

Подавление поверхностных волн в данных сейсморазведки на основе поиска главных компонент волнового поля в частотно-временной области

А. В. Азаров^{1,2}, А. С. Сердюков^{1,2}, А. В. Яблоков^{1,2}*

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

² Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Аннотация. Подавление поверхностно-волновых помех является необходимым этапом обработки данных наземной сейсморазведки. Традиционные методы, такие как одноканальная полосовая фильтрация и многоканальная FK фильтрация зачастую не позволяют отделить полезный сигнал от помех. Предлагаемый метод подавления поверхностных волн на основе анализа главных компонент волнового поля в частотно-временной области показывает лучшие результаты. В основе метода модель распространения поверхностных волн в горизонтально-слоистых средах, однако были проведены численные эксперименты, демонстрирующие применимость метода в горизонтально-неоднородных трехмерных средах. Разработан и зарегистрирован программный пакет «PF Seism» реализующий предложенный метод подавления поверхностных волн.

Ключевые слова: подавление поверхностных волн, метод главных компонент, частотно-временной анализ

Suppression of surface waves in seismic data based on the search for the main components of the wave field in the frequency-time domain

A.V. Azarov^{1,2}, A. S. Serdyukov^{1,2}, A.V. Yablokov^{1,2}*

¹ Institute of Petroleum Geology and Geophysics A.A. Trofimuk SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Institute of Mining N.A.Chinakala SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru

Abstract. Suppression of surface wave interference is a necessary step in the processing of land seismic data. Traditional methods, such as single-channel band-pass filtering and multi-channel FK filtering, often fail to separate the desired signal from interference. The proposed method of suppressing surface waves based on the analysis of the main components of the wave field in the time-frequency domain shows the best results. The method is based on the model of surface wave propagation in horizontally layered media, however, numerical experiments were carried out demonstrating the applicability of the method in horizontally heteronode three-dimensional media. A software package "PF Seism" has been developed and registered, which implements the proposed method for suppressing surface waves.

Keywords: suppression of surface waves, principal component method, time-frequency analysis

Введение

Подавление поверхностных волн (ПВ) является одним из основных этапов предварительной обработки данных наземной сейсморазведки. В записях вертикальных смещений, которые как правило используются, ПВ представлены в ос-

новном волной Релея. Фильтрация нижних частот (ФНЧ) позволяет подавлять ПВ, в силу того, что они сконцентрированы на более низких частотах чем полезный сигнал. Такая простая однокональная полосовая фильтрация часто не позволяет разделять полезный сигнал и ПВ в силу пересечения их спектров. Подавление низкочастотных компонент отраженных волн приводит к потере качества изображения отражающих границ. Проблемой стандартной FK фильтрации, применяемой при обработки данных линейных систем наблюдения, является наложение пространственных частот (волновых чисел) из-за недостаточно частотого шага по приемникам (пространственный аляйсинг).

В работе [1] для подавления поверхностных волн было предложено применять метод главных компонент во временной области. Применение такого подхода предполагает предварительное спрямление волновых пакетов поверхностных волн на основе ручного пикирования. Заметим, что такие действия не всегда возможны и корректны из-за дисперсии ПВ. Тем не менее в [1] работе приведен пример успешного подавления ПВ и показано, что подход на основе метода главных компонент позволяет подавлять ПВ даже при наличии пространственного аляйсинга. Мы развиваем данное направление путем применения метода главных компонент в частотно-временной области. Похожий способ ранее уже предлагался нами [2]. В данной статье мы представляем разработанное программное обеспечение – пакет программ «PF Seism» и приводим примеры, демонстрирующие применимость алгоритма при подавлении ПВ, распространяющихся в трехмерных горизонтально-неоднородных средах.

Методы и материалы

Предлагаемый метод основан на применении S-преобразования (ST). ST преобразование сигнала $h(t)$ находится по формуле:

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

В ряде работ ([3],[4],[5]), рассматривающих поверхностные сейсмические волны (ПВ), используется следующая модель распространения ПВ в частотно-временной ST области:

$$S[h_2(t)](\tau, f) = e^{-2\pi k(f)l} e^{-\lambda(f)l} S[h_1(t)](\tau, f) (\tau - k'(f)l, f),$$

где $h_{1,2}(t)$ записи приемников, $u(f) = 1/k'(f)$ групповая скорость ПВ, $V_{ph}(f) = f/k$ фазовая скорость ПВ. Эта же модель используется и нами. Как показано на рис.1, предлагаемый метод основан на вычитании пакета ПВ, полученного с использованием схемы моделирования ПВ на основе поиска главных компонент в частотно-временной ST области, из исходных данных.

