

5. Batzle M., Zhijing Wang. Seismic properties of pore fluids // *Geophysics*. – 1992. – V. 57, № 11. – P. 1396-1408. – DOI: 10.1190/1.1443207.
6. Backus G.E. Long-wave anisotropy produced by horizontal layering // *Journal of Geophysical Research*. – 1962. – V. 67. – P. 4427-4440. – DOI: 10.1029/JZ067i011p04427.
7. Хилтерман Ф. Д. Интерпретация амплитуд в сейсморазведке. – Тверь: ГЕРС, 2010. – 256 с.
8. Barnes E. Handbook of Poststack Seismic Attributes / Society of Exploration Geophysicists. – 2016. – 268 p. – (Geophysical References).
9. Goloshubin G.M., Korneev V.A., Vingalov V.M. Seismic low-frequency effects from oil-saturated reservoir zones // *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. – 2002. – V. 21. – № 1. – P. 1813-1816. – DOI: 10.1190/1.1817037.
10. Forrest M., Roden R., Holeywell R. Risking seismic amplitude anomaly prospects based on database trends // *Leading Edge*. – 2010. – V. 29. – № 5. – P. 570-574.

УДК 550.834.08

DOI:10.7242/echo.2022.3.7

## СРАВНЕНИЕ ОПТОВОЛОКОННОЙ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ И ГИДРОФОНОВ ПРИ МЕЖСКВАЖИННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

А.В. Чугаев, А.И. Кузнецов  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Приведены результаты сравнения оптоволоконной системы регистрации сейсмоакустических сигналов и традиционных пьезокерамических гидрофонных датчиков при проведении межскважинного просвечивания. Выполнена идентичная обработка сигналов оптоволоконной системы и гидрофонов. Оптоволоконная система регистрации имеет чувствительность намного ниже, чем у традиционных сейсмоакустических датчиков, тем не менее она обеспечивает хорошую повторяемость регулярного полезного сигнала, что позволяет повысить его интенсивность за счет многократного суммирования. Диаграмма направленности прямого волокна оказывает существенное фильтрующее влияние на волновое поле, вследствие чего регистрируются лишь отдельные классы волн. На частотный состав сигналов, полученных с помощью оптоволоконной системы, оказывает влияние осреднение на базе измерения, что приводит к сужению спектра. Полученные результаты показывают применимость оптоволоконных систем регистрации для сейсмоакустического мониторинга на Верхнекамском месторождении калийных солей.

**Ключевые слова:** DAS, межскважинное просвечивание, вертикальное сейсмопрофилирование, распределенный акустический датчик, Верхнекамское месторождение, скважинная сейсморазведка, головные волны.

### Введение

На Верхнекамском месторождении калийных солей (ВКМКС) ведется мониторинг состояния подработанной территории сейсмоакустическими методами. Одним из таких методов является скважинная сейсмоакустика способом межскважинного просвечивания [Chugaev et al., 2022].

В последнее время интенсивно развивается направление распределенных акустических измерений, являющееся альтернативой точечным датчикам. Оптоволоконные системы регистрации акустических сигналов (DAS – distributed acoustic sensing) уже применяются в нефтяной [Wu et al., 2017; Willis et al., 2018] и рудной [Riedel et al., 2018; Bellefleur et al., 2020] скважинной сейсморазведке. Системы DAS имеют ряд особенностей по сравнению с точечными датчиками и необходимо дополнительное изучение для их внедрения на Верхнекамском месторождении калийных солей. Имеющиеся в литературе результаты в подавляющем большинстве случаев рассматривают оптоволоконно для проведения вертикального сейсмопрофилирования [Zaanen et al., 2017], в то время как по межскважинному просвечиванию существует дефицит информации.

Основными преимуществами распределенных оптоволоконных сенсоров являются количество каналов, которое для одного регистратора может достигать десятков тысяч, а также низкая стоимость оптоволоконного кабеля. В качестве недостатков необходимо выделить неравномерность спектра регистрации (рис. 1) и диаграмму направленности, отличающуюся от традиционных датчиков – геофонов или гидрофонов (рис. 2).

