Геофизические технологии, № 3, 2018, с. 48–58 www.rjgt.ru

doi: 10.18303/2619–1563–2018–3–5 УДК 550.34

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДИСПЕРСИОННЫХ КРИВЫХ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННО-ЧАСТОТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

А.В. Яблоков, А.С. Сердюков

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Новосибирск, Красный проспект, 54, Россия,
Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия,
e-mail: YablokovAV@ipgg.sbras.ru, SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru

В работе рассматривается метод многоканального анализа поверхностных волн. Предлагается автоматизированный способ выделения поверхностных волн на основе временно-частотного представления сейсмограмм и их дальнейшего пространственного спектрального анализа. Такой подход является помехоустойчивым и обеспечивает полностью автоматическое извлечение плавных и реалистичных дисперсионных кривых, что приводит к более достоверному определению скоростных разрезов поперечных сейсмических волн методом многоканального анализа поверхностных волн. В статье приводятся результаты тестирования разработанного подхода с использованием зашумленных синтетических и реальных сейсмических данных.

Сейсморазведка, поверхностные волны, спектральный анализ, верхняя часть разреза

METHOD OF AUTOMATED EXTRACTING OF DISPERSION CURVES BASED ON TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION OF SEISMIC DATAv

A.V. Yablokov, A.S. Serdyukov

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Koptug Avenue, 3, Novosibirsk, 630090, Russia,
Chinakal Institute of Mining SB RAS, Krasny Avenue, 54, Novosibirsk, 630091, Russia,
Novosibirsk State University, Pirogova str., 2, Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: *YablokovAV@ipgg.sbras.ru, SerdyukovAS@ipgg.sbras.ru*

The paper discusses the method of multichannel analysis of surface waves. We propose an automated method of surface waves extraction, based on the time-frequency representation of seismograms and their subsequent spatial spectral analysis. This approach is robust for the extraction of smooth and realistic dispersion curves in automatic mode. This provides a more reliable assessment of high-velocity sections of shear waves by the method of multichannel analysis of surface waves. The article presents the results of testing of the developed approach with using noisy synthetic and real seismic data.

Seismic, surface waves, spectral analysis, near-surface section

© А.В. Яблоков, А.С. Сердюков, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Метод многоканального анализа поверхностных волн (MASW) [Park et al., 1999] широко применяется в течение двух последних десятилетий в области инженерно-геотехнических изысканий [Socco et al., 2010; Foti et al., 2014]. В разведочной сейсморазведке анализ поверхностных волн используется для расчета статических поправок объемных волн [Mari, 1984; Roohollah, 2013].

Для записей данных обычно используются маломощные импульсные источники (кувалда, падающий груз, сейсморужье и др.) и линейные системы наблюдений [Schwenk et al., 2016]. Существуют исследования, направленные на регистрацию и обработку данных от пассивных источников (техногенный шум, приливные волны и др.), как для линейных, так и для площадных систем наблюдений [Cheng et al., 2015].

Фундаментальная мода поверхностной волны извлекается путем пикирования максимумов амплитуд на f-k спектре сейсмограммы. Присутствие помех (шумов и других типов волн) приводит к появлению локальных спектральных максимумов, не связанных с истинной дисперсионной кривой. Из-за короткой длины приемной линии (на практике длина расстановки ограничена особенностями рельефа и степенью горизонтальной неоднородности исследуемого объекта) проявляется эффект размывания спектра (при вычислении волновых чисел), что приводит к сдвигу и/или слиянию соседних спектральных максимумов. Поэтому на практике при обработке методом MASW пикирование дисперсионных кривых выполняется вручную. Интерпретатор должен учитывать искажения спектра и выделять максимально реалистичный тренд. Эта особенность процесса обработки поверхностных волн ограничивает применимость метода в области разведочной сейсморазведки, где требуется обработка больших объемов данных.

Заключительный этап метода MASW состоит в решении обратной задачи подбора 1D-модели скорости поперечной волны по наблюдаемым дисперсионным кривым фазовой скорости поверхностной волны. Для восстановления горизонтальных неоднородностей исследуемой толщи грунтов, которые необходимы для многих геотехнических приложений, набор 1D-моделей *Vs* интерполируется в псевдо-2D (3D) разрез [Boiero, Socco, 2010; Mi et al., 2017].

