

## **Применение технологии распределенного акустического зондирования в задачах вулканологии**

**Гравиров В.В.<sup>1,2</sup>, Кислов К.В.<sup>2</sup>**

**Application of distributed acoustic sensing technology in volcanology issues**

**Gravirov V.V., Kislov K.V.**

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва;*

*e-mail: gravirov@mail.ru*

<sup>2</sup> *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

Распределенное акустическое зондирование (DAS) базируется на использовании Рэлеевского рассеяния в волоконно-оптических кабелях для получения данных о деформациях, распределенных по длине кабеля. В DAS кабель одновременно является чувствительным элементом и линией передачи данных. Сегодня DAS активно применяется в вулканологии, геофизике и т.д. Однако, несмотря на существенные достоинства, у DAS также имеются недостатки, которые необходимо учитывать.

### **Введение**

Использование волоконно-оптических распределенных датчиков является новым многообещающим подходом в геофизике, сейсмологии, а также в вулканологии. По сравнению с сейсмической сетью, основанной на традиционных сейсмических приборах, использование распределенных акустических датчиков (Distributed Acoustic Sensing – DAS) имеет ряд преимуществ [2]. Во-первых, это возможность получения более высокого пространственного разрешения. В сейсмических сетях датчики расположены с разнесением в десятки и сотни километров. В то же время, в сейсмологических приложениях DAS виртуальные датчики (каналы) могут иметь пространственное разделение в доли метра. При этом длина линии наблюдения (длина оптического волокна, которое и является собственно чувствительным элементом) составляет десятки километров. В зависимости от задачи, дискретность датчиков и длина датчика (которую можно ассоциировать с базой деформографа) могут быть изменены с использованием одного и того же оборудования [1]. Кабельные линии, на которых основываются DAS, обычно не строго линейны, а имеют изгибы и даже петли. Специально проложенные для целей DAS кабели, тем более, чаще всего предполагают угловую, спиральную, змеевидную или другую выбранную геометрию. Это позволяет превратить систему DAS в сейсмическую антенну. Стратегия сбора данных позволяет гибко изменять конфигурацию параметров в интеррогаторе. Это, в свою очередь, приводит к другой функции пространственного отклика антенны и определяет диапазон волновых чисел обнаруживаемого сейсмического сигнала. Во-вторых, возможность использовать существующие телекоммуникационные волоконно-оптические сети позволяет осуществлять быстрое развертывание с минимальным использованием нового оборудования. В кабелях связи всегда конструктивно заложены так называемые «темные волокна», предназначенные для расширения объема коммуникаций и замены вышедших из строя. Использование этих темных волокон никоим образом не влияет на функционирование кабеля по его прямому назначению. Принципиально возможно использовать DAS на рабочих «не темных» волокнах. Отметим, что для DAS можно использовать старые заброшенные и даже оборванные кабели; главное, чтобы отрезок нужной длины с самого начала был цел. Это позволяет проводить исследования в мегаполисах [10], на морском дне [7] и в сейсмически неактивных регионах, которые обычно имеют очень разреженную сейсмическую сеть [14]. В-третьих, нет проблем с синхронизацией между каналами и нет необходимости в отдельных источниках питания и обслуживании виртуальных датчиков. Низкая стоимость и широкая доступность материалов также являются преимуществами.

Конечно, использование DAS в геофизических приложениях, а тем более введение в практику рутинных измерений потребует определенных усилий. Как у всякой технологии, у DAS тоже есть слабые стороны. Измерительная система может быть реализована на кабеле (участке кабеля) только ограниченной длины, т.е. не может, например, использовать всю длину трансокеанских линий связи. DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволокна, то есть состоит из набора однокомпонентных виртуальных датчиков (каналов). Поскольку кабели обычно не проходят по прямой линии, направление оси чувствительности от одного виртуального датчика к другому меняется. Каналы имеют более высокий уровень шума, чем обычные широкополосные сейсмометры, может иметь место замирание сигнала. К тому же коммуникационные кабели обычно проложены по шумным местам. Связь между волокном и землей разная по длине кабеля, таким образом, передаточная функция у разных участков кабеля разная. Расположение и ориентация каналов трудноопределимы, особенно на ранее проложенных кабелях.

