

ПЕТРОФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СКВАЖИННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ ОБЩЕЙ ГЛУБИННОЙ ТОЧКИ

А.В. Чугаев¹, И.А. Санфинов¹, К.Ю. Томилов¹

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: chugaev@mi-perm.ru

Аннотация: Скважинное сейсмическое профилирование по методике общей глубинной точки (ОГТ) в водонаполненных скважинах с помощью электроискрового источника и многоканальной гидрофонной косы направлено на поиск и локализацию в пространстве линейных вертикально ориентированных объектов. При этом данный подход основывается на всестороннем изучении всей имеющейся геолого-геофизической информации о вмещающем массиве. Волновое поле, регистрируемое при проведении скважинного профилирования ОГТ, содержит волны продольного типа и волны Лэмба-Стоунли, распространяющиеся вдоль оси скважины. Показана возможность изучения данных волн в идеологии акустического каротажа. Основными результатами будут являться кривые скоростей продольных волн и гидроволн, а также трассы отраженных волн обоих типов. Основным преимуществом в данном случае будет система расстановки, подразумевающая многократность и многоканальность записи. Такая расстановка эквивалентна многоканальному скважинному зонду и позволяет повысить точность определения скорости по годографу за счет статистического эффекта и увеличить интенсивность отраженных волн благодаря суммированию. Кратность определения скоростной характеристики на одном интервале может составлять от 20 до 40, кратность суммирования отраженных продольных волн — более 100, гидроволн — более 400. Полученные результаты могут быть использованы как в качестве самостоятельного инструмента для расчленения геологического разреза, так и в качестве параметрического обеспечения для скважинных и наземных сейсмических наблюдений по методике общей глубинной точки.

Ключевые слова: скважинная сейсморазведка, акустический каротаж, волна Лэмба-Стоунли, скважинное сейсмическое профилирование, многоканальный зонд акустического каротажа, трасса отраженной волны.

Для цитирования: Чугаев А.В., Санфинов И.А., Томилов К.Ю. Петрофизические возможности скважинного профилирования по методу общей глубинной точки // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11. – С. 108–117. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-108-117.

Petrophysical capabilities of crosswell profiling with common depth point

A.V. Chugaev¹, I.A. Sanfirov¹, K.Yu. Tomilov¹

¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Perm, Russia,
e-mail: chugaev@mi-perm.ru

Abstract: Common depth point seismics in water-filled wells using a sparker and a multichannel array is used to detect and locate linear vertical objects. This approach rests upon comprehensive

examination of all available data on geology and geophysics of enclosing rock mass. The wave field recorded in CDP profiling contains P-waves and the Lamb–Stonely waves propagating along the well axis. It is possible to study these waves using acoustic well logging. In this case, the results will be the velocity curves of P-waves and hydrowaves, as well as traces of reflected waves of both types. A major advantage of the approach is the array enabling multiple and multichannel recording. Such array is equivalent to multichannel well logging. It enhances accuracy of velocity estimation from time–travel plots owing to statistical effect and increases intensity of reflected waves thanks to stacking summation. The frequencies of the velocity characteristic determination can be 20–40, while stacking folds of reflected P-waves and hydrowaves are more than 100 and more than 400, respectively. The results can be used both as an independent tool for geologic cross-section differentiation and as a parameter database for downhole and land seismic surveys with common depth point.

Key words: borehole seismics, acoustic logging, Lamb–Stonely wave, crosswell profiling, multichannel acoustic logging tool, reflected wave trace.

For citation: Chugaev A. V., Sanfirov I. A., Tomilov K. Yu. Petrophysical capabilities of crosswell profiling with common depth point. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11):108-117. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-108-117.

Комплексные скважинные сейсмические исследования на Верхнекамском месторождении калийных солей включают скважинное сейсмическое профилирование ОГТ, направленное на поиск и локализацию в пространстве линейных вертикально ориентированных объектов [1–4]. Скважинное ОГТ позволяет определить наличие отражающих объектов во вмещающей среде, оценка природы которых невозможна без априорной информации об объекте исследований, поэтому необходимо иметь максимально полное представление о строении разреза и его петрофизических свойствах.

При реализации скважинного ОГТ источник и приемники сейсмического сигнала располагаются в одной скважине, при этом применяется центральная расстановка, реализуемая за два фланговых прохода с выносом пункта возбуждения 2–3 м. Шаг пунктов возбуждения и шаг между приемниками — 1 м. Таким образом, систему источников и приемников можно рассматривать как каротажный зонд с одним излучателем, 24-мя приемниками и максимальным удалением в 26 м.

