

Технология DAS - развенчание заблуждений и перспективы

- Харасов Д.Р.¹, Спиридонов Е.П.¹, Наний О.Е.^{1,2}, Ашкар Г.Х.¹,
Трещиков В.Н.¹, Дучков А.А.³, Яскевич С.В.³, Яблоков А.В.³,
Белов М.В.²

¹ Группа компаний Т8, г. Москва.

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

³ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск.



О группе компаний Т8

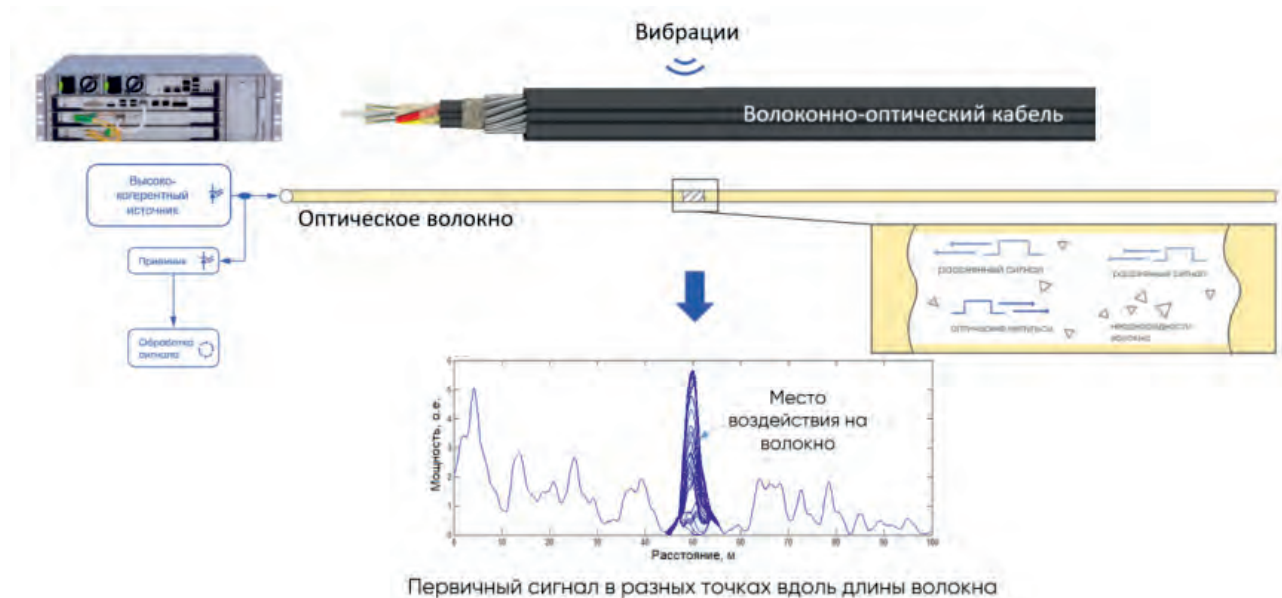
Группа компаний Т8 является одним из ведущих игроков на российском рынке оптоволоконных систем. В компании успешно реализуется стратегия внедрения инновационных решений в области передачи информации и систем мониторинга. Т8 обладает внушительным научно-техническим потенциалом: более 500 сотрудников, из которых более 100 — разработчики, 5 докторов наук и 30 кандидатов наук. В рамках национального проекта поддержки высокотехнологичных компаний Т8 занимается развитием волоконных сетей, передающих информацию со скоростью до 800 Гбит/с на один канал и до 38,4 Тбит/с на одно волокно. С применением оборудования компании Т8 было построено свыше 130 000 км магистральных волоконно-оптических линий по всей России. Одним из направлений деятельности Т8 является

разработка оптоволоконного распределённого акустического датчика (DAS) и его внедрение для решения задач сейсморазведки, сейсмологии, мониторинга нефтегазовых и инфраструктурных объектов.

Т8 работает с многими ведущими вузами, институтами РАН, отраслевыми компаниями для создания таких тестовых полигонов и проведения полевых испытаний DAS для задач геофизики. Только за 2024 г. проводились совместные мероприятия с ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН, Томским политехническим университетом, Передовой Инженерной Школой НГУ, ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН, Геологическим факультетом МГУ им. Ломоносова, Горным институтом УрО РАН, компаниями ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», ООО "ЛУКОЙЛ-Инжиниринг", АО «Башнефтегеофизика», ПАО «Татнефть», ООО «ТНГ-АлГис».