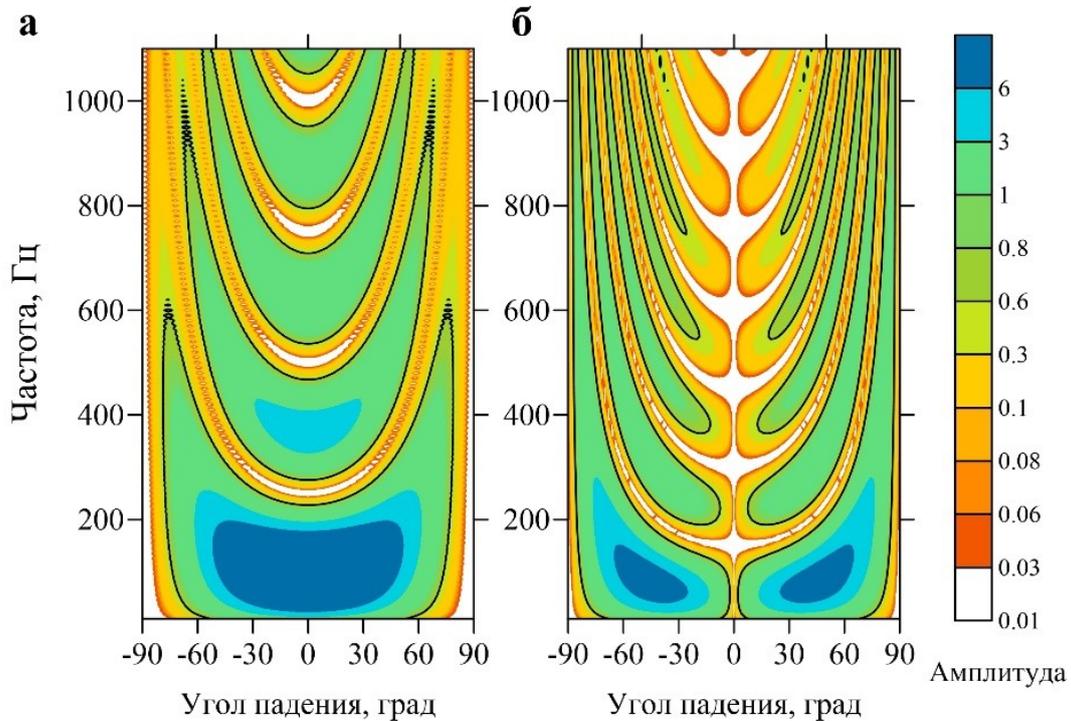


Рис. 1. Зависимость амплитудно-частотной характеристики от угла падения продольных (а) и поперечных (б) волн.  $V_p = 2200$  м/с,  $V_s = 1300$  м/с и  $GL = 10$  м.  $0^\circ$  – распространение волны вдоль волокна

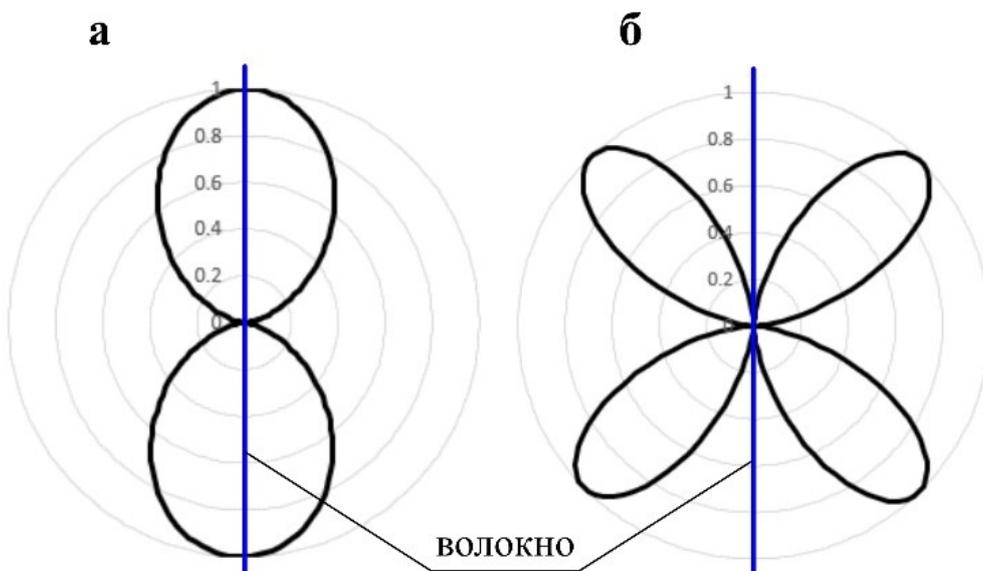


Рис. 2. Диаграмма направленности оптоволоконного сенсора для продольных (а) и поперечных (б) волн (по Матеевой, 2012)

### Методика сравнения сигналов

На тестовом участке выполнено сравнение оптоволоконной системы DAS и гидрофонов при проведении межскважинных исследований.

Расстояние между скважинами составляет 150 м, интервал возбуждения 105-164 м, интервал приема 127-198 м. В качестве источника упругих колебаний использован электроискровой излучатель с энергией разряда 2500 Дж, а регистрация велась с помощью пьезокерамических гидрофонов и DAS. Шаг пунктов возбуждения (ПВ) – 1 м, шаг пунктов приема (ПП) для гидрофонов – 1 м, для DAS – 0.25 м (рис. 3). Подробное описание геологии и анализ волнового поля при межскважинном просвечивании на ВКМКС приведено в работе [Chugaev et al., 2022].

На каждом ПВ выполнено 4 накопления для повышения отношения сигнал-шум. Для повышения интенсивности сигнала соседние трассы DAS просуммированы на базе 1 м (каждые 4 трассы). Это обеспечило возможность прямого сравнения с данными, полученными с гидрофонов. Такой подход возможен, поскольку длины регистрируемых волн составляют 5-20 м, соответственно суммирование вызовет снижение верхней границы спектра полезного сигнала на 10% или менее.

