

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 550.834.08

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОПТОВОЛОКОННОЙ
СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ СО СПИРАЛЬНЫМ ВОЛОКНОМ
ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕЖСКВАЖИННОГО
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОСВЕЧИВАНИЯ¹

© 2023 г. А. В. Чугаев^{a,*}, А. И. Кузнецов^a

^aГорный институт УрО РАН
Россия, 614007, Пермь, ул. Сибирская, 78-А

*e-mail: chugaev@mi-perm.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 15.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Для расширения возможностей решения геофизических задач с помощью оптоволоконных распределенных систем регистрации акустических волн выполнено сравнение сигналов, полученных традиционными гидрофонами и распределенной оптоволоконной системой с применением кабеля, содержащего прямое и спиральное волокна. Исследования проведены способом межскважинного сейсмического просвечивания. Рассмотрена возможность выделения прямых и преломленных головных волн, зарегистрированных распределенной оптоволоконной системой, и получения с их помощью геолого-геофизической информации о состоянии массива. Показано, что при использовании спирально уложенного волокна первые вступления прямой продольной волны могут быть прослежены для проведения межскважинного просвечивания массива и оценки скоростной характеристики способом межскважинной томографии на прямых волнах. Как для прямого, так и для спирального волокна суммирование головных волн позволяет получать достаточно четкие вступления головной волны даже в сухой части скважины и использовать его для определения скоростей продольных волн околоскважинного массива. Состав волнового поля межскважинного просвечивания зависит от диаграмм направленности как источника, так и приемника упругих колебаний. Применение систем многократных перекрытий позволяет варьировать состав регистрируемого волнового поля за счет взаимного расположения приемной и возбуждающей линий в зависимости от решаемых задач.

DOI: 10.31857/S0032816223050087, EDN: ZJFDCJ

ВВЕДЕНИЕ

Система распределенных оптоволоконных акустических датчиков (Distributed Acoustic Sensing – DAS) – активно развивающаяся технология, позволяющая в перспективе существенно расширить возможности сейсмических исследований. Распределенные датчики с применением оптоволоконного волокна позволяют на несколько порядков увеличить количество каналов, одновременно выполняющих регистрацию акустических сигналов. В последние годы появляется все больше сообщений о внедрении DAS в практику сейсмозащиты [1, 2]. Преимущественно работы проводятся по методике вертикального сейсмопрофилирования в скважинах [3–5].

На Верхнекамском месторождении одним из методов контроля устойчивости массива на аварийных и предаварийных участках является межскважинное просвечивание на проходящих, отраженных и преломленных волнах [6].

Предыдущие исследования показали принципиальную возможность применения системы DAS для выполнения работ такого рода [7]. Однако существует ряд практических моментов, которые в настоящее время затрудняют применение технологии. Во-первых, диаграмма направленности прямого волокна ограничивает диапазон углов падения волны, при которых возможна регистрация полезного сигнала [8]. Во-вторых, амплитудно-частотная характеристика регистрирующей системы зависит от соотношения базы приема DAS и видимой длины волны. Поскольку система DAS регистрирует интегральное значение растяжения волокна на выбранной базе приема, то она выступает в качестве прямоугольного оконного филь-

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2023”, Россия, Пермь, 24–26 мая 2023 г. (International conference “Optical Reflectometry, Metrology & Sensing 2023”, Russia, Perm, 24–26, May 2023).

