

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ GLOBAL DAS MONTH: ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Е.П. Спиридонов¹, О.Е. Наний^{1,4}, С.П. Никитин^{1,2}, К.В. Кислов³, Ю.О. Старовойт¹,
Д.М. Бенгальский¹, В.Н. Трещиков¹

¹ ООО "Т8", Россия, 107076, г. Москва, Россия

² ООО "Фемтовижн", г. Москва, Россия

³ Институт теории прогноза землетрясений и математической
геофизики РАН (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, г. Москва, Россия

Автор для переписки: К.В. Кислов, e-mail: kvkislov@yandex.ru

Аннотация. В результате международного эксперимента GLOBAL DAS MONTH, прошедшего в феврале 2023 г., был собран уникальный набор данных о более чем 156 землетрясениях ($M \geq 5$), зарегистрированных в системах DAS по всему миру. Каждое из этих событий записывалось каждым участником эксперимента. Цель заключалась в определении применимости глобальной системы DAS для телесеismicкой регистрации, выявления возникающих при этом узких мест. В статье представлен анализ данных, полученных ООО "Т8 Сенсор" - российским участником эксперимента, проведена оценка некоторых метрологических характеристик применяемой системы наблюдений. Проведенные исследования позволяют сравнить систему наблюдений с мировыми аналогами и наметить направления дальнейших работ.

Ключевые слова: Программно-аппаратный комплекс "Дунай", распределенное акустическое зондирование (DAS), международный эксперимент Global DAS Month, землетрясения в Турции в феврале 2023г., оценка качества сигнала, детектирование первых вступлений

Финансирование: Работа выполнена по плану научных работ ООО "Т8 Сенсор" и в рамках государственного задания Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук

Введение

За последние несколько лет распределенное акустическое зондирование (Distributed acoustic sensing — DAS) стало признанным инструментом для записи сейсмических волновых полей с высокой точностью и высоким пространственно-временным разрешением. Интерес к этой технологии как в научных кругах [Gorshkov et al., 2022], так и при коммерческом применении, использующим геофизические методы

[Rossi et al., 2022], ускоряет исследования и разработки оборудования DAS: окончных устройств и их схем измерений, оптических волокон и кабелей, алгоритмов первичной обработки сигналов, метрологических схем и методов анализа данных, превращения их в информацию.

Конечно, при использовании DAS в сейсмометрии существуют определённые трудности [Кислов, Гравиров, 2022]. Измерения деформации $\varepsilon = dL/L$ не всегда достаточны для решения многих задач сейсмологии, ориентированных на кинематические компоненты движения грунта: перемещение, скорость и ускорение [Lior et al., 2021; van den Ende, Ampuero, 2021]. DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволоконна, т.е. каждый его виртуальный «датчик» (канал) однокомпонентный. Каждый канал DAS имеет более высокий уровень шума, чем широкополосный современный сейсмометр. Однако, высокая пространственная плотность многоканальных наблюдений позволяет компенсировать этот недостаток за счёт суммирования или группирования сигналов отдельных каналов.

Тип оптоволоконного кабеля [Zhang et al., 2020; Jiang et al., 2023] и процедуры его укладки [Becker et al., 2018; Celli et al., 2023; Gaudot et al., 2023] также влияют на амплитудный отклик DAS. Передаточная функция [Lindsey et al., 2020] является двумерной функцией частоты и волнового вектора [Jousset et al., 2018] и не одинакова на разных участках кабеля. Отношения сигнал/шум (ОСШ) на разных участках кабеля также различаются.

Сейсмологов до сих пор изумляет, что с помощью одного и того же оборудования можно регистрировать практически весь диапазон сейсмических явлений [Paitz et al., 2020]. DAS используют при разведке и добыче полезных ископаемых (особенно углеводородов), в инженерной, локальной и региональной сейсмологии. Однако долгое время записи телесеизмических землетрясений были побочным продуктом в этих исследованиях.

Методы и инструменты

В рамках международного эксперимента GLOBAL DAS MONTH с 1 по 28 февраля 2023 года энтузиасты применения DAS в сейсмологии, как из научных кругов, так и из промышленности одновременно вели запись сейсмических событий [Wüstefeld, 2023]. В разных регионах земного шара все желающие одновременно регистрировали сигналы землетрясений с магнитудой $M > 5$ (по каталогу USGS), используя различную аппаратуру DAS. Сигналы представляют собой проекцию компоненты тензора деформаций, обусловленную сейсмической волной, на ось максимальной чувствительности оптоволоконного датчика т.е. вдоль него. В результате предварительной договоренности участники эксперимента представили в общее хранилище свои записи в размерности деформации или ее скорости. За это время во всем мире произошло более 150 землетрясений выше указанного магнитудного порога. Записи DAS были получены с использованием наземных, подводных и проложенных в скважинах оптоволоконных кабелей.

Цель эксперимента состояла в том, чтобы определить, может ли глобальная система сейсмомониторинга, основанная на DAS, устойчиво работать для регистрации

и анализа телесеismicких событий. В случае малых эпицентральных расстояний отдельные системы также записывали события и в ближней от источника зоне.

Для обеспечения единообразия записей и уменьшения общего объема данных организаторами эксперимента были выбраны следующие параметры регистрации: частота дискретизации выходного сигнала снижалась до 100 Гц, продолжительность записи каждого события - 1 час, пространственная выборка (которую можно рассматривать, как расстояние между виртуальными датчиками): ~20 м. Дополнительно 14 февраля 2023 г. была инициирована непрерывная регистрация продолжительностью 24 часа с частотой дискретизации - 50 Гц [Wuestefeld et al., 2023].

