

## ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 681.586.5

### ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА МЕЛКОВОДЬЕ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ КОСЫ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. Э. Алексеев<sup>a,\*</sup>, Б. Г. Горшков<sup>b</sup>, Д. А. Ильинский<sup>c</sup>, В. Т. Потапов<sup>a</sup>,  
Д. Е. Симикин<sup>a,d</sup>, М. А. Таранов<sup>a,d</sup>

<sup>a</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

<sup>b</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН  
Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

<sup>c</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, 36

<sup>d</sup>ООО “Петрофайбер”  
Россия, 105082, Москва, Спартаковская пл., 14

\*e-mail: denis.simikin@gmail.com

Поступила в редакцию 07.04.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 17.04.2023 г.

Описан эксперимент по сейсмическому исследованию геологической структуры морского дна Черного моря с помощью оптического кабеля, уложенного на дно моря (на мелководье), и распределенного акустического датчика (distributed acoustic sensor, DAS). Результаты эксперимента позволяют сделать вывод о перспективности предлагаемой технологии.

DOI: 10.31857/S0032816223050038, EDN: ZIFWJH

#### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмические исследования на мелководье с помощью автономных донных станций достаточно дороги из-за относительно большой стоимости отдельной станции и зачастую связаны с риском их потери. Существенным недостатком автономных систем является также малое время их работы на дне из-за ограниченности заряда элементов питания. Отметим, что в последнее время был достигнут значительный прогресс в конструкции автономных систем, в понижении энергопотребления, в удельной емкости современных элементов питания и в возможности акустически контактировать с приборами и переключать их в режим пониженного энергопотребления до следующего временного окна работы. В настоящее время нет возможности оставлять автономные приборы на дне на длительное время (полгода, год) для проведения повторных исследований, в то время как с оптическим кабелем это можно безбоязненно делать, оставляя его для бу-

дущих исследований без затрат дополнительных ресурсов на подъем и повторную укладку на дно в том же месте. Кроме того, как правило, стоимость оптического кабеля невелика, и можно смириться с его обрывами и даже потерей, а его масса и габариты позволяют использовать практически любое маломерное судно с элементарными для настоящего времени приспособлениями для его укладки или для починки разорванного участка. В работе [1] была протестирована степень чувствительности оптической донной косы, в качестве которой выступал оптоволоконный кабель, к водным волнам, возбуждаемым пневматическим источником. Однако в работе не было проведено полноценных геологических работ с целью получения скоростной модели среды. В предыдущей работе [2] были показаны перспективность использования оптического волокна для регистрации акустических воздействий на грунт и высокая степень корреляции данных, полученных с помощью распределенного акустического датчика и стандартных геофонов, применяемых в геофизических исследованиях.

Донная коса в виде оптоволоконного кабеля может быть использована для проведения длительного мониторинга сейсмических событий.

<sup>1</sup> Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

В работе [3] была предложена архитектура когерентного фазового рефлектометра с низким уровнем шума в выходном сигнале в субгерцевом диапазоне частот. Созданный на основе этой архитектуры распределенный акустический датчик, подключенный к размещенной донной косе, продемонстрировал эффективность при регистрации удаленных землетрясений.

В настоящей статье проводится описание работ по размещению оптоволоконного кабеля на дне моря, а также сейсмических исследований, целью которых является получение скоростной модели среды морского дна с использованием стандартного когерентного фазового рефлектометра, описанного в работе [4].

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

В 2021 году на базе Южного отделения института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Геленджик, был проведен эксперимент по использованию волоконно-оптического когерентного фазового рефлектометра, или распределенного акустического датчика (DAS) для сейсмических исследований. В качестве донной геофизической косы был использован оптоволоконный кабель производства ООО НКО (г. Новомосковск Тульской области). В отличие от стандартных телекоммуникационных кабелей, волокна в модуле не были свободно размещены в гидрофобном геле, а были плотно зафиксированы специальным составом для лучшего восприятия волокон деформаций.

На дно Черного моря было уложено 10 км кабеля. Первые 200 м кабеля, размещенные на небольшой глубине (от 7 до 15 м), в наибольшей степени подвержены влиянию сильных штормов. Для исключения возможности смещения кабеля после размотки указанный отрезок был оборудован небольшими свинцовыми якорями. Якоря были прикреплены непосредственно к кабелю через каждый метр. Дополнительно первые 200 м кабеля были прижаты к морскому дну мешками с песком для его фиксации в случае штормовой погоды.