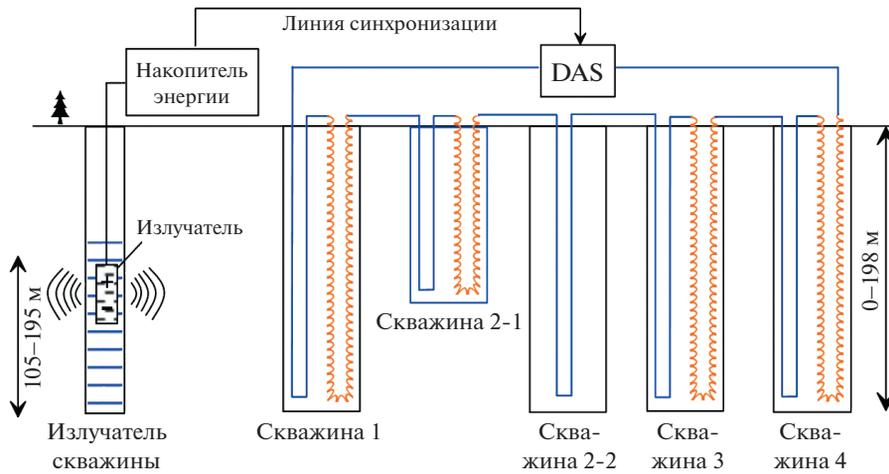


Рис. 1. Схема возбуждения сейсмоакустических колебаний и регистрации системой DAS.

тра, каким является протяженный линейный приемник, аналогично группированию точечных датчиков [9].

Для выполнения межскважинного акустического просвечивания с помощью системы DAS необходимо решить задачи изменения ее направленности для повышения чувствительности в отношении целевых сейсмических волн и выравнивания амплитудно-частотной характеристики регистрирующей системы.

ПРИМЕНЕНИЕ КАБЕЛЯ СО СПИРАЛЬНЫМ ВОЛОКНОМ

Изменение диаграммы направленности возможно путем применения кабеля с особым уложением волокна [10–12]. Технологически самым доступным способом является спиральная намотка. При спиральной намотке длина волокна в кабеле будет увеличиваться, следовательно, при сохранении оптической длины базы приема эффективная база приема (линейный размер массива, прилегающего к кабелю) уменьшается. Оптическое волокно в таком кабеле должно обеспечивать устойчивость к изгибу и сохранение приемлемого значения затухания. Для волокна стандарта G657.A2 эффективный радиус изгиба, при котором не происходит значительного увеличения затухания, составляет 30 мм. Исходя из такого значения радиуса и угла намотки 40° , для выполнения как поверхностных, так и скважинных сейсмических измерений спроектирован кабель, содержащий одновременно прямое и спиральное волокна. Внешний диаметр кабеля составляет 32.6 мм, масса 721 кг/км. Затухание в реальном кабеле составило порядка 0.3 дБ на километр оптической длины спирального волокна и 0.17 дБ на километр для прямого волокна.

Теоретическая диаграмма направленности кабеля при регистрации продольных волн симметрична относительно оси кабеля и зависит от угла намотки θ (0° для прямого волокна) и угла падения волны α (0° при распространении вдоль кабеля) в соответствии с выражением [10]:

$$D_p(\alpha, \theta) = \cos^2 \alpha \cos^2 \theta + (\sin^2 \alpha \sin^2 \theta)/2. \quad (1)$$

Амплитудно-частотная характеристика кабеля со спиральным волокном может быть найдена как [13]

$$A_L(\alpha, \theta, f) = A_0 \frac{V}{2\pi f_a} \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi L f_a}{V}\right) \right) D_p(\alpha, \theta), \quad (2)$$

где $f_a = f|\cos\alpha|$ – видимая частота сигнала, V – скорость волны в среде, L – оптическая база приема.

РЕГИСТРАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Для изучения возможностей системы DAS с применением кабеля, содержащего спиральное волокно, выполнена серия экспериментов по регистрации акустических сигналов, возбуждаемых источником упругих волн с известными параметрами, и проведено сравнение со стандартными сейсмическими датчиками. В данном случае использовались пьезокерамические гидрофоны совместно с сейсмоакустической станцией IS-128.

Регистрация DAS осуществлялась с помощью интеррогатора iDAS2 Silixa и оптоволоконной линии, смонтированной одновременно в пяти скважинах (рис. 1). Параметры системы наблюдения (табл. 1) обеспечивали возможность регистрации акустических сигналов с верхней границы спектра до 1250 Гц.

Оптическая линия организована по схеме кольца, т.е. концы линии физически приходят в

один оптический шкаф. Это, во-первых, облегчает тестирование линии на целостность, а во-вторых, позволяет проводить запись поочередно в обе стороны, уменьшая эффект затухания оптического сигнала.