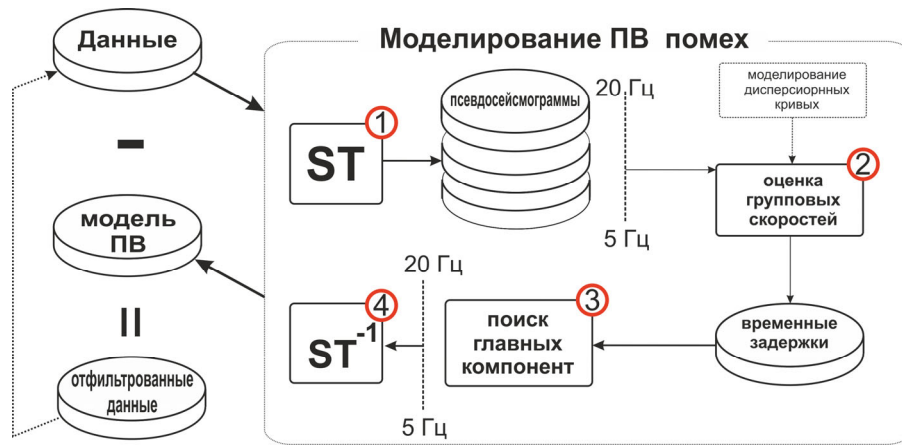


Рис. 1. Схема подавления ПВ

Способ моделирования ПВ помех включает следующие этапы (отмечены на рис.1):

1) применение ST к сейсмограммам $g(x,t)$:

$$g_f(x, \tau) = S[g(x, t)](x, \tau, f)$$

В результате получаем для набора частот совокупность комплекснозначных данных $g_f(x, \tau)$, называемых псевдосейсмограммами.

2) *Оценка групповых скоростей.* Находятся временные задержки, необходимых для спрямления волновых пакетов ПВ на каждой частоте (т.е. псевдосейсмограмме). В горизонтально-слоистой среде групповые скорости могут быть оценены путем анализа распределения амплитуд ST преобразования:

$$u_f(x) = \max_u \sum_x \left| g_f\left(\frac{x}{u}, x\right) \right|$$

В горизонтально-неоднородных средах групповые времена пробега (и соответствующие им временные поправки) могут быть рассчитаны с использованием теории распространения ПВ в горизонтально-неоднородных средах [6].

3) *Поиск главных компонент.* Внесение временных поправок (спрямление ПВ пакета) осуществляется по формуле:

$$\tilde{g}_f(\tau, x) = g_f\left(\tau - \frac{x}{u_f(x)}, x\right)$$

Далее применяется KL (*Karhunen-Loeve*) преобразование

$$\mathbf{D}_{kl} = \mathbf{R}^{-1}\Psi,$$

где \mathbf{R} матрица, состоящая из правых собственных чисел ковариационной матрицы данных $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{D}\mathbf{D}^T$, \mathbf{D} – матрица данных, $\mathbf{\Psi} = \mathbf{R}^T\mathbf{D}$.

Максимальное по модулю собственное значение λ и соответствующий ему собственный вектор r находится с помощью степенного метода:

$$r_{k+1} = \frac{\mathbf{\Gamma}r_n}{\|\mathbf{\Gamma}r_n\|} \quad \lambda_{n+1} = \frac{(r_n, \mathbf{\Gamma}r_n)}{(r_n, r_n)}$$

4) *Применение обратного S-преобразования.* После проведения фильтрации методом главных компонент, которая применяется к каждой псевдосейсмограмме в выбранном диапазоне частот (типичный диапазон частот 5-20Hz), применяется обратное ST и получается пакет ПВ во временной области:

$$\bar{g}(t, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{g}_f(\tau, x) e^{-i2\pi ft} d\tau df$$

