интенсивность света в различных порядках дифракции [11].

Воздействие механических колебаний, в том числе акустического диапазона, на ОВ проявляется в виде приложения к последнему периодического давления, модулирующего показатель преломления и положение неоднородностей в этом месте с частотой приложенного колебания. Это, безусловно, отражается на интенсивности обратного рэлеевского рассеяния от этой области, которая также становится модулированной с данной частотой.

С учетом результатов исследований в этой области, а также появления одномодового оптического волокна с низкими потерями и давно существовавшей и вполне очевидной необходимости контроля вибрационной обстановки во многих сферах человеческой деятельности и технических изделиях можно предположить, что технология OTDR является идеальной для реализации распределенного волоконно-оптического акустического датчика. Однако некоторые ограничения, присущие OTDR и по сей день, не позволяли этого сделать. Мощность сигнала обратного рэлеевского рассеяния крайне мала. В силу пропорциональности энергии импульса можно предположить, что логичным выходом из ситуации могло являться увеличение последней. Однако величина энергии, вводимой в ОВ для наблюдения за обратным рэлеевским рассеянием, имеет и верхний предел. При дальнейшем увеличении начинают значительно проявляться другие, неупругие виды рассеяния светового импульса в ОВ – бриллюэновское и рамановское, которые не только отбирают часть энергии, но и могут мешать детектированию. Позже они станут основой для распределенных волоконно-оптических датчиков других физических величин – температуры, механических напряжений и др. [12–14]. По этой причине для получения качественного сигнала в OTDR рефлектограммы записываются многократно в течение некоторого времени, а затем усредняются. Это неприемлемо для регистрации быстро меняющихся акустических воздействий. Кроме того, обыкновенные акустические воздействия – шаги, голос, музыка зачастую модулируют положения неоднородностей и показатель преломления с амплитудой, недостаточной для обнаружения в сигнале OTDR.

Качественный уровень развития

В 1982 г. Healey P и D.J. Malyon предложили способ обойти эти ограничения и усовершенствовали технологию оптической рефлектометрии при помощи гетеродинного детектирования, представив

когерентную оптическую рефлектометрию с разрешением во времени (COTDR) [15]. Суть нововведения заключалась в том, что часть непрерывного излучения лазера (сигнал локального осциллятора) смешивалась с сигналом обратного рэлеевского рассеяния (рис. 2, *a*).

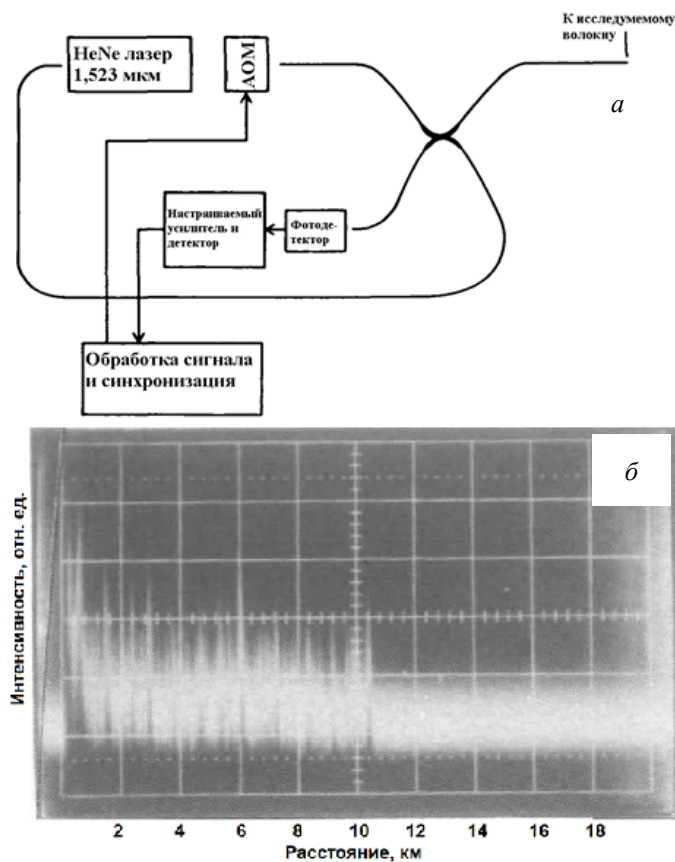


Рис. 2. Схема установки когерентной оптической рефлектометрии с разрешением во времени (*a*); когерентная рефлектограмма; АОМ – акустооптический модулятор (*б*)