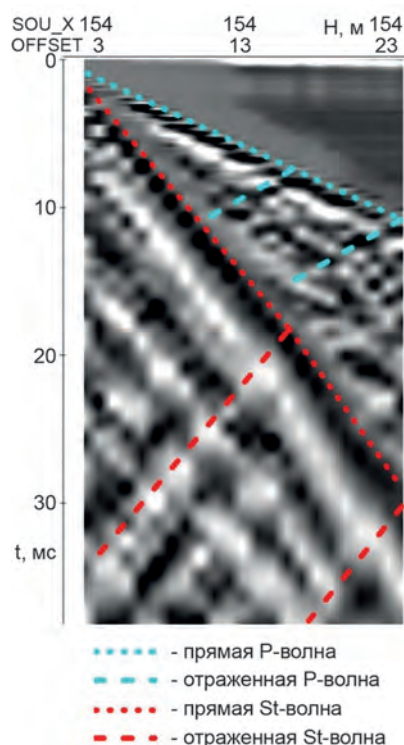


Рис. 1. Сейсмограмма многоканального каротажа, содержащая прямые и отраженные P- и St-волны

Fig. 1. Multichannel seismogram of logging which contains P- and St-waves

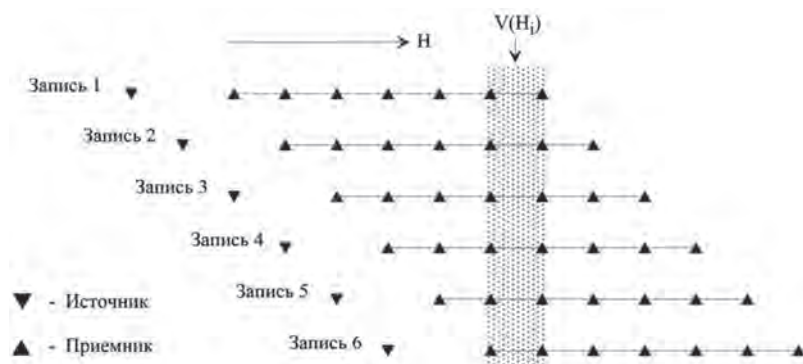


Рис. 2. Многократное определение скорости при многоканальной системе наблюдений
 Fig. 2. Multiple estimation of the velocity in multifold spread

Волновое поле, регистрируемое при подобных исследованиях, содержит волны, распространяющиеся вдоль оси скважины. Изучение этой составляющей волнового поля позволяет получить дополнительную информацию о характеристиках околоскважинного пространства.

При использовании электроискрового скважинного источника и датчиков давления на сейсмограммах регистрируются прямая продольная волна (P), распространяющаяся по вмещающему массиву горных пород, и гидроволна (St), распространяющаяся по контакту флюида и вмещающего массива (рис. 1). Поперечные волны в массиве регистрируются как дважды обменные PSP и, соответственно, имеют низкую амплитуду. Это вместе с достаточно большим

шагом пунктов приема и возбуждения, в большинстве случаев не позволяет уверенно их коррелировать.

Как P-, так и St-волны при падении на акустически жесткие границы будут формировать отражения, которые можно использовать для дополнительного изучения физических свойств околоскважинного пространства.

Получение скоростной характеристики разреза

Под гидроволной обычно подразумевают волну Лэмба-Стоунли, которая распространяется по контакту скважинного флюида и вмещающих горных пород.

Скорость гидроволны в необсаженной скважине при длине волны больше

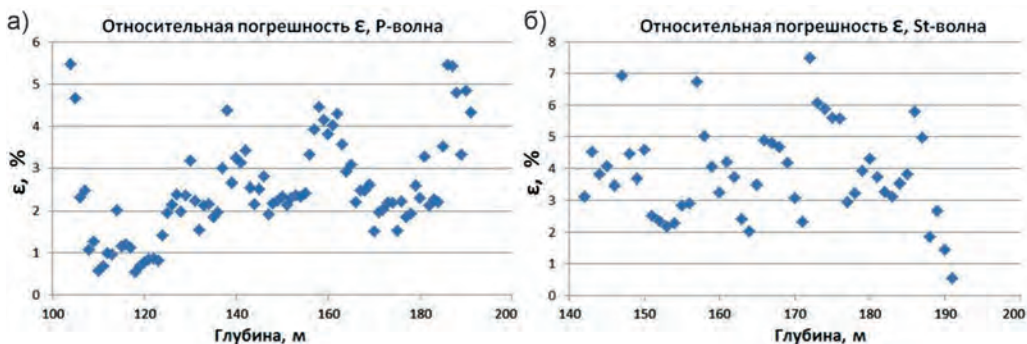


Рис. 3. Значения относительной погрешности измерения скоростей продольной волны (а) и гидроволны (б)

