

## **МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН В ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОВЕРХНОСТНЫМИ СИСТЕМАМИ НАБЛЮДЕНИЯ С НЕРЕГУЛЯРНОЙ РАССТАНОВКОЙ ПРИЕМНИКОВ**

*Антон Витальевич Азаров*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

*Александр Сергеевич Сердюков*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник, тел. (383)335-96-42, e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

В работе предложен многоканальный метод подавления поверхностных волн в данных сейсмического мониторинга поверхностными системами наблюдения с нерегулярной расстановкой приемников. Рассмотрены возможности использования различных спектральных преобразований при реализации предлагаемого метода. Приведены результаты тестирования алгоритма на синтетических данных. Сформулированы условия использования предлагаемого метода на практике.

**Ключевые слова:** микросейсмический мониторинг, поверхностные волны, обработка сигнала, подавление шума, спектральная обработка, спектральные преобразования.

## **SURFACE WAVE SUPPRESSION METHOD IN SEISMIC MONITORING OF GEODYNAMIC PROCESSES BY SURFACE SURVEILLANCE SYSTEMS WITH IRREGULAR RECEIVERS SURFACE**

*Anton V. Azarov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: antonazv@mail.ru

*Alexander S. Serdyukov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., Junior Researcher, phone: (383)335-96-42, e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

A multichannel method of suppressing surface waves contained in seismic monitoring data collected by surface observation systems with irregular arrangement of receivers is proposed. The possibilities of using various spectral transformations in the implementation of the proposed method are considered. The results of testing the algorithm on synthetic data are presented. The conditions for using the proposed method in practice are formulated.

**Key words:** microseismic monitoring, surface waves, signal processing, noise suppression, spectral conversion, spectral processing, spectral transformations.

## *Введение*

Микросейсмический мониторинг является технологией дистанционного контроля добычи полезных ископаемых, которая основана на регистрации и обработке данных сейсмических волн, возникающих в результате сопутствующих геодинамических процессов. Регистрация сейсмичности осуществляется скважинными (приемники располагаются в скважинных) или наземными (приемники располагаются на дневной поверхности) системами наблюдения [1]. Главной проблемой наземного микросейсмического мониторинга является низкое соотношение сигнал/шум. Основную часть сейсмического шума составляют поверхностные волны, в том числе, генерируемые работающим оборудованием. При использовании наземных систем наблюдения, приемники могут располагаться нерегулярным образом. Это затрудняет применение стандартных методов многоканальной фильтрации сейсмических данных [2–8]. Основным недостатком указанных методов является необходимость в знании скоростной модели среды. Если скоростная модель не известна, то, например в случае  $f-k$  фильтрации становится проблематично отделить друг от друга поверхностные и объемные волны на  $f-k$  плоскости. Это делает фильтрацию невозможной или малоэффективной. В нашей работе представлен метод, который позволяет подавлять поверхностные волны в данных мониторинга, если известна модель верхней части среды или имеется запись сигнала от источника поверхностных волн с известной локацией. Предлагаемый метод является аналогом  $f-k$  фильтра. При  $f-k$  фильтрации, используемой в микросейсмическом мониторинге, в данные вносятся временные задержки, соответствующие временам пробега волн от выбранной тестовой точки пространства до каждого приемника. Временные задержки позволяют спрямить годограф объемных волн, приходящих из определенной области среды и тем самым сфокусировать их на  $f-k$  плоскости около нулевой пространственной частоты. В случае с поверхностными волнами определить подобные временные задержки невозможно из-за дисперсии. Чтобы собрать энергию поверхностных волн на  $f-k$  плоскости в работе предлагается представить данные в частотной области и вводить в них фазовые сдвиги на каждой частоте. Фазовые сдвиги будут вычисляться на основе определения времени вступления и фазы поверхностной волны на каждом приемнике от тестового источника. Для решения этой задачи предлагается использовать частотно-временное представление сигнала, полученное на основе преобразования Стоквелла. В итоге, после внесения фазовых сдвигов в данные, поверхностные волны, приходящие из точки, соответствующей положению тестового источника, будут собраны около нулевой частоты и могут быть легко удалены. Предложенную процедуру возможно продельвать последовательно для заданного набора тестовых источников.