При этом между сигналами происходила интерференция. Результат интерференции сильно зависит от разности фаз интерферирующих волн. Так, в случае если их фазы одинаковы, интенсивность результирующего сигнала будет максимальной. В противном случае – наоборот. Локальное изменение показателя преломления рассеивающей среды, в которой распространяется свет, вызывает изменение фазы рассеянного сигнала. В то время как это не отражается существенно на сигнале OTDR, оно становится заметным после

интерференции последнего с сигналом локального осциллятора. В результате получается картина, состоящая из множества локальных минимумов и максимумов сигнала – когерентная рефлектограмма (рис. 2, б). В общем случае неоднородности показателя преломления в ОВ распределены равномерно и случайно, они остаются неизменными в отсутствие воздействий. Подобная когерентная рефлектограмма является своего рода «отпечатком пальца» волокна, в котором она была записана. Взаимодействие ОВ, например, с акустической волной вызывает изменение их положения и/или величины, приводя к изменению разности фаз между сигналом локального осциллятора и обратного рассеяния от этой области. В результате в соответствующей области когерентной рефлектограммы пропадает или появляется пик.

Предложенные улучшения позволили уменьшить время усреднения сигнала или избавиться от него полностью, увеличить возможную длину опрашиваемого ОВ и, что самое главное, регистрировать акустические события. Изменения в сигнале являются периодическими и модулируются с частотой воздействия. Их амплитуда прямо пропорциональна амплитуде воздействия, а, например, преобразование Фурье, осуществленное для набора уровней сигнала, соответствующих одному и тому же расстоянию вдоль ОВ на рефлектограмме при непрерывном их сборе в течение некоторого времени, позволяет получить информацию о частоте воздействия. Таким образом, подобная конструкция делает возможным получение информации о наличии, местоположении, амплитуде и частоте воздействия на ОВ. Это фактически привело к возникновению самой области науки и техники – волоконно-оптического распределенного акустического мониторинга на качественном уровне [16].

Постоянное развитие технологий производства ОВ и источников излучения, в том числе появление доступных высококогерентных (узкополосных) лазеров, позволило в 1993 г. Н.Ф. Taylor и С.Е. Lee представить очередное улучшение технологии волоконно-оптического распределенного акустического мониторинга [4]. Оно несколько упрощало схему COTDR избавлением от линии ОВ, передававшей от лазера сигнал локального осциллятора (рис. 3, а). В то же время в качестве выходного сигнала по-прежнему принималась так называемая когерентная рефлектограмма (рис. 3, б). Это было возможно благодаря использованию узкополосного лазера с большой длиной когерентности, который обеспечивал условия для интерференции

компонентов обратного рэлеевского рассеяния в пределах длины импульса. Модификация была названа «фазочувствительной OTDR» (Ф-OTDR) и представлена в составе датчика вторжения, предназначенного для охраны периметров/территорий при помощи закапывания опрашиваемого ОВ на небольшой глубине под землей. Проведение некоторых дополнительных исследований и калибровок установки дало возможность не только регистрировать сам факт вторжения, но и определять с некоторой погрешностью тип нарушителя, к примеру, дикое животное, человека или транспортное средство. Кроме прочего авторы отметили возможность установки подобных датчиков в воде для обнаружения пловцов, судов или подводных лодок, а также в воздухе для обнаружения, например, перемещающихся на небольшой высоте летательных аппаратов.

