

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 550.34; 535.41

**ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДАТЧИКОВ В ГЕОФИЗИКЕ¹**

© 2023 г. С. П. Никитин^{a,b}, К. В. Кислов^c, Ю. О. Старовойт^a, Д. М. Бенгальский^a,
Е. П. Спиридонов^a, Д. Р. Харасов^a, Э. А. Фомиряков^{a,d}, О. Е. Наний^{a,d}, В. Н. Трешиков^a

^aООО “Т8”

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1

^bООО “Фемтовижн”

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1

^cИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН)

Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

^dМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 1

*e-mail: nikitin@t8.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 01.03.2023 г.

Принята к публикации 26.04.2023 г.

Приведен краткий обзор применений распределенных акустических сенсоров для решения геофизических и сейсмометрических задач. Получены теоретические оценки и экспериментальные измерения уровня собственных шумов в распределенных акустических сенсорах, в том числе на субгерцевых частотах. Проведено численное моделирование, позволяющее количественно оценить мощность низкочастотного шума (связанного с медленным изменением температуры зондируемого волокна) в сигнале распределенных акустических сенсоров. Полученные результаты дополнены теоретическими оценками спектральной мощности сигнала от удаленного землетрясения, они демонстрируют важность учета температурных эффектов в волокне при планировании экспериментов, связанных с регистрацией слабых сейсмических событий.

DOI: 10.31857/S0032816223050191, EDN: ZVBDKA

ВВЕДЕНИЕ

Использование распределенных оптоволоконных датчиков на основе рассеяния Рэлея для распределенного акустического зондирования является новым перспективным методом в сейсмологии. По сравнению с сейсмической сетью традиционных сейсмических датчиков, использование распределенных акустических сенсоров (РАС) имеет ряд преимуществ.

Во-первых, это возможность более высокого пространственного разрешения. В сейсмических сетях датчики располагаются с дискретностью в десятки и сотни километров. При работах на нефтегазовых резервуарах плотность точечных наблюдений повышается до расстояний в десятки метров. В то же время, в сейсмологических приложениях РАС виртуальные датчики (каналы) могут иметь дискретность в доли метра с пере-

крытием линейной области усреднения деформаций, что и является основой стратегии распределенного акустического мониторинга. В зависимости от задачи дискретность датчиков и измерительную длину можно менять, используя одно и то же оборудование [1, 2]. Возможны также конфигурации РАС с использованием кабеля, закрученного в спираль, в “змейку” или “звезду”, что превращает систему РАС в сейсмическую антенну. Стратегия сбора данных позволяет гибко изменять конфигурацию параметров в опросном блоке датчика (в частности, частоту опроса и величину линейной области усреднения деформаций). Это, в свою очередь, формирует различный вид функции пространственного отклика антенны и определяет диапазон волновых чисел сейсмического сигнала.

Во-вторых, возможность использования существующих телекоммуникационных волоконно-оптических сетей допускает быстрое развертывание с минимальным подключением нового оборудования. Это позволяет проводить исследования в мегаполисах [3, 4], на дне моря [5], в сей-

¹ 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).

смически неактивных регионах, обычно имеющих очень редкую сейсмическую сеть [6]. Быстрое развертывание особенно полезно при исследовании афтершоков, т. е. более слабых повторных толчков, следующих после сильных землетрясений [7].

В-третьих, нет проблемы синхронизации между каналами; не нужны индивидуальные источники питания датчиков и их обслуживание. Низкая стоимость и широкая распространенность материалов также являются преимуществами.

Распределенные акустические сенсоры все шире применяются в сейсмологии. Это скважинные и поверхностные измерения, используемые для разведки и при добыче полезных ископаемых [8–10], для мониторинга резервуаров CO_2 и для исследований в области геотермальной энергии [11, 12], для пассивной и активной сейсмической томографии [13], сейсмологии землетрясений, в том числе маломagnitudeных и микроземлетрясений [14], в морской геофизике [15] для раннего предупреждения о землетрясениях и цунами [16] и во многих других приложениях. Данные РАС полезны для многих геофизических приложений, таких как локация событий, инверсия волновых форм для анализа процессов в источнике [17], томография неоднородностей верхних слоев земной коры и верхней мантии с помощью пространственных корреляций сейсмического шума и с использованием свойств дисперсии поверхностных волн [18].