Для уменьшения влияния помех при f-k анализе поверхностные волны часто выделяются непосредственно на сейсмограмме, где они образуют низкоскоростную треугольную область высоких энергий с вершиной в источнике и расширяющуюся по времени и расстоянию источник–приемник. Такая процедура позволяет избавиться от быстрых волн первых вступлений, но не удаляет другие типы более сложных волн (отраженные, обратно-рассеянные, интерференционные) и требует ручной предобработки.

Нами предлагается автоматизированный способ выделения поверхностных волн с использованием частотно-временного представления сейсмограмм. Такой подход обеспечивает извлечение плавных и реалистичных дисперсионных кривых в автоматическом режиме. Предлагаемый алгоритм состоит из трех этапов. На первом этапе с помощью преобразования Стоквелла (S-преобразования) [Stockwell et al., 1996] рассчитывается частотно-временное распределение для каждой сейсмической трассы. На втором этапе выполняется пространственное преобразование Фурье вдоль спектральных максимумов поверхностной волны, которые в этой области представляют собой

прямые наклонные линии. На третьем этапе строится *f-k* изображение и пикируется максимум энергии на каждой частоте. В статье приводятся примеры апробации на синтетических моделях и реальных полевых данных.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для обработки сейсмических данных широко используется непрерывное вейвлет-преобразование (CWT) [Smith et al., 2008], которое в отличие от стандартного оконного преобразования Фурье (STFT) не требует предварительного выбора длины окна и имеет переменное частотно-временное разрешение. Преобразование Стоквелла (S-преобразование) обеспечивает частотно-временное разрешение сигнала схожее с CWT, но в отличие от него сохраняет прямую связь со спектром Фурье. В работе [Kulesh et al., 2005] показана возможность оценки фазовых и групповых скоростей поверхностных волн на основе CWT. Аналогичный метод, основанный на S-преобразовании и позволяющий независимо друг от друга оценивать фазовые и групповые скорости поверхностных волн, был предложен [Roohollah, 2013].

Обобщенное S-преобразование сигнала *d(t)* определяется выражением

$$S\left[d(t)\right](\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} d(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2\sigma^2}} e^{-i2\pi ft} dt, \quad (1)$$

где σ – масштабирующий параметр, контролирующий ширину вейвлета, f – частота, τ и t – временные переменные.

Рассмотрим два сигнала $d_1(t)$ и $d_2(t)$, зарегистрированных парой приемников, расположенных на одной линии с источником. В случае, если сигнал состоит только из одной моды поверхностной волны, S-преобразование второго сигнала (записи второго приемника) связано с S-преобразованием первого сигнала [Roohollah, 2013]

$$S\left[d_2(t)\right](\tau, f) = e^{-2\pi k(f)l} e^{-\lambda(f)l} S\left[d_1(t)\right](\tau - k'(f)l, f), \quad (2)$$

где $k(f)$ – волновое число, $\lambda(f)$ – частотно-зависимый параметр затухания и l – расстояние между приемниками. На основе модели распространения поверхностных волн между одной парой приемников (2), возможно определить фазовую $\upsilon(f) = f/k(f)$ и групповую $u(f) = 1/k'(f)$ скорости. Как правило, зависимость волнового числа от частоты имеет линейный характер, начиная с некоторой частоты, т. е. $k(f) = k_0 + \alpha f$. Групповая скорость в этом случае становится постоянной $U(f) = 1/\alpha$, как в однородной среде. Если при этом k_0 не нулевое, то фазовая скорость не постоянна – она характеризует зависимость скорости S-волны от глубины.

Определение фазовых скоростей поверхностных волн более эффективно при использовании большего числа приемников. Применение *f-k* анализа позволяет разделить различные моды

поверхностной волны и оценить их фазовые скорости независимо. В данной работе мы предлагаем метод, позволяющий использовать модель распространения поверхностных волн на основе S-преобразования (2) при анализе многоканальных данных.