Fig. 3. Relative error of velocity estimation: a—P-wave; b—St-wave

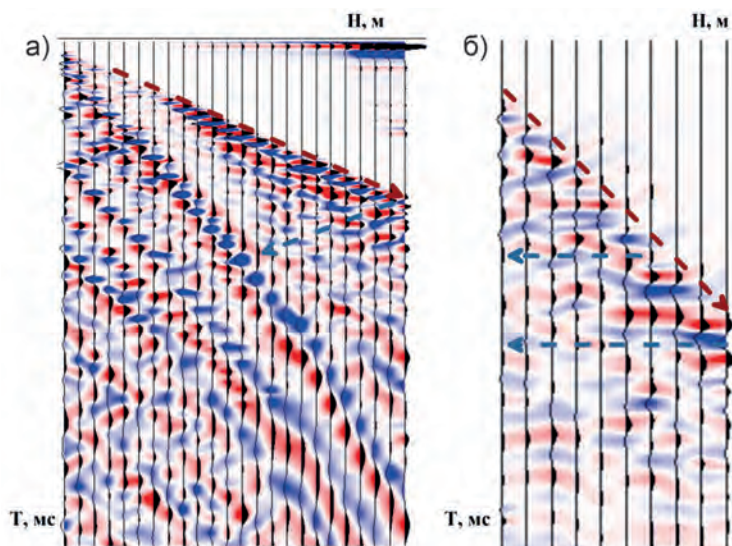


Рис. 4. Подготовка к суммированию в пределах одной записи: исходная сейсмограмма (а); после f - k фильтрации и введения кинематики (б)

Fig. 4. Preparation for stacking within the scope of one seismogram: a—initial seismogram; b—after f - k filter and kinematic correction applying

чем $5d$ (d — диаметр скважины), определяется модулем сдвига вмещающих пород μ и параметрами жидкости: скоростью волны давления V_0 и плотностью ρ_0 [5]:

$$V_{st} = V_0 \sqrt{\frac{\mu}{\mu + \rho_0 V_0^2}} \quad (1)$$

В работе [6] показано, что для скважины, обсаженной ПВХ пластиком,

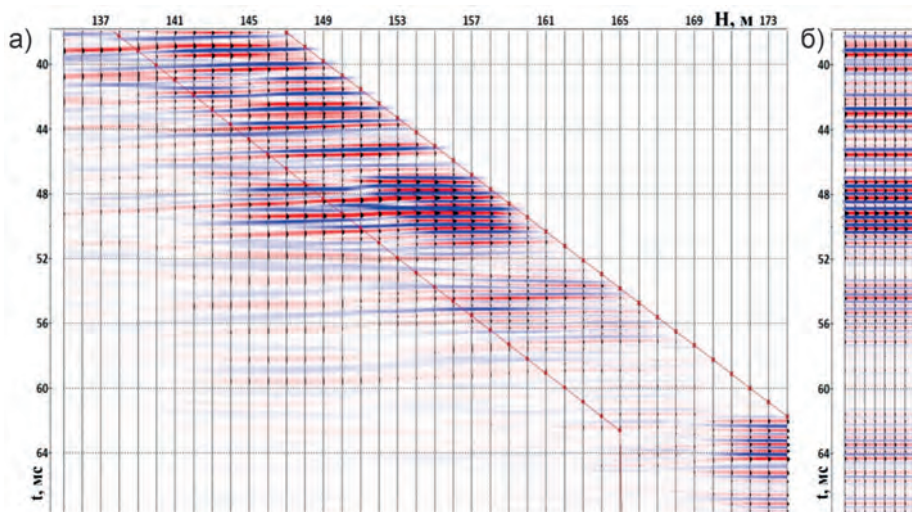


Рис. 5. Получение трассы отраженной волны: разрез продольных отраженных волн с учетом смещения зонда и границы коридорного суммирования (а); результирующая трасса отраженной волны (б)