Конечно, при использовании РАС в сейсмологии существуют и определенные трудности. Измерения деформации $\varepsilon = dL/L$ на данном этапе не всегда достаточны для решения многих задач сейсмологии, которые обычно ориентированы на использование кинематических компонентов движения грунта (перемещение, скорость, ускорение) [19].

В настоящее время существенным недостатком РАС является неразвитая метрология сейсмологических измерений данным методом. Трудности возникают при определении передаточной функции [20], которая является двумерной функцией частоты и волнового вектора [21] и может быть неодинаковой на разных участках кабеля. Отношение сигнала к шуму на разных участках кабеля также может быть разным. Строгая оценка собственных шумов РАС также является непростой задачей, в частности, в силу того, что при использовании РАС возникает дополнительная погрешность измерений, связанная с влияниями на чувствительный элемент изменений температуры, влажности, давления, внешних нагрузок, промерзания/оттаивания и т. п. [22].

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное изучение собственных шумов РАС на основе когерентного рефлектометра Рэлея и сравнение полученных результатов с уровнем сигналов, ожидаемым при регистрации удаленных сейсмических событий.

За основу взята сейсмологическая модель источника Брюна [23, 24]. В этой модели оценка спектральной амплитуды объемной волны $\Omega(f)$ на эпицентральной расстоянии r_h от источника с величиной сейсмического момента M_0 с учетом допустимых упрощений параметров определяется как

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot e^{-\frac{\pi f r_h}{Q\sqrt{V_s V_r}}}, \quad (1)$$

где f – частота объемной волны, f_c – частота среза амплитудного спектра объемных волн, взятая здесь равной 0.15 Гц, а Ω_0 – низкочастотная асимптота амплитудного спектра объемной волны, пропорциональная сейсмическому моменту:

$$\Omega_0 = \frac{F_R S_a}{4\pi\sqrt{\rho_r \rho_s V_r V_s}} \cdot \frac{M_0}{r_h}. \quad (2)$$

Здесь V_s , V_r , и ρ_s , ρ_r – соответственно скорости объемных волн и плотности геологических пород в источнике и приемнике, Q – добротность среды, характеризующая неупругое затухание волны вдоль пути распространения и взятая для приведенной оценки равной 400, наконец, F_R и S_a – два безразмерных параметра, связанных с диаграммой направленности сейсмического излучения и с особенностями размещения приемника сейсмических колебаний на поверхности Земли или на некоторой глубине от нее.

Сейсмическая магнитуда M_w связана с сейсмическим моментом M_0 , выраженным в Н/м, соотношением [24]

$$M_w = \frac{2}{3}(\lg(M_0) - 9), \quad (3)$$

что с учетом формул (1) и (2) позволяет провести оценки ожидаемых амплитудных спектров на определенном расстоянии от источника. Переход от амплитудного спектра сигнала к его оценке в единицах спектральной плотности случайных процессов проведен по методике, предложенной в работе [25]. Сравнение по порядку величины с обобщенным спектром мощности сейсмических деформаций [26, 27] учитывает простое соотношение для плоской волны [28]:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{\omega}{V_x} A_0 e^{-i(\omega t - k_x x)} = \frac{\dot{U}_x}{V_x}, \quad (4)$$