Рассмотрим нестационарный поверхностно-волновой пакет, распространяющийся вдоль линейной системы наблюдения. Применим S-преобразование (1) к каждой трассе полученной сейсмограммы $d(x,t)$. Так мы получим трехмерное распределение по времени, расстоянию и частоте. Рассмотрим сечение полученного трехмерного распределения на фиксированной частоте

$$\hat{d}_f(x,t) = S\left[d(x,t)\right](\tau, f, x). \tag{3}$$

Так как методика MASW предполагает однородное горизонтально-слоистое строение среды, будем считать, что групповая скорость поверхностных волн не зависит от расстояния x. При анализе псевдосейсмограмм на фиксированной частоте годограф поверхностно-волнового пакета образует прямую наклонную линию, выходящую из точки источника. Будем считать, что источник генерирует импульс в начале координат (как по времени, так и по пространству). Для каждой частоты f и групповой скорости u введем одномерную комплекснозначную функцию пространственной горизонтальной координаты

$$\hat{d}_{f,u}(x) = \hat{d}_f\left(x, \frac{x}{u}\right). \tag{4}$$

Для получения волнового числа к функции (4) применим одномерное преобразование Фурье по пространственной переменной

$$\Omega(u, f, k) = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{d}_{f,u}(x) e^{-2\pi i x k} dx. \tag{5}$$

Для получения из 3-мерного распределения (5) традиционного *f-k* изображения необходимо выполнить поиск максимумов амплитуд функции для серии групповых скоростей, покрывающих область возможных наклонов пакета поверхностной волны:

$$D(f, k) = \max_u \Omega(u, f, k). \tag{6}$$

Вместо стандартных *f-k* или *f-v* изображений, полученных с помощью традиционного двумерного преобразования Фурье, для извлечения дисперсионной кривой мы предлагаем анализировать распределение (6). Локализация по времени на каждой частоте повышает соотношение сигнал/помеха, поскольку исключает шум от помех или от других волн, которые не попадают в эффективную ширину соответствующего вейвлета.

Следующим этапом предлагаемого подхода является пикирование дисперсионной кривой путем поиска максимумов амплитуд на каждой частоте

$$k(f) = \underset{k}{\operatorname{argmax}} D(f,k). \tag{7}$$

Как показывают наши эксперименты по обработке реальных данных, дисперсионная кривая (7) имеет более гладкий характер по сравнению с кривой, получаемой с помощью стандартного *f-k* преобразования. Заметим, что расчетные (теоретические) дисперсионные кривые в горизонтально-слоистых средах всегда гладкие. Этот факт свидетельствует об эффективности предлагаемого подхода. Далее в статье приводятся примеры применения предлагаемого алгоритма извлечения дисперсионных кривых на синтетических и реальных данных.

ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДА НА ЗАШУМЛЕННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Для демонстрации фильтрационных свойств предлагаемого метода рассмотрим горизонтально-слоистую модель среды с неоднородными включениями (рис. 1, *а-в*). Неоднородности добавлялись случайным образом с увеличением их размера по мере увеличения глубины, при этом сохранялась средняя скорость в каждом слое.

Полное упругое волновое поле рассчитывалось с помощью конечно-разностной схемы на сдвинутых сетках (Virieux, 1986). Источник – вертикально направленный удар с формой импульса Риккера с f_d=30 Гц. Сейсмограмма вертикальной компоненты смещений представлена на рис. 1, *г*. Сейсмограмма состоит из 101 трассы с шагом между приемниками – 2 м. К данным был добавлен нормально распределенный шум Гаусса (рис. 1, *д*).

