



**НОВЫЕ МЕТОДЫ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН**

**А. С. Сердюков<sup>1,2</sup>, А. В. Яблоков<sup>1,2</sup>, Г. С. Чернышов<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru,  
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

<sup>2</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН  
просп. Академика Коптюга 3, Новосибирск 630090, Россия*

Предложены методы, основанные на применении частотно-временных представлений. Полезный сигнал восстанавливается по пикам амплитуд частотно-временных спектрограмм, полученных с помощью S-преобразования. В результате численных экспериментов показано, что, используя узкие по времени частотно-временные окна (порядка 10–20 отчетов по времени), удается определить параметры сигнала импульсного типа существенно большей длительности.

*Рудная сейсморазведка, обработка сигналов, преобразование Фурье, вейвлеты, S-преобразование*

**NEW METHODS FOR SIGNAL DIGITAL PROCESSING TO DETERMINE  
THE PARAMETERS OF SEISMIC WAVE PROPAGATION MODELS**

**A. S. Serdyukov<sup>1,2</sup>, A. V. Yablokov<sup>1,2</sup>, and G. S. Chernyshov<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: aleksanderserdyukov@yandex.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

<sup>2</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics,  
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, prosp. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk 630090, Russia*

The methods based on the use of time-frequency representations are proposed. The useful signal is reconstructed from the amplitude peaks of time-frequency spectrograms obtained by S-transform. As a result of numerical experiments, it is shown that using narrow time-frequency intervals (about 10–20 time reports), it is possible to determine the parameters of a pulsed-type signal with substantially longer duration.

*Ore mining seismic survey, signal processing, Fourier transform, wavelets, S-transform*

Параметры распространения сейсмических волн: фазовые и групповые скорости, коэффициенты поглощения, динамические модули упругости достаточно полно характеризуют физико-механические свойства горных пород. Соответствующие измерения проводят как на образцах (акустические исследования кернов), так и непосредственно в горном массиве (сейсмические исследования). Проблемой при определении указанных параметров (как в лабораторных так и в естественных условиях) является наличие помех, интерференция различных типов волн, частотная дисперсия.

S-преобразование [1] — метод частотно-временного спектрального анализа, который сочетает в себе преимущества непрерывных вейвлет-преобразований (CWT) и преобразований Фурье. Подобно CWT, S-преобразование (ST) обеспечивает адаптивное разрешение время – частота. В отличие от CWT, ST сохраняет прямую связь со спектром Фурье. Для эффективного вычис-

ления ST можно использовать быстрое преобразование Фурье (FFT). Кроме того, ST сохраняет абсолютную фазу каждой локализованной частотной составляющей. Это свойство обеспечивает его обратимость.

ST нашло широкое применение при обработке сейсмических данных. Приложения, связанные с задачами частотно-временной фильтрации и подавлением помех, рассмотрены в работах [1–3]. В [4] решается задача выделения отраженных волн от тонких пластов с помощью обобщенного ST. В [5] предложен автоматизированный способ обработки пассивных микросейсмических данных на основе ST и известного метода выделения порогового значения [6]. В [7] модифицированное ST использовано для деконволюции сейсмических сигналов в средах с затуханием. В работе [8] рассматривают ST-анализ в методе отраженных волн. ST также используется для анализа распространения сейсмических поверхностных волн [9–11].

Стандартный метод фильтрации на основе ST заключается в применении обратного преобразования к обработанному спектру. Исходный частотно-временной спектр умножается на адаптивное частотно-временное окно [12]. Поскольку вычисление обратного ST включает усреднение по времени [1], стандартный метод фильтрации не является оптимальным с точки зрения временной локализации сигналов. Другими словами, если ширина временного окна недостаточно велика, например, окно не содержит “полезную” волну полностью, фильтрация приводит к искажению волновых форм.

В данной работе рассмотрен альтернативный подход фильтрации, направленный на пики амплитудного спектра ST. Как правило, эти пики соответствуют образам “импульсных” сейсмических сигналов, которые часто и представляют интерес во время обработки сейсмических данных. Для таких задач предлагается метод восстановления сигнала по ST-пикам.

S-преобразование сигнала  $h(t)$  задается соотношением

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-i2\pi ft} dt. \quad (1)$$

S-преобразование также может быть выражено через спектр Фурье  $H(f)$  сигнала  $h(t)$ :

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{i2\pi \alpha \tau} d\alpha. \quad (2)$$