## *Описание метода*

Рассмотрим реализацию предлагаемого метода подавления поверхностных волн. Допустим мы имеем систему наблюдения, состоящую из  $N$  сейсмических

приемников, произвольно расставленных на дневной поверхности. Пусть с помощью приемников были собраны данные:

$$\{u_n(t) | n = 1, \dots, N\}, \quad (1)$$

где  $u_n(t)$  сейсмический сигнал, записанный  $n$ -ым приемником. Задача заключается в подавлении поверхностных волн, источники которых расположены в точке  $(x_s, y_s, z_s)$ . Например, при рассмотрении задачи микросейсмического мониторинга операции гидроразрыва пласта, точкой  $(x_s, y_s, z_s)$  может быть устье скважины, около которого находится работающее оборудование.

Первый шаг предлагаемого метода заключается в определении фазы сигнала поверхностной волны на каждом приемнике для каждой частоты. Решение этой задачи возможно выполнить двумя способами. Первый способ предполагает, что мы знаем скоростную модель среды. Тогда фазы могут быть рассчитаны на основе решения прямой задачи распространения поверхностных сейсмических волн от заданного источника. Второй способ предполагает, что мы уже имеем запись поля от тестового источника сейсмических волн, который был установлен в точку  $(x_s, y_s, z_s)$ . В представленной работе рассматривается второй способ.

Пусть  $\{h_n(t) | n = 1, \dots, N\}$  запись сигнала от тестового источника, установленного в точку  $(x_s, y_s, z_s)$ . Представим эти данные в частотно-временной области с помощью  $S$ -преобразования [9]:

$$S_n(\tau, f, \sigma) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_n(t) w(\tau - t, f, \sigma) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

где  $\tau$  и  $f$  время и частота, а  $\sigma$  дополнительный параметр, характеризующий

ширину окна Гаусса,  $w(t, f, \sigma) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\tau-t)f^2}{2\sigma^2}}$  – окно Гаусса. Как видно, ширина

окна зависит от частоты сигнала: с ростом частоты ширина окна уменьшается и наоборот. Данное свойство позволяет получать частотно-зависимое частотно-временное разрешение. Это позволяет повысить разрешение спектрограммы по сравнению с классическим преобразованием Фурье в скользящем окне. Параметр  $\sigma$  позволяет производить дополнительную настройку ширины окна, чтобы получать оптимальное разрешение на каждом диапазоне частот. Каждое значение  $S_n(\tau, f, \sigma)$  есть комплексное число, которое запишем в виде:

$$S_n(\tau, f, \sigma) = A_n(\tau, f) e^{i\varphi_n(\tau, f)} \quad (3)$$

где  $A_n(\tau, f)$  и  $\varphi_n(\tau, f)$  амплитудный и фазовый спектр сигнала на частоте  $f$  в момент времени  $\tau$ . Для каждой частоты  $f$  на каждом приемнике  $n$  найдем мо-

мент времени, когда амплитудный спектр сигнала становится максимальным, т. е. время прихода энергии волны на частоте  $f$  в приемник:

$$\tilde{\tau}_n(f) = \max_{\tau} \{A_n(\tau, f)\} \quad (4)$$

Далее выберем приемник с номером  $r \in [1, 2, \dots, N]$ , относительно которого вычислим разницу в фазе на каждом приемнике в моменты времени  $\tilde{\tau}_n(f)$ :

$$\Delta\varphi_n(f) = \text{Arg} \left( \frac{S_r(\tilde{\tau}_r(f), f)}{S_n(\tilde{\tau}_n(f), f)} \right) = \varphi_r(f) - \varphi_n(f), \quad n = 1, \dots, N \quad (5)$$

Следующий шаг заключается в представлении сейсмических данных (1) в частотной области:

$$\{\hat{u}_n(f) | n = 1, \dots, N\} \quad (6)$$

где  $\hat{u}_n(f)$  образ Фурье сигнала  $u_n(t)$ . Внесем найденные ранее найденный разницы фаз на приемниках из (5) в данные:

$$\tilde{u}_n(f) = \hat{u}_n(f) e^{i\Delta\varphi_n} \quad n = 1, \dots, N \quad (7)$$

Применим преобразование Фурье к вектору данных  $(\tilde{u}_1(f), \dots, \tilde{u}_N(f))$  и тем самым получим изображение данных в  $f$ - $k$  плоскости:  $U(f, k)$ , где  $k$  пространственная частота. За счет внесения фазовых сдвигов в данные, энергия поверхностных волн, приходящих из точки  $(x_s, y_s, z_s)$ , на  $f$ - $k$  плоскости будет сосредоточена около нулевой пространственной частоты. Поэтому, чтобы отфильтровать поверхностные волны достаточно обнулить все коэффициенты на  $f$ - $k$  плоскости, пространственная частота которых меньше выбранного  $k_0$ . Величина  $k_0$  не может быть строго равной 0, так как из-за ограниченности пространственной апертуры системы наблюдений происходят утечки спектральной энергии на соседние частоты. Чтобы получить фильтрованные данные остается выполнить последовательность обратных преобразований: обратное преобразование Фурье по пространству, восстановление оригинальной фазы сигнала в данных  $(\hat{u}_n(f) = \tilde{u}_n(f) e^{-i\Delta\varphi_n})$ , и выполнение обратного преобразования Фурье по времени. Предложенную процедуру возможно провести последовательно для всех интересующих точек пространства.