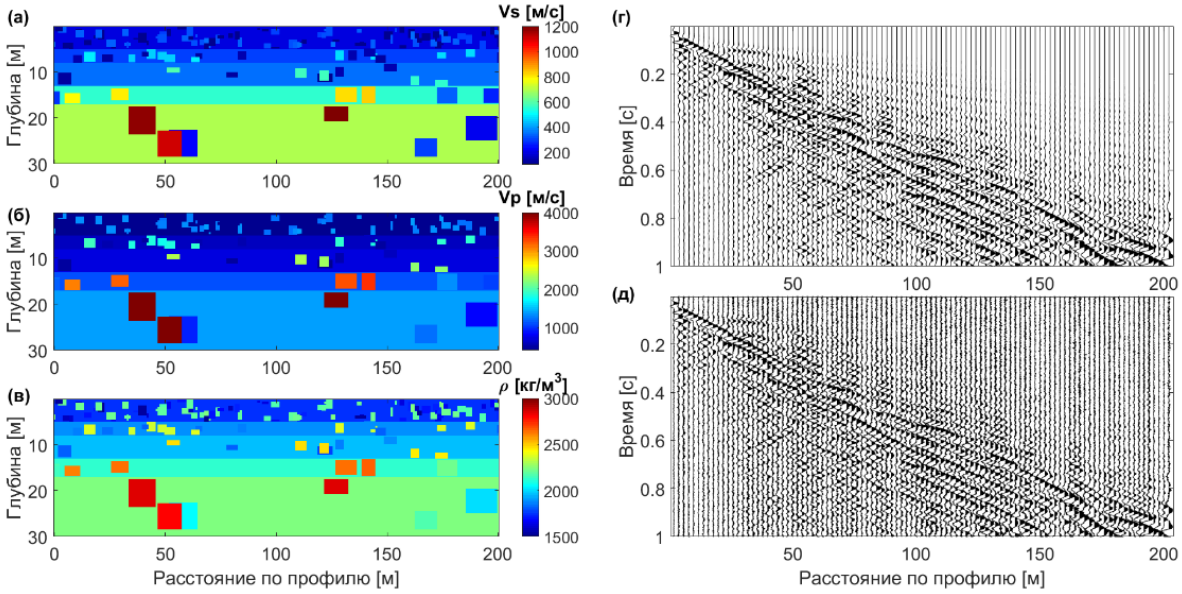

Рис. 1. Модель среды и данные для синтетического теста № 1: *а* – модель скоростей поперечной волны (м/с); *б* – модель скоростей продольной волны (м/с); *в* – модель плотности (кг/м^3); *г* – сейсмограмма вертикальной компоненты смещения; *д* – сейсмограмма с добавлением нормально-распределенного шума Гаусса (SNR = 13 dB)

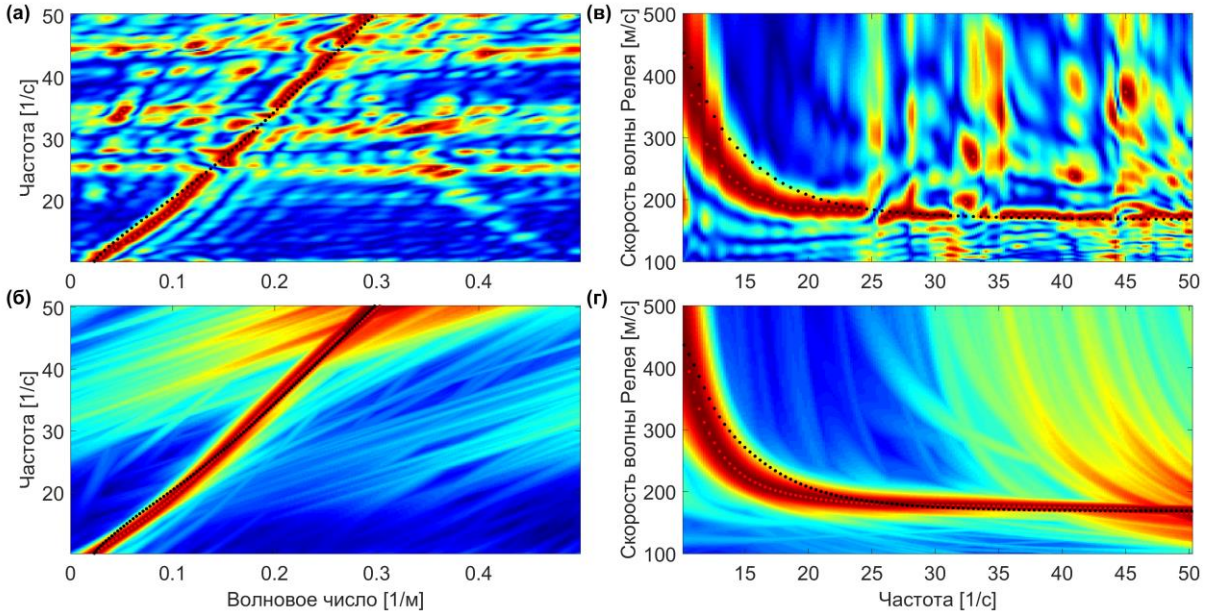

Рис. 2. Спектральные образы сейсмограммы с ПВ 0 м: *а* – *f-k* спектр, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *б* – *f-k* спектр, полученный с помощью S-преобразования; *в* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *г* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью S-преобразования. Черными точками нанесена аналитическая кривая, рассчитанная для среды со средними по слоям значениями упругих параметров, красными точками нанесены автоматически определенные максимумы

На рис. 2 представлены *f-k* и *v-f* изображения, полученные с помощью стандартного двумерного преобразования Фурье и предлагаемого подхода на основе S-преобразования. Значения амплитуды нормируются – приведены в долях от максимального значения на каждой частоте. Предлагаемый метод усиливает пакет поверхностных волн путем фильтрации других волн на временно-частотном распределении. В результате получается более гладкое и «чистое» спектральное изображение. При использовании стандартного подхода на спектральном изображении наблюдаются многочисленные ложные локальные максимумы, искажающие положение и амплитуды спектральных пиков, соответствующих фундаментальной моде.