Акустический сигнал в скважине возбуждался электроискровым источником с единичным воздействием 2.5 кДж. Накопитель электрической энергии, расположенный на поверхности, по магистральному кабелю подавал разряд на излучатель в скважине. Излучатель перемещался по скважине в интервале глубин 105–195 м. На каждом пункте возбуждения выполнялось 16 накопителей регистрируемого сигнала для последующего суммирования и повышения отношения сигнал/шум. В момент возбуждения накопитель подавал синхронизирующий импульс по проводной линии на вход интеррогатора DAS для начала регистрации. Все скважины обсажены пластиковой колонной ПВХ и заполнены водой, начиная с глубины 100 м. Выше 100 м воды нет ни в трубе, ни в затрубном пространстве.

Анализ волнового поля показал, что при межскважинном просвечивании на изучаемом участке наиболее интенсивными являются прямая проходящая и головная волны, также присутствуют отраженные волны [6]. Диаграммы направленности и схема подхода лучей при межскважинном просвечивании приведены на рис. 2.

Схема хода лучей для прямого параллельного просвечивания и головных волн приведена на рис. 3. Необходимо отметить, что диаграммы направленности излучателя и гидрофонов практически совпадают, в то время как для оптоволоконных датчиков диаграммы направленности существенно отличаются, что необходимо учитывать при анализе волнового поля.

СРАВНЕНИЕ ВОЛНОВЫХ КАРТИН

Для сравнения волновых картин необходимо преобразовать сигнал растяжения волокна, полученный оптоволоконной системой регистрации, к традиционному представлению скорости смещения частиц при ее регистрации велосиметрами. Для этого сигнал DAS необходимо проинтегрировать по времени [14].

Прямые волны при параллельном просвечивании

На рис. 4 приведено сравнение сейсмограмм, полученных гидрофонами, системой DAS на спиральном и прямом волокнах в сортировке прямого параллельного просвечивания, когда источник и приемник располагаются на одной глубине. Сейсмограмма, полученная с помощью системы DAS на спиральном кабеле, позволяет уверенно выделять первые вступления прямой продольной волны, пришедшей по нормали к кабелю. Запись,

Таблица 1. Параметры системы наблюдения

Наименование параметра	Значение
Общая оптическая длина приемной линии, м	6300
Суммарная длина полезных участков приемной линии, м	3100
Шаг пунктов приема, м	0.5
Количество регистрирующих каналов в скважинах	6200
Общее оптическое затухание на линии, дБ	3.5
База приема (Gauge length), м	10
Длина записи, мс	300
Шаг дискретизации по времени, мс	0.2

следующая за первыми вступлениями прямой волны, имеет существенные отличия, по всей видимости, связанные с различными амплитудно-частотными характеристиками систем регистрации. На сейсмограмме с прямого кабеля первые вступления прямой волны не наблюдаются.

Частотные составы сигналов гидрофонов и спирального кабеля в целом весьма близки, максимумы спектров совпадают, в то время как для прямого кабеля спектр смещен в область более низких частот.

Также выполнено потрассное сравнение сигналов (рис. 5). Первые вступления прямой волны практически совпадают для гидрофонов и спирального кабеля, в то время как для прямого кабе-

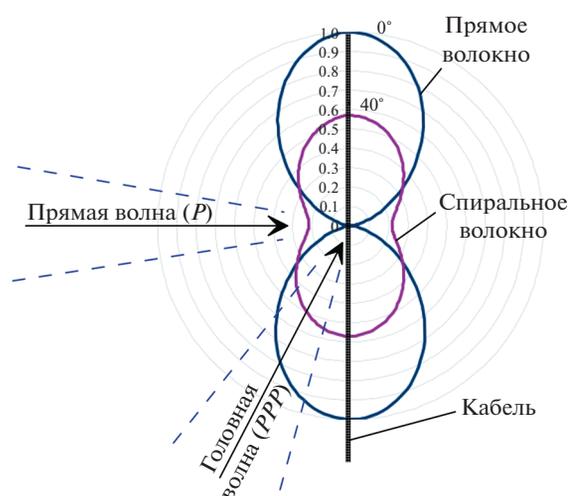


Рис. 2. Диаграммы направленности кабеля, содержащего прямое (0°) и спиральное волокно (40°), с направлениями прихода наиболее интенсивных волн.