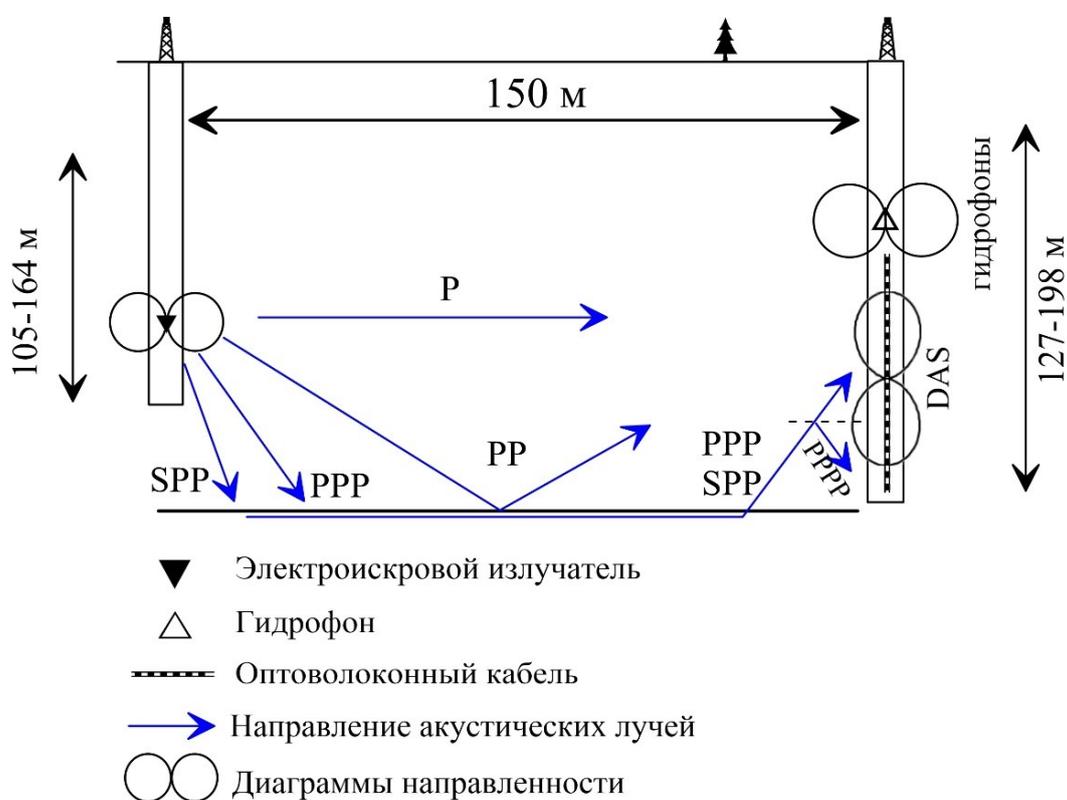


Рис. 3. Параметры системы наблюдений и схема хода лучей

Регистрация сигнала гидрофонов осуществлялась станцией IS-128, регистрация DAS с помощью iDAS2 Silixa. Время регистрации 300 мсек, дискретизация 0.2 мсек (5000 Гц). База осреднения сигнала DAS (Gauge length) определяется характеристиками станции и составляет 10 м [Parker et al, 2014]. Использовано одноволоконное оптоволокно G.657.A1 в кабеле диаметром 5 мм «MultiSense» производства завода Инкаб. Особенностью такого кабеля является уложение волокна без оптического модуля и практически без запаса длины, что должно обеспечивать лучшую передачу акустического сигнала из массива к волокну за счет жесткого сцепления волокна и изоляции кабеля.

Сравнение первичных сейсмограмм общего пункта возбуждения (ОПВ) и общего пункта приема (ОПВ) приведено на рисунках 4 и 5. Спектральный состав приведен на рис. 6.

Наиболее интенсивный сигнал на сейсмограммах DAS представлен преломленной головной волной (PPP), формирующейся на кровле каменной соли. Кроме того, присутствуют отражения этой волны от горизонтальных границ (PPPP). В сортировке ОПП достаточно ясно прослеживается головная волна SPP, поскольку ход лучей у регистрирующей скважины для волн PPP и SPP идентичный. Прямая продольная волна (время регистрации 62-70 мс) на сейсмограммах DAS ожидается отсутствует, поскольку она попадает в минимум диаграммы направленности, однако вторичное поле, образуемое прямой волной, можно различить на временах 65-70 мс (рис. 4б). Сюда входят отраженные продольные и обменные поперечные волны от горизонтальных сейсмогеологических границ. Эти волны требуют более детального изучения.

Существенное различие волнового состава на сейсмограммах обусловлено различными диаграммами направленности гидрофонов и кабеля с прямым оптоволоконном (рис. 3).

Считая спектр сигнала, зарегистрированного с помощью гидрофонов, близким к истинному (рис. 6а) и сравнивая его со спектром DAS, можно сделать вывод, что шум станции DAS на приведенных сейсмограммах сопоставим по интенсивности с полезным сигналом.