Анализируя спектральные изображения (см. рис. 2), отметим, что кривая, полученная с помощью S-преобразования, находится в лучшем согласии с аналитической кривой, чем при стандартном подходе. Таким образом, предлагаемый подход позволяет автоматизировать процесс извлечения дисперсионных кривых поверхностных волн, как в случае простой горизонтально-слоистой среды, так и при наличии неоднородностей, которые привносят сложный шум в спектр и делают неоднозначным процесс пикирования.

ОБРАБОТКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Полевые работы выполнялись по системе непрерывного профилирования для метода МПВ вблизи с. Бурмистрово, Новосибирская область. Вертикальные 10-герцовые сейсмоприемники устанавливались

с шагом 5 м. Длина линии наблюдения 455 м. Источник – падающий груз массой 100 кг перемещался вдоль профиля с шагом 20 м. Пример сейсмограммы представлен на рис. 4. Шаг по временным отсчетам – 1 мс.

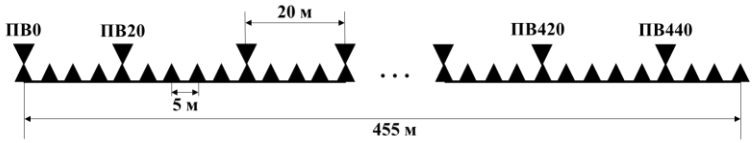

Рис. 3. Схема системы наблюдений для сейсморазведочных работ на профиле

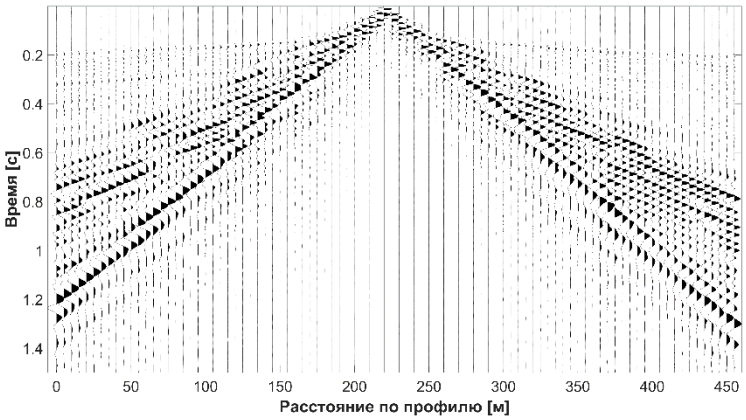

Рис. 4. Сейсмограмма вертикальной компоненты скорости смещений для пункта возбуждения с координатой 220 м