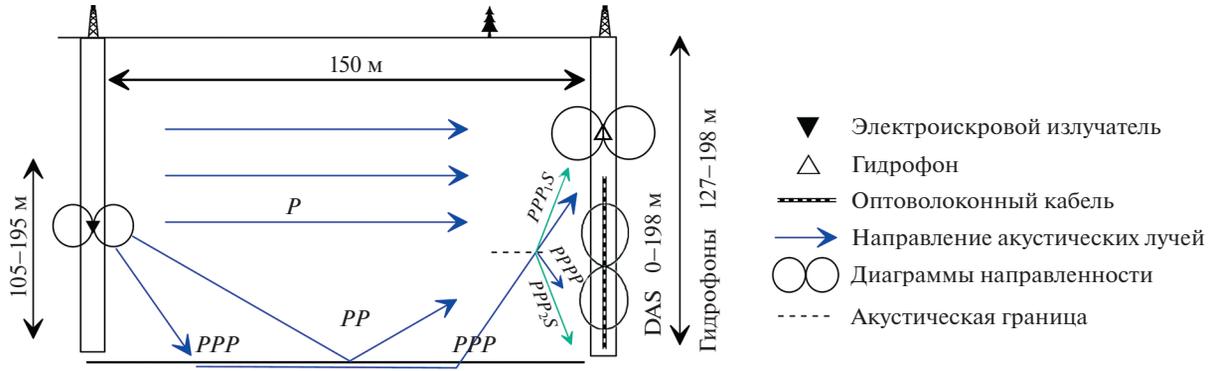


Рис. 3. Схема хода лучей при прямом параллельном просвечивании. P – прямая продольная волна, PP – отраженная продольная волна, PPP – головная преломленная волна, PPPP – преломлено-отраженная волна. PPP₁S – обменная проходящая головная волна, PPP₂S – обменная преломлено-отраженная волна.