### ***Примеры обработки данных***

Продemonстрируем работу предложенного алгоритма на синтетических данных. Рассмотрим 3d модель горизонтально слоистой среды, содержащую ис-

точник поверхностных волн и источник объемных волн (Рисунок 1). Регистрацию сейсмических волн будем проводить с помощью площадной системы наблюдения, состоящей из 100 приемников, распределенных на верхней поверхности модели.

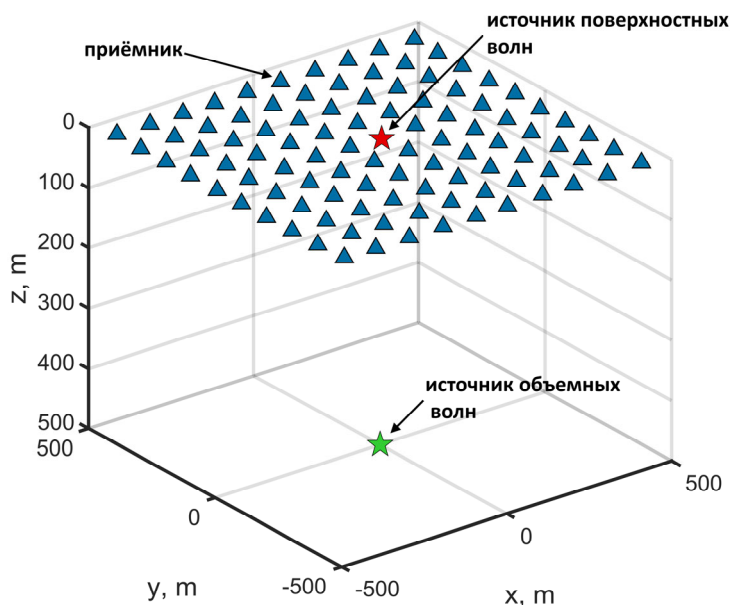


Рис. 1. Модель, используемая для расчета синтетических сейсмограмм: Здрава, система наблюдения, источник поверхностных волн, источник объемных волн

Параметры горизонтально-слоистой среды приведены в табл. 1. Расчет синтетических сейсмограмм производился методом конечных разностей [10] с использованием методик, предложенных в работах [11–13]. В качестве формы волны в источнике использовался импульс Риккера с центральной частотой 18 Гц.

Таблица 1

Скоростная модель горизонтально-слоистой среды

Номер слоя	Мощность слоя, м	Скорость продольных волн, м/с	Скорость поперечных волн, м/с	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
1	4	500	300	1700
2	12	1000	600	1800
3	∞	1800	1100	2200

На рис. 2, а приведена рассчитанная синтетическая сейсмограмма, содержащую волны от двух источников. Сейсмограмма отрисована по принципу удаленности приемника от источника поверхностных волн (чем выше номер приемника, тем более он удален от источника). На рис. 2, б приведен результат обработки данных предлагаемым методом. Как видно, первая мода поверх-

ностной волны была успешно подавлена. Вторую моду возможно отфильтровать путем повторного применения предлагаемого алгоритма, с использованием фазовых сдвигов найденных для второй моды поверхностной волны.