Запишем Фурье и ST спектры через амплитуды и фазы:

$$H(f) = A(f) e^{-i2\pi\varphi(f)},$$

$$S(\tau, f) = B(\tau, f) e^{-i2\pi\beta(\tau, f)}.$$

ST пиком будем называть функцию  $\tau_R(f)$  для которой выполнено  $B(\tau_R(f), f) \geq B(\tau, f)$  для любых  $\tau$  и  $f$  (по крайней мере в некоторой области). Таким образом, получаем две функции частоты — амплитуду и фазу ST пика:

$$B_R(f) = B(\tau_R(f), f), \quad \beta_R(f) = \beta(\tau_R(f), f). \quad (3)$$

Задача состоит в том, чтобы восстановить амплитуду и фазу сигнала по функциям (3). Следуя [9, 13], подставляем следующую аппроксимацию фазы сигнала

$$\varphi(\alpha + f) \sim \varphi(f) + \alpha \varphi'(f) \quad (4)$$

в уравнение (2). После проведения очевидных выкладок, получим:

$$\tau_R(f) = \varphi'(f), \quad \varphi(f) = \beta_R(f). \quad (5)$$

Следует заметить, что приближение (4) становится точным равенством, когда сигнал является симметричным, например, в случае импульса Рикера. После сокращения фаз в уравнении (2), получаем следующее интегральное уравнение

$$B_R(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\alpha + f) e^{-\frac{2\pi^2\alpha^2}{f^2}} d\alpha, \quad (6)$$

где амплитуда сигнала  $A$  является неизвестной функцией. Решаем уравнение (6) численно. Предположим, что неизвестная амплитуда сигнала и амплитуда ST-пика равны нулю за пределами некоторого интервала частот:

$$A(f) = 0 \text{ и } B_R(f) = 0 \text{ для } f \notin (f_0, f_{N+1}). \quad (7)$$

Частота дискретизируется внутри этого интервала:

$$f_j = f_0 + j\delta\alpha, \quad \delta\alpha = \frac{f_{N+1} - f_0}{N+1}, \quad j = 1 \dots N.$$

После применения квадратурных формул к интегралу из (6) получим систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\mathbf{M}\mathbf{a} = \mathbf{b}, \quad (8)$$

где  $\mathbf{M}$  — матрица размера  $N \times N$  с элементами  $\mathbf{M}_{kj} = e^{-\frac{2\pi^2(k-j)^2}{k^2}} \delta\alpha$ ;  $\mathbf{a}$  — вектор неизвестных:  $\mathbf{a}_j = A(f_j)$ , вектор из правой части уравнения:  $\mathbf{b}_k = B_R(f_k)$ . Решение интегрального уравнения является некорректной задачей — матрица  $\mathbf{M}$  плохо обусловленная. Следуя [14], применяем усеченное сингулярное разложение (TSVD) при решении системы (8).

Чтобы продемонстрировать возможности предлагаемого метода ST, был сгенерирован широкополосный сейсмический “импульсный” сигнал, показанный на рис. 1а. Второй сигнал, который является “помехой”, представлен на рис. 1б, сумма двух сгенерированных сигналов — рис. 1в, амплитуда S-преобразования сигнала — на рис. 1г, ST второго сигнала — на рис. 1д. На амплитудном ST-спектре данных (рис. 1е) наблюдается ST-пик, который соответствует изображению первого сигнала. Цель фильтрации состоит в восстановлении сигнала по этому пику. Для этого выбран интервал частот от 25 до 65 Гц (пик отмечен черной полосой на рис. 1е).

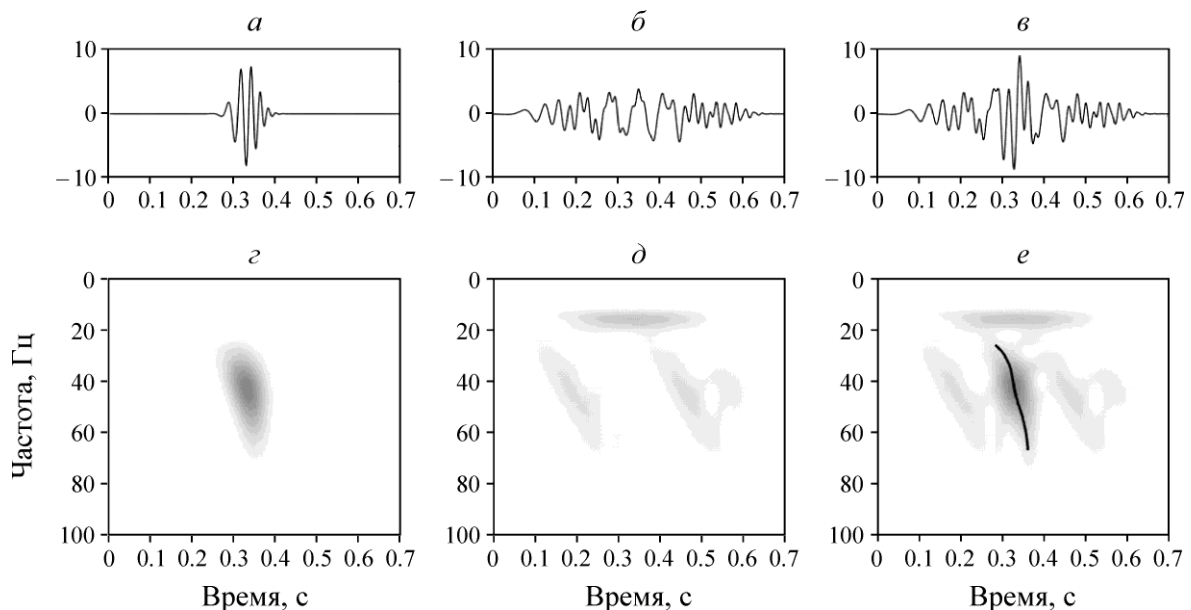


Рис. 1. Синтетические данные и ST-спектры

Для решения линейной системы (8) методом TSVD использованы 20 старших сингулярных векторов. Число обусловленности соответствующей матрицы малого ранга около 11.6. Результат восстановления сигнала показан на рис. 2. Восстановленный сигнал изображен кружками, он хорошо совпадает с исходным восстанавливаемым сигналом (сплошная черная линия), для иллюстрации фильтрации здесь же приводятся и данные (серым цветом).