Fig. 5. Trace of reflection wave acquisition: a — P -wave reflections cross-section with accordance of sonde shift and borders of corridor stacking; b — resulting trace of reflection

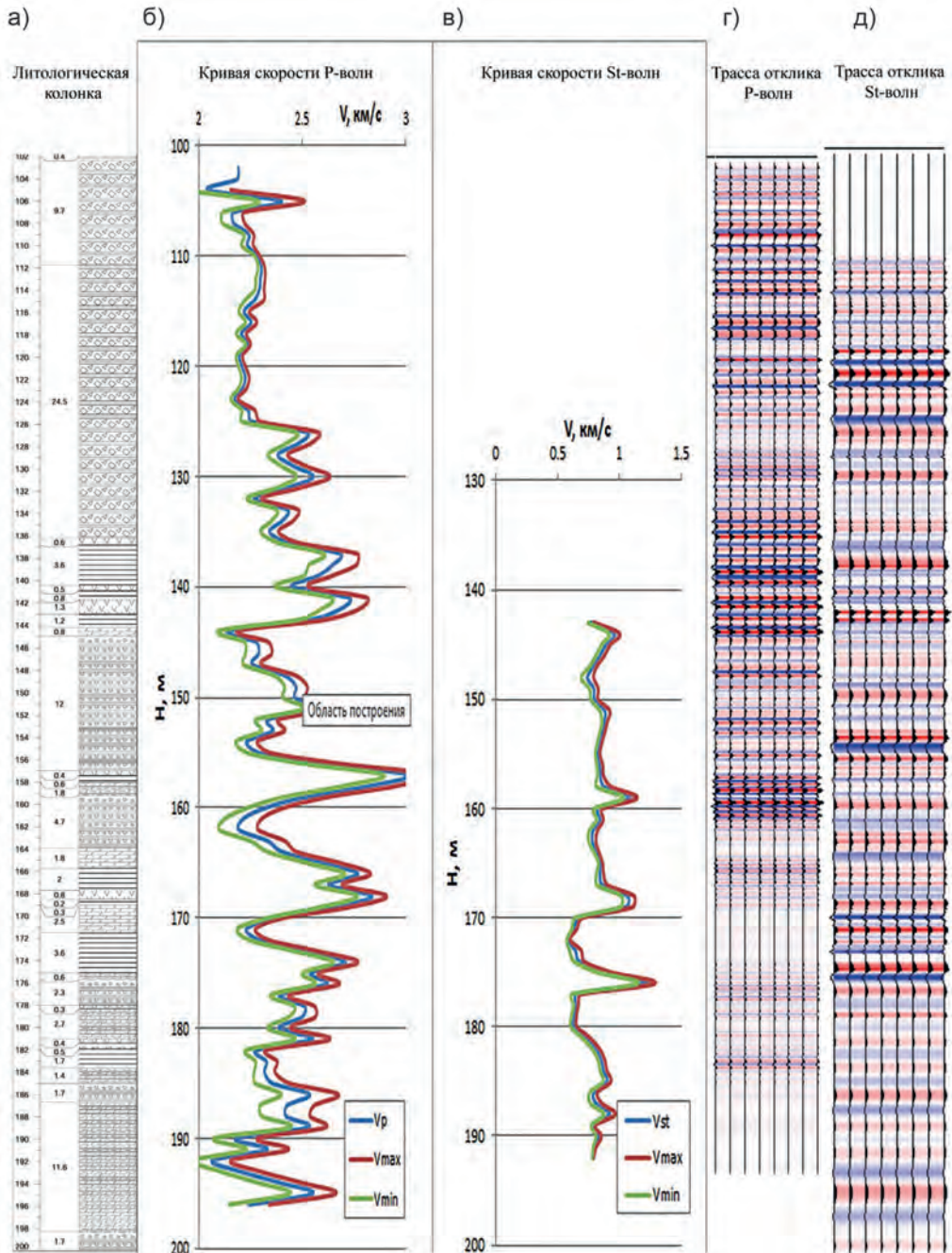


Рис. 6. Результаты обработки волн, распространяющихся вдоль скважины: литологическая колонка (а); кривая скорости P (б); кривая скорости St, (обе с учетом погрешности измерений) (в); трасса отраженных P-волн (г), трасса отраженных St-волн (д)

Fig. 6. Results of processing the waves which are propagating along well axis: a-Lithological profile; b-P-wave velocity curve; v-St-wave velocity curve (both with the glance of error); g-P-wave trace of reflection; d-St-wave trace of reflection

в случае обводненного разреза (присутствие жидкости в затрубном пространстве) влияние обсадной трубы незначительно, что позволяет использовать гидроволны для анализа характеристик вмещающего разреза.