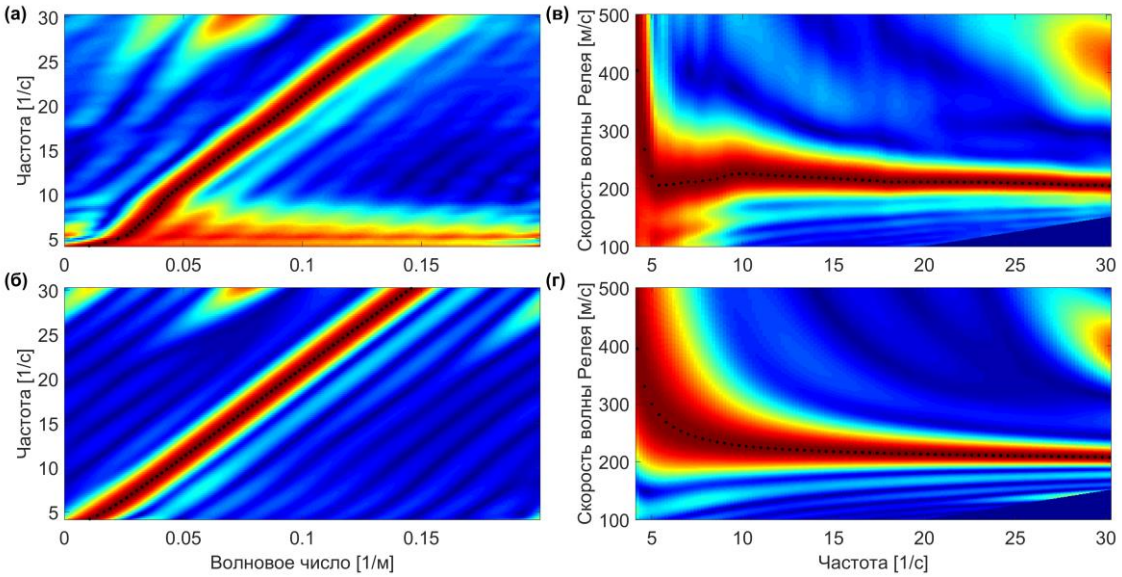

Рис. 5. Спектральные изображение сейсмограммы с ПВ 220: *а* – *f-k* спектр, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *б* – *f-k* спектр, полученный с помощью S-преобразования; *в* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью двумерного преобразования Фурье; *г* – спектр фазовых скоростей, полученный с помощью S-преобразования. Черными точками нанесены автоматически определенные дисперсионные кривые

Для построения двумерного скоростного разреза по методу MASW используется фланговая система наблюдений с источником слева, т. е. к сейсмограммам применяется прямоугольное пространственное окно со сдвигом от источника. Для сравнения двух различных подходов автоматического определения дисперсионных кривых спектры рассчитывались путем применения стандартного двумерного преобразования Фурье и с помощью предлагаемого подхода через S-преобразование. На рис. 5 представлены *f-k* и *v-f* изображения сейсмограммы с ПВ 220 м с применением пространственного окна длиной 50 м и сдвигом от источника 10 м. Все дисперсионные кривые извлекаются в автоматическом режиме и к каждой применяется эмпирическая инверсия [Foti et al., 2014] для определения начальных значений скоростей. Затем стартовые модели уточняются на основе алгоритма Оккама [Lai, 2005]. Результат для каждой инверсии привязывается к серединной точке расстановки и все одномерные модели интерполируются в двумерный разрез. На рис. 6 представлено сравнение результатов двух подходов к извлечению дисперсионных кривых, где пунктирными линиями нанесены положения границ, определенных по методу t_0'. Отметим, что разрез на рис. 6, *а* имеет более выраженную однородную горизонтально-слоистую структуру, что согласуется с имеющимися данными по этому участку.

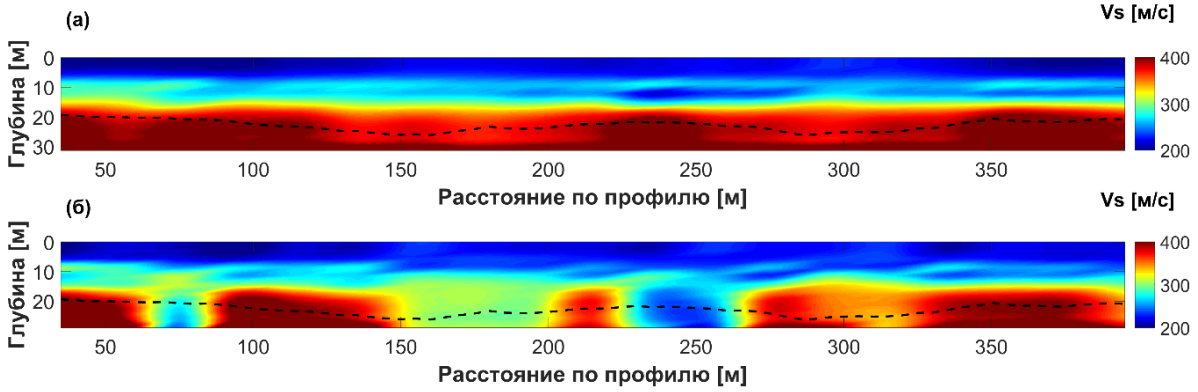

Рис. 6. Результаты решения обратной задачи (разрез скорости поперечной волны в м/с): *а* – инверсия набора кривых, полученных с помощью временно-частотного представления сейсмограмм, *б* – инверсия набора кривых, полученных стандартным преобразованием Фурье. Пунктирными линиями нанесены положения границ, полученных по методу t_0'