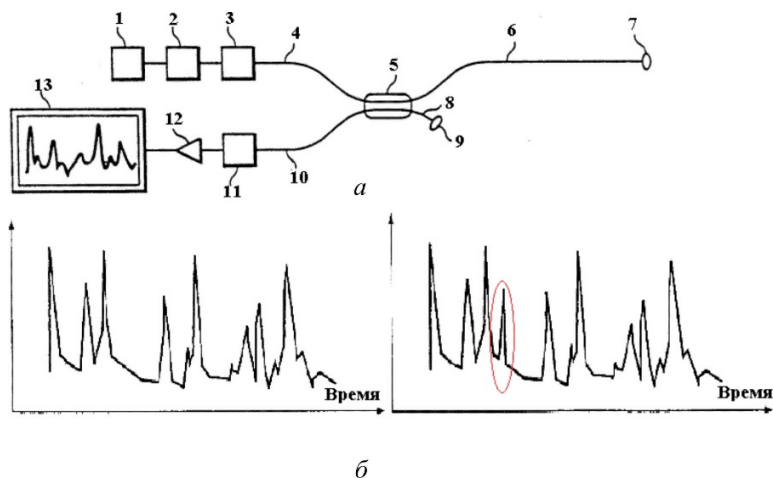


Рис. 3. Устройство датчика вторжения (а); обнаружение вторжения (б); 1 – одномодовый лазер непрерывного излучения; 2 – оптический изолятор; 3 – оптический модулятор интенсивности; 4 – соединительное волокно; 5 – разветвитель; 6 – оптоволоконный чувствительный элемент; 8 – неиспользуемый разъем разветвителя; 7, 9 – неотражающие концы ОВ; 10 – разъем разветвителя для сигнала обратного рассеяния; 11 – фотодетектор; 12 – электронный усилитель; 13 – устройство анализа и обработки

Количественный уровень развития и современность

На количественный уровень такие датчики физических величин, в том числе акустические, были переведены представлением методик демодуляции сигнала в 2013-2016 гг. [17–19]. Представленные ранее схемы Ф-OTDR или Ф-DAS принято объединять в группу «с прямым

детектированием». Это связано с тем, что в них не регистрируется непосредственно информация о фазе обратно рассеянного излучения, а лишь косвенно – через изменение уровня сигнала – её изменение. В то же время амплитуда точки на рефлектограмме связана с амплитудой акустического сигнала, воздействующего на ОВ в этой точке, нелинейно. Таким образом, на качественном уровне развития волоконно-оптические распределенные акустические датчики не позволяли в полной мере получать информацию об амплитуде воздействия.

На данный же момент усилия исследователей в этой области сосредоточены в основном на улучшении характеристик Ф-OTDR [20, 21] – пространственного разрешения, чувствительности, частотного отклика, возможностей распознавания акустических событий, например, при помощи искусственного интеллекта [22] или специальных ОВ [23–26]. По мере того как распределенные акустические датчики становятся совершеннее и доступнее, они проникают во все большее количество исследовательских и производственных сфер. За последние 40 лет такие датчики получили широкое распространение в добыче и разведке полезных ископаемых, инженерии, обороне. В то же время отрасли с более скромным финансированием – биология, экология, сельское хозяйство – выражают необходимость в подобном датчике [27, 28]. Несмотря на сообщения о первых случаях успешного применения для мониторинга таяния ледников [29], жизнедеятельности животных [30, 31] и важных погодных явлений [32], их масштабная интеграция в этих областях всё еще ограничивается сравнительно высокой стоимостью и в некоторых случаях недостаточной устойчивостью к условиям окружающей среды [33–35]. Поэтому, вероятно, усилия исследователей и производителей волоконно-оптических систем акустического мониторинга в ближайшее время будут сосредоточены кроме прочего и на преодолении этих ограничений, изготовлении и оптимизации DAS под конкретные применения.

Заключение

В работе рассмотрены историко-научные аспекты развития волоконно-оптических распределенных акустических датчиков. Описана история развития этой области науки и техники, включая причины и предпосылки возникновения, физические основы, основные этапы и достижения, проблемы, с которыми исследователям пришлось

столкнуться, и способы их решения. Представлено современное состояние и обоснованы возможные направления развития отрасли, включая применение технологий искусственного интеллекта и ориентацию не на универсальность устройства, а пригодность для конкретных целей. Это, весьма вероятно, приведет к возникновению как доступных конкретным отраслям установок распределенного акустического мониторинга, обладающих скромными, но достаточными возможностями, но в то же время не ограничит развитие технологии и возникновение новых рекордов в тех отраслях, где результат превышает стоимость.