Размотка кабеля осуществлялась с научно-исследовательского судна “Ашамба”. Конец кабеля был размотан с катушки и зафиксирован на пирсе рядом с местом последующей установки DAS. Катушка с оптоволоконным кабелем была размещена на корме судна, размотка осуществлялась напрямую в воду по ходу движения. В ходе размотки контролировалось натяжение кабеля для исключения образования петель при замедлении судна или рывков при его ускорении. Оптоволоконный кабель был уложен по прямой линии за исключением последнего участка длиной 1 км, который был уложен под углом в 90°. Такая конфигурация укладки была выбрана для изучения чувствительности кабеля в зависимости от угла прихода

воздействия. На рис. 1 черной линией показана трасса размотки кабеля (и впоследствии трасса, вдоль которой были осуществлены воздействия пневмоисточником), а красной линией — фактическое положение оптоволоконного кабеля на дне. Позиционирование каждого сегмента кабеля (1.02 м) было проведено в ходе обработки данных времен прихода водной волны от разных точек излучения пневмоисточника, которые располагались с шагом 27–30 м вдоль всей трассы проложенного донного кабеля. Позиционирование источника излучения осуществлялось с помощью дифференциального навигационного приемника GPS/GLONASS.

В качестве источника возбуждения была использована пневмопушка производства ООО “Пульс” (г. Геленджик, РФ) с рабочим объемом 2.5 л и давлением 138 бар. Акустическая амплитуда воздействия каждого излучения была 3.5 бар · м. Источник буксировался судном и находился под водой на глубине 4 м. Воздействия производились каждые 16 с по фронту PPS (pulse per second) импульса GPS-приемника. Данные DAS записывались в непрерывном режиме, при этом в записываемый сигнал также были подмешаны секундные PPS-импульсы GPS-приемника, что в дальнейшем позволило легко осуществить нарезку данных по времени излучения, выделив из непрерывного потока данных интересные участки. Судно с источником двигалось со скоростью около 3.5–4 узлов (примерно 1.7–2 м/с), таким образом, воздействия производились на расстоянии около 27–30 м друг от друга, и всего на проходе вдоль кабеля было осуществлено около 400 воздействий.

В работе был использован DAS с двойным зондирующим импульсом и фазовым разнесением импульсов [4]. Типовая схема приведена на рис. 2. Модулятор интенсивности формирует из непрерывного высококогерентного излучения, генерируемого лазерным источником, пару импульсов, задержка между которыми определяет длину измерительной базы датчика (gauge length). С учетом спектра источника и специфики задачи была выбрана оптимальная длина измерительной базы, которая составила 10 м. После формирования импульсы поступают на фазовый модулятор, где один импульс из пары приобретает дополнительный фазовый сдвиг  $\delta$ . Последовательно чередуются три разных значения  $\delta = 0$ ,  $\delta = (2/3)\pi$  и  $\delta = -(2/3)\pi$ . Пары импульсов усиливаются в эрбиевом усилителе и через циркулятор направляются в волоконную линию. Сигнал, рассеянный в обратном направлении, через циркулятор поступает на фотодетектор и передается на АЦП. Регистрируется зависимость интенсивности излучения, рассеянного в обратном направлении, от расстояния, называемая рефлектограммой или “сырым” сигналом DAS. Три последовательные группы импульсов с разными значениями фазового



**Рис. 1.** Трасса движения научно-исследовательского судна “Ашамба” при размотке кабеля (черная линия) и фактическое положение кабеля на дне, определенное в ходе обработки сейсмических данных водной волны (красная линия).

сдвига генерируют разные рефлектограммы. Благодаря фазовому разнесению из трех последовательных сигналов с помощью квадратурной обработки можно извлечь (или демодулировать) сигнал, пропорциональный деформации участка волокна, длина которого равна измерительной базе датчика. Таким образом, выходным сигналом DAS является двумерный массив значений деформации. Шаг пространственной дискретизации DAS определяется частотой работы АЦП, для данной работы он составил 1.02 м. Шаг временной дискретизации ограничивается длиной подключенной волоконной линии, в текущей работе частота дискретизации сигнала в каждом пространственном канале составила  $f = 3.3$  кГц. Таким образом, волоконная коса может быть представлена в виде последовательности виртуальных 10-метровых датчиков, расположенных через каждые 1.02 м. Изменение длины каждого из виртуальных датчиков регистрируется с частотой  $f$ . На рис. 3 показан пример выходного сигнала DAS, отклик на воздействие пневматическим источником.

