

III Всероссийская научная конференция
с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений



25-26 октября 2023, ИТПЗ РАН, Москва

III All-Russian Scientific Conference
with International Participation

Modern Methods of Seismic Hazard Assessment and Earthquakes Prediction



25-26 October 2023, IEPT RAS, Moscow

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики
Российской академии наук

Памяти члена-корреспондента РАН А.А. Соловьева

III Всероссийская научная конференция с международным участием

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений

25-26 октября 2023 г., Москва, Россия

МАТЕРИАЛЫ ДОКЛАДОВ И ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

Под редакцией к.ф.-м.н. А.П. Кержаева, к.ф.-м.н. А.И. Филипповой

Москва
2023

Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений: материалы III Всероссийской конференции с международным участием, посвященной памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Александра Анатольевича Соловьева. 25-26 октября 2023 г. Москва: ИТПЗ РАН, 2023. – 308 с.

В сборнике публикуются материалы III Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений», которая состоялась 25-26 октября 2023 г. в Институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва. Конференция была посвящена памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Александра Анатольевича Соловьева. На конференции были представлены основные достижения в области математической геофизики, сейсмологии, геодинамики. Рассматривались методы оценки сейсмической опасности, прогноза мест возможного возникновения сильнейших сейсмических событий, алгоритмы прогноза землетрясений и методы оценки надёжности и достоверности результатов прогноза, связь геодинамики с сейсмичностью и другие вопросы из смежных областей.

Ответственные редакторы:

к.ф.-м.н. А.П. Кержаев, к.ф.-м.н. А.И. Филиппова

Компьютерная верстка:

Л.А. Бутова, О.А. Мациевская, Т.В. Прохорова

Дизайн обложки:

П.Д. Щепалина

© ИТПЗ РАН, 2023

УДК 550.34; 535.41

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ РАСПРЕДЕЛЕННЫМ АКУСТИЧЕСКИМ СЕНСОРОМ В РАМКАХ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА GLOBAL DAS MONTH

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

¹ ООО «Т8», г. Москва, Россия

² ООО «Фемтовижн», г. Москва, Россия

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

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

E-mail: nikitin@t8.ru

(устный доклад)

Аннотация. В период с 1 по 28 февраля 2023 г. проводился международный эксперимент, в котором все желающие участники со всего мира, используя различную аппаратуру DAS, синхронно регистрировали сигналы, возникающие в результате землетрясений с магнитудой $M > 5$ (по каталогу Геологической службы США USGS). Цель эксперимента заключалась в определении возможного облика глобальной системы DAS для регистрации землетрясений, выявлении узких мест, возникающих при регистрации, хранении и обмене данными, и сопутствующие юридические вопросы. С российской стороны в эксперименте участвовало ООО «Т8 Сенсор». Объем и разнообразие данных, полученных в эксперименте, открывает возможность целого ряда исключительно интересных научных исследований. Приведен предварительный анализ сигналов первых вступлений землетрясений магнитудой 5+, зарегистрированных распределенным акустическим сенсором «Дунай» в течение февраля 2023 г. в рамках международного эксперимента Global DAS Month. Также рассматриваются факторы, от которых может зависеть качество сигнала.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс «Дунай», распределенное акустическое зондирование (DAS), международный эксперимент Global DAS Month, землетрясения в Турции 2023 года, оценка качества сигнала, детектирование первых вступлений

За последнее десятилетие распределенное акустическое зондирование (Distributed acoustic sensing – DAS) превратилось в захватывающую тему в наблюдательной сейсмологии [Кислов, Гравиров, 2022]. DAS может предоставить огромное количество информации, которое невозможно получить с помощью обычных сейсмометров при любой разумной цене.

Конечно, использованию DAS в сейсмологии сопутствуют определённые трудности [Никитин и др., 2023]. Измерения деформации $\varepsilon = dL/L$ не всегда достаточны для решения многих задач сейсмологии, которые обычно ориентированы на кинематические компоненты движения грунта. DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволокну, т. е. каждый его виртуальный «датчик» или «канал» однокомпонентный. Каждый канал DAS имеет более высокий уровень шума, чем обычный широкополосный современный сейсмометр. Однако высокая пространственная плотность многоканальных наблюдений позволяет ожидать

компенсацию этого недостатка за счёт возможностей суммирования или группирования сигналов отдельных каналов.

Тип оптоволоконного кабеля [Zhang et al., 2020] и процедуры установки [Becker et al., 2018] также влияют на амплитудный отклик DAS. Непросто определить передаточную функцию [Lindsey et al., 2020], которая является двумерной функцией частоты и волнового вектора [Jousset et al., 2018] и может быть не одинаковой на разных участках кабеля. Отношение сигнал/шум (ОСШ) на разных участках кабеля также может быть разным.