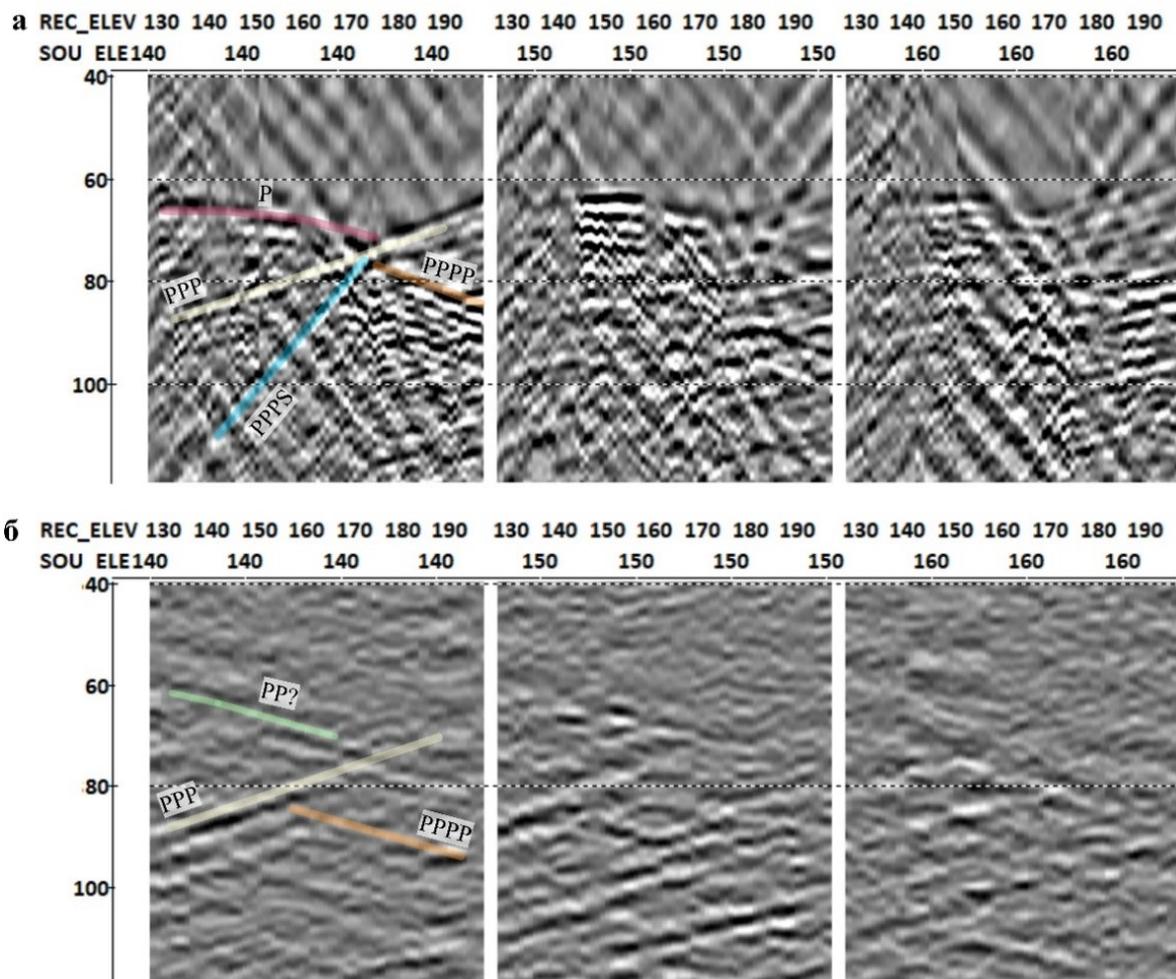


Рис. 4. Сейсмограммы общего ПВ, полученные с помощью гидрофонов (а) и DAS (б)