После определения положения каждого канала на дне сейсмические данные с оптических каналов были обработаны по графу метода отраженных волн — общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). В результате был получен сейсмический временной разрез с явно видимыми отражениями до 5 с двойного времени пробега, рис. 4. Учитывая высокие скорости в верхней части разреза, можно оценить глубину освещения сейсмического разреза до 7 км. Такая глубина разреза была получена с пневматической пушкой объемом всего лишь в 2.5 л (153 куб. дюйма).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые была проведена донная сейсморазведка с использованием оптического кабеля (длинной 10 км), измеряющего динамические деформации с небольшим пневматическим источником (объем 2.5 л).

Разработан геофизический оптический кабель для проведения сейсмических исследований на дне моря, который обладает уникальным сочетанием свойств — дешевизной в производстве, лег-

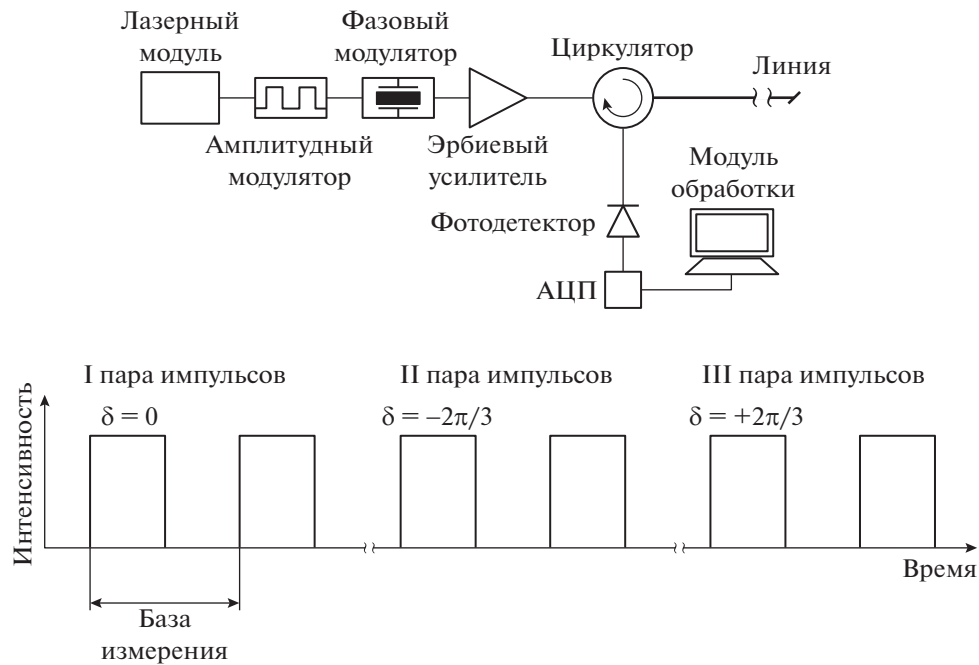


Рис. 2. Принципиальная схема двухимпульсного DAS с фазовым разнесением зондирующих импульсов.