Благодарности

Автор выражает благодарность члену редакционной коллегии журнала, доктору физико-математических наук, профессору В.В. Криштопу и руководителю лаборатории фотоники ПФИЦ УрО РАН Ю.А. Константинову.

Список литературы

1. Wang L.V., Yao J. A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences // Nature methods. – 2016. – Vol. 13, № 8. – P. 627.
2. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology / L. Ren, T. Jiang, Z.G. Jia, D.S. Li, C.L. Yuan, H.N. Li // Measurement. – 2018. – № 122. – P. 57–65.
3. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG / G. M.Ma, H.Y. Zhou, C.Shi, Y. B.Li, Q.Zhang, C. R.Li, Q. Zheng // IEEE Sensors Journal. – 2018. – Vol. 18, № 7. – P. 2788–2795.
4. Taylor H.F., Lee C.E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: пат. 5194847 США. – 1993.
5. Takahashi N., Tetsumura K., Takahashi S. Underwater acoustic sensor using optical fiber Bragg grating as detecting element // Japanese journal of applied physics. – 1999. – Vol. 38, № 5S. – P. 3233.
6. Leng J., Asundi A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors // Sensors and Actuators A: Physical. – 2003. – Vol. 103, № 3. – P. 330–340.

7. Maurer R.D., Schultz P.C. Fused silica optical waveguide: пат. 3659915 CIIA. – 1972.

8. Barnoski M.K., Jensen S.M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics // *Applied optics*. – 1976. – Vol. 15, № 9. – P. 2112–2115.

9. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient / A. Behrendt, T. Nakamura, M. Onishi, R. Baumgart, T. Tsuda // *Applied optics*. – 2002. – Vol. 41, № 36. – P. 7657–7666.

10. Jenkins D.M. Updated optical waveguide measurement techniques and detailed equipment listing to be made available for instructional purpose in assembling a similar measuring system // *Corning Glass Works R&D Lab, Technical Staff Division*. – Vol. 19. – 1974.

11. Raman C.V., Nath N.S.N. The diffraction of light by sound waves of high frequency: Part II // *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*. – Springer India, 1935. – Vol. 2, № 4. – P. 413–420.

12. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor / H. Ohno, H. Naruse, M. Kihara, A. Shimada // *Optical fiber technology*. – 2001. – Vol. 7, № 1. – P. 45–64.

13. Long-range Raman distributed temperature sensor with high spatial and temperature resolution using graded-index few-mode fiber / Y. Liu, L. Ma, C. Yang, W. Tong, Z. He // *Optics express*. – 2018. – Vol. 26, № 16. – P. 20562–20571.

14. A neural network method for the BFS extraction / A.I. Krivosheev [et al.] // *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. – IEEE, 2022. – P. 01–01.

15. Healey P., Malyon D.J. OTDR in single-mode fibre at 1.5 μm using heterodyne detection // *Electronics Letters*. – 1982. – Vol. 18, № 20. – P. 862–863.

16. Research progress in distributed acoustic sensing techniques / Y. Shang [et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 16. – P. 6060.

17. Masoudi A., Belal M., Newson T.P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR // *Measurement Science and Technology*. – 2013. – Vol. 24, № 8. – P. 085204.

18. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm / G. Fang, T. Xu, S. Feng, F. Li // *Journal of lightwave technology*. – 2015. – Vol. 33, № 13. – P. 2811–2816.

19. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer / Y. Dong, X. Chen, E. Liu, C. Fu, H. Zhang, Z. Lu // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, № 28. – P. 7810–7815.

20. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry / S. Liu, F. Yu, R. Hong, W. Xu, L. Shao, F. Wang // *Opto-Electronic Advances*. – 2022. – Vol. 5, № 3. – P. 200078-1–200078-28.

21. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-art review and perspective / B.G. Gorshkov [et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 3. – P. 1033.