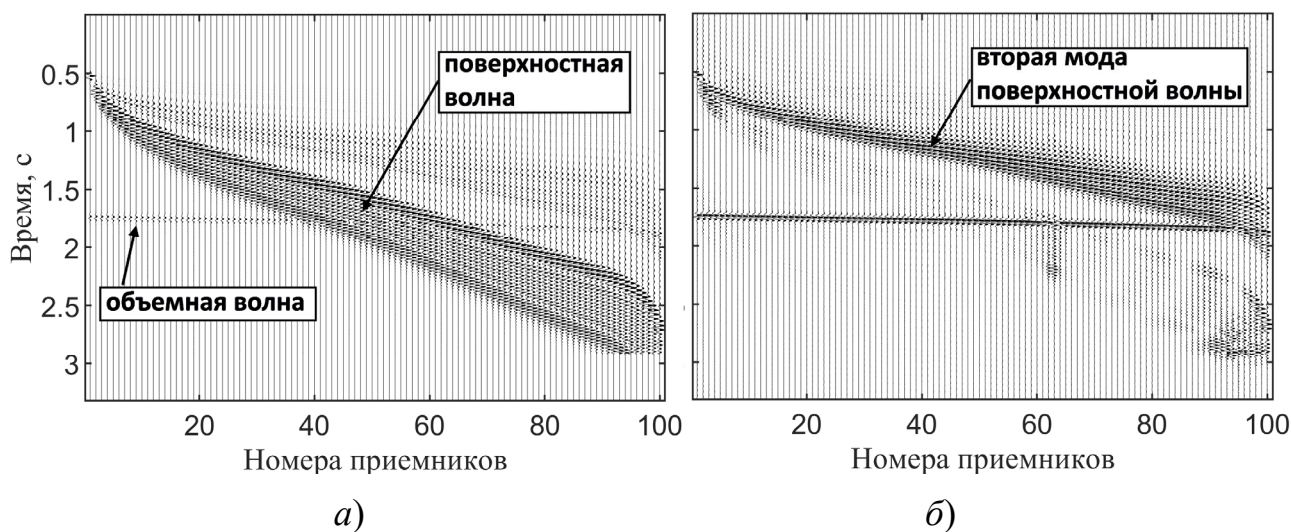


Рис. 2. а) синтетическая сейсмограмма; б) обработанная сейсмограмма

В заключении отметим, что предложенный метод может успешно использоваться для обработки реальных данных, так как для его реализации достаточно сигналов от тестовых источников поверхностных волн, которые на практике достаточно просто могут быть реализованы.

### **Выводы**

В работе был представлен метод подавления поверхностных волн в данным микросейсмического мониторинга наземными системами наблюдения с нерегулярной расстановкой приемников. Показано, что для локализации поверхностных волн на  $f-k$  плоскости, можно найти необходимые фазовые сдвиги на основе использования преобразования Стоквелла и применить их к данным. На синтетических данных показано, что предложенный метод позволяет подавлять поверхностные волны приходящие из заданной точки среды.

### **Благодарности**

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект РНФ № 18-77-00043*

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Grechka V. I. U., Heigl W. M. Microseismic monitoring. – Tulsa, Oklahoma, USA : Society of Exploration Geophysicists, 2017.
2. Yilmaz O. Z., Doherty S. M. Seismic data analysis. – Society of exploration geophysicists, 2001.

3. Hosseini S. A. et al. Adaptive attenuation of aliased ground roll using the shearlet transform // *Journal of Applied Geophysics*. – 2015. – Т. 112. – С. 190–205.
4. Hu Y. et al. Ground-roll noise extraction and suppression using high-resolution linear Radon transform // *Journal of Applied Geophysics*. – 2016. – Т. 128. – С. 8–17.
5. Serdyukov A. S., A. V. Yablokov, A. A. Duchkov, A. A. Azarov, V. D. Baranov, Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. – 2019. – Т. 84. – № 1. – С. A19–A24.
6. Liang C. et al. Improving signal-to-noise ratio of passive seismic data with an adaptive FK filter // *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009*. – Society of Exploration Geophysicists, 2009. – С. 1703–1707.
7. Forghani-Arani F. et al. Noise suppression in surface microseismic data // *The Leading Edge*. – 2012. – Т. 31. – № 12. – С. 1496–1501.
8. Azarov A. V., Serdyukov A. S., Gapeev D. N. Frequency domain orthogonal projection filtration of surface microseismic monitoring data // *Geophysical Prospecting*. – 2020. – Т. 68. – № 2. – С. 382–392.
9. Stockwell R. G., Mansinha L., Lowe R. P. Localization of the complex spectrum: the S transform // *IEEE transactions on signal processing*. – 1996. – Т. 44. – № 4. – С. 998–1001.
10. Virieux J. P-SV wave propagation in heterogeneous media: Velocity-stress finite-difference method // *Geophysics*. – 1986. – Т. 51. – № 4. – С. 889–901.
11. Kurlenya M. V., A. S. Serdyukov, A. V. Azarov, A. A. Nikitin, Numerical modeling of wavefields of microseismic events in underground mining // *Journal of Mining Science*. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 689–695.
12. Азаров А.В., Сердюков А.С. Численное моделирование микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 9. – С. 328–335
13. Азаров А.В., Сердюков А.С., Моделирование микросейсмических событий в активной геофизической среде // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук* – 2015. – № 2. – С. 52–56.

© А. В. Азаров, А. С. Сердюков, 2020