Глубина восстанавливаемого разреза в методе MASW прямо пропорционально зависит от длины линии наблюдения [Park et al., 2001]. Используя описанный выше алгоритм, были получены скоростные модели после применения пространственного окна длиной 200 м и сдвигом от источника 55 м (рис. 7). Разрезы, полученные на большой базе наблюдения, отличаются повышенной глубинностью, но при этом имеют худшее разрешение в верхней части (за счет затухания высоких частот). Отметим, что при увеличении базы наблюдения снижается эффект спектрального размытия, которому подвержено стандартное преобразование Фурье, но тем не менее разрез, полученный предлагаемой методикой является более выдержанным.

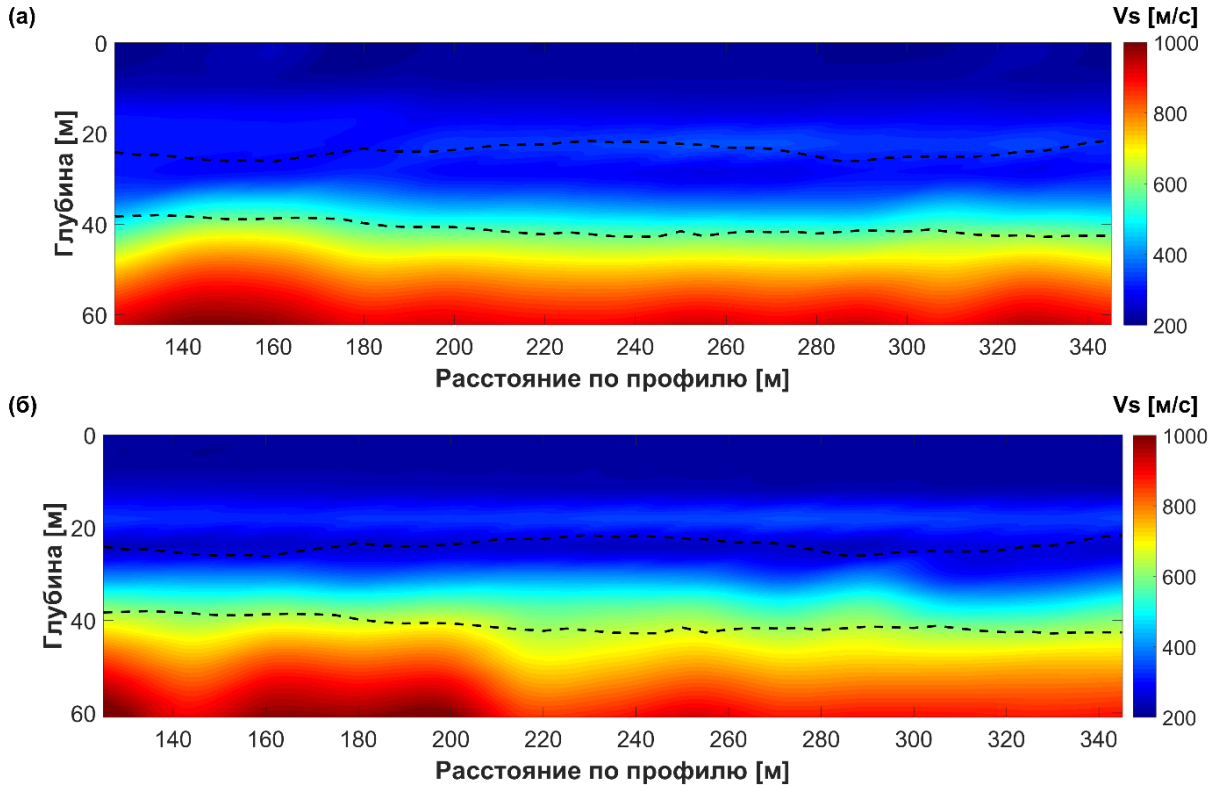

Рис. 7. Результаты решения обратной задачи (разрез скорости поперечной волны в м/с): *а* – инверсия набора кривых, полученных с помощью временно-частотного представления сейсмограмм, *б* – инверсия набора кривых, полученных стандартным преобразованием Фурье. Пунктирными линиями нанесены положения границ, полученных по методу t_0'

ВЫВОДЫ

Новый метод спектрального анализа поверхностных волн на основе S-преобразования более помехоустойчив по сравнению со стандартным двумерным преобразованием Фурье. При последующем автоматическом пикировании извлекаются более точные и гладкие дисперсионные кривые поверхностных волн, что имеет решающее значение для метода многоканального анализа поверхностных волн.