Однако вышеперечисленные и другие препятствия, встающие перед геофизиками, использующими DAS, постепенно преодолеваются: разрабатывается новое оборудование (интеррогаторы и новые виды специальных оптических волокон и кабелей), методики работ и обработки данных [1].

### **Применение DAS в вулканологии**

Использование технологии распределенного акустического зондирования может быть особенно полезным для вулканологов благодаря ее высокому временному и пространственному разрешению, что помогает решить проблемы развертывания и обслуживания сейсмических групп на вулканах. DAS позволяет наблюдать деформацию в пространственном интервале метрового масштаба и в широком диапазоне частот. При этом многие задачи вулканологии могут быть решены в терминах деформации, без преобразования данных DAS в перемещение, скорость или ускорение. Магматические структуры способны генерировать вторичные сейсмические волны на собственных частотах. Резонансные моды определяют размер и свойства внутренней структуры и уникальны для каждого магматического объекта. Данные о деформациях могут быть использованы для выявления резонансных мод и оценки параметров магматических структур [6].

Для вулканических систем характерно возникновение множества явлений, таких как потоки лавы, пепловые извержения, землетрясения. Чтобы научиться качественно прогнозировать эруптивные процессы, необходимо отслеживать динамику магматических процессов. В настоящее время с помощью традиционных сейсмометров осуществлять плотные продолжительные (а лучше, постоянные) сейсмологические наблюдения не представляется возможным [15]. Использование от нескольких десятков до сотни сейсмометров требует больших усилий для развертывания и частого обслуживания системы. Например, в [3] шаг съемки составил всего 500 м, а время регистрации в каждой точке было около трех часов. DAS дает возможность проводить постоянные сейсмические исследования с высоким разрешением для комплексного видения глубинных процессов и четкого определения строения и динамики магматической питающей системы вулканов. Одновременные измерения по нескольким волокнам могут дополнительно помочь ограничить местоположения гипоцентров событий. Например, в [12] при исследованиях вулкана Этна задействованы проложенный в скважине на южном склоне вулкана специальный кабель, оптические телекоммуникационные кабели, проложенные в населенных пунктах, и подводный кабель, соединяющий остров Вулкано с Сицилией.

Исследования на вулкане Адзума (Япония) проводились с помощью специально проложенного, заглубленного на 50 см, кабеля, который, как указано в [13], не повреждается вулканическим пеплом и бомбами во время извержений.

Пространственно-временные изменения местоположения источников используются для прогнозирования мест новых извержений и мониторинга вулканической активности. Применялись два метода: определение разницы первых вступлений (развернутый вдоль извилистой дороги волоконно-оптический кабель действовал как L-образный массив) и метод локации источника по максимальным амплитудам сейсмических волн. При этом учитывались разницы между направлениями участков волоконно-оптического кабеля и направлением колебаний в сейсмической волне. Непрерывно регистрировались динамические сигналы деформации в направлении вдоль кабеля с частотой дискретизации 200 Гц, с интервалом между каналами 10.2 м и измерительной длиной GL 40.8 м.

В [5] описано получение характеристики вулканического толчка во время извержения Тайогаита (Tajogaite) с 19 сентября по 13 декабря 2021 г. (Ла-Пальма, Канарские острова, Испания). Система DAS была установлена в октябре 2021 г. примерно в 10 км от эруптивного жерла и подключена к подводному оптоволоконному кабелю, направленному к острову Тенерифе. DAS работает в режиме реального времени до сих пор.

Обработка огромного объема данных, генерируемого DAS, предполагает использование машинного обучения [4]. Глубокие нейронные сети, описанные в [8], были разработаны для детектирования вулканических сейсмических событий на острове Вулкано по данным, полученным с 20-километрового телекоммуникационного подводного кабеля, соединяющего остров Вулкано с Сицилией.