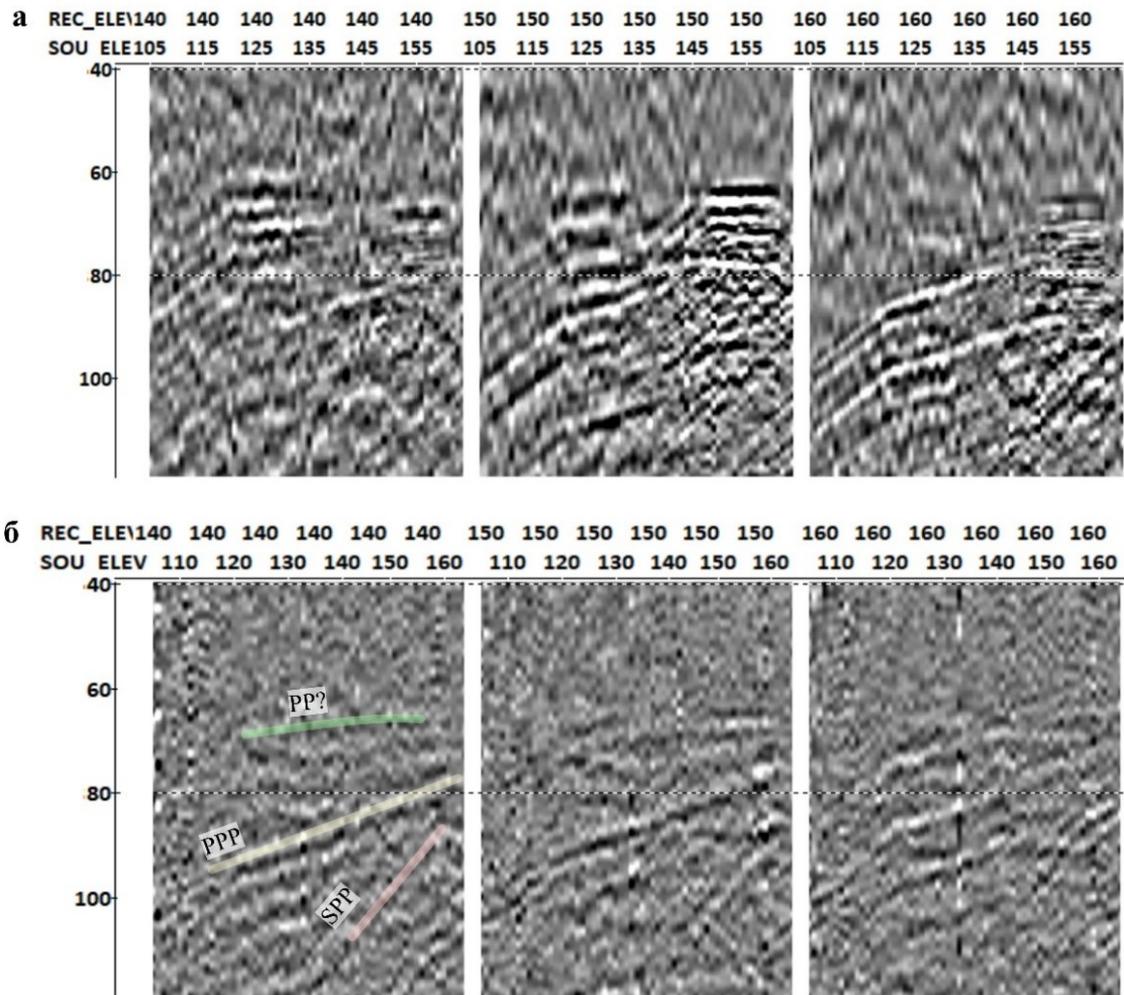


Рис. 5. Сейсмограммы общего ПП, полученные с помощью гидрофонов (а) и DAS (б)

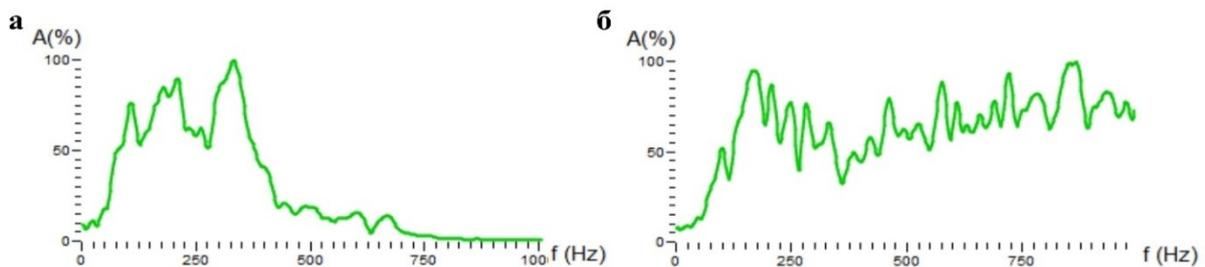


Рис. 6. Спектры сейсмограмм для гидрофонов (а) и DAS (б)

Имеющаяся волновая картина, зарегистрированная с помощью DAS, может быть улучшена путем суммирования головных волн способом, описанным в работе [Чугаев и др., 2020]. Этот способ основан на свойстве головных волн, относительная волновая картина которых практически не меняется при перемещении источника колебаний вдоль излучающей скважины.

На рис. 7 приведены варианты суммирования с разным количеством накоплений от 2 до 60 пунктов возбуждения. Наблюдается заметное улучшение прослеживаемости годографов, особенно для вторичного волнового поля, которое на исходных сейсмограммах практически не различимо.