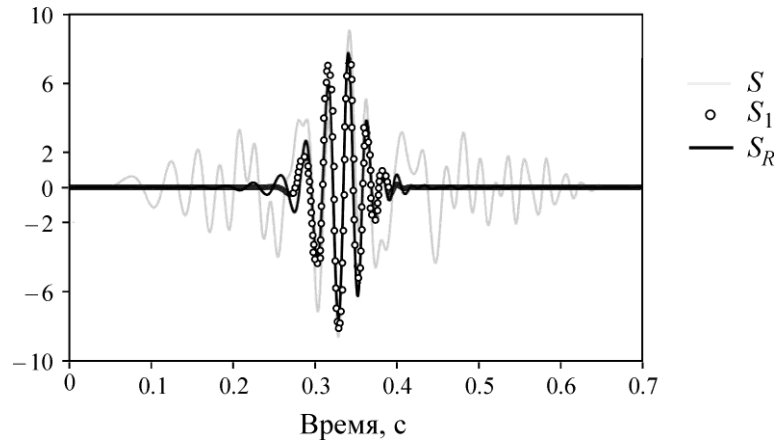


Рис. 2. Синтетические данные и ST-спектры

## ВЫВОДЫ

Предложен новый метод частотно-временной фильтрации данных по частоте и времени. Полезный сигнал выделяется по пикам амплитудного спектра, полученного при помощи S-преобразования. Фазовый и амплитудный спектр Фурье такого сигнала реконструируются по выбранному ST-пику в выбранном частотном диапазоне. Метод подходит для извлечения широкополосных сейсмических “импульсных” сигналов, что часто необходимо при обработке сейсмических данных при наличии шума и помех. Работоспособность метода продемонстрирована на синтетических данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Stockwell R. G., Mansinha L., and Lowe R. P. Localization of the complex spectrum: the S transform, IEEE transactions on signal processing, 1996, vol. 44, no. 4, pp. 998–1001.
2. Pinnegar C. R. and Mansinha L. The S-transform with windows of arbitrary and varying shape, Geophysics, 2003, vol. 68, no. 1, pp. 381–385.
3. Pinnegar C. R. and Eaton D. W. Application of the S transform to prestack noise attenuation filtering, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2003, vol. 108, no. B9.
4. Askari R. and Siahkoochi H. R. Ground roll attenuation using the S and xfk transforms, Geophysical Prospecting, 2008, vol. 56, no. 1, pp. 105–114.
5. Tselentis G. A., Martakis N., Paraskevopoulos P., Lois A., and Sokos E. Strategy for automated analysis of passive microseismic data based on S-transform, Otsu’s thresholding, and higher order statistics, Geophysics, 2012, vol. 77, no. 6, pp. KS43–KS54.
6. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62–66.
7. Djeflal A., Pennington W., and Askari R. Enhancement of Margrave deconvolution of seismic signals in highly attenuating media using the modified S-transform, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2016, Society of Exploration Geophysicists, 2016, pp. 5198–5202.
8. Li D., Castagna J. and Goloshubin G. Investigation of generalized S-transform analysis windows for time-frequency analysis of seismic reflection data Investigation of GST analysis windows, Geophysics, 2016, vol. 81, no. 3, pp. V235–V247.

9. **Askari R. and Ferguson R. J.** Dispersion and the dissipative characteristics of surface waves in the generalized S-transform domain Dispersion and dissipation of surface waves, *Geophysics*, 2012, vol. 77, no. 1, pp. V11 – V20.
10. **Askari R. and Hejazi S. H.** Estimation of surface-wave group velocity using slant stack in the generalized S-transform domain Surface-wave group velocity estimation, *Geophysics*, 2015, vol. 80, no. 4, pp. EN83 – EN92.
11. **Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. V., and Baranov V. D.** Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data, *Geophysics*, 2019, vol. 84, no. 1, pp. A19 – A24.
12. **Schimmel M. and Gallart J.** The inverse S-transform in filters with time-frequency localization, *IEEE Transactions on signal processing*, 2005, vol. 53, no. 11, pp. 4417 – 4422.
13. **Kulesh M. et al.** Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms, *Pure and Applied Geophysics*, 2005, vol. 162, no. 5, pp. 843 – 855.
14. **Hansen P. C.** Truncated singular value decomposition solutions to discrete ill-posed problems with ill-determined numerical rank, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1990, vol. 11, no. 3, pp. 503 – 518.