22. Building safety monitoring based on extreme gradient boosting in distributed optical fiber sensing / L. Huang, Y. Li, S. Chen, Q. Zhang, Y. Song, J. Zhang, M. Wang // *Optical Fiber Technology*. – 2020. – Vol. 55. – P. 102149.

23. A single-scan PM-fibers polarization axes study / M.E. Belokrylov [et al.] // 2022 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2022. – P. 01–01.

24. Application of optical frequency domain reflectometry for the study of polarization maintaining fibers / K.A. Ovchinnikov [et al.] // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2022. – Vol. 86, № 1. – P. S156–S162.

25. Туров А.Т., Константинов Ю.А., Криштоп В.В. Анизотропное оптическое волокно в распределенном акустическом мониторинге // *Проблемы оптической физики и биофотоники. SFM-2022: материалы 10-го Междунар. симпоз. и 26-й Междунар. молодеж. науч. школы Saratov Fall Meeting 2022; Саратов, 26–30 сентября 2022 г.* / под ред. Г.В. Симоненко, В.В. Тучина. – Саратов: Саратовский источник, 2022. – С. 33–38.

26. Распределённое одноимпульсное исследование поляризационных осей анизотропных оптических волокон / М.Е. Белокрылов, Ю.А. Константинов, А.И. Кривошеев, А.Т. Туров // *Фотон-Экспресс*. – 2021. – № 7(175). – С. 16–18.

27. Advances in effects of sound waves on plants / R.H.E. Hassanien [et al.] // *Journal of Integrative Agriculture*. – 2014. – Vol. 13, № 2. – P. 335–348.

28. Passive acoustic monitoring in ecology and conservation / E. Browning, R. Gibb, P. Glover-Kapfer, K.E. Jones. – 2017.

29. A song of ice and fiber // Sandia LabNews. – URL: https://news-releases.sandia.gov/undersea_sensor/ (дата обращения: 08.06.2023).

30. Snow coupled distributed acoustic sensing for intrusion detection of Polar Bears in Arctic Camps / D. Glaser, D. Costley, K. Hathaway, G. Boitnott, J. Weale // Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2021. – Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society, 2021. – P. 262–262.

31. Towards detecting red palm weevil using machine learning and fiber optic distributed acoustic sensing / B. Wang [et al.] // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 5. – P. 1592.

32. Zhu T., Shen J., Martin E.R. Sensing Earth and environment dynamics by telecommunication fiber-optic sensors: an urban experiment in Pennsylvania, USA // Solid Earth. – 2021. – Vol. 12, № 1. – P. 219–235.

33. Оптоволоконный датчик вибраций почвы и система обработки данных / А.Т. Туров, Ю.А. Константинов, М.Е. Белокрылов, А.Ю. Максимов // Фотон-Экспресс. – 2021. – № 6(174). – С. 383–384.

34. Разработка простого волоконно-оптического распределенного акустического датчика для применения в растениеводстве / А.Т. Туров, Ю.А. Константинов, М.Е. Белокрылов, А.Ю. Максимов // Прикладная фотоника. – 2021. – Т. 8, № 2. – С. 33–43.

35. Простой волоконно-оптический распределённый датчик вибраций / А.Т. Туров, Ю.А. Константинов, М.Е. Белокрылов, А.Ю. Максимов // XI Междунар. конф. по фотонике и информац. оптике: сб. науч. тр.; Москва, 26–28 января 2022 г. – М.: Изд-во Нац. исслед. ядерного ун-та. – МИФИ, 2022. – С. 501–502.

References

1. Wang L.V., Yao J. A practical guide to photoacoustic tomography in the life sciences. *Nature methods*, 2016, vol. 13, no. 8, 627 p.

2. Ren L., Jiang T., Jia Z.G., Li D.S., Yuan C.L., Li H.N. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology. *Measurement*, 2018, no. 122, pp. 57-65.

3. Ma G.M., Zhou H.Y., Shi C., Li Y.B., Zhang Q., Li C.R., Zheng Q. Distributed partial discharge detection in a power transformer based on phase-shifted FBG. *IEEE Sensors Journal*, 2018, vol. 18, no. 7, pp. 2788-2795.