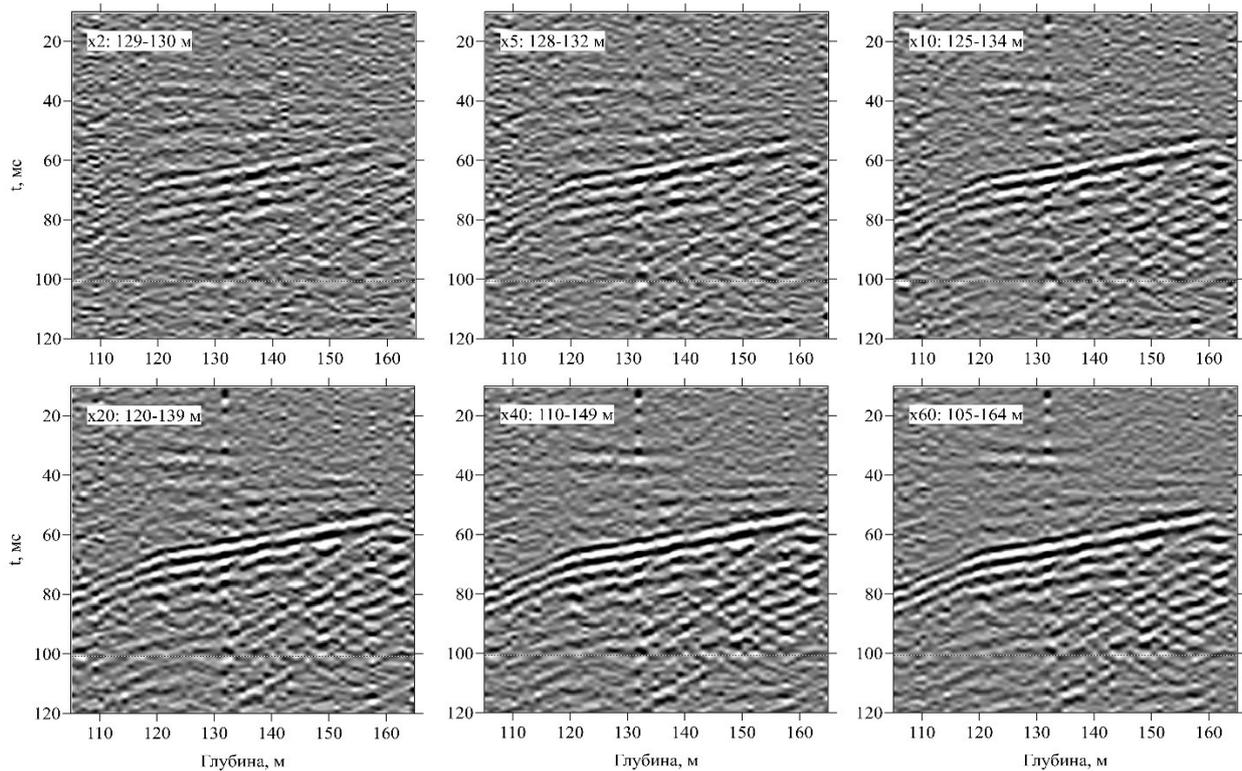


Рис. 7. Суммирование головных волн при разном количестве ПВ (регистрация DAS)

Для полноценного сравнения волновых картин, зарегистрированных с помощью гидрофонов и DAS, выполнена идентичная обработка сигналов (за исключением пункта 2):

- 1) 4-х кратное накопление на одной точке пункта возбуждения;
- 2) для DAS суммирование 4 трасс на базе 1 м (приведение шага ПП к 1 м);
- 3) полосовая фильтрация 50-100-1000-2000 Гц;
- 4) снятие первых вступлений головной волны;
- 5) ввод временных поправок для приведения поля головных волн к одному времени;
- 6а) суммирование по общему пункту приема (волновая картина у возбуждающей скважины), результаты на рис. 8;
- 6б) суммирование по общему пункту возбуждения (волновая картина у регистрирующей скважины), результаты на рис. 9.

### Результаты

Сравниваемые суммарные сейсмограммы качественно полностью соответствуют исходным данным, но характеризуются существенно более высоким отношением сигнал-шум. Выводы по волновым картинам вблизи излучающей и приемной скважины отличаются.

Поскольку диаграммы направленности электроискрового излучателя и гидрофона весьма похожи, то в сортировке общего пункта приема волновое поле вблизи излучающей скважины весьма сходно для гидрофонов и DAS (рис. 8).

Для приемной скважины диаграмма направленности прямого волокна оказывает существенное фильтрующее влияние на волновое поле, вследствие чего регистрируются лишь отдельные классы волн, в данном случае продольные головные РРР и преломленно-отраженные РРРР волны. Перспективными для обработки также являются отраженные РР волны.

На частотный состав сигналов, полученных с помощью DAS, оказывает влияние осреднение на базе измерения (рис. 1), что в данном случае привело к выпадению частот 250-350 Гц и сужению спектра.