Сигналы двух разрушительных землетрясений в Турции, происшедших 6 февраля 2023 г., были зафиксированы по всему земному шару [Joussset et al., 2023]. С российской стороны в эксперименте участвовало ООО "Т8 Сенсор", которое проводит научные исследования в области фотоники и разработки многофункциональных систем технологического мониторинга и охраны объектов от несанкционированных проникновений. В эксперименте проводилась регистрация сейсмических сигналов с помощью Программно-аппаратного комплекса DAS "Дунай" собственной разработки [Никитин и др., 2023б]. Система "Дунай" основана на принципе когерентной рефлектометрии. В волокно периодически поступают оптические лазерные импульсы. Часть света рассеивается на неоднородностях волокна и распространяется в обратном направлении. При микродеформациях волокна, вызванных сейсмическими воздействиями, параметры рассеянного сигнала изменяются. Эти изменения преобразуются в полезный сигнал, отражающий деформацию волокна. База усреднения измеряемой деформации ~10 м, а рабочая длина чувствительного элемента (волокна) может достигать 100 км [Дунай..., 2023]. Для проведения эксперимента система была развернута на полигоне Кавказской горной обсерватории Государственного астрономического института им. П.К.Штернберга (ГАИШ). На рис. 1 показана пространственная схема расположения оптоволоконного кабеля на полигоне, полученная с помощью «привязки» - сопоставления оптической длины сенсора географическим координатам. Привязка осуществляется сотрудником "Т8 Сенсор" и представляет из себя последовательность механических воздействий вдоль предполагаемого места укладки кабеля с одновременной фиксацией координат на GPS-трекере и оптической длины в программном обеспечении DAS "Дунай". Для оптимизации ресурсов привязка производится в областях предполагаемого сопряжения прямых участков, а координаты виртуальных каналов получаются с помощью интерполяции. Также на рис. 1 отмечены номера виртуальных каналов с оптической длиной, которые используются для дальнейшего анализа данных.

Разрушительные февральские землетрясения в Турции произошли на эпицентральной расстоянии около 900 км от полигона. Объем и разнообразие данных, полученных в эксперименте, открывает возможность для целого ряда прикладных научных исследований в области использования DAS в геофизике.



Рис. 1. Пространственная привязка оптоволоконного кабеля на полигоне Кавказской горной обсерватории ГАИШ.

Fig. 1. The fiber optic cable routing layout at the Caucasus Mountain Observatory of Sternberg Astronomical Institute site

Результаты

В рамках исследования данных, полученных системой «Дунай», была произведена оценка отношения сигнал-шум всех распределенных каналов для сейсмических событий, зарегистрированных в течение международного эксперимента. При этом были использованы времена первых вступлений фаз для скоростной модели Земли iasp91 [Kennett, Engdahl, 1991]. Сигнал каждого канала или деформограмма представляет собой набор амплитудных возмущений на фоне регистрируемого шума и ничем по характеру амплитудных колебаний этот сигнал не отличается от обычного землетрясения, записанного стандартным сейсмоприемником. Разница лишь в том, что в данном случае мы имеем дело с $m \times n$ матричным представлением двумерного процесса, где шаг по строкам определяется частотой опроса (в нашем случае 100 Гц), а шаг по столбцам определяется упомянутой выше пространственной выборкой 20 м. При этом сам деформационный сигнал усреднялся на базе в 10 м. Упрощенно это можно представить как набор расположенных вдоль кабеля деформографов, каждый из которых длиной 10м, а расстояние между ними 20м. Для оптимизации объёмов собранной информации после пространственно-временной фильтрации исходных данных, общее число каналов (виртуальных «мини-деформографов») было равным 36. Внутри часового интервала записи каждого события сигнал каждого канала был разбит на два 10-минутных окна до первого вступления волновой формы, оцененного по годографу и после него (рис. 2). Длительность интервалов (10 мин) выбрана практически произвольно. Напомним, что анализ полученной информации имел пока очень предварительный характер и ставил своей целью получение самых общих представлений о возможностях регистрации удалённых сейсмических событий

(волновых форм) с помощью систем DAS на базе оптоволоконного кабеля. Для выбранных окон были рассчитаны среднеквадратичные значения (СКЗ) амплитуды сигнала. Данные соответствующего окна в дальнейшем рассматриваются как «шум» и «сигнал», исходя из допущения, что в окне «шума» отсутствуют деформации, вызванные соответствующим сейсмическим событием. Такой подход к расчету имеет существенный, но неизбежный недостаток, при частых землетрясениях, как было, например, в Турции, в окно «шума» может попадать сигнал от предыдущих событий. Поэтому для дальнейшего анализа было решено использовать данные, для которых ОСШ превышает 3 дБ. Известным недостатком DAS является неравномерность метрологических характеристик каналов. Поэтому для простоты расчетов был выбран 25 канал, расположенный на 480 м от начала волоконно-оптической линии. Этот канал за время эксперимента продемонстрировал статистически стабильное и наибольшее ОСШ, с отсутствием спорадических шумовых выбросов сигнала неизвестного происхождения [Спиридонов и др., 2023]. Кроме того, впоследствии были исключены далекие (>4000 км) события с магнитудой меньше M_6 . В результате пригодными для анализа оказались 18 событий (рис. 3, табл.1). Используются записи землетрясений, происшедших как во время проведения эксперимента (1-28 февраля 2023 г.), так и в период тестовой работы системы «Дунай» (январь 2023 г.).