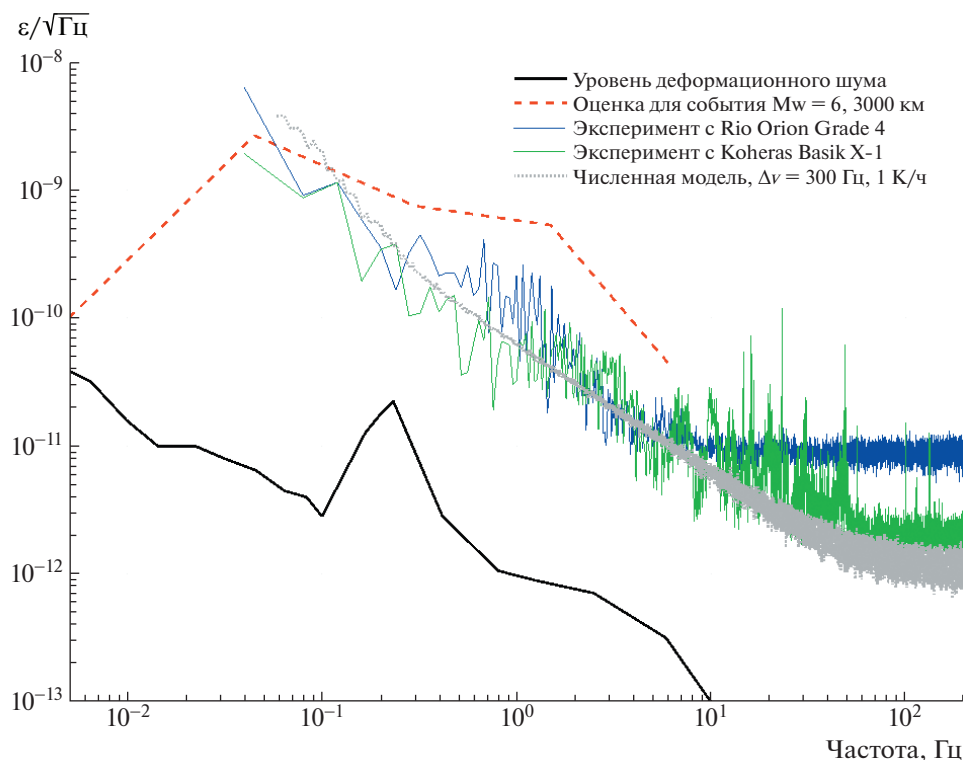


Рис. 1. Оценки спектра деформационного шума, спектра сигнала от события с магнитудой $M_w = 6$ на расстоянии 3000 км, результаты измерений собственных шумов РАС “Дунай” при использовании лазеров двух типов и результаты численного моделирования фликкер-шума, вызванного изменением температуры волокна. Параметры модели указаны на рисунке.

где A_0 — амплитуда смещений в сейсмической волне, ω — ее круговая частота, k_x — волновой вектор, x — координата вдоль пути распространения волны, V_x — скорость объемных сейсмических волн в приповерхностных частях земной коры, ϵ_{xx} — регистрируемая деформация, \dot{U}_x — скорость движения земной поверхности, вызванная сейсмической волной.

Полученные результаты представлены графически на рис. 1. Сплошная черная кривая на этом рисунке соответствует оценке спектральной амплитуды деформационного шума, полученной из хорошо известной скоростной спектральной плотности минимальной модели сейсмического шума [29]. Пересчет из единиц $(\text{м/с})^2/\text{Гц}$, используемых в работе [29], в единицы $\epsilon/\sqrt{\text{Гц}}$, использованные на рис. 1, осуществлен с помощью формулы (4), в которой скорость объемных волн V_x в верхних слоях земной коры была взята оценочно равной 3.1 км/с. Данный метод аналогичен методу оценки спектральной плотности деформаций, отмеченному в работе [26]. Красная штриховая кривая, приведенная на рис. 1, соответствует оценке (по порядку величины) спектральной амплитуды деформаций сигнала, ожидаемого от землетрясения с магнитудой $M_w \sim 6.0$ на телесе-

смическом расстоянии $r_h \sim 3000$ км. Приведенные расчеты позволяют оценить допустимый уровень собственных шумов РАС, предназначенных для сейсмического мониторинга удаленных землетрясений.

Сравним полученные результаты с оценками и экспериментальными измерениями уровня собственных шумов в системе РАС на основе фазочувствительных когерентных рефлектометров рассеяния Рэлея. Когерентный рефлектометр Рэлея по своей природе измеряет оптический фазовый набег, при этом шум фазового сигнала РАС можно оценить, зная мгновенную ширину лазерной линии $\Delta\nu$, длительность зондирующего импульса τ и частоту зондирования $f_{\text{гер}}$ [30, 31]:

$$S_\varphi \approx N \frac{\Delta\nu\tau}{f_{\text{гер}}}, \quad (5)$$

где N — безразмерный множитель, зависящий от используемой оптической схемы РАС, формы импульса и особенностей фильтрации в фотоприемном устройстве рефлектометра, в нашем случае приблизительно равный 4. Пересчет вариации фазы в деформацию волокна ϵ (стрейны) осуществляется с помощью выражения (6), где без-