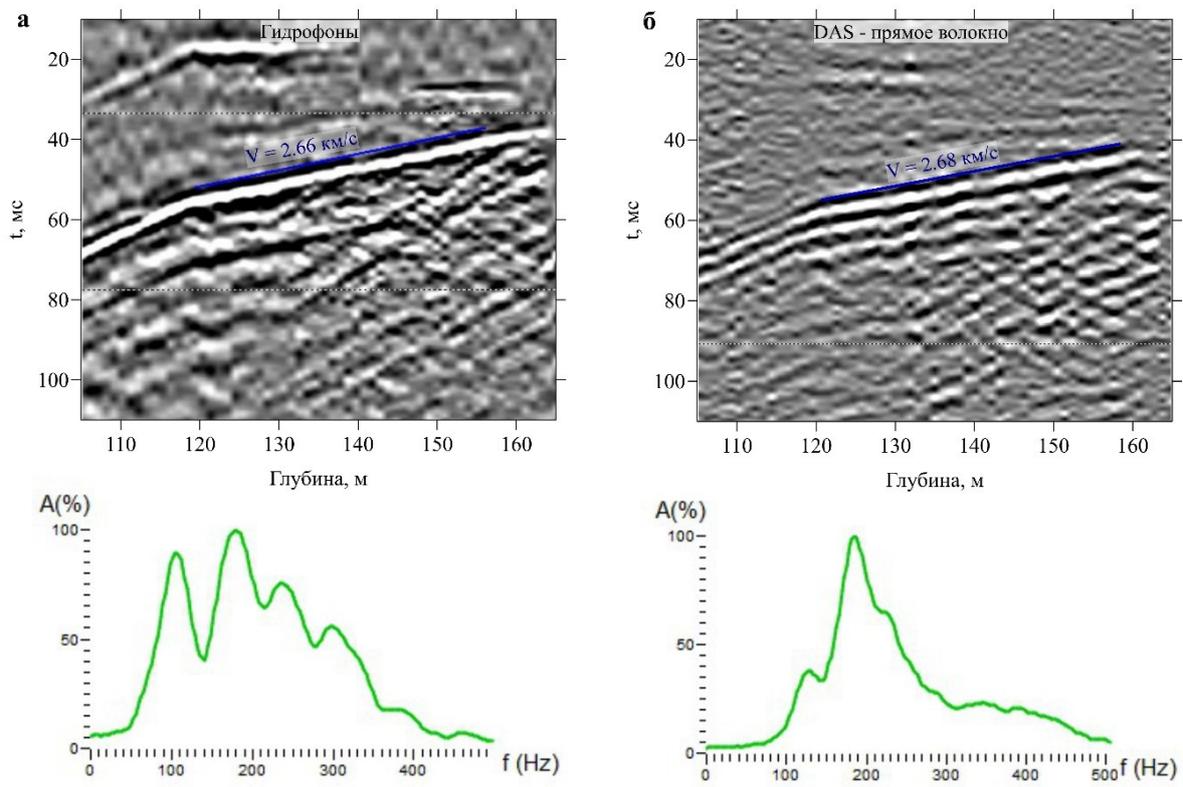


Рис. 8. Сравнение суммарных сейсмограмм ОПП и спектров гидрофонов (а) и DAS (б)

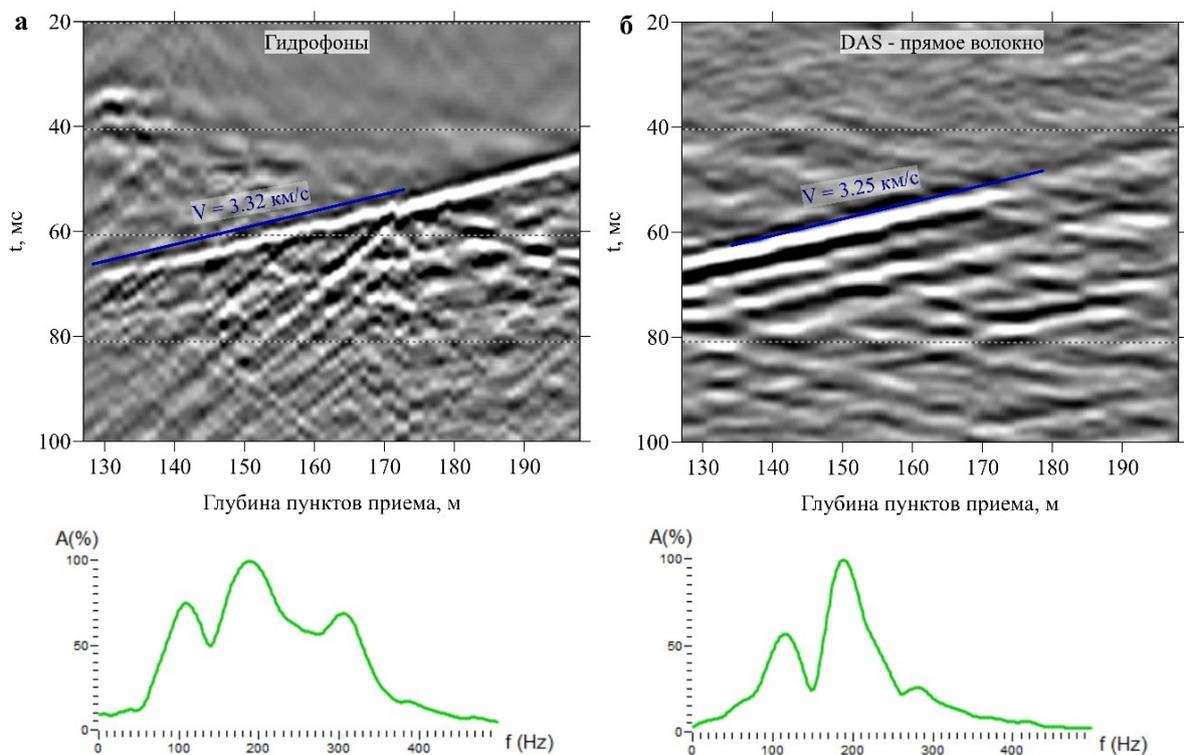


Рис. 9. Сравнение суммарных сейсмограмм ОПВ и спектров гидрофонов (а) и DAS (б)