4. Taylor H.F., Lee C.E. Apparatus and method for fiber optic intrusion sensing: patent 5194847 USA, 1993.
5. Takahashi N., Tetsumura K., Takahashi S. Underwater acoustic sensor using optical fiber Bragg grating as detecting element. *Japanese journal of applied physics*, 1999, vol. 38, no. 5S, 3233 p.
6. Leng J., Asundi A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, vol. 103, no. 3, pp. 330-340.
7. Maurer R.D., Schultz P.C. Fused silica optical waveguide: patent 3659915 USA. – 1972.
8. Barnoski M.K., Jensen S.M. Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics. *Applied optics*, 1976, vol. 15, no. 9, pp. 2112-2115.
9. Behrendt A., Nakamura T., Onishi M., Baumgart R., Tsuda T. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient. *Applied optics*, 2002, vol. 41, no. 36, pp. 7657-7666.
10. Jenkins D.M. Updated optical waveguide measurement techniques and detailed equipment listing to be made available for instructional purpose in assembling a similar measuring system. *Corning Glass Works R&D Lab, Technical Staff Division*, vol. 19, 1974.
11. Raman C.V., Nath N.S.N. The diffraction of light by sound waves of high frequency: Part II. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section A*. Springer India, 1935, vol. 2, no. 4, pp. 413-420.
12. Ohno H., Naruse H., Kihara M., Shimada A. Industrial applications of the BOTDR optical fiber strain sensor. *Optical fiber technology*, 2001, vol. 7, no. 1, pp. 45-64.
13. Liu Y., Ma L., Yang C., Tong W., He Z. Long-range Raman distributed temperature sensor with high spatial and temperature resolution using graded-index few-mode fiber. *Optics express*, 2018, vol. 26, no. 16, pp. 20562-20571.
14. Krivosheev A.I. et al. A neural network method for the BFS extraction. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. IEEE, 2022, pp. 01-01.
15. Healey P., Malyon D.J. OTDR in single-mode fibre at 1.5 μm using heterodyne detection. *Electronics Letters*, 1982, vol. 18, no. 20, pp. 862-863.

16. Shang Y. et al. Research progress in distributed acoustic sensing techniques. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 16, pp. 6060.

17. Masoudi A., Belal M., Newson T.P. A distributed optical fibre dynamic strain sensor based on phase-OTDR. *Measurement Science and Technology*, 2013, vol. 24, no. 8, 085204 p.

18. Fang G., Xu T., Feng S., Li F. Phase-sensitive optical time domain reflectometer based on phase-generated carrier algorithm. *Journal of lightwave technology*, 2015, vol. 33, no. 13, pp. 2811-2816.

19. Dong Y., Chen X., Liu E., Fu C., Zhang H., Lu Z. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer. *Applied Optics*, 2016, vol. 55, no. 28, pp. 7810-7815.

20. Liu S., Yu F., Hong R., Xu W., Shao L., Wang F. Advances in phase-sensitive optical time-domain reflectometry. *Opto-Electronic Advances*, 2022, vol. 5, no. 3, pp. 200078-1-200078-28.

21. Gorshkov B.G. et al. Scientific applications of distributed acoustic sensing: State-of-the-art review and perspective. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 3, 1033 p.

22. Huang L., Li Y., Chen S., Zhang Q., Song Y., Zhang J., Wang M. Building safety monitoring based on extreme gradient boosting in distributed optical fiber sensing. *Optical Fiber Technology*, 2020, vol. 55, 102149 p.

23. Belokrylov M.E. et al. A single-scan PM-fibers polarization axes study. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. IEEE, 2022, pp. 01-01.

24. Ovchinnikov K.A. et al. Application of optical frequency domain reflectometry for the study of polarization maintaining fibers. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2022, vol. 86, no. 1, pp. S156-S162.