▼ Рис. 1. Направления деятельности группы компаний Т8.





▲ Рис. 2. Принцип работы распределённого акустического датчика

Принцип работы DAS и его применения в геофизике

Распределённые акустические датчики (DAS — Distributed acoustic sensing) — это современная технология, которая позволяет превращать оптическое волокно в цепочку датчиков вибраций [1]. В DAS блок опроса (интеррогатор) посылает короткие лазерные импульсы в оптоволокно и регистрирует фотоприёмным устройством рассеянный назад свет. Чаще всего волокно используется в составе волоконно-оптического кабеля (ВОК), которое обеспечивает необходимые прочностные параметры и защищает от агрессивных условий среды. Микроскопические деформации или акустические колебания ВОК, такие как сейсмические волны или движения грунта,

изменяют распределение неоднородностей в сердцевине оптического волокна, что приводит к изменениям в интерференционном сигнале обратного рассеяния [2]. Измерение временной задержки позволяет точно локализовать место воздействия, а измерение приращения фазы света вдоль длины — количественно оценить динамическую деформацию вдоль всей длины волокна. В результате каждый участок волокна функционирует как автономный датчик.

В DAS сигнал на выходе фотоприёмного устройства оцифровываются с помощью аналогово-цифрового преобразователя с частотой порядка 100 Мвыб/с (мегавыборка в секунду), что позволяет получать данные через каждый 1 м вдоль длины волокна. **Однако тут есть первое заблуждение: реальное**

▼ Табл. 1. Соответствие между длительностью импульса, полосой сигнала и пространственной разрешенностью.

Длительность импульса, нс	Полоса сигнала после демодуляции, МГц	Пространственная разрешенность вдоль длины волокна, м
10	100	1
50	20	5
100	10	10
200	5	20

пространственное разрешение, которое эквивалентно шагу базы группирования точек приема, определяется не шагом дискретизации, а длительностью оптического импульса и полосой электрического сигнала (см. таблицу 1). Также надо учитывать конструкцию и геометрию прокладки ВОК. Об этом будет ниже.

За счёт низких потерь мощности света в оптическом волокне (~ 3 дБ на 15 км в одном направлении) распределённые акустические датчики (DAS) могут обеспечивать работу на десятки километров одним интеррогатором. Например, в [3] испытания показали возможность определять относительное растяжение волокна на уровне $0,3 \cdot 10^{-9}$ на расстояниях до 130 км без доступа к электропитанию на всей длине волокна. При наличии доступа к электропитанию вдоль длины кабеля дальность работы DAS можно увеличить до 300 км в одном направлении с помощью каскада оптических усилителей через ~ 50 км [4]. Это позволяет использовать DAS для мониторинга протяженных объектов таких как охраняемые периметры, магистрали, железные дороги [5], трубопроводы [6]. Подтверждена работоспособность [7] системы обнаружения утечек в подземном трубопроводе с помощью DAS. Принцип работы системы был основан на обнаружении волны отрицательного давления при разгерметизации.

У российских геофизиков есть второе заблуждение: технология DAS еще совсем «сырая». На самом деле это не давно не так. Активное внедрение DAS для задач геофизики активно ведётся с середины прошлого десятилетия [8-10], а сама технология DAS давно вышла за пределы «лаборатории». На международном рынке присутствует около десятка иностранных производителей интеррогаторов DAS. На международном

рынке лидирующие позиции по использованию собственных DAS-систем в геофизике занимают Silixa, APsensing, а в России группа компаний T8 (ООО «Т8» и ООО «Т8 Сенсор») и группа компаний ПетроФайбер. DAS системы уже могут применяться для решения задач сейсмологии [11-13], вертикального сейсмического профилирования (ВСП)[14], в том числе 3D-ВСП [15], шумометрии скважин [16]. Кроме вышеперечисленного ведутся работы над внедрением технологии DAS для наземной сейсморазведки [17], донных исследований геологических структур морского дна [18]. Нефтесервисные компании оценили преимущества DAS и регулярно используют их при решении ряда задач. Например, у компании Schlumberger есть решение Optiq Seismic на базе технологии DAS для различных видов ВСП, в том числе 3D и 4D.