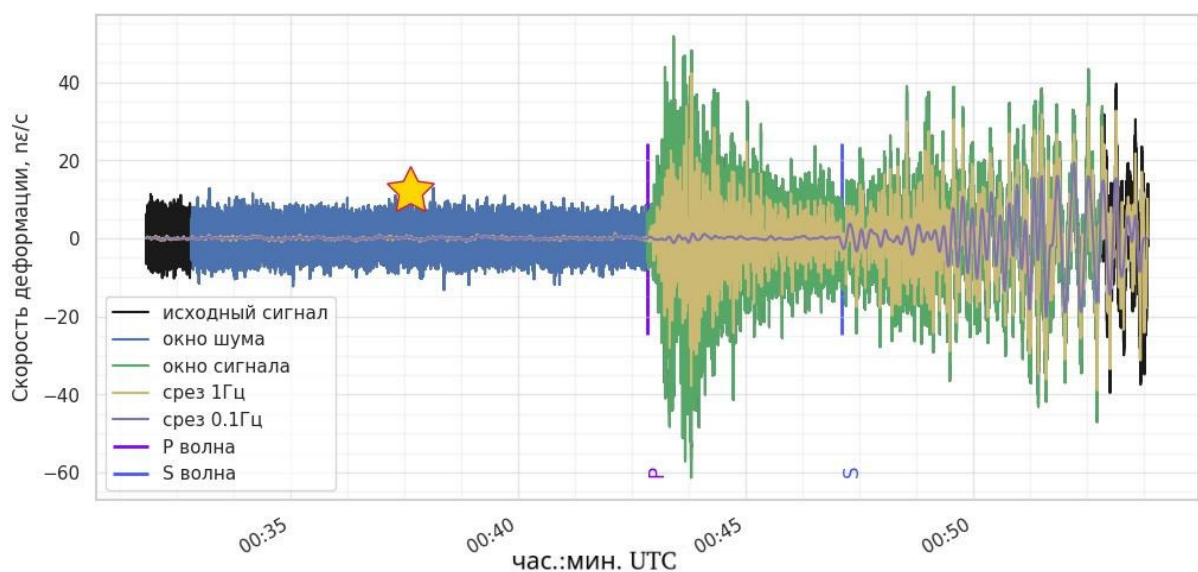


Рис. 2. Пример записи скорости деформации (наноустрейн в сек) землетрясения 23.02.2023 г., происшедшего в 65 км от поселка Мургаб (Таджикистан) (см. табл. 1, событие us6000jрхс): $M_6.7$, эпицентральное расстояние $\Delta = 2635$ км, глубина $H = 9$ км. Звездочкой обозначено время в очаге.

События для анализа

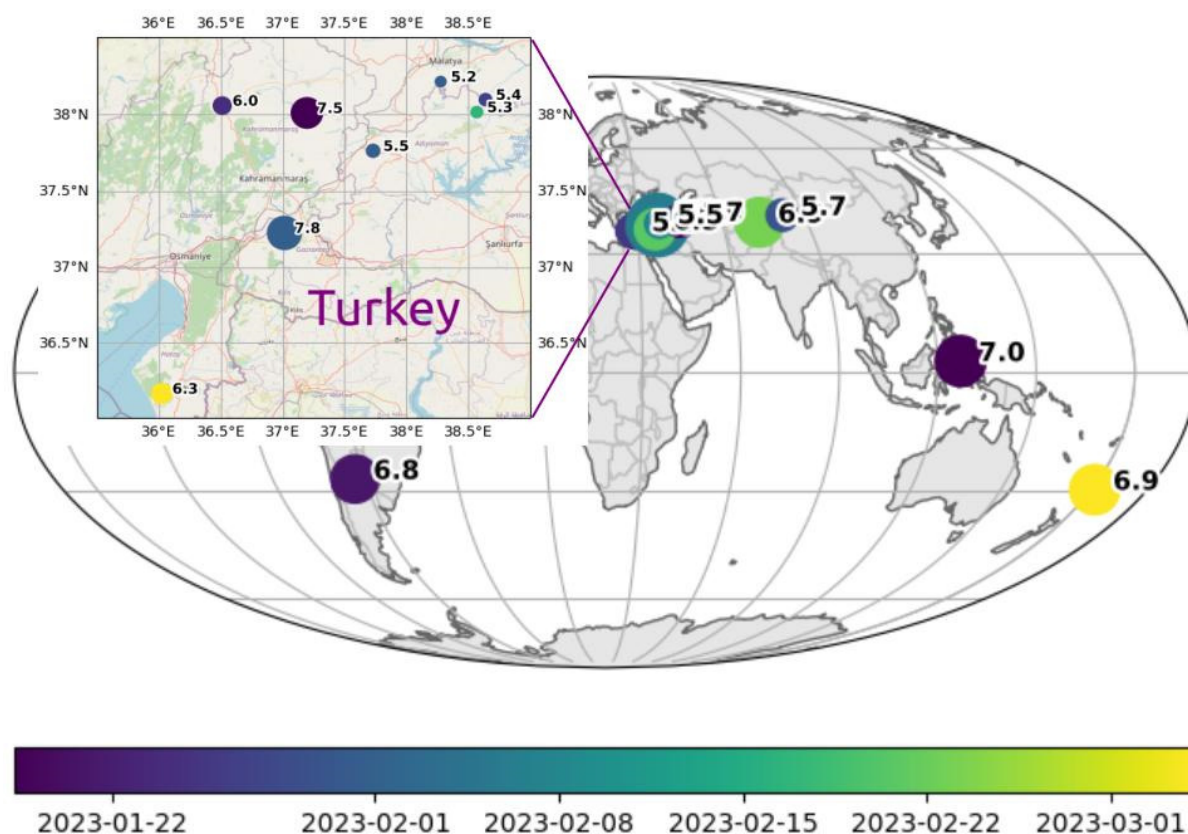


Рис. 3. Расположение событий, используемых для данного анализа. События с ОСШ > 3 дБ, зарегистрированные DAS T8 "Дунай".