Скорости гидроволн и поперечных волн во вмещающем массиве связаны следующим соотношением [7]:

$$V_s = \left(\frac{\rho_c}{\rho_o} \left(\frac{1}{V_{st}^2} - \frac{1}{V_o^2} \right) \right)^{0,5} \quad (2)$$

где ρ_c — плотность вмещающей среды, что осложняет переход от значений скорости гидроволн к V_s . Однако, как следует из формулы (1), для расчленения разреза вдоль скважины не обязательно осуществлять этот переход, поскольку гидроволны уже содержат информацию о модуле сдвига среды [8, 9].

Волны Лэмба-Стоунли, как и другие поверхностные волны, обладают дисперсией скоростей [10], соответственно, с увеличением расстояния между источником и приемником увеличивается проникновение волны вглубь массива горных пород. Объем захватываемого пространства определяется глубиной эффективного проникновения гидроволны, которое составляет половину длины волны ($\lambda/2$). В свою очередь, для оценки глубины проникновения объемных P- и S-волн необходимо использовать радиус первой зоны Френеля: $R = \sqrt{\lambda^2 / 4 + L\lambda}$, где L — расстояние, пройденное волной от источника до приемника. Вертикальная разрешающая способность для прямой волны обоих типов ограничивается шагом между пунктами приема $X_{пп}$.

Изучение скоростного разреза околоскважинного пространства по данным акустического каротажа, выполняемого с помощью многоэлементного зонда, весьма обширно представлено в литературе [11–16]. В рамках выполнения скважинного профилирования ОГТ возможна новая в методическом отноше-

нии реализация процедуры скоростного анализа.

Применение многоканальной установки позволяет: во-первых, уменьшить погрешность определения скорости за счет статистического эффекта; во-вторых, выбрать те участки записи, где интерференция разных типов волн минимальна. Скорости определяются по разности времен прихода на два соседних датчика. При использовании 24-х канальной гидрофонной косы за два прохода на каждом интервале скорость определяется 48 раз. На ближних удалениях интерференция волновой картины наиболее сильно осложняет выделение первых вступлений, поэтому часть каналов с удалениями меньше 5 м не используется.

При многократном измерении одной величины погрешность результата измерений с надежностью 0,95 составляет [17]:

$$\varepsilon = \pm \frac{t_{\alpha n} s_n}{\sqrt{n}}$$

где s_n — среднеквадратическое отклонение измеренных величин, а $t_{\alpha n}$ — табличное значение, равное 2,05 при $n = 40$ и 2,09 при $n = 20$. Таким образом, погрешность измерений равна $0,32s_n$ при $n = 40$ (два прохода — правый и левый фланги) и $0,47s_n$ при $n = 20$ (один проход). На рис. 3 приведены графики рассчитанной относительной погрешности скоростей P- и St-волн при измерении за один проход.

Получение сеймотрассы отраженных волн

Для геологической привязки получаемых значений скоростей распространения изучаемых волн необходимо получение трассы отраженных волн, которая является аналогом трассы коридорного суммирования в методике ВСП-ОГТ.

Общим принципом получения трассы отраженных волн как для P-, так и для St-волн является выделение поля

отраженных волн и суммирование полезного сигнала за счет многоканальности и многократной записи. Кратность суммирования составляет до 120 для продольных волн и более 400 для гидроволн.

Для выделения поля продольных отраженных волн больше всего подходит участок записи на дальних каналах, где отражения регистрируются раньше прямой гидроволны (рис. 4, а).

Прямая продольная и гидроволна подавляются с помощью f_k -фильтрации, кроме того, вводится кинематическая поправка, позволяющая расположить отражения от одного слоя на одном времени (рис. 4, б). Данная процедура позволяет просуммировать отражения в пределах одной сейсмограммы. После чего строится разрез вдоль ствола скважины, первоначально без учета перемещения зонда. Скорости определяются по первым вступлениям и позволяют внести поправку за положение зонда.