Сравнение с традиционными сейсмоприёмниками

Сравнение DAS и традиционных сейсмоприёмников («стандартные» геофоны) по основным параметрам показано в Таблице 2.

Стоит отметить, что оптоволокно в DAS совмещает в себе одновременно чувствительный элемент и систему телеметрии - передачи информации в точку сбора. При этом энергоснабжение необходимо лишь в местах расположения интеррогаторов. Это является выгодным отличием от телеметрических сейсмических систем, где питанием должны быть обеспечены все модули оцифровки аналогового сигнала датчиков. Например, в задаче непрерывного мониторинга на морском дне в прибрежных зонах, где «время жизни» современной донной станции ограничено энергетической ёмкостью источника её пита-

Параметр	Распределённые акустические датчики (DAS)	«Стандартные» геофоны
Пространственная плотность	Непрерывный, интервал 1 м	Дискретный, интервал 5-50 м
Количество компонент	Однокомпонентный (осевая деформация)	1С или 3С
Стоимость/трудозатраты развёртывания	Низкая стоимость при повторных съемках (волокно устанавливается один раз)	Высокая стоимость при повторных съемках (мобилизация и установка для каждого измерения)
Повторяемость при последующих измерениях	Высокая, фиксированное положение датчиков (устанавливается один раз)	Ниже (идентичность повторной установке практически недостижима)
Электропитание	Не требуется	Требуется
Устойчивость к условиям (темп./давление/ЭМП)	Высокая (до 200°C при использовании высокотемпературного волокна, 20,000 psi) Невосприимчивость к ЭМП, долгий срок службы (15+ лет)	Ограниченная, восприимчивость к ЭМП
Измеряемый параметр	Деформация/скорость деформации	Скорость/ускорение движения частиц
Механизм связи с средой в наземной сейсморазведке	Внедрение в грунт (на глубину 10-15 см.)	Внедрение в грунт
Механизм связи с средой в транзитной зоне и морской сейсморазведке	Погружение на дно, буксирование	Погружение на дно, буксирование
Механизм связи с средой в скважинной сейсморазведке	Цементация, крепление, каротажный кабель	Зажимы
Применимость в наклонных/горизонтальных скважинах	Отличная (с учетом использования спирального ВОК)	Ограниченная/затруднённая
Интеграция с другими датчиками	Возможно комбинирование с оптоволоконными датчиками температуры и статического натяжения в одном кабеле	Нет

▲ Табл. 2. Сравнение сейсморазведочных методик с использованием DAS и «стандартных» геофонов.

ния. Благодаря оптоволокну есть возможность организовать передачу данных на большие расстояния (десятки километров) без влияния электромагнитных наводок, типичных для кабельных сейсмических систем. При перманентной установке ВОК можно осуществлять периодический или постоянный геофизический мониторинг. Для ряда применений DAS можно использовать с уже

существующей кабельной инфраструктурой. Например, в течение февраля 2024 г. по всему миру было развёрнуто 32 профиля наблюдений землетрясений. с помощью DAS, где в большинстве случаев использовались ВОК от волоконно-оптических линий связи [11-13]. С их помощью было зафиксировано 156 землетрясений магнитудой более 5 баллов.

Несмотря на свои преимущества, DAS обладает определёнными ограничениями.

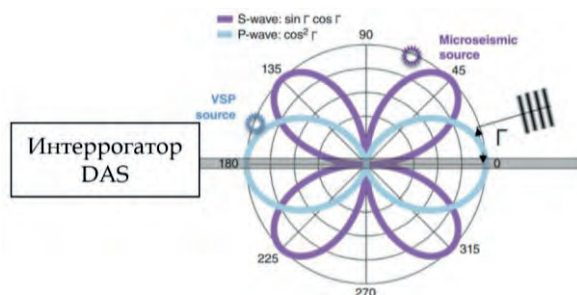
Во-первых, частота опроса волокна ограничена сверху временем обхода света до конца чувствительного волокна и обратно. Так для линии 5 км максимальная частота опроса волокна с помощью типового DAS равняется 20 кГц, а для линии 50 км уже 2 кГц, что вполне сравнимо с частотой дискретизации традиционных сейсмостанций для инженерной и большой наземной сейсморазведки. Существуют методы, где это ограничение на частоту опроса DAS обходится за счёт дополнительной частотной модуляции оптического импульса [20], но, насколько известно авторам, в коммерческие интеррогаторы DAS пока технология не внедрена. Ограничения по частоте опроса нужно принимать во внимание и оценивать ожидаемый частотный диапазон измеряемых сигналов, особенно в шумометрии.