Под руководством Андреаса Вюстефельда [Wüstefeld, 2023] из независимого исследовательского фонда NORSAR при инициативе и сотрудничестве с Международным Консорциумом IRIS в период с 1 по 28 февраля 2023 г. проводился международный эксперимент, в котором все желающие в разных регионах земного шара, используя различную аппаратуру DAS, одновременно регистрировали сигналы землетрясений с магнитудой $M > 5$ (по каталогу USGS). Цель эксперимента заключалась в определении возможного облика глобальной системы DAS для мониторинга и анализа телесеизмических событий, выявлении узких мест при регистрации, хранении и обмене данными, сопутствующих юридических трудностей.

Организаторы эксперимента сформулировали следующие требования к регистрации:

- Частота дискретизации: до 100 Гц
- Пространственная выборка: ~20 м
- Длина используемого волокна: от 800 м и длиннее
- Продолжительность записи: 1 час на событие
- Дополнительно 14 февраля 2023 г. была проведена непрерывная регистрация продолжительностью 24 часа с частотой дискретизации 50 Гц.

С российской стороны в эксперименте участвовало ООО «Т8 Сенсор», которое проводит научные исследования в области фотоники и разработки многофункциональных систем технологического мониторинга и охраны. В эксперименте проводилась регистрация сейсмических сигналов с помощью системы DAS «Дунай» собственной разработки. В основе работы системы лежит принцип когерентной рефлектометрии. При этом длина чувствительного элемента (волокна) может быть до 75–100 км (в зависимости от конфигурации). Пространственное разрешение ~10 м. Для проведения эксперимента система «Дунай» была развернута на полигоне Кавказской горной обсерватории ГАИШ.

За время эксперимента во всем мире произошло около 150 землетрясений с магнитудой больше 5. Некоторые из них даже попали в один и тот же часовой интервал записи. Разрушительные февральские землетрясения в Турции также были зафиксированы всеми участниками эксперимента как в относительной близости от места событий, так и на