В итоге строится разрез отраженных волн вдоль скважины с учетом смеще-

ния зонда (рис. 5, а). По этому разрезу можно выполнить коридорное суммирование и получить трассу отраженной волны (рис. 5, б). Глубинная привязка осуществляется по первым вступлениям прямой волны.

Аналогично, трассу сейсмического отклика можно получить и для гидроволны. Отличия будут заключаться: в природе волн, реагирующих на изменение модуля сдвига; в более низкой частоте сканирующего сигнала; в значениях кинематических поправок, вычисляемых на основании скорости гидроволны.

Трассу отраженных волн можно рассматривать как результат свертки импульса падающей волны с разрезом акустического импеданса вдоль скважины. Таким образом, ее можно использовать для сейсмогеологического расчленения разреза. При наличии литологической колонки по скважине отражения привязываются к геологическому разрезу. Разрешающая способность отраженной волны зависит от длины волны и составляет $1/4\lambda - 1/8\lambda$.

Численные характеристики составляющих волнового поля Numerical characteristics of wavefield constituents

	Р-волна прямая	Р-волна отраженная	Гидроволна прямая	Гидроволна отраженная
Скорость, м/с	1300 – 4000	1300 – 4000	400 – 1400	400 – 1400
Частота, Гц	2500 – 4000	500 – 2500	150 – 250	130 – 200
Длина волны, м	0,5 – 1,5	0,7 – 3	2 – 6	4 – 7
Удаление от оси скважины, R	$R = \sqrt{\lambda^2 / 4 + L\lambda}$	$R = \sqrt{\lambda^2 / 4 + L\lambda}$	$\lambda/2$	$\lambda/2$
Удаление от оси скважины, м	1,5 – 3	4 – 9	1 – 3	1 – 4
Результат обработки	кривая V_p	разрез Р-волн	кривая V_{st}	разрез St-волн
Погрешность определения скорости	2 – 5%	–	2 – 6%	–
Вертикальная разрешающая способность, δ	шаг $X_{пп}$	$1/4 - 1/8\lambda$	шаг $X_{пп}$	$1/4 - 1/8\lambda$
Вертикальная разрешающая способность, м	1	0,25 – 0,5	1	1 – 1,5

Скважинный электроискровой источник генерирует начальный сигнал с верхней частотой спектра 4,5 кГц. В обводненном терригенном разрезе частота регистрируемой прямой продольной волны составляет 2500–4000 Гц, отраженной – 1000–2500 Гц.

Спектр частот регистрируемой гидроволны относительно стабилен как для прямых, так и для отраженных волн, и составляет 120–180 Гц.

Численные характеристики параметров регистрируемых волн приведены в сводной таблице. Разрешающая способность отраженной волны продольных волн составляет 0,25–0,5 м, а гидроволны – 1–1,5 м.

Если рассматривать предложенную методику в качестве альтернативы традиционному акустическому каротажу, то необходимо учитывать, что линейные размеры существенно превышают подавляющее большинство зондов, выпускаемых серийно. Это приводит к увеличению объема захватываемого пространства и позволяет практически полностью избежать влияния скважины на вмещающий массив как для прямого измерения скорости, так и при получении трасс отраженных волн. При этом разрешающая способность измерения скорости равна шагу системы расстановки,

которая, как правило, при подобных исследованиях равна 1 м, реже 0,5 м и не может конкурировать с традиционными зондами акустического каротажа, шаг съемки которых существенно меньше.