Табл. 1. Выбранные для анализа землетрясения. Данные о землетрясениях по каталогу USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>)

№ п/п	Дата, гggг.мм.дд	Время UTC, чч:мин:с с.с	Магнитуда	Координаты, град.		Глубина, км	Эпицентральное расстояние, км	Обратный азимут, град	Идентификатор USGS
				широта	долгота				
1	2023-01-18	06:06:11.4	7.0	2.73	127.02	29.70	9347	91.78	us7000j553
2	2023-01-18	10:08:14.1	5.7	38.43	44.95	19.10	619	161.22	us7000j56z
3	2023-01-20	22:09:39.0	6.4	-26.75	-63.08	596.80	13236	259.80	us7000j5x2
4	2023-	12:37:0	6.0	35.71	28.50	29.60	1503	238.43	us6000jj5k

	01-25	5.1							
5	2023-01-28	18:14:4 5.8	5.6	38.42	44.91	16.00	620	161.54	us6000jk0t
6	2023-01-29	23:49:3 8.2	5.8	40.02	82.37	28.00	3289	83.30	us6000jk82
7	2023-02-06	01:17:3 4.3	7.9	37.23	37.01	10.00	867	215.39	us6000jllz
8	2023-02-06	10:24:4 8.8	7.5	38.01	37.20	7.40	785	217.75	us6000jlqa
9	2023-02-06	12:02:1 1.2	6.0	38.06	36.51	8.50	816	221.47	us6000jlrc
10	2023-02-06	15:14:3 4.4	4.9	37.88	37.74	10.00	771	214.22	us6000jlsq
11	2023-02-06	21:57:4 3.5	4.7	38.03	36.59	9.90	814	220.97	us6000jm3c
12	2023-02-07	03:13:1 2.7	5.5	37.76	37.73	10.00	783	213.76	us6000jm5e
13	2023-02-07	07:11:1 5.0	5.4	38.10	38.64	9.10	712	209.76	us6000jm6p
14	2023-02-07	10:18:1 4.5	5.3	38.02	38.57	13.00	722	209.87	us6000jm7f
15	2023-02-20	17:04:2 9.7	6.1	36.16	36.03	16.00	1014	216.18	us6000jqcn
16	2023-02-23	00:37:3 8.1	6.7	38.06	73.23	9.00	2635	93.29	us6000jqxc
17	2023-02-27	09:04:5 1.8	5.2	38.21	38.28	10.00	715	212.50	us6000jrw4
18	2023-03-04	06:41:2 3.1	6.9	- 29.50	- 178.8 0	211.0 0	16040	80.34	us7000jh99

Для каждого из выбранных событий получены данные о магнитуде по каталогу USGS, а также рассчитаны эпицентральные расстояния и обратные азимуты, горизонтальные углы между направлением на север и направлением от места расположения чувствительного элемента DAS «Дунай» на источник сейсмических волн.

С целью выявления зависимостей ОСШ от параметров записей событий построена линейная регрессионная модель и рассчитаны соответствующие коэффициенты корреляции Пирсона (рис.4).