Во-вторых, чувствительность современных ВОК ниже, чем у традиционных геофонов, а динамический диапазон имеет сложную зависимость как от частоты и амплитуды самого сейсмического сигнала, так и параметров режима опроса — частоты и длительности импульсов и используемого алгоритма вычисления полезного сигнала [21, 22].

В-третьих, в отличие от геофона, который фиксирует точечный сигнал в одной конкретной точке, DAS измеряет растяжение волокна на базе измерения порядка длины импульса, т.е. обычно 5–20 м. Из-за этого отклик на разных частотах зависит от скорости звука в среде и базы измерения. Также важным фактором является качество установки: если волокно или ВОК плохо контактирует с землей или колонной, то его чувствительность падает. Например, в [23] авторы

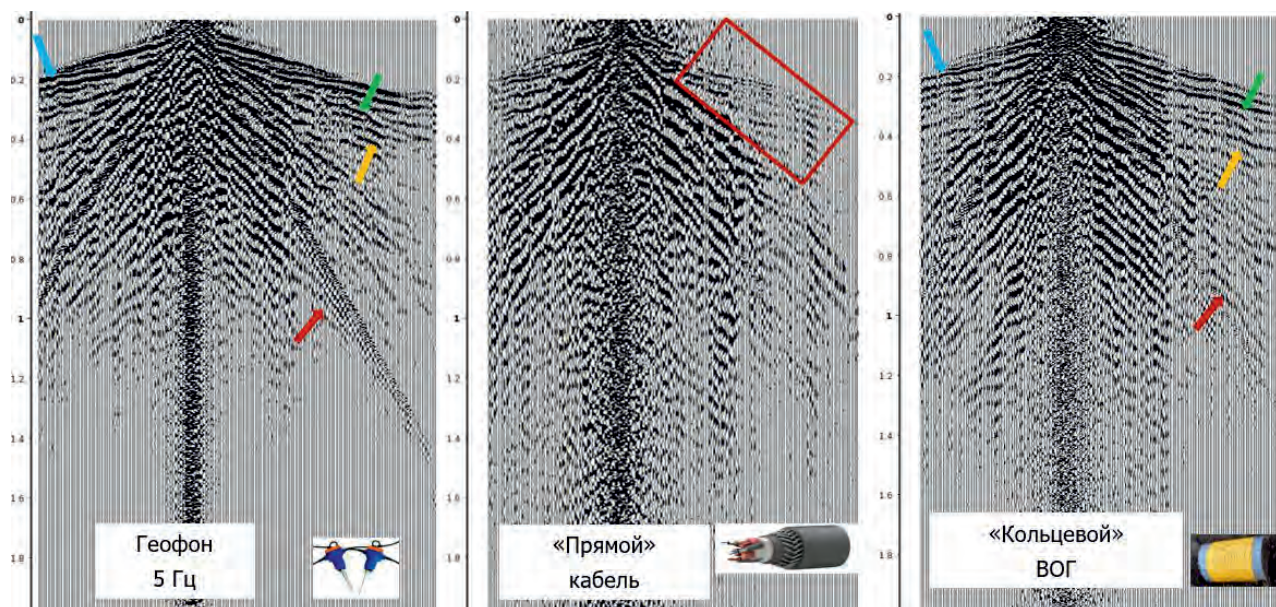
показали, что полностью несвязанное волокно на поверхности земли способно регистрировать сейсмическую энергию на расстоянии до ~10 м от источника, в то время как закрепленное и утяжеленное волокно регистрирует сигналы на расстоянии нескольких десятков метров. Большое значение имеет и конструкция ВОК: насколько он хорошо передаёт растяжение на волокно.

В-четвертых, оптоволокно восприимчиво в основном к деформациям вдоль оси волокна. Из-за этого продольные волны, подходящие под углом к ВОК, регистрируются хуже (см. Рис. 3), а при перпендикулярном падении Р-волны чувствительность прямого волокна приближается к нулю.



▲ Рис. 3. Диаграмма направленности чувствительности прямого волокна к продольным (P) и поперечным (S) волнам. Адаптировано из [9].

