

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОГЕРЕНТНЫХ РЭЛЕЕВСКИХ РЕФЛЕКТОМЕТРОВ

Никитин С.П.^{1,4*}, **Спиридонов Е.П.**¹, **Кислов К.В.**², **Старовойт Ю.О.**¹,
Бенгальский Д.М.¹, **Харасов Д.Р.**¹, **Фомиряков Э.А.**¹, **Наний О.Е.**^{1,3},
Трещиков В.Н.¹

¹ ООО "Т8", г. Москва

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

³ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва

⁴ ООО "ФемтоВижн", г. Москва

*E-mail: nikitin@t8.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-282-283

В настоящее время большое внимание уделяется возможностям использования распределённых акустических сенсоров (Distributed Acoustic Sensors, "DAS"), использующих оптическое волокно в качестве чувствительного элемента, в широком диапазоне геофизических и сейсмических применений. Для этого обычно используются вибро-акустические волоконные датчики на основе фазочувствительной когерентной рефлектометрии рассеяния Рэля (Ф-OTDR). По сравнению с обычными сейсмодатчиками, DAS отличается простотой развёртывания как на суше, так и на дне водоёмов, нечувствительностью к электромагнитным помехам, высокой естественной точностью синхронизации сигналов при большом объёме данных, получаемых с волоконных линий протяженностью до нескольких десятков километров. К недостаткам DAS можно отнести сложность абсолютной калибровки регистрируемых сигналов, трудности с реализацией 3-х компонентного приёма и снижение чувствительности датчика на высоких частотах вследствие усреднения сигналов на базе измерения [1].

Для изучения возможностей DAS в области телесеизмометрии в период с 1 по 28 февраля 2023 г. был проведён международный эксперимент "Global DAS month", в ходе которого регистрировались сигналы DAS в течение ~60 мин. после всех землетрясений на Земле с магнитудой $M \geq 5$. Кроме того, в случайно выбранную организаторами дату 14 февраля 2023 г. все участники эксперимента осуществляли 24-часовую запись. В эксперименте использовались несколько десятков систем DAS различных изготовителей, размещённых в самых разнообразных географических условиях.

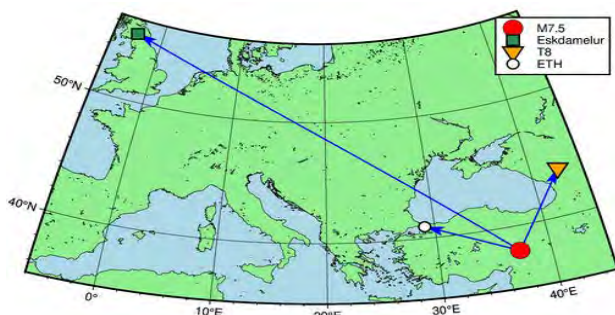


Рис.1 Эпицентр землетрясения с $M=7.5$ в Турции и расположения некоторых из систем DAS

В данном эксперименте принимала участие компания «Т8 Сенсор» с использованием программно-аппаратного комплекса «Дунай» собственного производства, подключённого к изолированному одномодовому волокну длиной ~750 м, используемого в Кавказской Горной Обсерватории ГАИШ МГУ, в районе г. Кисловодск. Данные, собранные участниками эксперимента доступны на сайте www.globus.org в директории DAS-Month-02.2023/ [2]. В ходе эксперимента произошло более 150 землетрясений с $M \geq 5$, в том числе 6 февраля 2023 года на юго-востоке Турции вблизи г. Кахраманмараш произошли два мощных землетрясения с магнитудами 7,8 и 7,5, повлёкшие катастрофические последствия. Сейсмические волны от этих землетрясений были зарегистрированы системами DAS, расположенных на нескольких континентах [3].

На Рис.1 изображена карта, где красным кружком отмечен эпицентр землетрясения с $M = 7,5$ в Турции ($38,0155^{\circ}$ с.ш. $37,2056^{\circ}$ в.д.), произошедшее 6 февраля в 13:24:50 (MSK), а также расположения некоторых систем DAS: белый кружок – г. Стамбул, Турция (772 км от эпицентра, $40,96^{\circ}$ с.ш., $29,07^{\circ}$ в.д., оборудование: Silixa iDAS, оператор Высшая Техническая школа Цюриха, Швейцария), оранжевый треугольник – обсерватория ГАИШ вблизи г. Кисловодск, РФ (~784 км от эпицентра, $43,74^{\circ}$ с.ш., $42,66^{\circ}$ в.д., оборудование: DAS T8 «Дунай», оператор ООО Т8 / ГАИШ, МГУ, РФ) и зеленый квадрат - окрестность г. Эскдейлмьюир, Шотландия (~3565 км от эпицентра, $55,33^{\circ}$ с.ш. $3,15^{\circ}$ з.д., оборудование: DAS Febus A1-R, оператор Унив. Лидса, Великобритания). На Рис.2(а) показаны сигналы, зарегистрированные указанными системами DAS сразу после землетрясения. На Рис 2 (б) показаны амплитудные спектры, полученные обработкой записей сигналов

продолжительностью 24 часов, записанных 14 февраля 2023 г в Кисловодске и Эскдейльмюире, и 15 февраля в Стамбуле. При этом 14 февраля произошли три землетрясения с магнитудой $M \geq 5$, наиболее крупное из них – в Румынии с $M = 5,6$; в то время как 15 февраля произошло десять землетрясений с магнитудой $M \geq 5$, причем ближайшее к Стамбулу имело эпицентр в районе Срединно-Атлантического хребта и магнитуду $M = 5,3$, а наиболее крупное с магнитудой $M = 6,1$ произошло на Филиппинах.