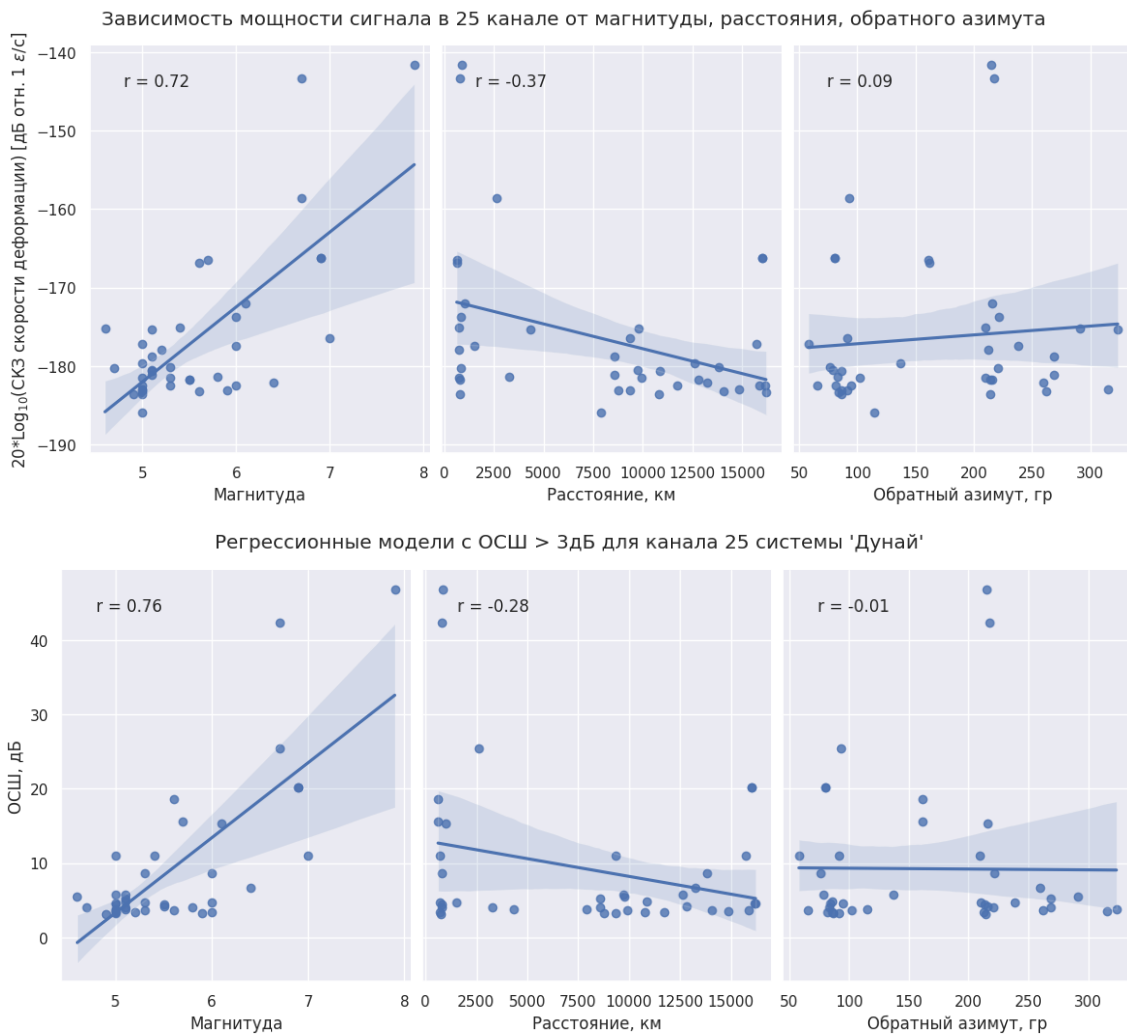


Рис 2. Линейные модели зависимостей мощности сигналов (вверху) и ОСШ (внизу) для исследуемых событий, зарегистрированных системой «Дунай»

Из результатов видно, что значительную положительную корреляцию имеют зависимости мощности и ОСШ от магнитуды события. Для расстояния и угла пока не удалось получить информативных результатов. 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 положения сегмента волокна и направлением прихода сейсмической волны. Кроме того, температурные флуктуации вносят значительную погрешность в низкочастотном сейсмическом диапазоне. В дальнейшем анализе планируется учитывать эти факторы. Предварительный анализ результатов участия ООО «Т8 Сенсор» в международном эксперименте по регистрации удалённых землетрясений свидетельствует о широких возможностях привлечения оптоволоконной технологии для решения традиционных задач сейсмического мониторинга. По сути, открывается перспектива применения как линейных, так и иных геометрических конфигураций волокна на земной поверхности для оперативного развертывания сейсмической антенны или группы и, таким образом, получения дополнительной информации о пространственных характеристиках сейсмического 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 и цифровой телеметрии в точку сбора. Разработка методик оперативного развёртывания таких систем, например в зонах регистрации афтершоковой активности, может создать серьёзную конкуренцию традиционным методам наблюдений.

Литература

- Кислов К.В., Гравиров В.В. Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 2. С. 5–38. DOI:[10.21455/si2022.2-1](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. 2023. № 5. С. 153–158.
- 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. DOI:[10.1190/segam2018-2997900.1](https://doi.org/10.1190/segam2018-2997900.1)
- Jousset P., Reinsch T., Ryberg T., Blanck H., Clarke A., Aghayev R., et al. Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features // Nature communications. 2018. V. 1. P. 1–11. DOI:[10.1038/s41467-018-04860-y](https://doi.org/10.1038/s41467-018-04860-y)
- Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Travel times for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. V. 105. No 2. P. 429–465. DOI:[10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x](https://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 // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. No 2. Article e2019JB018145. DOI:[10.1029/2019JB018145](https://doi.org/10.1029/2019JB018145)
- Wüstefeld A. Global DAS monitoring month. <https://www.norsar.no/in-focus/global-das-monitoring-month-february-2023>. Последний просмотр 21.04.2023.
- Zhang C.-C., Shi B., Zhu H.-H., Wang B.-J., Wei G.-Q. Toward distributed fiber-optic sensing of sub-surface deformation: A theoretical quantification of ground-borehole- cable interaction // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. V. 125. No 3. Article e2019JB018878. DOI:[10.1029/2019JB018878](https://doi.org/10.1029/2019JB018878)

PRELIMINARY RESULTS OF THE ANALYSIS OF SIGNALS RECORDED BY A DISTRIBUTED ACOUSTIC SENSOR AS PART OF AN INTERNATIONAL EXPERIMENT GLOBAL DAS MONTH

Spiridonov E.P.¹, Nikitin S.P.^{1,2}, Kislov K.V.³, Starovoit Yu.O.¹, Bengalskii D.M.¹,
Nanii O.E.^{1,4}, Treshchikov V.N.¹

¹ *OOO T8, Moscow, Russia*

² *OOO Femtovision, Moscow, Russia*

³ *Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, RAS,
Moscow, Russia*

⁴ *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

E-mail: nikitin@t8.ru