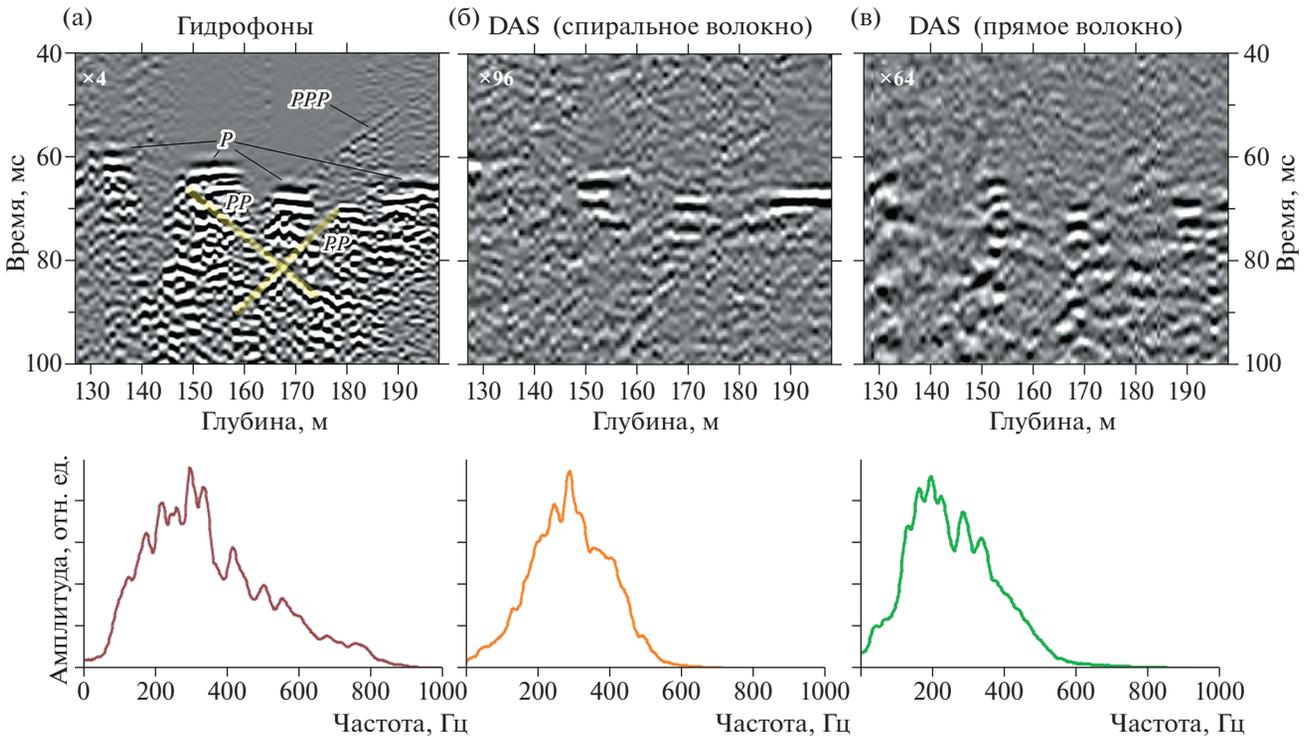


Рис. 4. Вверху – сейсмограммы прямого параллельного просвечивания при регистрации с помощью гидрофонов (а) и оптоволоконной системой DAS на спиральном (б) и прямом (в) волокнах; внизу – их спектры.

ля корреляция отсутствует. На некоторых участках, в частности при временах 82 и 95 мс (рис. 5а), сигналы всех трех систем имеют высокую степень корреляции. При этих временах регистрируются отраженные волны, попадающие в зону высокой чувствительности как спирального, так и прямого волокна. Сравнение сигналов гидрофонов и спирального кабеля на различных глубинах (рис. 5б) дает возможность оценить отклонение времени регистрации первых вступлений, которое составляет не более 0.6 мс. В последующей записи вид-

но расхождение кривых за счет различного частотного состава.

Преломленные головные волны

Сравнение головных волн выполнено по суммированным сейсмограммам, позволяющим существенно повысить отношение сигнал/шум поля головных волн по сравнению с однократными сейсмограммами. Этот способ основан на свойстве головных волн, относительная волновая картина