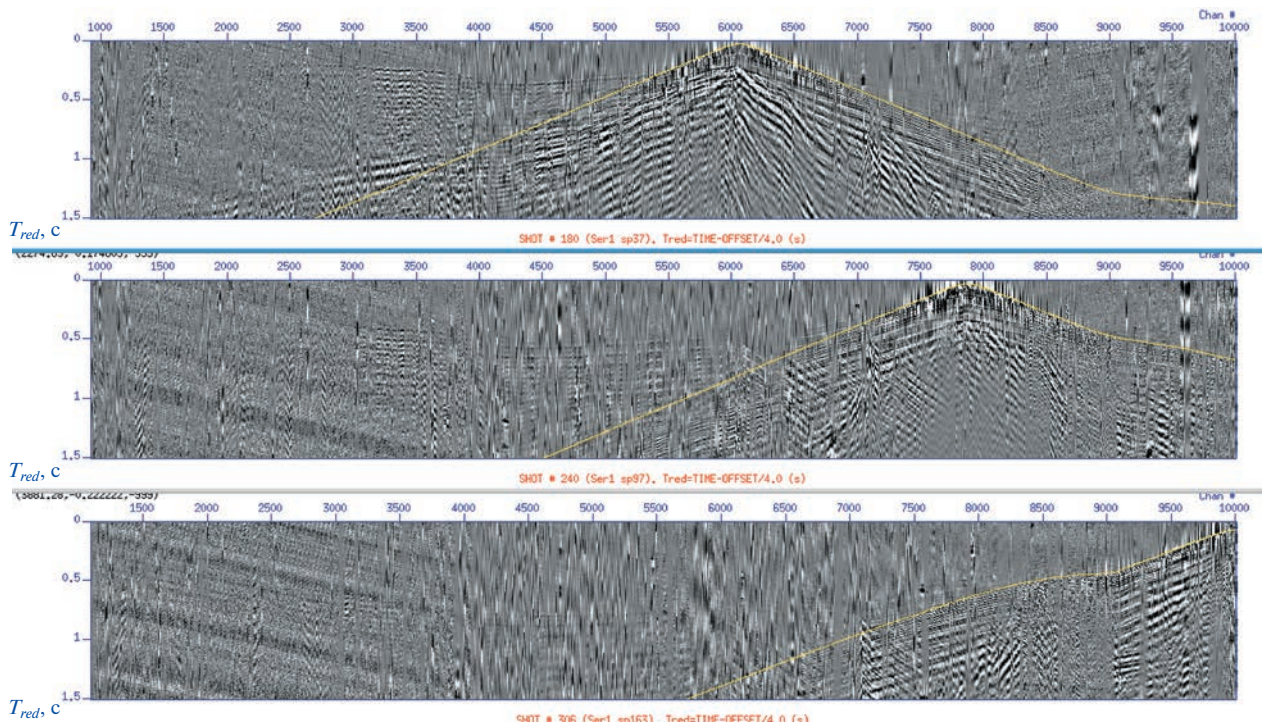
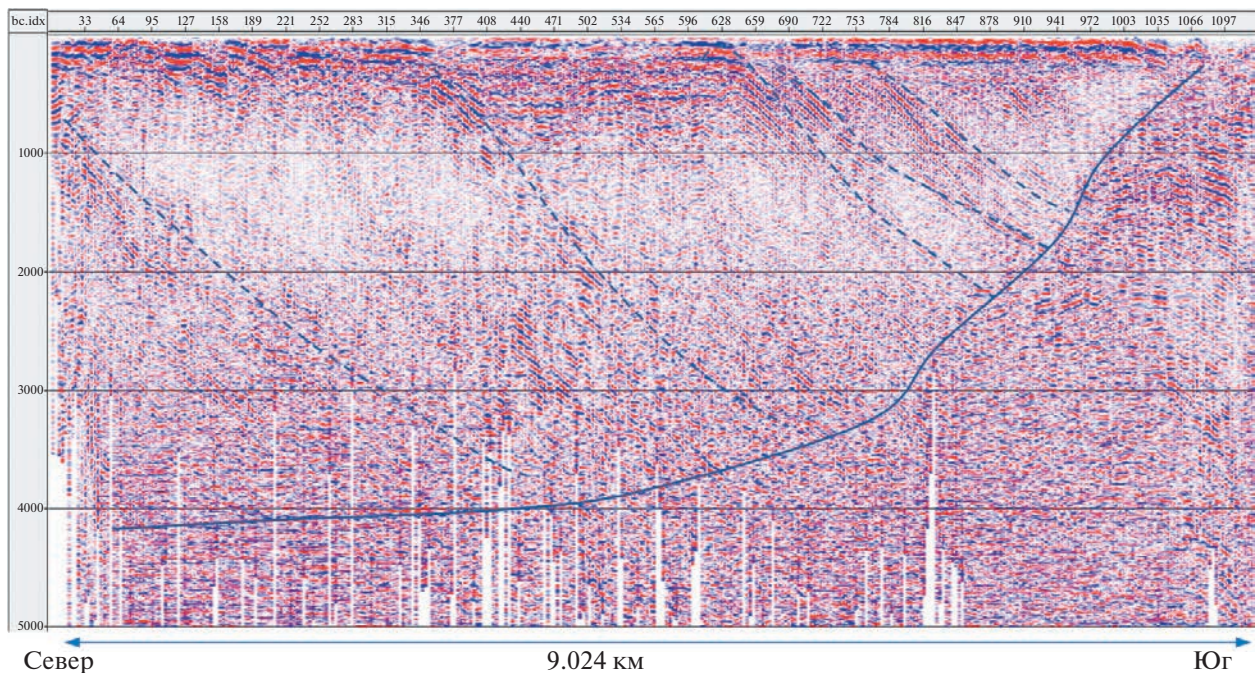