Из приведённых данных видно, что волоконно-оптические системы DAS уверенно регистрируют сильные землетрясения ($M > 7$) на расстояниях в несколько тысяч километров. Уровень собственных шумов DAS в области высоких частот (> 10 Гц) обычно составляет несколько пикострейн/Гц^{1/2}, что соответствует анализу шумов Ф-OTDR, проведённому ранее [4, 5].

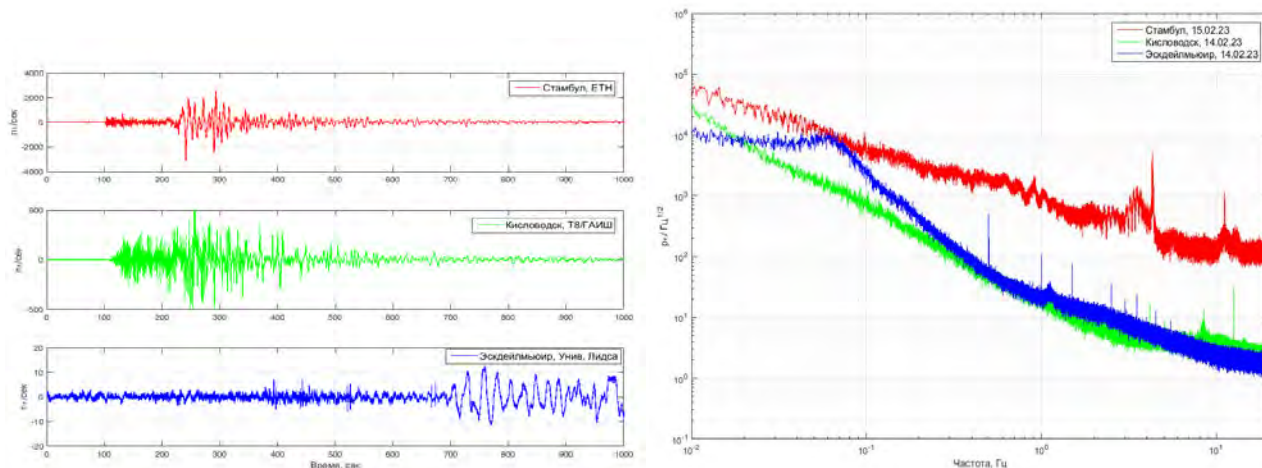


Рис. 2. Сигналы DAS, зарегистрированные после землетрясения в Турции 06.02.2023 на единой временной шкале, где $T = 0$ соответствует началу землетрясения в 13:24:50 МСК. Красная кривая – Стамбул; зелёная – Кисловодск; синяя – Эскдейльмюир (а). Амплитудные спектры сигналов продолжительностью 24 часа, записанные в этих же местах, 14 февраля в Кисловодске и Эскдейльмюире и 15 февраля в Стамбуле (б)

В случае с iDAS Silixa, расположенного в черте города Стамбул, уровень шума на высоких частотах существенно выше этого значения и, вероятно, соответствует фоновому шуму города. Во всех трёх случаях наблюдается фликкер-шум на частотах менее 10 Гц. Такое поведение спектра может быть вызвано частотным шумом зондирующего лазера [6], что можно компенсировать техническими методами [7] либо дрейфом температуры зондируемого волокна [8]. Поскольку при распространении сейсмических волн высокие частоты быстро затухают, основной интерес для телесеизмометрии представляет диапазон частот < 10 Гц и поиск методов подавления фликкер-шумов в этом диапазоне является важной задачей. Одним из эффективных способов подавления фликкер-шумов является использование волокон с массивом искусственных рефлекторов (МИР-волокна) [4, 9]. Другим подходом к решению этой задачи является непрерывный мониторинг температуры волоконной линии с последующей пост-обработкой фазового сигнала рефлектометра.

Авторы выражают благодарность коллегам из ГАИШ (МГУ им. Ломоносова), предоставившим волоконную линию, место для размещения оборудования и обеспечившим его техническое обслуживание во время эксперимента «Global DAS month-2023».

Литература

1. “Distributed acoustic sensing in geophysics: Methods and applications. Vol. 268.”; Ed. Yingping L., Karrenbach M., and Ajo-Franklin J., Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2022
2. Spica, Zack J., et al. *Seismological Society of America* **94.2A** (2023): 983-998
3. Jousset P., et al, *Copernicus Meetings. EGU23-17618* (2023)
4. Fomiryakov E.A., et al., *Optoelectron. Instrument. Proc.* **59**, 77–99 (2023)
5. Gorshkov B.G., et al, *Sensors* **23**, 5402-11 (2023)
6. Fomiryakov E., et al *Journal of Lightwave Technology*, **39**, 5191-5196 (2021)
7. Gorshkov B.G., et al, *Appl. Opt.* **61**, 8308-8316 (2022)
8. Никитин С.П. и др., *Приборы и техника эксперимента*, **5**, (2023), в печати
9. Shatalin S., Parker T. and Farhadiroushan M. in “Distributed acoustic sensing in geophysics: Methods and applications” (2021): 1-32. Hoboken, NJ: Wiley