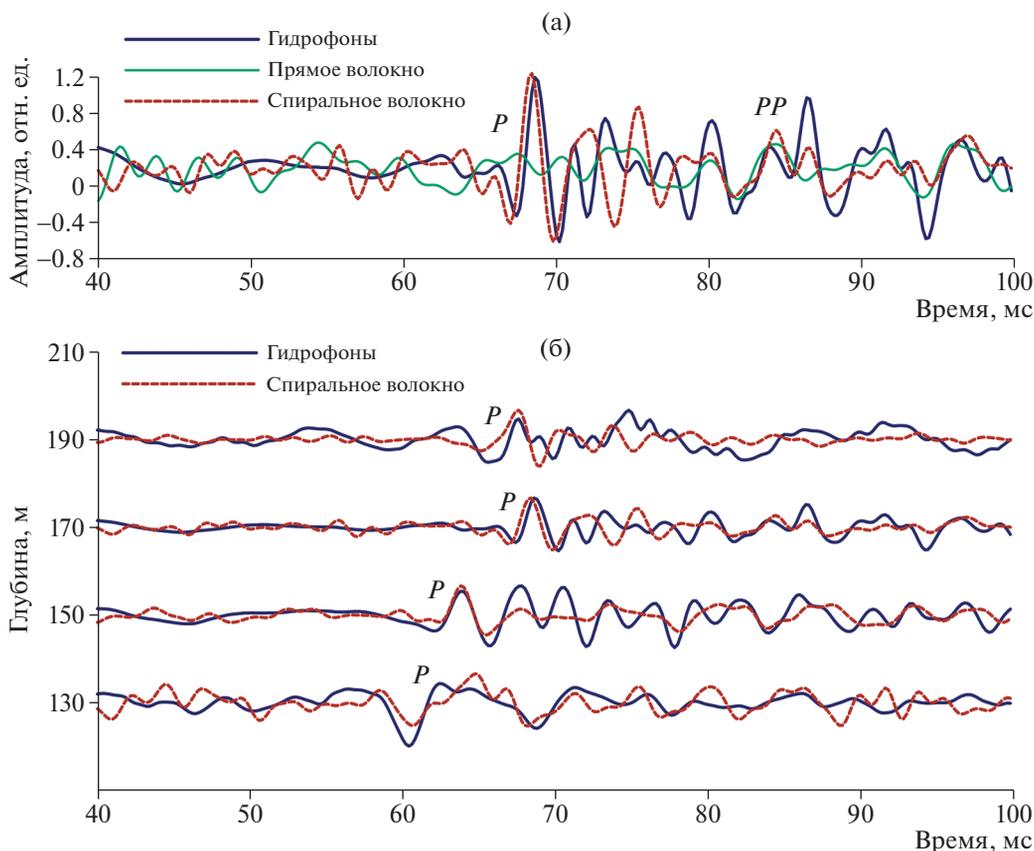


Рис. 5. Сравнение сеймотрасс при параллельном просвечивании: **а** – гидрофонов, спирального и прямого волокон при глубине источника и приемника 170 м; **б** – гидрофонов и спирального волокна на различных глубинах.

которых практически не меняется при перемещении источника колебаний вдоль излучающей скважины [15]. Используя свойство взаимности источника и приемника, такие суммарные сейсмограммы можно получить как для приемной (рис. 6а, 6в, 6д), так и для излучающей скважины (рис. 6б, 6г, 6е). Кратность суммирования зависит от количества пунктов приема или возбуждения и может составлять до 200 накоплений. Учитывая количество накоплений на одном пункте возбуждения, общая кратность может превышать 1000.

В условиях плоской преломляющей границы (в рассматриваемом примере представленной кровлей солей) головные волны имеют плоский фронт, падающий на приемную линию в скважине под углом $\sim 60^\circ$. При падении головной волны на горизонтальную акустическую границу возникает классический набор проходящих и отраженных продольных P и обменных поперечных S волн (рис. 6б, схему хода лучей см. на рис. 3). Поскольку регистрация поперечных волн гидрофонами в скважинном флюиде физически невозможна, по всей видимости, на стенках скважины происходит еще один обмен из поперечной в про-

дольную волну, что позволяет наблюдать эти волны на сейсмограммах.

Волновые картины, полученные гидрофонами у приемной и излучающей скважин, весьма схожи, на них присутствует весь набор отраженных и обменных волн, что легко объяснить сходными диаграммами направленности электроискрового излучателя в скважине и гидрофонов, имеющими максимум чувствительности по нормали к скважине. Диаграмма направленности оптоволоконного кабеля существенно отличается и имеет максимум чувствительности вдоль оси скважины. Этим обуславливается отсутствие обменных волн (PPP_1S и PPP_2S , см. рис. 3 и 6б) на сейсмограммах DAS в приемной скважине. В то же время при пересортировке к общему пункту приема (рис. 6г, 6е) волновая картина более похожа на ту, что наблюдается при использовании гидрофонов. В частности, становятся отчетливо различимы обменные проходящие и отраженные поперечные волны.

Таким образом, волновое поле определяется диаграммой направленности как регистрирующей системы, так и излучателя, что позволяет варьировать его состав за счет взаимного расположения линий возбуждения и приема.