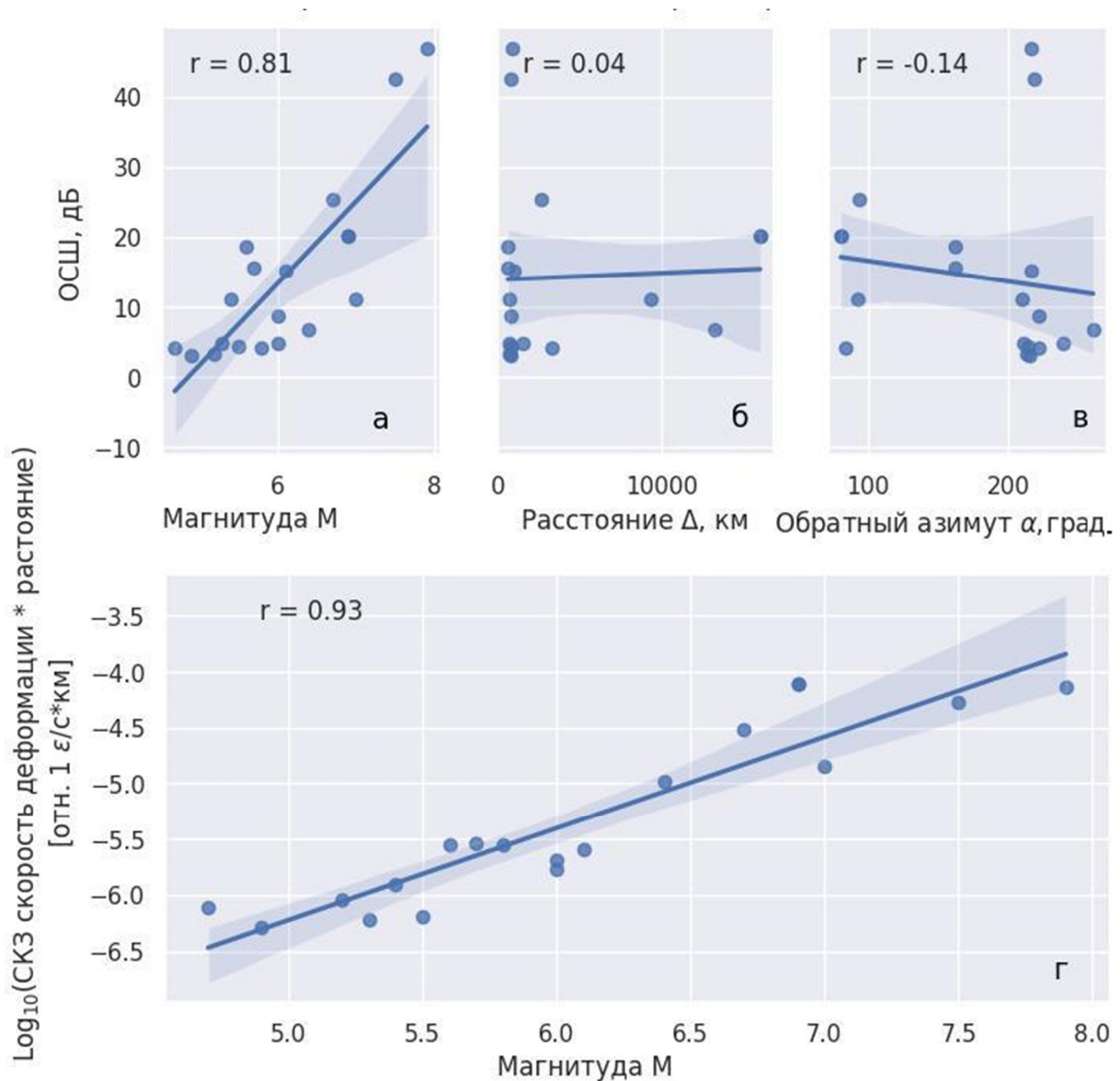


Рис.4. Регрессионные модели характеристик исследуемых событий, зарегистрированных системой "Дунай". Отношение сигнал/шум в зависимости от: а - магнитуды M ; б - эпицентрального расстояния Δ ; в - обратного азимута α . г - зависимость логарифма произведения среднеквадратичного значения амплитуды сигнала (стрейн в сек) и эпицентрального расстояния от магнитуды события.

Из приведенных графиков видно, что значительную положительную корреляцию имеет логарифм произведения СКЗ сигнала и эпицентрального расстояния от магнитуды события, что согласуется с оценкой ожидаемой спектральной амплитуды объемной волны в том диапазоне частот, где спектральная амплитуда сигнала от

землетрясения с магнитудой M превышает спектральные характеристики шума DAS [Никитин и др., 2023а]. Для оценки влияния на ОСШ расстояния и обратного азимута получить контрастных результатов пока не удалось. Одним из факторов, не учтенных в анализе является то, что системы DAS имеют сложную зависимость диаграммы направленности для различных типов волн, а также от угла между направлением линейного сегмента волокна и направлением прихода сейсмической волны. Кроме того, температурные флуктуации вносят значительную погрешность в низкочастотном сейсмическом диапазоне [Никитин и др., 2023б]. Отдельного внимания заслуживает методика оценки качества данных. Здесь имеется в виду, прежде всего, статистическая стабильность поведения сигналов на выходе отдельных каналов с точки зрения отсутствия значительных выбросов фонового шума и заметных низкочастотных трендов. Не надо забывать, что каждый канал DAS – это участок оптоволоконного кабеля, погруженного в верхний слой грунта на поверхности и существенную роль играет эффективность передачи деформации среды непосредственно на волокно. Исследование этого вопроса представляет очевидный интерес, но выходит за рамки данной статьи. В дальнейшем анализе планируется учитывать эти факторы.

Обсуждение

Предварительный анализ результатов участия ООО Т8 Сенсор в международном эксперименте по регистрации удалённых землетрясений свидетельствует о возможностях увязать амплитуду в окне сигнала с величиной деформации для магнитуды M с поправкой на эпицентральное расстояние. Это обнадеживает с точки зрения привлечения оптоволоконной технологии для решения традиционных задач сейсмического мониторинга. Открывается перспектива применения, как линейных, так и иных геометрических конфигураций волокна, (хотя этот вопрос в данной работе не рассматривался) на земной поверхности для оперативного развертывания сейсмической антенны или группы и, таким образом, получения дополнительной информации о пространственных характеристиках сейсмического (деформационного) волнового поля. Отметим, что волокно является пассивным сейсмическим датчиком и реализация такого многоканального сбора сейсмической информации не требует дорогостоящих решений по организации электропитания отдельных каналов, их синхронизации между собой и цифровой телеметрии в точку сбора. Разработка методик оперативного развёртывания таких систем, например, в зонах регистрации афтершоковой активности вполне возможно может создать серьёзную конкуренцию традиционным методам наблюдений.