Выводы

Совместная реализация процедур скоростного анализа волн продольного типа и гидроволн вместе с построением трасс отраженных волн приводит к получению информации, аналогичной сейсмическим каротажным исследованиям. При этом надо отметить, что линейные размеры системы расстановки позволяют практически полностью избежать влияния скважины на измеряемые физико-механические характеристики. С другой стороны, разрешающая способность предложенной технологии уступает традиционному акустическому каротажу. Результаты такого рода многоканального каротажа, проводимого в рамках скважинного профилирования ОГТ, могут быть использованы при интерпретации данных наземной сейморазведки ОГТ (рис. 6) и получения петрофизической характеристики околоскважинного пространства. В случае наличия плотностной характеристики по разрезу возможно получение оценки физико-механических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Санфиоров И. А., Чугаев А. В., Бабкин А. И., Лисин В. П., Бобров В. Ю. Горнотехнические приложения малоуглубинной скважинной сейморазведки // Геофизика. – 2018. – № 5. – С. 24–30.
2. Чугаев А. В., Пугин А. В., Лисин В. П., Тараканов С. А. Особенности формирования волнового поля при изучении ледопородного ограждения шахтного ствола с помощью скважинных сейсмических методов / Тезисы докладов 15-й международной научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика–2019». – Геленджик, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901721.
3. Санфиоров И. А., Ярославцев А. Г., Бабкин А. И., Чугаев А. В. Патент РФ № 2706910 29.03.2019. Способ контроля толщины ледопородного ограждения при строительстве шахтных стволов. – 2019. Бюл. №33.
4. Ярославцев А. Г. Отражение ледопородного ограждения стволов в сейсмическом волновом поле // Горное эхо. – 2019. – № 3. – С. 52–57. DOI: 10.7242/echo.2019.3.15.

5. Lamb H. On the velocity of sound in a tube, as affected by the elasticity of the walls // *Memoirs and Proceedings of the Manchester literary and Philosophical Society*. 1988. Vol. 42. No 9. Pp. 1–16.

6. Henriët J. P., Schittekat J., Heldens P. Borehole seismic profiling and tube wave applications in a dam site investigation // *Geophysical Prospecting*, 1983. No. 31, pp. 72–86.

7. Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. — М.: Недра, 1986. — 261 с.

8. Владов М.Л., Калинин А.В., Шалаева Н.В. Использование гидроволн при восстановлении скоростного разреза сдвиговых волн по данным скважинной томографии // *Разведка и охрана недр*. — 2002. — № 1. — С. 46–48.

9. Ошкин А.Н., Хуснуллина Г.Ф. Возможности и перспективы сейсмоакустических исследований скважин // *Технологии сейсморазведки*. — 2015. — № 1. — С. 92–98.

10. Бураго Н.А., Ибатов А.С., Крауклис П.В., Крауклис Л.А. Дисперсия трубной и лэмбовской волн, регистрируемых при акустическом каротаже / Интерференционные волны в слоистых средах. — Л.: Наука, 1980. С. 19–27.

11. Горгун В.А., Утемов Э.В., Косарев В.Е. Дисперсионный метод определения скоростей по данным многоэлементного волнового акустического каротажа // *Георесурсы*. — 2011. — № 6 (42). — С. 44–47.


12. Ахметсафин Р.Д., Ахметсафина Р.З. Вычисление дисперсионного сембланта для волнового акустического каротажа // *Геофизические исследования*. — 2017. — Т. 18. — № 4. — С. 57–70.

13. Пименова А.В., Белов С.В., Шумилов А.В. Селекция волн при акустическом каротаже на основе преобразования Радона // *Геофизика*. — 2015. — № 5. — С. 19–22.

14. Shi W., Wang X., Shi Y., Feng A., Zou Y., Young S. Application of dipole array acoustic logging in the evaluation of shale gas reservoirs // *Energies*, 2019. Vol. 12. No 20. Article 3882. DOI: 10.3390/en12203882.

15. Assous S., Elkington P. Shearlets and sparse representation for microresistivity borehole image inpainting // *Geophysics*. 2018. Vol. 83. Pp. 17–25. DOI: 10.1190/geo2017-0279.1.

16. Li C., Yue W. High-resolution radon transforms for improved dipole acoustic imaging // *Geophysical Prospecting*. 2017. Vol. 65. Vol. 2. Pp. 467–484.

17. Алексеев Р.И., Коровин Ю.И. Руководство по вычислению и обработке результатов количественного анализа. — М.: Атомиздат, 1972. — 72 с. 

REFERENCES

1. Sanfirov I.A., Chugaev A.V., Babkin A. I., Lisin V.P., Bobrov V.Y. Minetechnical applications of seismic in shallow wells. *Russian Geophysics*. 2018, no 5, pp. 24–30. [In Russ].

2. Chugaev A.V., Pugin A.V., Lisin V.P., Tarakanov S.A. Particular features of wave-field forming in the process of ice wall fencing study at the mine shaft by the borehole seismic methods. *Tezisy dokladov 15-y mezhduнародной nauchno-prakticheskoy konferentsii «Inzhenernaya i rudnaya geofizika–2019»* [Conf. proc., Engineering and Mining Geophysics, 15th Conference and Exhibition, April 2019]. Gelendzhik, 2019. [In Russ]. DOI: 10.3997/2214-4609.201901721.