При этом необходимо отметить, что большинство из вышеперечисленных недостатков возможно компенсировать с помощью применения волоконно-оптических геофонов (ВОГ) специальной конструкции, которые соединены ВОК. ВОГ представляет собой волокно или тонкий кабель, свёрнутый в кольцо или вытянутый овал. Дополнительно волокно может быть намотано на чувствительное к механическим колебаниям основание. В таком случае ВОГ представляет собой дискретный датчик – аналог классического геофона. На Рис. 4 показаны сейсмограммы общего пункта приёма



▲ Рис. 4. Сейсмограммы ОПП, которые были получены с помощью классического геофона 5 Гц, DAS с прямым ВОК и DAS с «кольцевым» ВОГ.

(ОПП), которые были получены с помощью: классического 5 Гц вертикального геофона, DAS с «прямым» волокном в ВОК и DAS с «кольцевым» ВОГ. Если на «прямом» кабеле отраженных продольные волн ожидаемо не было зафиксировано, то с помощью ВОГ впервые были качественно зарегистрированы продольные отраженные волны для наземной сейсморазведки.

Для ВСП использование DAS с ВОК с прямым волокном приемлемо [14], так как отраженные волны приходят под небольшим углом (исключение дальние пункты возбуждения). Так как DAS измеряет показания со всей длины ВОК, то время необходимое на проведение работ значительно (в разы) сокращается. В 2024 г. с помощью интеррогатора DAS «Дунай» были записаны данные ВСП/НВСП. После обработки и интерпретации данных были получены глубинные и временные разрезы.

В отличие от ВСП в большой наземной сейсморазведки использование ВОК с прямым волокном не подходит, так как волны будут приходить перпендикулярно волокну в кабеле. Из-за этого существ-

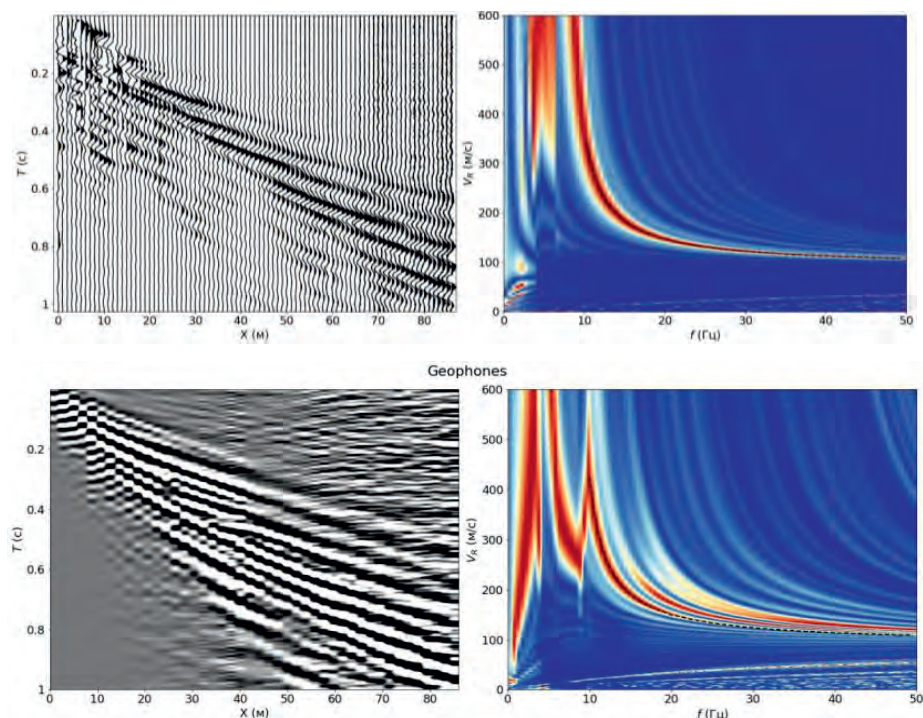
твует заблуждение, что технология DAS совсем не применима для наземной сейсморазведки. Для того, чтобы регистрировать волны, падающие перпендикулярно, можно использовать ВОК со спиральной намоткой волокна [23-25]. Угол намотки, при котором в теории достигается круговая диаграмма направленности, составляет $54,7^\circ$. Альтернативным методом является использование вместе с интеррогатором DAS волоконно-оптических геофонов (ВОГ).