Заключение

Сейчас системы DAS, принадлежащие научным организациям, применяются в самых разных исследовательских проектах по всему миру. Кроме того, системы DAS используются для коммерческих целей, например, при разведке и добыче полезных ископаемых, для мониторинга протяженных объектов, таких как железные дороги, трубопроводы, линии энергопередачи и связи. Эти данные тоже могут быть использованы мировым научным сообществом. Международный эксперимент GLOBAL DAS MONTH положил начало исследованиям, разработкам и сотрудничеству

в сфере DAS. Он показал перспективность использования этой новой технологии для исследований сейсмичности и волновых форм сигналов на телесеismicких расстояниях.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

Литература

Дунай – распределенный акустический сенсор [электронный ресурс]. URL: <https://t8-sensor.ru/> (дата обращения 27.12.2023)

Кислов К.В., Гравиров В.В. Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58, № 2. С. 5-38. <https://doi.org/10.21455/si2022.2-1>

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

Никитин С.П., Спиридонов Е.П., Кислов К.В., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Харасов Д.Р., Фомиряков Э.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Экспериментальные результаты регистрации землетрясений с помощью когерентных рэлеевских рефлектометров // ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА. 2023б. №6(190) Спецвыпуск «ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА 2023». С. 282-283. www.fotonexpres.ru

Спиридонов Е.П., Старовойт Ю.О., Бенгальский Д.М., Трещиков В.Н., Никитин С.П., Наний О.Е., Кислов К.В. Предварительные результаты анализа сигналов, зарегистрированных распределенным акустическим сенсором в рамках международного эксперимента Global DAS Month / III Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений». 25-26 октября 2023 г. ИТПЗ РАН, Москва

Becker M.W., Ciervo C., Coleman T. Laboratory testing of low frequency strain measured by distributed acoustic sensing / SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2018. P. 4963–4966. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2997900.1>

Celli N.L., Bean C.J., O'Brien G., Nooshiri N. Modelling of DAS cable and ground coupling response using Discrete Particle Schemes / EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23-14444. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14444>

Gaudot I., Leroy M., Bitri A., Bretaudeau F. Comparison of DAS surface waves records at geotechnical scales using telecom fiber optic with different cable and ground coupling / EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23-1884. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1884>

Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. V. 22(3). 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>

Jiang K, Liang L, Tong X, Zeng F, Hu X. How the Material Characteristics of Optical

Fibers and Soil Influence the Measurement Results of Distributed Acoustic Sensing // *Sensors*. 2023. V. 23(17). 7340. <https://doi.org/10.3390/s23177340>

Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., Hersir G.P., Henniges J., Weber M., Krawczyk C.M. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features // *Nature communications*. 2018. V. 9. 2509. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y>

Jousset P., Wuestefeld A., Krawczyk C., Wollin C., Diaz S., Ehsaninezhad L., Tribaldos V.R., Hart J., Baird A., Oye V., Currenti G., Prestifilippo M., Napoli R., Landrø M., Rørstadbotnen R.A., Nowacki A., de Ridder S., Booth A., Spica Z., Barajas S.R., Gaite B., Lindner F., Konca Ö.A., Edme P., Fichtner A., Bowden D., Rinaldi A.P., Shaikhsulaiman A., Lai V.H., Miller M., Treshchikov V., Nikitin S., Urmantseva L., Zapf D., Morten J.P., Lienhart W., Strasser L., Dumitru V., Lipovsky B.P., Schoenball M., Wetter C., Ma K.-F., Global Distributed Fibre Optic Sensing recordings of the February 2023 Turkey earthquake sequence / EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17618, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17618>

Kennett B.L.N., Engdahl E. R. Travel times for global earthquake location and phase identification // *Geophysical Journal International*. 1991. V. 105(2). P. 429-465. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x>

Lindsey N.J., Rademacher H., Ajo-Franklin J.B. On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2020. V. 125(2). e2019JB018145. <https://doi.org/10.1029/2019JB018145>

Lior I., Sladen A., Mercerat D., Ampuero J.-P., Rivet D., Sambolian S. Strain to ground motion conversion of distributed acoustic sensing data for earthquake magnitude and stress drop determination // *Solid Earth*. 2021. V. 12. P. 1421–1442. <https://doi.org/10.5194/se-12-1421-2021>

Paitz P., Edme P., Schmelzbach C., Doetsch J., Gräff D., Walter F., Lindsey N., Chalari A., Fichtner A. Distributed Acoustic Sensing from mHz to kHz: Empirical Investigations of DAS Instrument Response / EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7343, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7343>

Rossi M., Wisén R., Vignoli G., Coni M. Assessment of Distributed Acoustic Sensing (DAS) performance for geotechnical applications // *Engineering Geology*. 2022 V. 306. 106729. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106729>

van den Ende M.P.A., Ampuero J.-P. Evaluating seismic beamforming capabilities of distributed acoustic sensing arrays // *Solid Earth*. 2021. V. 12. P. 915–934. <https://doi.org/10.5194/se-12-915-2021>

Wüstefeld A. Global DAS monitoring month. <https://www.norsar.no/in-focus/global-das-monitoring-month-february-2023>. Последний просмотр 21.04.2023.

Wuestefeld A., Spica Z.J., Aderhold K., Huang H.-H., Ma K.-F., Lai V.H., Miller M., Urmantseva L., Zapf D., Bowden D.C., Edme P., Kiers T., Rinaldi A.P., Tuinstra K., Jestin C., Diaz-Meza S., Jousset P., Wollin C., Ugalde A., Barajas S.R., Gaite B., Currenti G., Prestifilippo M., Araki E., Tonegawa T., de Ridder S., Nowacki A., Lindner F., Schoenball M., Wetter C., Zhu H.-H., Baird A.F., Rørstadbotnen R.A., Ajo-Franklin J., Ma Y., Abbott R.E., Hodgkinson K.M., Porritt R.W., Stanciu C., Podrasky A., Hill D., Biondi B., Yuan S., Luo B., Nikitin S., Morten J.P., Dumitru V.-A., Lienhart W., Cunningham E., Wang H. The Global DAS Month of February 2023 // *Seismological Research Letters*. 2023. doi: <https://doi.org/10.1785/0220230180>

Zhang C.-C., Shi B., Zhu H.-H., Wang B.-J., Wei G.-Q. Toward distributed fiber-optic sensing of subsurface deformation: A theoretical quantification of ground-borehole- cable interaction // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2020. V. 125(3). e2019JB018878. <https://doi.org/10.1029/2019JB018878>

Сведения об авторах

СПИРИДОНОВ Егор Павлович - ведущий специалист по цифровой обработке сигналов ООО «Т8», 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1.