Предложенный метод подавления ПВ был реализован в виде комплекса программ «PF Seism» (свидетельство гос. регистрации №2021665753 от 14.10.2021г.) Программный комплекс, представленный на рис. 2, состоит из двух модулей. Первый модуль содержит процедуры полосовой фильтрации, подавление ПВ методом главных компонент в ST частотно-временной области и FK фильтрацию. Блок моделирования распространения сейсмических волн включает в себя алгоритм решения уравнений упругости методом конечных разностей, расчет дисперсионных кривых скоростей ПВ и волновых форм в горизонтально-слоистых средах методом матричных пропагаторов. Блок моделирования нужен как для тестирования алгоритмов подавления ПВ, так и для расчета временных поправок, необходимых для спрямления волновых пакетов ПВ в горизонтально-неоднородных средах. Блок алгоритмов фильтрации рассчитан как на работу с данными 2D сейсморазведки на отраженных волнах, так и на обработку данных наземного микросейсмического мониторинга (МСМ).

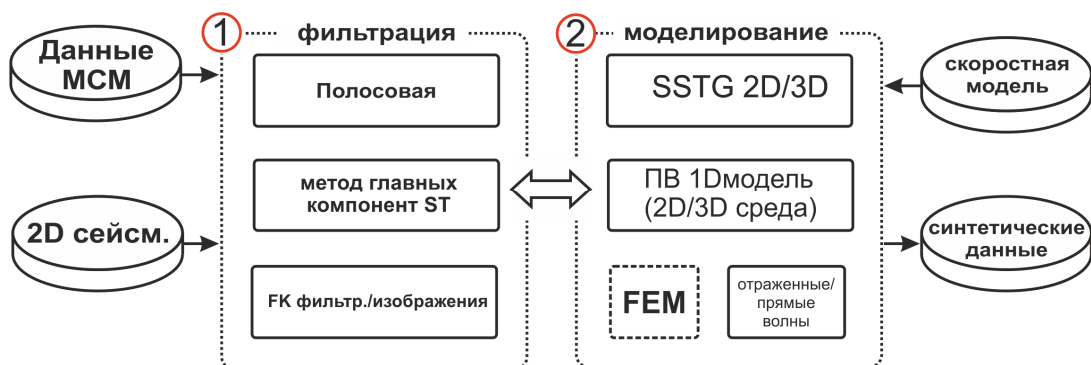


Рис. 2. Комплекс программ «PF Seism»

Результаты

Приведем результаты тестирования разработанного алгоритма подавления ПВ помех, реализованного в виде представленного программного комплекса. На рис.3 показана трехмерная скоростная модель и система наблюдения: положения источников, приемников. Синтетические сейсмограммы (рис. 4а) были получены с использованием второго модуля (моделирования) программного комплекса «PF Seism». На рис.4б показан результат фильтрации, полученный с помощью предлагаемого подхода. На рис.4в и рис.4г показаны результаты полученные с помощью стандартных способов: f-k и tau-p фильтрационных алгоритмов. Из сравнения результатов фильтрации (см. красный прямоугольник) видно, что фильтрация на метода главных компонент в частотно-временной ST дает лучшие результаты – обеспечивает большую когерентность полезного сигнала. На рис.5 полевым данным наземной сейморазведки на отраженных волнах. Видно, что предлагаемый метод показывает хорошие результаты подавления ПВ (рис.5б) и при этом не затрагивает полезный сигнал (это видно из анализа рис.5в).

Заключение

Комплекс программ для ЭВМ «PF Seism», реализующий метод подавления поверхностных волн на основе поиска главных компонент в частотно-временной области, позволяет применять разработанный алгоритм подавления ПВ при обработке полевых данных наземной сейморазведки на отраженных волнах и наземного мкиросейсмического мониторинга в том числе и в горизонтально-неоднородных средах.