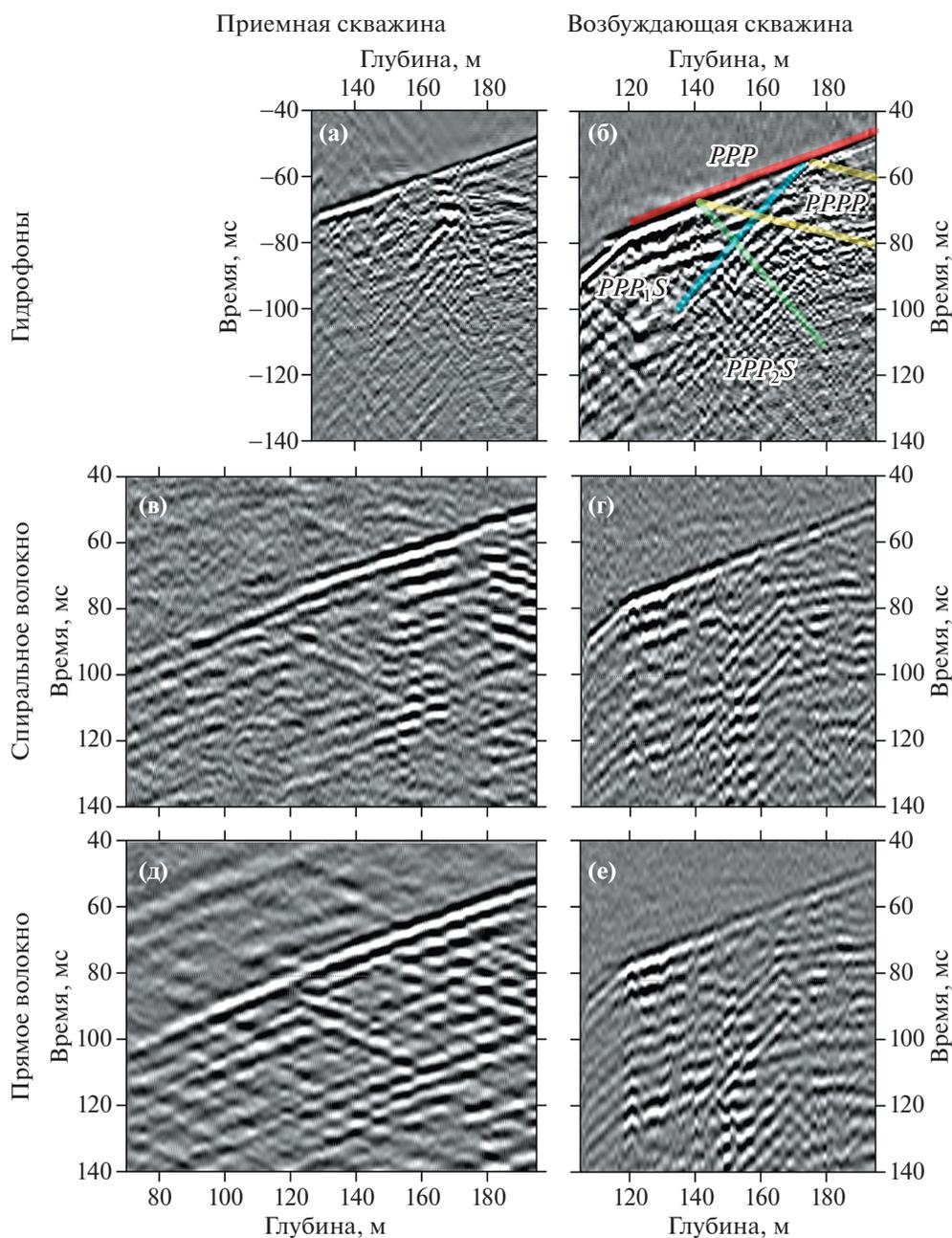


Рис. 6. Сравнение суммированных сейсмограмм головных волн: **а, б** – гидрофонов; **в, г** – спирального кабеля; **д, е** – прямого кабеля – для приемной скважины (**а, в, д**) и излучающей скважины (**б, г, е**). *PPP* – продольная головная волна; *PPPP* – продольная головная волна, отраженная от горизонтальной границы; *PPP₁S* – проходящая обменная головная волна; *PPP₂S* – отраженно-обменная головная волна.

Еще одним важным результатом является наличие регистрируемого сигнала за пределами обводненной части скважины (глубины 70–100 м на рис. 6в, 6д). Факт присутствия сигнала в сухой части скважины можно объяснить высокой кратностью суммирования (более 1000), а также тем, что тяжелый кабель плотно прилегает к стенке, что является достаточным для приема акустического сигнала.

ВЫВОДЫ

Испытание распределенной оптоволоконной системы со спиральным уложением волокна позволило экспериментально подтвердить возможность приема акустических сигналов, падающих по нормали к кабелю. Интенсивность сигнала при регистрации системой DAS существенно ниже, чем при использовании гидрофонов, тем не менее первые вступления достаточно уверенно

коррелируются и могут быть прослежены. Это позволяет проводить межскважинное просвечивание массива для оценки скоростной характеристики с использованием межскважинной томографии на прямых волнах.