### **Заключение**

Этот обзор показывает необходимость и перспективность применения DAS в решении задач вулканологии. Как и в других приложениях, наилучшие измерения можно получить, используя специально разрабатываемые для DAS кабели. Новое поколение волокон разрабатывается для повышения чувствительности и снижения уровня шума по сравнению со стандартными. Некоторый эффект можно получить, если использовать несколько волокон одного кабеля [9]. Немаловажна также специальная прокладка, обеспечивающая необходимую геометрию кабеля и качественную связь кабеля с грунтом. Конечно, это лишает DAS существенных преимуществ (быстроты и простоты развертывания системы и малой стоимости). Тем не менее, в вулканологических исследованиях довольно часто применяют специальную прокладку кабеля [11], а иногда и специальные кабели. Однако для продвижения DAS в исследовательские проекты и практику рутинных работ потребуется преодолеть, прежде всего, некоторое недоверие, с которым встречается каждая новая технология.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

### **Список литературы**

1. *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>
2. *Кислов К.В., Гравиров В.В.* Чем DAS полезен для нас / II Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений». 2021. Тезисы докладов и программа конференции. М.: ИТПЗ РАН, 2021. С. 56-58.
3. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.* Особенности глубинного строения зоны трещинных толбачинских извержений (Камчатка, Ключевская группа вулканов) по комплексу геолого-геофизических данных // Физика Земли. 2018. № 3. С. 60-83. <https://doi.org/10.7868/S0002333718030055>

4. *Allegra M., Currenti G., Cannavò F. et al.* Deep learning approach for detecting low frequency events on DAS data at Vulcano Island, Italy // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-16459. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16459>
5. *Barrancos J., D'Auria L., Garcia F.A. et al.* Characterization of the volcanic tremor during the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands) through Distributed Acoustic Sensing // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Berlin. 2023. Art. IUGG23-2766. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-2766>
6. *Biagioli F., Metaxian J.-P., Stutzmann E. et al.* Using Distributed Acoustic Sensing to Monitor and Investigate Eruptive Events at Stromboli Volcano, Italy // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-3955. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3955>
7. *Cheng F., Chi B., Lindsey N.J. et al.* Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization // Scientific Reports. 2021. V. 11. Art. 5613. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84845-y>
8. *Currenti G., Allegra M., Cannavò F. et al.* Distributed dynamic strain sensing of very long period and long period events on telecom fiber-optic cables at Vulcano, Italy // Scientific Reports. 2023. V. 13. Art. 4641. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31779-2>
9. *Diaz-Meza S., Jousset P., Currenti G. et al.* On the Comparison of Records from Standard and Engineered Fiber Optic Cables at Etna Volcano (Italy) // Sensors. 2023. V. 23. № 7. Art. 3735. <https://doi.org/10.3390/s23073735>
10. *Fang G., Li Y.E., Zhao Y., Martin E.R.* Urban near-surface seismic monitoring using distributed acoustic sensing // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Art. e2019GL086115. <https://doi.org/10.1029/2019GL086115>
11. *Grimm J., Poli P., Jousset P.* Detecting seismo-volcanic events based on inter-channel coherency of a DAS cable // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-9089. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9089>
12. *Jousset P., Currenti G., Murphy S. et al.* Distributed fiber optic sensing observations at Etna volcano, Italy: An integrated vision // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Berlin. 2023. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4747>
13. *Nishimura T., Emoto K., Nakahara H. et al.* Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system // Scientific Reports. 2021. V. 11. Art. 6319. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85621-8>
14. *Smolinski K., Paitz P., Bowden D. et al.* Urban distributed acoustic sensing using in-situ fibre beneath Bern, Switzerland // EGU General Assembly. 2020. Art. EGU2020-8225. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8225>
15. *Wassermann J., Braun T., Ripepe M. et al.* The use of 6DOF measurement in volcano seismology – A first application to Stromboli volcano // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2022. V. 424. Art. 107499. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107499>