НАНИЙ Олег Евгеньевич - доктор физико-математических наук, профессор, начальник научного отдела ООО «Т8», 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1; профессор, Физический факультет. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ имени М.В.Ломоносова, Дом 1, строение 2, Физический Факультет.

НИКИТИН Сергей Петрович – к.ф.-м.н., руководитель научной группы ООО «Т8», 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1; Генеральный директор ООО “Фемтовижн”, 143026, Московская обл., г. Одинцово, д. Сколково, ул. Новая, д. 100.

КИСЛОВ Константин Викторович – к.ф.-м.н. с.н.с., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук (ИТПЗ РАН), 117997, Москва, улица Профсоюзная, 84/32. E-mail: kvkislov@yandex.ru

СТАРОВОЙТ Юрий Олегович - к.ф.-м.н., Научный консультант, ООО «Т8», 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1.

БЕНГАЛЬСКИЙ Данил Михайлович - инженер-исследователь 3 категории ООО «Т8», 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1.

ТРЕЩИКОВ Владимир Николаевич - генеральный директор компании ООО "Т8", 107076, Москва, Краснобогатырская 44/1.

METADATA IN ENGLISH

THE GLOBAL DAS MONTH: PRELIMINARY RESULTS OF THE DATA ANALYSIS

E.P. Spiridonov¹, S.P. Nikitin^{1,2}, K.V. Kislov³, Yu.O. Starovoi¹, D.M. Bengalskii¹,
O.E. Nani^{1,4}, V.N. Treshchikov¹

¹ ООО Т8, Moscow, Russia

² ООО Femtovision, Moscow, Russia

³ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences (ITPZ RAS), Moscow, Russia

⁴ Moscow State University, Department of Physics, Moscow, 119991 Russia
, Country

Corresponding author: K.V. Kislov, e-mail: kvkislov@yandex.ru

Abstract. In February 2023, the international experiment GLOBAL DAS MONTH was carried. A unique data set of more than 156 events with $M \geq 5$ was collected by participants and recorded by different DAS systems deployed worldwide. The purpose of the experiments was to evaluate the feasibility of the global DAS system for teleseismic monitoring and to identify any bottlenecks that may arise. The article presents preliminary results of data analysis obtained by T8 Sensor LLC, a Russian participant in the experiment. Some metrological characteristics of the applied observation system had been evaluated. The conducted study allows to compare DAS system with world analogues in the area of seismic monitoring and to map out a plan for the future works.

Keywords: Hardware-Software system “Dunay”; distributed acoustic sensing (DAS); Global DAS Month; February 2023 earthquakes in Turkey; signal quality assessment; first arrivals picking

Funding: The work was carried out according to the scientific work plan of T8 Sensor LLC and within the state tasks of the Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences.

References

- Becker M.W., Ciervo C., Coleman T. Laboratory testing of low frequency strain measured by distributed acoustic sensing / SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2018. P. 4963–4966. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2997900.1>
- Celli N.L., Bean C.J., O'Brien G., Nooshiri N. Modelling of DAS cable and ground coupling response using Discrete Particle Schemes / EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23-14444. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-14444>
- Dunay. Distributed acoustic sensor. Retrieved December 27, 2023, from <https://t8-sensor.ru/>
- Gaudot I., Leroy M., Bitri A., Bretaudeau F. Comparison of DAS surface waves records at geotechnical scales using telecom fiber optic with different cable and ground coupling / EGU General Assembly 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23-1884. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1884>
- Gorshkov B.G., Yüksel K., Fotiadi A.A., Wuilpart M., Korobko D.A., Zhirnov A.A., Stepanov K.V., Turov A.T., Konstantinov Y.A., Lobach I.A. Scientific Applications of Distributed Acoustic Sensing: State-of-the-Art Review and Perspective // Sensors. 2022. V. 22(3). 1033. <https://doi.org/10.3390/s22031033>
- Jiang K, Liang L, Tong X, Zeng F, Hu X. How the Material Characteristics of Optical Fibers and Soil Influence the Measurement Results of Distributed Acoustic Sensing

// *Sensors*. 2023. V. 23(17). 7340. <https://doi.org/10.3390/s23177340>

Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., Hersir G.P., Hennings J., Weber M., Krawczyk C.M. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features // *Nature communications*. 2018. V. 9. 2509. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y>

Jousset P., Wuestefeld A., Krawczyk C., Wollin C., Diaz S., Ehsaninezhad L., Tribaldos V.R., Hart J., Baird A., Oye V., Currenti G., Prestifilippo M., Napoli R., Landrø M., Rørstadbotnen R.A., Nowacki A., de Ridder S., Booth A., Spica Z., Barajas S.R., Gaite B., Lindner F., Konca Ö.A., Edme P., Fichtner A., Bowden D., Rinaldi A.P., Shaikhsulaiman A., Lai V.H., Miller M., Treshchikov V., Nikitin S., Urmantseva L., Zapf D., Morten J.P., Lienhart W., Strasser L., Dumitru V., Lipovsky B.P., Schoenball M., Wetter C., Ma K.-F., Global Distributed Fibre Optic Sensing recordings of the February 2023 Turkey earthquake sequence / EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-17618, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-17618>