размерный множитель $\xi = 0.78$ учитывает эффекты фотоупругости в волокне [32]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_G} = \Delta\varphi \frac{\lambda}{4\pi n L_G \xi}. \quad (6)$$

Для оценки положим длину волны лазера $\lambda = 1500$ нм, показатель преломления волокна $n = 1.5$. Как указывалось, использовалась база измерения $L_G \approx 20$ м. С учетом равенства (6) из формулы (5) получается следующая оценка для уровня мощности белого шума деформации в $\varepsilon^2/\text{Гц}$:

$$S_\varepsilon \approx N \frac{\Delta\nu\tau}{f_{\text{реп}}} \left(\frac{\lambda}{4\pi n L_G \xi} \right)^2. \quad (7)$$

Заметим, что после вычисления мощности шума S_ε с помощью формулы (7) из полученного значения в $\varepsilon^2/\text{Гц}$ следует извлечь квадратный корень, с тем чтобы получить результат в единицах амплитуды шума, измеряемой в $\varepsilon/\sqrt{\text{Гц}}$. Для лазера с шириной линии $\Delta\nu = 1$ кГц выражение (7) с указанными параметрами приводит к оценке уровня амплитуды шума в РАС примерно $5 \cdot 10^{-12} \varepsilon/\sqrt{\text{Гц}}$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Нами были проведены экспериментальные измерения собственных шумов РАС, в том числе в области субгерцевых частот, с использованием двух различных высококогерентных лазеров. Для измерений использовалась лабораторная установка, созданная на основе когерентного рефлектометра “Дунай”, разработанного ООО “Т8 Сенсор” и модифицированного таким образом, чтобы в нем можно было использовать различные внешние лазерные источники.

Эксперименты были проведены с двумя различными лазерами, различающимися шириной лазерной линии, а именно, лазером “Koheras Basik X-1” производства “NKT Photonics” со специфицированной мгновенной шириной лазерной линии менее 100 Гц [33] и лазером “RIO Orion Grade 4” производства “LUNA Innovations RIO Lasers” со специфицированной шириной лазерной линии порядка 2 кГц [34]. Рефлектометр “Дунай” использовался в конфигурации с базой измерения (gauge length) $L_G = 20$ м, частотой зондирования $f_{\text{реп}} = 1$ кГц и длительностью зондирующего импульса $\tau = 200$ нс. При обработке спектров шума для их сглаживания было применено усреднение по пространству гауссовым фильтром с шириной 30 м по уровню -3 дБ.

Результаты измерений приведены также на рис. 1, на котором тонкая синяя линия соответствует спектральной амплитуде собственных шумов, полученных при использовании лазера “RIO Orion Grade 4”, а тонкая зеленая линия со-

ответствует лазеру “Koheras Basik X-1”. Из проведенного выше анализа следует, что использование более узкополосного лазерного источника “Koheras Basik X-1” ожидаемо приводит к уменьшению уровня белого шума прибора (наблюдаемого на частотах выше 10 Гц) на 14 дБ.

Итак, спектральная амплитуда белого шума в конфигурации с лазером RIO ($\Delta\nu \sim 2$ кГц) составила примерно $10^{-11} \varepsilon/\text{Гц}$, а в конфигурации с лазером “Koheras” ($\Delta\nu \sim 0.1$ кГц) она же была примерно $2 \cdot 10^{-12} \varepsilon/\sqrt{\text{Гц}}$. Таким образом, экспериментально полученные значения уровней белого шума в сигналах рефлектометра находятся в разумном соответствии с оценками, полученными с помощью формулы (7). Заметим, что в случае лазера “Koheras Basik X-1” полученное экспериментальное значение шума несколько выше ожидаемого, поскольку фазовые шумы этого лазера достаточно малы по сравнению с вкладом от шумов спонтанного излучения оптических усилителей, используемых в установке (при этом влияние этих усилителей на собственный шум РАС в формулах (5) и (7) не учитывается).