3. Sanfirov I.A., Yaroslavtsev A. G., Babkin A. I., Chugaev A. V. *Patent RU 2706910 29.03.2019*.

4. Yaroslavtsev A. G. Representation of an icewall fence of mine shafts in a seismic wavefield *Gornoe ekho*. 2019, no 3, pp. 52–57. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2019.3.15.

5. Lamb H. On the velocity of sound in a tube, as affected by the elasticity of the walls. *Memoirs and Proceedings of the Manchester literary and Philosophical Society*. 1988. Vol. 42. No 9. Pp. 1–16.

6. Henriët J. P., Schittekat J., Heldens P. Borehole seismic profiling and tube wave applications in a dam site investigation. *Geophysical Prospecting*, 1983. No. 31, pp. 72–86.

7. White J. E. *Vozbuzhdenie i rasprostranenie seysmicheskikh voln* [Excitation and propagation of seismic waves], Moscow, Nedra, 1986, 261 p.
8. Vladov M. L., Kalinin A. V., Shalaeva N. V. The use of tube waves in the restoration of a velocity section of shear waves according to borehole tomography. *Prospect and protection of mineral resources*. 2002, no 1, pp. 46 – 48. [In Russ].
9. Oshkin A., Khusnullina G. Possibilities and perspectives of seismoacoustic measurements of wells. *Tekhnologii seismorazvedki*, 2015, no 1, pp. 92 – 98. [In Russ].
10. Burago N. A., Ibatov A. S., Krauklis P. V., Krauklis L. A. Dispersion of tube and lamb waves recorded in acoustic logging. *Interferentsionnye volny v sloistykh sredakh* [Interference waves in layered media], Leningrad, Nauka, 1980, pp. 19 – 27.
11. Gorgun V. A., Utemov E. V., Kosarev V. E. The dispersion method for determining the interval velocity according to a multielement wave acoustic logging. *Georesursy*. 2011, no 6 (42), pp. 44 – 47. [In Russ].
12. Akhmetzafin R. D., Akhmetzafina R. Z. Dispersive semblance processing of borehole acoustic array data. *Geofizicheskie issledovaniya*. 2017. vol. 18, no 4, pp. 57 – 70. [In Russ].
13. Pimenova A. V., Belov S. V., Shumilov A. V. Using radon transform for wave selection in acoustic logging. *Russian Geophysics*. 2015, no 5, pp. 19 – 22. [In Russ].
14. Shi W., Wang X., Shi Y., Feng A., Zou Y., Young S. Application of dipole array acoustic logging in the evaluation of shale gas reservoirs. *Energies*, 2019. Vol. 12. No 20. Article 3882. DOI: 10.3390/en12203882.
15. Assous S., Elkington P. Shearlets and sparse representation for microresistivity borehole image inpainting. *Geophysics*. 2018. Vol. 83. Pp. 17 – 25. DOI: 10.1190/geo2017-0279.1
16. Li C., Yue W. High-resolution radon transforms for improved dipole acoustic imaging. *Geophysical Prospecting*. 2017. Vol. 65. Vol. 2. Pp. 467 – 484.
17. Alekseev R. I., Korovin Yu. I. *Rukovodstvo po vychisleniyu i obrabotke rezul'tatov kolichestvennogo analiza* [Guidelines for calculating and processing quantitative analysis results]. Moscow, Atomizdat, 1972, 72 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чугаев Александр Валентинович¹ — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник, e-mail: chugaev@mi-perm.ru,
Санфирова Игорь Александрович¹ — д-р техн. наук, профессор,
директор Горного института,
Томилов Константин Юрьевич¹ — инженер,
¹ Горный институт Уральского отделения РАН.
Для контактов: Чугаев А.В., e-mail: chugaev@mi-perm.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A. V. Chugaev¹, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher
I. A. Sanfirov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director,
K. Yu. Tomilov¹, Engineer,
¹ Mining Institute of Ural Branch, Russian Academy of Sciences,
614007, Perm, Russia.
Corresponding author: A. V. Chugaev, e-mail: chugaev@mi-perm.ru.

Получена редакцией 28.04.2020; получена после рецензии 11.08.2020; принята к печати 10.10.2020.
Received by the editors 28.04.2020; received after the review 11.08.2020; accepted for printing 10.10.2020.