25. Turov A.T., Konstantinov Iu.A., Krishtop V.V. Anizotropnoe opticheskoe volokno v raspredelennom akusticheskom monitoringe [Anisotropic optical fiber in distributed acoustic monitoring]. *Problemy opticheskoi fiziki i biofotoniki. SFM-2022. Materialy 10-go Mezhdunarodnogo simpoziuma i 26-i Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi shkoly Saratov Fall Meeting 2022, Saratov, 26-30 September 2022*. Ed. G.V. Simonenko, V.V. Tuchina. Saratov: Saratovskii istochnik, 2022, pp. 33-38.

26. Belokrylov M.E., Konstantinov Iu.A., Krivosheev A.I., Turov A.T. Raspredelennoe odnoimpul'snoe issledovanie poliarizatsionnykh osei anizotropnykh opticheskikh volokon [Distributed single pulse study of po-

larization axes of anisotropic optical fibers]. *Foton-Ekspress*, 2021, no. 7 (175), pp. 16-18.

27. Hassanien R.H.E. et al. Advances in effects of sound waves on plants. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, vol. 13, no. 2, pp. 335-348.

28. Browning E., Gibb R., Glover-Kapfer P., Jones K.E. Passive acoustic monitoring in ecology and conservation, 2017.

29. A song of ice and fiber. *Sandia LabNews*, available at: https://newsreleases.sandia.gov/undersea_sensor/ (accessed 08 June 2023).

30. Glaser D., Costley D., Hathaway K., Boitnott G., Weale J. Snow coupled distributed acoustic sensing for intrusion detection of Polar Bears in Arctic Camps. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2021*. Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering Geophysical Society, 2021, pp. 262-262.

31. Wang B. et al. Towards detecting red palm weevil using machine learning and fiber optic distributed acoustic sensing. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 5, 1592 p.

32. Zhu T., Shen J., Martin E.R. Sensing Earth and environment dynamics by telecommunication fiber-optic sensors: an urban experiment in Pennsylvania, USA. *Solid Earth*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 219-235.

33. Turov A.T., Konstantinov Iu.A., Belokrylov M.E., Maksimov A.Iu. Optovolokonnyi datchik vibratsii pochvy i sistema obrabotki dannykh [Fiber optic soil vibration sensor and data processing system]. *Foton-Ekspress*, 2021, no. 6 (174), pp. 383-384.

34. Turov A.T., Konstantinov Iu.A., Belokrylov M.E., Maksimov A.Iu. Razrabotka prostogo volokonno-opticheskogo raspredelennogo akusticheskogo datchika dlia primeneniia v rastenievodstve [Development a simple fiber optic distributed acoustic sensor for crop production applications]. *Prikladnaia fotonika*, 2021, vol. 8, no. 2, pp. 33-43.

35. Turov A.T., Konstantinov Iu.A., Belokrylov M.E., Maksimov A.Iu. Prostoi volokonno-opticheskii raspredelennyi datchik vibratsii [Simple fiber optic distributed vibration sensor]. *XI Mezhdunarodnaia konferentsiia po fotonike i informatsionnoi optike. Sbornik nauchnykh trudov; Moscow, 26-28 January 2022*. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii iadernyi universitet (MIFI), 2022, pp. 501-502.

Сведения об авторах

ТУРОВ А.Т.

e-mail: artemtur442@gmail.com

Аспирант кафедры «Общая физика» Пермский национальный исследовательский политехнический университет, младший научный сотрудник Лаборатории фотоники Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь.

About the authors

TUROV A.T.

e-mail: artemtur442@gmail.com

PhD student, Perm national research polytechnic university, Junior Researcher, Photonics Laboratory of Perm Federal Research Center of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания с номером государственной регистрации темы 122031100058-3.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 19.06.2023

Одобрена: 23.06.2023

Принята к публикации: 25.06.2023

Financing. The work was carried out within the framework of a state assignment with state registration number of the topic 122031100058-3.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 19/06/2023

Approved: 23/06/2023

Accepted for publication: 25/06/2023

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Историко-научные аспекты развития волоконно-оптических распределенных акустических датчиков / А.Т. Туров // Прикладная фотоника. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 51–68.

Please cite this article in English as: A.T. Turov Historical and scientific aspects of fiber-optic distributed acoustic sensors development // Applied photonics, 2023, no. 4, pp. 51-68.