Как упоминалось выше, для сейсмологических применений необходимо обеспечить низкий уровень шума РАС на частотах порядка 1 Гц и ниже. Вклад в шумы в этом диапазоне вносят, в первую очередь, случайные уходы оптической частоты зондирующего лазера и изменения температуры волокна, обычно расположенного в грунте на глубине не более 1 м. В данном эксперименте катушка с зондируемым волокном находилась на виброизолированном стенде и была размещена внутри шумоизолирующей коробки. В отличие от лазера “RIO”, лазер “Koheras Basik X-1” допускал работу в режиме стабилизации оптической частоты, реализованной с помощью встроенного в этот лазер эталона Фабри–Перо.

Ранее было продемонстрировано, что стабилизация частоты оптической несущей позволяет существенно подавить шумы в области низких частот [35]. По этой причине ожидалось, что низкочастотные шумы при использовании лазера “Koheras Basik X-1” будут подавлены при включении режима стабилизации оптической частоты. Однако в области частот ниже 1 Гц наблюдаемый шум РАС при использовании обоих лазеров практически не различался, при этом экспериментально измеренный спектр мощности низкочастотного фликкер-шума в обоих случаях аппроксимируется прямой вида $S_\varepsilon = A/f^2$, где параметр шума $A = 10^{-20} [\varepsilon^2 \cdot \text{Гц}]$. Учитывая примерно одинаковый уровень низкочастотного шума $1/f^2$ при использовании лазеров с разной степенью стабилизации оптической несущей и принимая во внимание, что специальных мер по термостабилизации волокна нами не предпринималось, можно

предположить, что природа наблюдаемого фликкер-шума связана с вариацией температуры оптического волокна, приводящей к шуму оптической фазы обратного-рассеянного сигнала, регистрируемого РАС.

Для предварительной проверки данной гипотезы нами было проведено численное моделирование шума с помощью модели когерентного рефлектометра, более подробно описанной в работе [36]. Данная модель, в отличие от оценки шума РАС по формулам (5)–(7), позволяет учесть не только влияние белого шума частоты зондирующего лазера, но и вклады в шум РАС, обусловленные фликкер-шумами частоты лазера, а также линейными уходами его оптической частоты, или шумами РАС, возникающими при изменении температуры зондируемого волокна [37], что эквивалентно линейному уходу частоты лазера. Для удобства сравнения с экспериментальными измерениями результаты численного моделирования собственных шумов РАС для зондирующего лазера с мгновенной шириной линии $\Delta\nu = 300$ Гц при изменении температуры волокна со скоростью 1 К/ч приведены серой пунктирной линией также на рис. 1. Как видно из сравнения графиков, низкочастотный шум, наблюдаемый в наших экспериментах, можно объяснить при нулевом линейном уходе частоты лазера, предположив, что температура зондируемого волокна изменялась со скоростью примерно 1 К/ч.

ВЫВОДЫ

Волоконно-оптические РАС на основе когерентных рефлектометров рассеяния Рэлея полезны для многих геофизических приложений, таких как локация событий, инверсия волновой формы, шумовая томография верхних слоев для изучения мелкомасштабных структурных неоднородностей земной коры и верхней мантии.

В данной работе приведены теоретические оценки спектральной мощности сигналов, значимых с точки зрения сейсмологии, а также проделаны теоретические оценки и экспериментальные измерения собственного шума РАС на основе когерентных рефлектометров рассеяния Рэлея, демонстрирующие ограничения, накладываемые на чувствительность сейсмических измерений наличием фазовых шумов излучения лазера, зондирующего волокно, и стабильностью температуры самого волокна. Проведенное численное моделирование подтверждает, что при использовании одномодовых волокон собственный шум РАС в области низких частот имеет характер фликкер-шума, мощность которого определяется не только стабильностью частоты используемого лазерного источника, но и вариациями температуры оптоволоконна, являющегося чувствительным элементом РАС.

При этом, если частоту лазера можно стабилизировать техническими средствами, то избавиться от влияния внешних температурных колебаний на волокно – непростая задача. Ранее сообщалось, что подобный эффект действительно имеет место в полевых условиях [38]. Для подавления данного шума было предложено и продемонстрировано волокно с массивом искусственных рассеивателей (МИР-волокно, *engineered fibers*) [38, 39]. Также улучшить чувствительность РАС можно, используя волоконно-оптические кабели с увеличенной глубиной прокладки в грунте, где температурная стабильность выше.