Рис. 3. Три сейсмограммы общей точки излучения – отклики DAS на три излучения источника. По вертикали указано время в секундах, по горизонтали – расстояние вдоль кабеля в метрах. Градацией серого цвета показано значение динамических деформаций на базе 1.02 м. Данные приведены с линейной кинематической поправкой со скоростью 4.0 км/с ( $T_{red} = T - (\text{удаление} - \text{источник} - \text{приемник}, \text{ км}) / 4.0 \text{ км/с}$ ). Желтой линией показан годограф водной волны после определения местоположения каждого канала кабеля (каждые 1.02 м). Изгиб годографа водной волны соответствует повороту кабеля в мористой части. Прослеживаемое максимальное удаление для продольной преломленной в известняках волны со скоростью 4.0 км/с наблюдается до 6 км расстояния источник–приемник.



**Рис. 4.** Временной разрез, полученный на донном оптическом кабеле с геологической интерпретацией. Штриховыми линиями обозначены крутопадающие разломы в направлении моря. Сплошной линией дан разлом другого направления, в который вливаются падающие разломы. Зоны прозрачности соответствуют песчаным отложениям.

костью и прочностью конструкции, что делает его удобным и технологичным для применения в донной сейсморазведке. Используя большую плотность пространственных каналов, можно достаточно точно (с ошибкой меньше одной десятой метра) восстановить положение на дне каждого пространственного канала из 10000 с учетом времени пробега водных волн от пневматического источника.

Данные получены в реальном масштабе времени, поэтому не было необходимости в использовании многочисленных гидроакустических ответчиков, привязанных к кабелю для его позиционирования. Также был исключен этап донных работ на отдельном судне, заключающийся в прохождении вдоль кабеля со специальным гидроакустическим излучателем. Это дало значительную экономию при проведении работ и сократило их сроки. Были использованы автономные системы синхронизации GPS у источника и приемника, что позволило быстро получить сейсмограммы общей точки излучения.

Получен и интерпретирован временной разрез ОГТ до 5 с двойного времени пробега (около 7 км по глубине) с маленьким пневмоисточником (объем 2.5 л, т.е. 153 куб. дюйма). Такой результат оказался возможен благодаря высокой плотности и большому количеству приемных каналов, позволяющих при суммировании значительно улучшить отношение сигнал/шум. Также стало возможным получить глубинные сейсмические изображения высокого разрешения по новой технологии, эко-

номя при этом значительные материальные и людские ресурсы и значительно сокращая время проведения работ.

Протестированная технология представляется перспективной в реальных масштабных сейсмических донных съемках благодаря высокому качеству получаемых данных при существенной экономии на проведении работ.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена частично в рамках государственного заказа Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Matsumoto H., Araki E., Kimura T., Fujie G., Shiraish K., Tonegawa T., Obana K., Arai R., Kaiho Y., Nakamura Y., Yokobiki T., Kodaira S., Takahashi N., Ellwood R., Yartsev V., Karrenbach M. // Sci. Rep. 2021. V. 11. P. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82093-8>
2. Ильинский Д.А., Алексеев А.Э., Ганжа О.Ю., Симикин Д.Е., Оджа М. // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. С. 5. <https://doi.org/10.21455/si2020.4-1>
3. Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Taranov M.A., Simikin D.E., Potapov V.T., Ilinskiy D.A. // Appl. Opt. 2022. V. 61. P. 8308. <https://doi.org/10.1364/AO.468804>
4. Alekseev A.E., Vdovenko V.S., Gorshkov B.G., Potapov V.T., Simikin D.E. // Laser Phys. 2014. V. 24. P. 115106. <https://doi.org/10.1088/1054-660X/24/11/115106>