## Выводы

Оптоволоконная система регистрации имеет чувствительность намного ниже, чем у традиционных сейсмоакустических датчиков, тем не менее она обеспечивает хорошую повторяемость регулярного полезного сигнала, что позволяет повысить его интенсивность за счет многократного суммирования. Несмотря на различия регистрируемого волнового состава, результаты сравнения можно считать весьма обнадеживающими, поскольку существуют способы изменения диаграммы направленности и расширения частотного состава акустических сигналов, получаемых с помощью оптоволоконного кабеля со спиральным уложением волокна [Kuvshinov, 2016].

На основании сравнения имеющегося оборудования стоимость одного канала оптоволоконной системы в 10-100 раз ниже, чем при использовании гидрофонов. Это позволяет проектировать системы наблюдения со стационарным заложением оптоволоконного кабеля, охватывающие сразу несколько скважин, что, в свою очередь, существенно снизит затраты на проведение регулярных мониторинговых полевых исследований, а также открывает перспективу создания автоматической системы сбора сейсмической информации в активном или пассивном режиме.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта №20-45-59603*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чугаев А.В., Санфиоров И.А., Тарантин М.В., Томилов К.Ю. Анализ вторичного поля головных волн при межскважинных сейсмических исследованиях // Геофизика. – 2020. – № 5. – С. 4-12.
2. Bellefleur G., Schetselaar E., Wade D., White D., Enkin R., Schmitt D.R. Vertical seismic profiling using distributed acoustic sensing with scatter-enhanced fibre-optic cable at the Cu–Au New Afton porphyry deposit, British Columbia, Canada // Geophysical Prospecting. – 2020. – V. 68, №1. – P. 313-333. – DOI: 10.1111/1365-2478.12828.
3. Chugaev A., Sanfirov I., Lisin V., Tarantin M., Babkin A., Yaroslavtsev A., Baybakova T., Tomilov K. The integrated borehole seismic surveys at the Verkhnekamskoye potassium salt deposit // Lecture notes in networks and systems. – 2022. – V. 342. – P. 255-269. – DOI:10.1007/978-3-030-89477-1-25.
4. Kuvshinov B.N. Interaction of helically wound fibre-optic cables with plane seismic waves // Geophysical Prospecting. – 2016. – V. 64, № 3. – P. 671-688. – DOI: 10.1111/1365-2478.12303.
5. Mateeva A., Mestayer J., Cox B., Kiyashchenko D., Wills P., Lopez J., Grandi S., Hornman K., Lumens P., Franzen A., Hill D., Roy J. Advances in distributed acoustic sensing (DAS) for VSP // Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 82<sup>nd</sup> Annual Meeting 2012, SEG. – 2012. – P. 4581-4585. – DOI: 10.1190/segam2012-0739.1.
6. Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M. Distributed Acoustic Sensing – A new tool for seismic applications // First Break. – 2014. – V. 32, № 2. – P. 61-69. – DOI: 10.3997/1365-2397.2013034.
7. Riedel M., Cosma C., Enescu N., Koivisto E., Komminaho K., Vahtinen K., Malinowski M. Underground Vertical Seismic Profiling with Conventional and Fiber-Optic Systems for Exploration in the Kylylahti Polymetallic Mine, Eastern Finland // Minerals. – 2018. – V. 8, № 11. – номер статьи: 538. – DOI: 10.3390/min8110538.
8. Willis M.E., Wu X., Padhi A., Ellmauthaler A., LeBlanc M. Effect of the angular response of a Fiber-Optic cable on DAS VSP recordings in Lateral wells // 80<sup>th</sup> EAGE Conference and Exhibition. Opportunities Presented by the energy Transition. – 2018. – Код 148615. – DOI: 10.3997/2214-4609.201801500.
9. Wu X., Willis M.E., Palacios W., Ellmauthaler A., Barrios O., Shaw S., Quinn D. Compressional- and shear-wave studies of distributed acoustic sensing acquired vertical seismic profile data // The Leading Edge. – 2017. – V. 36, № 12. – P. 987-993. – DOI: 10.1190/tle36120987.1.
10. van Zaanen L., Bona A., Correa J., Dean T., Pevzner R., Tertysnikov K. A comparison of borehole seismic receivers // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2017. – P. 5974-5978. – DOI: 10.1190/segam2017-17799478.1.