Данный эффект имеет практическое значение, поскольку, как показывают приведенные в статье теоретические оценки и экспериментальные результаты, спектральная мощность субгерцевого фликкер-шума РАС, возникающего при изменении температуры одномодового волокна со скоростью порядка 1 К/ч, по порядку величины сопоставима с ожидаемым сигналом, возникающим при землетрясении с магнитудой 6 на расстоянии порядка 3000 км от места регистрации с помощью РАС.

Результаты, изложенные в данной статье, являются частью подготовки к использованию РАС “Дунай” в эксперименте “Global DAS month” [40].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ide S., Araki E., Matsumoto H.* // *Earth Planets Space*. 2021. V. 73. P. 63. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01385-5>
2. *Shragge J., Yang J., Issa N., Roelens M., Dentith M., Schediwy S.* // *Geophys. J. Intern.* 2021. V. 226. P. 564. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab111>
3. *Fang G., Li Y.E., Zhao Y., Martin E.R.* // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47. Art. e2019GL086115. <https://doi.org/10.1029/2019GL086115>
4. *Spica Z.J., Perton M., Martin E.R., Beroza G.C., Biondi B.* // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2020. V. 125. P. 1. <https://doi.org/10.1029/2019JB018656>
5. *Tonegawa T., Araki E., Matsumoto H., Kimura T., Obana K., Fujie G., Arai R., Shiraishi K., Nakano M., Nakamura Y., Yokobiki T., Kodaira S.* // *Geophys. Research Lett.* 2022. V. 49. Iss. 4. Art. e2022GL098162. <https://doi.org/10.1029/2022GL098162>
6. *Smolinski K., Paitz P., Bowden D., Edme P., Kugler F., Fichtner A.* // *EGU General Assembly*, 2020. EGU2020-8225. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8225>
7. *Li Z., Shen Z., Yang Y., Williams E., Wang X., Zhan Z.* // *AGU Advances*. 2021. № 2. Art. e2021AV000395. <https://doi.org/10.1029/2021AV000395>
8. *Binder G., Titov A., Liu Y., Simmons J., Tura A., Byerley G., Monk D.* // *Geophysics*. 2020. V. 85. P. T225. <https://doi.org/10.1190/geo2019-0819.1>
9. *Hartog A.H.* In *Optical Fibre Sensors: Fundamentals for Development of Optimized Devices.* / Eds. Del Villar I., Matias I.R. Hoboken. NJ. John Wiley & Sons.