Полигоны для тестирования DAS

Создание полигонов, где можно сравнивать показания разных DAS между собой, а также с показаниями классических сейсмоприёмников - очень важно для внедрения технологии DAS и является необходимым дополнением к модельным расчетам и лабораторным исследованиям.

В сентябре 2024 году были проведены испытания систем "Дунай" и "Агидель" на геофизическом полигоне геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в д. Александровка. База является колыбелью для геофизиков Московского

► Рис. 5.
Сейсмограммы для
прямого кабеля DAS
(сверху) и косы
геофонов (снизу)
и соответствующая
им дисперсия
поверхностных
волн (справа).



университета, а также надежной зоной проведения испытаний и геофизических практик для многих ВУЗов. Полигон отличается повышенной изученностью самых разных методов геофизики, а теперь, и технологии распределенного акустического зондирования. В ходе работ были выполнены съемки скважинным методом вертикального сейсмического профилирования и наземным методом анализа поверхностных волн. Съемки осуществлялись на оптические волокна прямой и витой конфигурации, с использованием источников различного типа (кувалда, искровой источник и др.). Наземные испытания сопровождались регистрацией на классические наземные геофоны с горизонтальной и вертикальной ориентациями.

Похожие испытания проводились в геофизической обсерватории «Ключи» ИНГГ СО РАН. На начальном этапе анализировалось волновое поле для прямого кабеля (см. Рис.5) Показано, что по наблюдаемой волновой картине наблюдается дисперсионная кривая близкая к результатам наблюдений при помощи геофонов. Эта кривая далее может быть

использована для изучения разреза методом MASW. Также использовались ВОК с различной геометрией укладки в траншею: прямая, кольцевая, зигзагообразная в различных плоскостях. Показано (Рис. 6.), что укладка искривлённого кабеля в траншею позволяет при помощи DAS получить записи преломленной волны, которая поляризована ортогонально профилю наблюдений.

В ходе испытаний на обоих полигонах показано, что данные DAS с базой измерения 1 м подходят для изучения верхней части разреза методом многоканального анализа поверхностных волн (MASW). Для этого достаточно обычного ВОК с прямым волокном и стандартной укладкой в траншею. Скважинные измерения с помощью оптоволокну согласуются с результатами традиционных методов.

Также, с целью доказательства возможности применения DAS для мониторинга состояния ледового покрова, в феврале 2024г в акватории Клязьминского водохранилища были проведены тестирование интеррогатора DAS "Дунай" совместно с Институтом физики

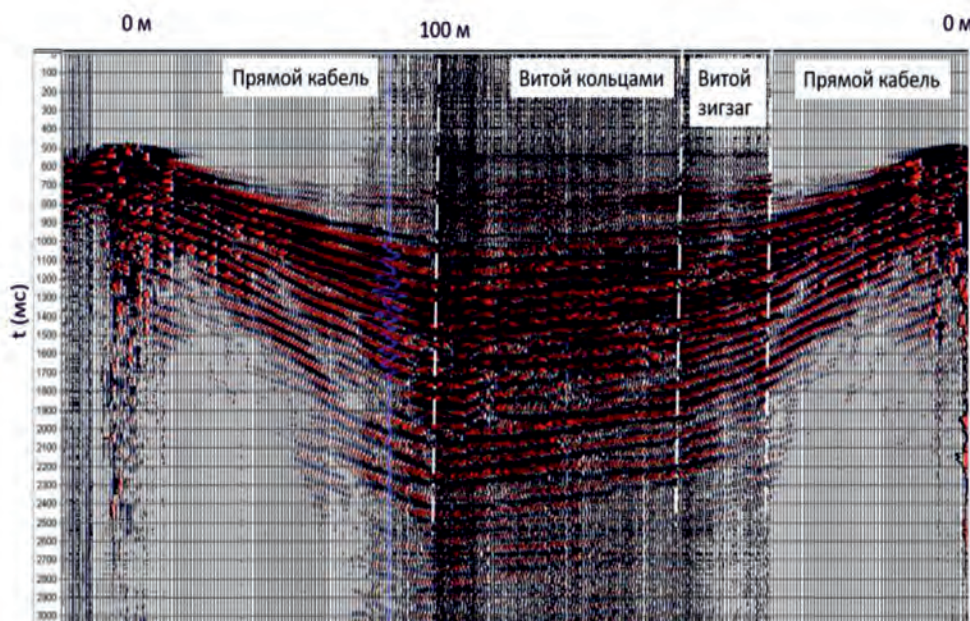


Рис. 6. Совмещенная сейсмограмма для прямого (левая часть) и искривленного оптоволоконного кабеля (правая часть).