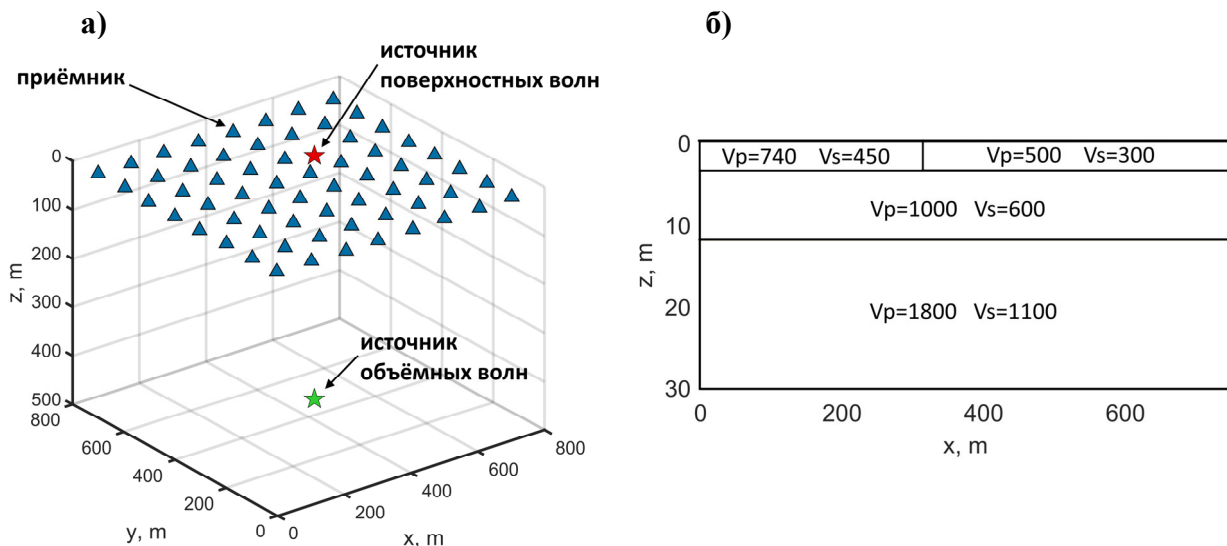


Рис. 3. Скоростная модель а) система наблюдения: положение приемников (синим), источника ПВ помех (красным) и полезного объемного сигнала (зеленый) б) скоростной разрез в плоскости xz (симметричен вдоль оси y)