2020. P. 151.
<https://doi.org/10.1002/9781119534730.ch6>
10. *Naldrett G., Parker T., Shatalin S., Mondanos M.* // *First Break*. 2020. V. 38. P. 71.
<https://doi.org/10.3997/1365-2397.fb2020012>
11. *Popik S., Pevzner R., Bona A., Tertyshnikov K., Glubokovskikh S., Gurevich B.* // *Geophys. Prospect*. 2021. V. 69. P. 842.
<https://doi.org/10.1111/1365-2478.13080>
12. *Tribaldos V.R., Ajo-Franklin J.B.* // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2021. V. 126. Art. e2020JB021004.
<https://doi.org/10.1029/2020JB021004>
13. *Agostinetti N.P., Villa A., Saccorotti G.* // *Solid Earth*. 2022. V. 13. P. 449.
<https://doi.org/10.5194/se-13-449-2022>
14. *Huff O., Lellouch A., Luo B., Jin G., Biondi B.* // *Lead. Edge*. 2020. V. 39. P. 776.
<https://doi.org/10.1190/tle39110776.1>
15. *Min R., Liu Z., Pereira L., Yang C., Sui Q., Marques C.* // *Opt. Laser Technol.* 2021. V. 140. Art. 107082.
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107082>
16. *Lior I., Rivet D., Ampuero J.P., Sladen A., Barrientos S., Sánchez-Ollavaria R., Opazo G.A.V., Prado J.A.B.* // *Sci. Rep.* 2023. V. 13. P. 424.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-27444-3>
17. *Faucher F., de Hoop M.V., Scherzer O.* // *Geophysics*. 2021. V. 86. P. R21.
<https://doi.org/10.1190/geo2020-0305.1>
18. *Nayak A., Ajo-Franklin J.* // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 2021. V. 111. P. 3432.
<https://doi.org/10.1785/0120210028>
19. Distributed acoustic sensing in geophysics: Methods and applications / Eds. Li Y., Karrenbach M., Ajo-Franklin J. 2022. Vol. 268. John Wiley & Sons. ISBN: 978-1-119-52179-2.
<https://doi.org/10.1002/9781119521808>
20. *Lindsey N.J., Rademacher H., Ajo-Franklin J.B.* // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2020. V. 125. Art. e2019JB018145.
<https://doi.org/10.1029/2019JB018145>
21. *Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., Krawczyk C.M.* // *Nature commun.* 2018. V. 9. P. 1.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y>
22. *Kislov K.V., Gravirov V.V.* // *Seismic Instruments*. 2022. V. 5. P. 485.
<https://doi.org/10.3103/S0747923922050085>
23. *Brune, J. N.* // *J. Geoph. Res.* 1970. V. 75. P. 4997.
<https://doi.org/10.1029/JB075i026p04997>
24. *Aki K., Richards P.* *Quantitative Seismology*. 2nd Ed. University Science Books. 2002.
<https://lcn.loc.gov/2002071360>
25. *Ackerley N.* // *CSEG GeoConvention Vision*. 2012. Article #90174.
26. *Borcherdt R.D., Johnston M.J.S., Glassmoyer G.* // *Bull. Seism. Soc. America*. 1989. V. 79. P. 1006.
<https://doi.org/10.1785/BSSA0790041006>
27. *Beavan R.J., Goultly N.R.* // *Geophys. J. Intern.* 1977. V. 48. P. 293.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1977.tb03673.x>
28. *Hubbard P.G., Vantassel J.P., Cox B.R., Rector J.W., Yust M.B.S., Soga K.* // *Sensors*. 2022. V. 22. P. 4589.
<https://doi.org/10.3390/s22124589>
29. *Peterson J.* Open-file report 93-322. U. S. Geological Survey, Albuquerque, New Mexico. 1993.
http://opg.sccc.ru/attachments/073_ofr93-322.pdf
30. *Alekseev A.E., Tezadov Y.A., Potapov V.T.* // *Laser Phys*. 2017. V. 27. P. 055101.
<https://doi.org/10.1088/1555-6611/aa6378>
31. *Nikitin S., Fomiryakov E., Kharasov D., Nanii O., Treshchikov V.* // *J. Lightwave Technol.* 2019. V. 38. P. 1446.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2952688>
32. *Bertholds A., Dandliker R.* // *J. Lightwave Technol.* 1988. V. 6. P. 17.
<https://doi.org/10.1109/50.3956>
33. Koheras BASIK – single-frequency fiber lasers. <https://www.nktphotonics.com/products/single-frequency-fiber-lasers/koheras-basik/>
34. ORION 1550 nm Laser Module. <https://rio-lasers.com/laser-products/>
35. *Gorshko 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>
36. *Fomiryakov E., Kharasov D., Nikitin S., Nanii O., Treshchikov V.* // *J Lightwave Technol.* 2021. V. 39. P. 5191.
<https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3082263>
37. *Nikitin S.P., Kuzmenkov A.I., Gorbulenko V.V., Nanii O.E., Treshchikov V.N.* // *Laser Phys*. 2018. V. 28. P. 085107.
<https://doi.org/10.1088/1555-6611/aac714>
38. *Shatalin S., Parker T., Farhadiroushan M.* *Distributed Acoustic Sensing in Geophysics: Methods and Applications*. 2021. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/9781119521808.ch1>
39. *Фомиряков Э.А., Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Наний О.Е., Никитин С.П., Трещиков В.Н.* // *Автоматерия*. 2023. Т. 59. № 1. С. 87.
<https://doi.org/10.15372/AUT20230109>
40. Global DAS monitoring month February 2023. <https://www.norsar.no/in-focus/global-das-monitoring-month-february-2023>. *Wuestefeld A., Spica Z.J., Aderhold K. et al.* // *The Global DAS Campaign of 2023*, submitted to *Seismol. Res. Lett.* (2023).