Земли имени О. Ю. Шмидта РАН [27]. К интеррогатору подключались волокно в виде «колец», вмороженных в снег в двух перпендикулярных плоскостях, с помощью которых регистрируются разные компоненты. Были проанализированы сигналы, генерируемые активными источниками, и показано, что при хороших условиях связи и соответствующих параметрах наблюдения возможно наблюдать широкополосное распространение продольных и поперечных волн во льду, как и при использовании обычных геофонов. Затем полученные дисперсионные кривые инвертированы с помощью байесовских методов (MCMC) для вывода функции плотности вероятности целевых свойств льда (толщина и эффективный модуль Юнга).

Рис. 7. Схема укладки волокна в двух перпендикулярных плоскостях.



Заключение

В настоящий момент распределённые акустические датчики (DAS) начинают широко использоваться и как эффективное дополнение к традиционным сейсмическим методам, и как их полная замена. DAS может обеспечить высокую плотность каналов и устойчивость к электромагнитным помехам используя стандартные волоконно-оптические кабели. Однако DAS имеет свои особенности: меньшая чувствительность по сравнению с традиционными сейсмодатчиками, некруговая диаграмма направленности прямого волокна. Несмотря на это, DAS уже активно применяется для ВСП, а наиболее результативной областью считается 3D time-lapse ВСП.

Мы показываем в работе примеры данных DAS в реализации наземных наблюдений с разрешением 1 м и пример их использования для анализа верхней части разреза методом MASW. Если перманентно установить ВОК в основание или фундамент объекта, то можно организовать периодический мониторинг его состояния. Применение DAS в большой наземной сейсморазвед-

ке осложнено необходимостью использования специальных оптоволоконных конструкций, однако видится перспективным за счёт возможного кратного увеличения плотности. Показаны примеры сейсмограмм ОПП, записанных с помощью DAS с ВОГ, на которых были зарегистрированы отраженные продольные волны для наземных наблюдений.

Компания Т8 предлагает комплексные решения в области DAS (интеррогаторы «Дунай» и «Агидель»), различные варианты конструкций ВОК с прямой, спиральной намоткой волокна или точечных датчиков на базе концентрированных в одном месте намоток волокна, а также программное обеспечение для обработки и анализа данных, визуализации и интеграции с существующими системами. Опыт в мониторинге объектов, таких как периметры и трубопроводы, подтверждает эффективность решений. Недавние проекты совместно с академическими и промышленными партнёрами демонстрируют высокое качество данных при использовании DAS в ВСП, 3D-исследованиях и мониторинге.

Авторы выражают благодарность Гордичу Евгению Александровичу за ценные замечания.

Литература

1. Официальный сайт Т8 Сенсор. <https://t8-sensor.ru/> [Электронный ресурс].
2. Shatalin S. V., Treschikov V. N., Rogers A. J. Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing // *Applied optics*. – 1998. – Т. 37. – №. 24. – С. 5600-5604.
3. Dudin A. S. et al. 130-km-sensing-range Single-ended High-sensitive Distributed Acoustic Sensor based on Phase-sensitive OTDR assisted by Remote Optically Pumped Amplifier // *2024 International Conference Laser Optics (ICLO)*. – IEEE, 2024. – С. 249-249.

4. Fan C. et al. 300 km ultralong fiber optic DAS system based on optimally designed bidirectional EDFA relays // *Photonics Research*. – 2023. – Т. 11. – №. 6. – С. 968-977.

5. Кудюкин В. В., Кузнецов В. И., Хатламджиян А. Е. Программно-аппаратный комплекс волоконно-оптической сенсорики для систем мониторинга на железнодорожном транспорте // *Труды АО "НИИАС"*. – 2021. – С. 59-64.

6. Грознов Д. И. и др. "Дунай"-система мониторинга активности в охранной зоне трубопровода // *Экспозиция Нефть Газ*. – 2014. – №. 4 (36). – С. 51-53.