Разработанная методика была протестирована и апробирована на реальных данных. Преимуществами предлагаемой реализации метода MASW являются: автоматизация процедуры обработки данных поверхностных волн – от этапа спектрального анализа и до определения скоростного разреза, высокая надежность получаемых результатов за счет извлечения точных и гладких дисперсионных кривых и, как следствие, достоверность восстановленных скоростных разрезов при изучении слоистых сред с гладкими горизонтальными неоднородностями.

Эффективность быстрых алгоритмов инверсии в комплексе с предлагаемым методом автоматического извлечения дисперсионных кривых позволяет реализовать метод восстановления сейсмического разреза на основе поверхностных волн в задачах сейсморазведки на месторождениях или в качестве экспресс-метода для мониторинга сейсмических параметров среды в режиме реального времени для решения геотехнических задач.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта № МК-6451.2018.5.

ЛИТЕРАТУРА

Boiero D., Socco L.V. Retrieving lateral variations from surface wave dispersion curves // Geophysical prospecting. – 2010. – Vol. 58, № 6. – P. 977–996.

Cheng F., Xia J., Xu Y., Xu Z., Pan Y. A new passive seismic method based on seismic interferometry and multichannel analysis of surface waves // Journal of applied geophysics. – 2015. – № 117. – P. 126–135.

Foti S., Lai C.G., Rix G.J., Strobbia C. Surface wave methods for near-surface site characterization. – CRC Press, 2014. – 487 p.

Kulesh M., Holschneider M., Diallo M.S., Xie Q., Scherbaum F. Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms // Pure and applied geophysics. – 2005. – Vol. 162, № 5. – P. 843–855.

Lai C.G. Surface waves in dissipative media: Forward and inverse modelling // Surface waves in geomechanics: direct and inverse modelling for soils and rocks. – Vienna: Springer, 2005. – P. 73–163.

Mari J.L. Estimation of static corrections for shear-wave profiling using the dispersion properties of Love waves // Geophysics. – 1984. – Vol. 49, № 8. – P. 1169–1179.

Mi B., Xia J., Shen C., Wang L., Hu Y., Cheng F. Horizontal resolution of multichannel analysis of surface waves // Geophysics. – 2017. – Vol. 82, № 3. – P. EN51–EN66.

Park C.B., Miller R.D., Xia J. Multichannel analysis of surface waves // Geophysics. – 1999. – Vol. 64, № 3. – P. 800–808.

Park C. B., Miller R. D., Xia J. Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW) // Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems 2001. – Kansas: SEG, 2001. – P. SSM4.

Roohollah A. Surface wave analysis and its application to the calculation of converted wave static corrections: PhD thesis. – Calgary, 2013. – 112 p.

Schwenk J.T., Sloan S.D., Ivanov J., Miller R.D. Surface-wave methods for anomaly detection // Geophysics. – 2016. – Vol. 81, № 4. – P. 29–42.

Smith M., Perry G., Stein J., Bertrand A., Yu G. Extending seismic bandwidth using the continuous wavelet transform // First break. – 2008. – Vol. 26, № 6. – P. 97–102.

Socco L.V., Foti S., Boiero D. Surface-wave analysis for building near-surface velocity models–Established approaches and new perspectives // Geophysics. – 2010. – Vol. 75, № 5. – P. 75A83–75A102.

Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P. Localization of the complex spectrum: the S transform // IEEE transactions on signal processing. – 1996. – Vol. 44, № 4. – P. 998–1001.

Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // Geophysics. – 1986. – Vol. 51, № 4. – P. 889–901.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЯБЛОКОВ Александр Викторович – аспирант Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета (НГУ), младший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН), младший научный сотрудник Института горного дела СО РАН (ИГД СО РАН). Область научных интересов: метод многоканального анализа поверхностных волн в горизонтально-неоднородных средах, спектральные преобразования.

СЕРДЮКОВ Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики Физического факультета НГУ, старший научный сотрудник ИНГГ СО РАН, научный сотрудник ИГД СО РАН. Область научных интересов: адаптивные методы частотно-временной и пространственно-временной спектральной фильтрации сейсмических сигналов.