При регистрации прямых продольных волн кабелем с прямым волокном корреляция практически отсутствует. Одновременно с этим на сейсмограммах присутствуют отраженные волны. Необходимо дальнейшее изучение волнового поля для оценки возможности построения разреза отраженных волн, зарегистрированных прямым кабелем.

При изучении головных волн на спиральном волокне регистрируется менее интенсивный сигнал, чем на прямом, однако его частотный состав шире за счет меньшего интервала породного массива, приходящегося на оптическую базу приема спирального кабеля. Как для прямого, так и для спирального кабеля суммирование головных волн позволяет регистрировать достаточно четкие вступления головной волны в сухой части скважины, что позволяет использовать его для определения скоростей продольных волн около-скважинного массива даже в сухих скважинах.

Состав волнового поля межскважинного просвечивания зависит от диаграмм направленности как источника, так и приемника упругих колебаний. Применение систем многократных перекрытий позволяет варьировать состав регистрируемого волнового поля за счет взаимного расположения приемной и возбуждающей линий в зависимости от решаемых задач.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 20-45-596032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012. Society of Exploration Geophysicists, 2012. <https://doi.org/10.1190/segam2012-0739.1>
2. *Cai Z., Yu G., Zhang Q., Zhao Y., Chen Y., Jin Y., Zhao H.* Comparative Research between DAS-VSP and Conventional VSP Data // SEG Global Meeting Abstracts. 2016. P. 81. <https://doi.org/10.1190/RP2016-022>
3. *Судакова М.С., Белов М.В., Понимаскин А.О., Пирогова А.С., Токарев М.Ю., Колубакин А.А.* // Геофизика. 2021. № 6. С. 110. EDN: RNPIBI
4. *Gorshkov B.G., Alekseev A.E., Simikin D.E., Taranov M.A., Zhukov K.M., Potapov V.T.* // Sensors. 2022. V. 22. P. 9482. <https://doi.org/10.3390/s22239482>
5. *Bakulin A., Golikov P., Smith R., Erickson K., Silvestrov I., Al-Ali M.* Smart DAS uphole acquisition system for near-surface characterization and imaging // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2018. P. 201. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2995883.1>
6. *Чугаев А.В., Тарантин М.В., Санфиоров И.А.* // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 2. С. 293. EDN: MMQNLI <https://doi.org/10.15372/GiG2022119>
7. *Чугаев А.В., Кузнецов А.И.* // Горное эхо. 2022. № 3 (88). С. 42. EDN: DYLFGI. <https://doi.org/10.7242/echo.2022.3.7>
8. *Bona A., Dean T., Correa J., Pevzner R., Tertyshnikov K.V., Van Zaanen L.* // 79th EAGE Conference and Exhibition 2017. Netherlands: EAGE Publications BV, 2017. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201701200>
9. *Parker T., Shatalin S., Farhadiroushan M.* // First Break. 2014. V. 32 (2). P. 61. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2013034>
10. *Kuvshinov B.N.* // Geophys Prospect. 2016. V. 64 (3). P. 671. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12303>
11. *Innanen K.* Determination of seismic-tensor strain from Helical Wound Cable-Distributed Acoustic Sensing cable with arbitrary and nested-helix winds // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017. Society of Exploration Geophysicists, 2017. P. 926. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17664060.1>
12. *Egorov A., Charara M., Alfataierge E., Bakulin A.* Realistic modeling of surface seismic and VSP using DAS with straight and shaped fibers of variable gauge length // First International Meeting for Applied Geoscience & Energy Expanded Abstracts. USA, OK, Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 2021. P. 184. <https://doi.org/10.1190/segam2021-3576626.1>
13. *Чугаев А.В., Тарантин М.В.* // Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 1. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2022-06-10>
14. *Correa J., Egorov A., Tertyshnikov K., Bona A., Roman R., Dean T., Freifeld B., Marshall S.* // The Leading Edge. 2017. V. 36. P. 962. <https://doi.org/10.1190/tle36120994a1.1>
15. *Чугаев А.В., Санфиоров И.А., Тарантин М.В., Томиллов К.Ю.* // Геофизика. 2020. № 5. С. 4. EDN: IVWWVL