Kennett B.L.N., Engdahl E. R. (), Travel times for global earthquake location and phase identification // *Geophysical Journal International*. 1991. V. 105(2). P. 429-465. <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x>

Kislov K.V., Gravirov V.V. Distributed acoustic sensing: a new tool or a new paradigm // *Seismic Instruments*. 2022. V. 58(5). P. 485–508. DOI: 10.3103/S0747923922050085

Lindsey N.J., Rademacher H., Ajo-Franklin J.B. On the broadband instrument response of fiber-optic DAS arrays // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2020. V. 125(2). e2019JB018145. <https://doi.org/10.1029/2019JB018145>

Lior I., Sladen A., Mercerat D., Ampuero J.-P., Rivet D., Sambolian S. Strain to ground motion conversion of distributed acoustic sensing data for earthquake magnitude and stress drop determination // *Solid Earth*. 2021. V. 12. P. 1421–1442. <https://doi.org/10.5194/se-12-1421-2021>

Nikitin S.P., Kislov K.V., Starovoi Yu.O., Bengalskii D.M., Spiridonov E.P., Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Possibilities and Prospects for the Use of Distributed Fiber Sensors in Geophysics // *Instrum Exp Tech*. 2023. V. 66. P. 854–859. <https://doi.org/10.1134/S0020441223050196>

Nikitin S.P., Spiridonov E.P., Kislov K.V., Starovoi Yu.O., Bengalskii D.M., Kharasov D.R., Fomiryakov E.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N. Experimental results of recording earthquakes by coherent Rayleigh reflectometers // *PHOTON-EXPRESS-SCIENCE*. 2023b. No. 6(190) Special issue “PHOTON-EXPRESS-SCIENCE 2023”. pp. 282-283. (in Russian)

Paitz P., Edme P., Schmelzbach C., Doetsch J., Gräff D., Walter F., Lindsey N., Chalari A., Fichtner A. Distributed Acoustic Sensing from mHz to kHz: Empirical Investigations of DAS Instrument Response / EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-7343, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-7343>

Rossi M., Wisén R., Vignoli G., Coni M. Assessment of Distributed Acoustic Sensing (DAS) performance for geotechnical applications // *Engineering Geology*. 2022 V. 306. 106729. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106729>

Spiridonov E.P., Starovoi Yu.O., Bengalskii D.M., Treshchikov V.N., Nikitin S.P., Nanii O.E., Kislov K.V. Preliminary results of the analysis of signals recorded by a distributed acoustic sensor as part of an international experiment Global DAS Month / III All-

Russian Scientific Conference with International Participation “Modern methods of seismic hazard assessment and earthquake prediction” October 25-26, 2023 ITPZ RAS, Moscow.

van den Ende M.P.A., Ampuero J.-P. Evaluating seismic beamforming capabilities of distributed acoustic sensing arrays // *Solid Earth*. 2021. V. 12. P. 915–934. <https://doi.org/10.5194/se-12-915-2021>

Wüstefeld A. Global DAS monitoring month. Retrieved December 27, 2023, from <https://www.norsar.no/in-focus/global-das-monitoring-month-february-2023>.

Wuestefeld A., Spica Z.J., Aderhold K., Huang H.-H., Ma K.-F., Lai V.H., Miller M., Urmantseva L., Zapf D., Bowden D.C., Edme P., Kiers T., Rinaldi A.P., Tuinstra K., Jestin C., Diaz-Meza S., Jousset P., Wollin C., Ugalde A., Barajas S.R., Gaite B., Currenti G., Prestifilippo M., Araki E., Tonegawa T., de Ridder S., Nowacki A., Lindner F., Schoenball M., Wetter C., Zhu H.-H., Baird A.F., Rørstadbotnen R.A., Ajo-Franklin J., Ma Y., Abbott R.E., Hodgkinson K.M., Porritt R.W., Stanciu C., Podrasky A., Hill D., Biondi B., Yuan S., Luo B., Nikitin S., Morten J.P., Dumitru V.-A., Lienhart W., Cunningham E., Wang H. The Global DAS Month of February 2023 // *Seismological Research Letters*. 2023. doi: <https://doi.org/10.1785/0220230180>

Zhang C.-C., Shi B., Zhu H.-H., Wang B.-J., Wei G.-Q. Toward distributed fiber-optic sensing of subsurface deformation: A theoretical quantification of ground-borehole- cable interaction // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2020. V. 125(3). e2019JB018878. <https://doi.org/10.1029/2019JB018878>

About the authors

SPIRIDONOV Egor Pavlovich - leading specialist in digital signal processing at T8 LLC, 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1.

NANII Oleg Evgenievich - Dr. Sci. in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Scientific Department of T8 LLC, 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1; Professor, Faculty of Physics. Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Moscow, Lenin Hills, Lomonosov Moscow State University, 1 - 2, Faculty of Physics.

NIKITIN Sergey Petrovich – Ph.D., Head of the scientific group of T8 LLC, 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1; General Director of Femtovision LLC, 143026, Moscow region, Odintsovo, Skolkovo, st. Novaya, 100.

KISLOV Konstantin Viktorovich – Ph.D. Higher Scientific Officer, Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics Russian academy of sciences (IEPT RAS), 117997, Russia, Moscow, Profsoyuznaya str., 84/32. E-mail: kvkislov@yandex.ru

STAROVOIT Yuri Olegovich - Ph.D., Consultant, LLC "T8", 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1.

BENGALSKII Danil Mikhailovich - research engineer of the 3rd category of T8 LLC, 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1.

TRESHIKOV Vladimir Nikolaevich - CEO LLC T8, 107076, Moscow, Krasnobogatyrskaya 44/1.