7. Кислицын В.О., Оленев В.А., Мионов О.В., Галочкин А.О., Трещиков В.Н., Наний О.Е., Слободсков Д.О., Дурягин В.Н., Саяпин Д.Ю., Стельмашук А.В. Натурные испытания и проверка характеристик оптоволоконной системы обнаружения утечек нефтегазопроводов. *ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти*. 2025;10 (1):108–122.

8. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing—a new tool for seismic applications // *first break*. – 2014. – Т. 32. – №. 2.

9. Li Y., Karrenbach M., Ajo-Franklin J. (ed.). *Distributed acoustic sensing in geophysics: Methods and applications*. – John Wiley & Sons, 2022.

10. Willis M. E. Distributed acoustic sensing for seismic measurements—what geophysicists and engineers need to know. – *Society of Exploration Geophysicists*, 2022.

11. Wuestefeld A. et al. The global DAS month of February 2023 // *Seismological Research Letters*. – 2024. – Т. 95. – №. 3. – С. 1569-1577.

12. Спиридонов Е.П., Наний О.Е., Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Трещиков В.Н. Международный эксперимент Global DAS Month: предварительные результаты анализа данных // *Наука и технологические разработки*. 2023. Т. 102. № 4. С. 75-87. DOI:

10.21455/std2023.4-5

13. Никитин С.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Спиридонов Е.П., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Возможности и перспективы использования распределенных оптоволоконных датчиков в геофизике // Приборы и техника эксперимента. 2023а. № 5. С. 153–158. DOI:10.31857/S0032816223050191

14. Mateeva A. et al. Advances in distributed acoustic sensing (DAS) for VSP //SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. – Society of Exploration Geophysicists, 2012. – С. 1-5.

15. БАРАНОВ К. В. и др. Учредители: Межрегиональная общественная организация Евро-Азиатское геофизическое общество //ГЕОФИЗИКА. – №. 1. – С. 2-14.

16. Zulic S. et al. Comparison of amplitude measurements on borehole geophone and das data //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 23. – С. 9510.

17. Bakulin A., Alfataierge E., Pevzner R. Evaluating HD weathering surveys and surface seismic with DAS in a sand dune environment //Second International Meeting for Applied Geoscience & Energy. – Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, 2022. – С. 621-625.

18. Алексеев А. Э. и др. Применение распределенного акустического датчика для сейсмических исследований с помощью оптической косы //Приборы и техника эксперимента. – 2023. – №. 5. – С. 141-145.

Optiq Seismic Fiber-optic borehole seismic solution

19. <https://www.slb.com/-/media/files/rpev-reservoir-performance-evaluation/product-sheet/optiq-seismic-ps.pdf> [Электронный ресурс].

20. Wakisaka Y. et al. Sampling rate enhancement and fading suppression of Ф-OTDR with frequency division multiplex technique //Journal of Lightwave Technology.

– 2022. – Т. 40. – №. 3. – С. 822-836.

21. van den Ende M. et al. An analysis of the dynamic range of Distributed Acoustic Sensing for Earthquake Early Warning //Seismica. – 2025. – Т. 4. – №. 1.

22. Cunzheng F. et al. Large dynamic range optical fiber distributed acoustic sensing (DAS) with differential-unwrapping-integral algorithm //Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Т. 39. – №. 22. – С. 7274-7280.

23. Harmon N. et al. Surface deployment of DAS systems: Coupling strategies and comparisons to geophone data. Near Surface Geophysics, 20 (5) [Электронный ресурс].

24. Chugaev A. V., Tarantin M. V. Amplitude-frequency response of a helically-wound fiber distributed acoustic sensor (DAS) //Mining Science and Technology (Russia). – 2023. – Т. 8. – №. 1. – С. 13-21.

25. Чугаев А. В. Опыт применения распределенных оптоволоконных акустических датчиков со спиральным волокном для выполнения малоглубинных скважинных сейсмических исследований //Инженерная и рудная Геофизика 2023. – 2023. – С. 637-644.

26. Чугаев А. В. и др. НАЗЕМНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА НА ОТРАЖЕННЫХ ВОЛНАХ С ПОМОЩЬЮ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ //Фотон-экспресс. – 2023. – №. 6 (190). – С. 288-289.

27. МЕТОД СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА, Д.А. Преснов, Е.П. Спиридонов, М.В. Костенко, А.С. Шуруп, «Наука и технологические разработки» 2025