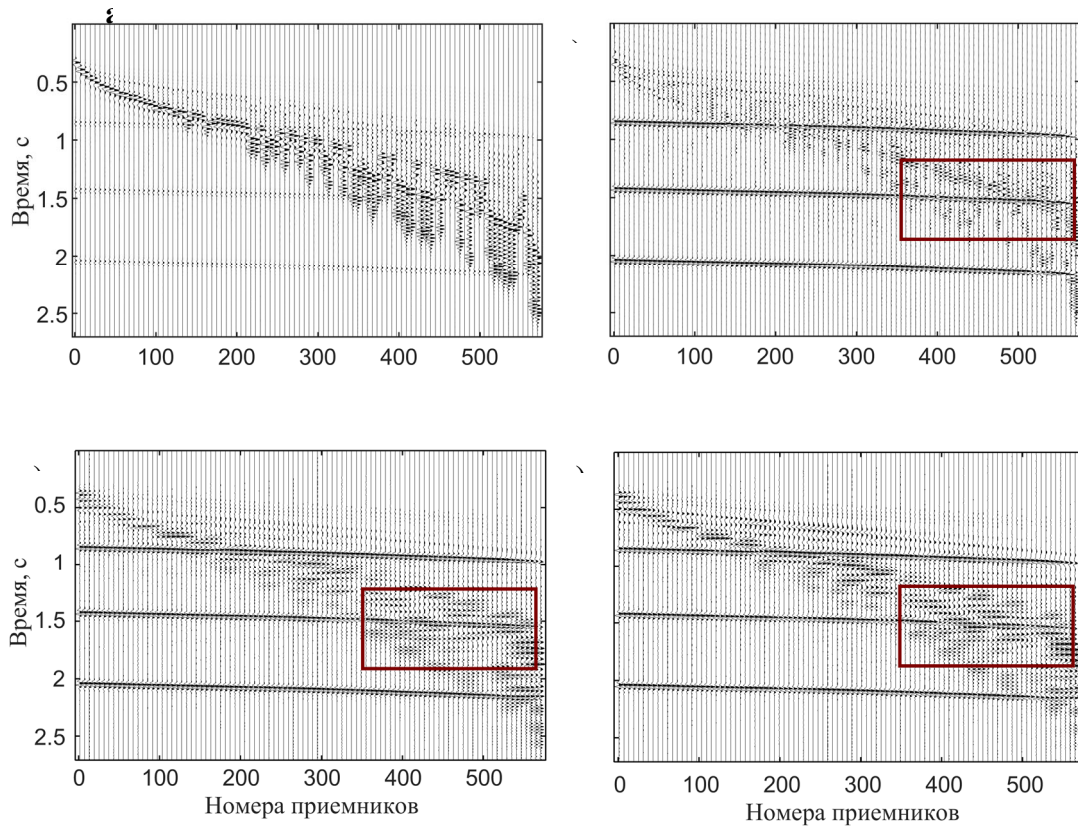


Рис. 4. Результаты обработки синтетических данных. а) синтетические данные б)

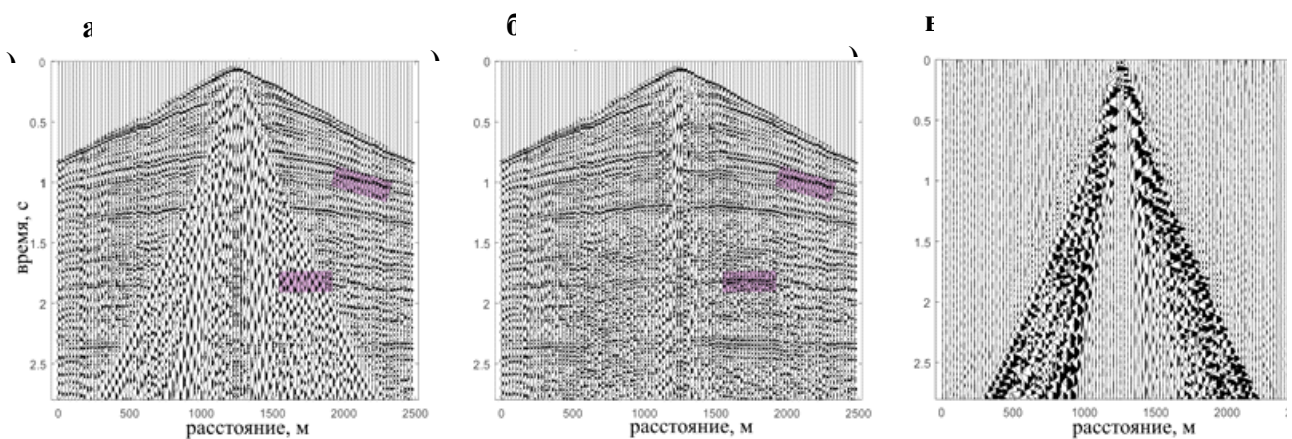


Рис. 5. Результаты обработке полевых данных методом главных компонент в ST области:

а) исходные данные, б) результат фильтрации, в) отфильтрованная поверхностная волна

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РФФ № 20-77-10023

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Liu X. Ground roll suppression using the Karhunen-Loeve transform // *Geophysics*. – 1999. – Т. 64. – №. 2. – С. 564-566.
2. Serdyukov A. S. Ground-roll extraction using the Karhunen-Loeve transform in the time-frequency domain // *Geophysics*. – 2022. – Т. 87. – №. 2. – С. A19-A24.
3. Askari R., Ferguson R. J. Dispersion and the dissipative characteristics of surface waves in the generalized S-transform domain // *Geophysics*. – 2012. – Т. 77. – №. 1. – С. V11-V20.
4. Serdyukov A. S., Azarov, A. V., Yablokov, A. V., Shilova, T. V., & Baranov, V. D. Research Note: Reconstruction of seismic signals using S-transform ridges // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – Т. 69. – №. 4. – С. 891-900.
5. Yablokov, A. V., Serdyukov, A. S., Loginov, G. N., & Baranov, V. D. An artificial neural network approach for the inversion of surface wave dispersion curves // *Geophysical Prospecting*. – 2021. – Т. 69. – №. 7. – С. 1405-1432.
6. Левшин А. Л. и др. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле // А.Л. Левшин, Т.Б. Яновская, А.В. Ландер.– М.: Наука. – 1986. – Т. 278.

© А. В. Азаров, А. С. Сердюков, А. В. Яблоков, 2022