



**ФИЛЬТРАЦИЯ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О ФАЗАХ СИГНАЛА**

**А. В. Азаров<sup>1</sup>, А. С. Сердюков<sup>2</sup>**

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

<sup>2</sup>*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,  
E-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru, просп. Академика Коптюга 3, г. Новосибирск 630090, Россия*

Разработан алгоритм фильтрации сейсмических данных, позволяющий усиливать сигналы от источников, расположенных внутри выбранной области пространства. Приведена теория, описывающая принцип работы алгоритма. На синтетических данных продемонстрирована способность фильтра подавлять сигналы от источников, находящихся вне выбранной области пространства, на полусинтетических данных — подавлять реальный шум и значительно повышать отношение сигнал/шум для событий, лежащих внутри выбранной области.

*Пассивный микросейсмический мониторинг, микросейсмический шум, обработка сейсмического сигнала*

**FILTERING OF MICROSEISMIC DATA BASED ON INFORMATION  
ABOUT SIGNAL PHASES**

**A. V. Azarov<sup>1</sup> and A. S. Serdyukov<sup>2</sup>**

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: antonazv@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

<sup>2</sup>*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru, pr. Akademika Koptyuga 3, Novosibirsk 630090, Russia*

Seismic data filtering algorithm has been developed. The proposed algorithm allows amplifying signals from the sources located inside a selected area of space. The paper presents a theory describing the principle of this algorithm. Testing on synthetic data showed that the proposed filtering method is capable to suppress signals from the sources located outside the selected area of space. On semi-synthetic data it was shown that the proposed filtering method allowed to suppress real noise and significantly increases the signal-to-noise ratio for the events located inside a selected area of space.

*Passive microseismic monitoring, microseismic noise, seismic signal processing*

Один из методов дистанционного контроля разработки полезных ископаемых — пассивный микросейсмический мониторинг (МСМ) [1]. Как правило, данные, собранные в процессе МСМ имеют низкое соотношение сигнал/шум. Основными причинами этого являются: 1) низкая энергия наблюдаемых микросейсмических событий; 2) работа горнодобывающего оборудования, которое генерирует высокоэнергетические волны-помехи; 3) удаленность сейсмических приемников от области мониторинга (особенно актуально при использовании наземных систем наблюдения). Низкое отношение сигнал/шум может приводить к неверной работе алгоритмов МСМ, поэтому актуальной задачей является подавление шума.

В настоящей работе представлен метод фильтрации данных, который позволяет усилить сигналы, приходящие из некоторой области наблюдения (далее будем называть эту область целевой). Этот метод можно рассматривать как расширение метода [2, 3], где предложено пре-

образовать данные в  $\tau-p$  область, в которой характеристики различных типов волн можно разделить. Перед  $\tau-p$  преобразованием в работах [2, 3] применяются к каждой трассе временные задержки, пропорциональные расстоянию от предполагаемого местоположения тестового источника до приемников, чтобы микросейсмические события фокусировались около нулевой медленности (величина, обратная к кажущейся скорости). На плоскости сохраняются лишь значения выше некоторого заданного порога. После обратного преобразования и введения обратных временных задержек на сейсмограмме должны оставаться сигналы от источников, расположенных в выбранной тестовой точке пространства. Недостаток такого метода — высокая вычислительная сложность, так как введение задержек и выполнение обратного  $\tau-p$  преобразования необходимо проводить для каждой потенциальной точки пространства. Чтобы решить эту проблему, в данной работе предлагается заранее выбрать тестовые источники, которые будут располагаться в целевой области. Волновое поле от любого возможного источника, расположенного внутри целевой области, можно представить как суперпозицию волновых полей тестовых источников. Из-за перехода в частотную область размерность задачи снижается, что позволяет использовать методы ортогонального проецирования.

### ПРОЕКЦИОННЫЙ ФИЛЬТР

Рассмотрим сейсмическое поле, которое генерируется набором источников:

$$u_k(t) = \sum_j U_{kj}(t) + \mu_k(t), \quad (1)$$

где  $k = 1, \dots, N$  — номер приемника;  $j$  — номер источника;  $U_{kj}(t)$  — поле на приемнике  $k$ , генерирующее источник  $j$ ;  $\mu_k(t)$  — шум. Выполним преобразование Фурье над сигналом (1):

$$\hat{u}_k(\omega) = \sum_j \hat{U}_{kj}(\omega) + \hat{\mu}_k(\omega). \quad (2)$$

Функцию  $\hat{U}_{kj}(\omega)$  в частотной области можно записать как:

$$\hat{U}_{kj}(\omega) = A_{kj}(\omega) \exp(-i\omega\tau_{kj}), \quad (3)$$

где  $\tau_{kj}$  — время пробега волны от источника  $j$  до приемника  $k$  (в данном случае рассматриваем только времена первого вступления Р-волн);  $A_{kj}$  — амплитуда сигнала.

Рассмотрим конечный набор из  $M$  тестовых источников, расположенных внутри целевой области пространства, и введем комплекснозначный вектор в  $N$ -мерном частотном пространстве данных  $D$ :

$$\mathbf{v}_j = \begin{pmatrix} A_{1j}(\omega) \exp(-i\omega\tau_{1j}) \\ A_{2j}(\omega) \exp(-i\omega\tau_{2j}) \\ \vdots \\ A_{kj}(\omega) \exp(-i\omega\tau_{kj}) \\ \vdots \\ A_{Nj}(\omega) \exp(-i\omega\tau_{Nj}) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где  $j$  — номер тестового источника;  $k$  — номер приемника;  $A_{kj}(\omega)$  — амплитуда от  $j$ -го источника на приемнике  $k$ .

Набор векторов  $S = [\mathbf{v}_j \mid j = 1, \dots, M]$  образует линейное подпространство решений:

$$\mathbf{V} = \left\{ \sum_{n=1}^M \lambda_n \mathbf{v}_n \mid \mathbf{v}_n \in S, \lambda_n \in \mathbb{R} \right\}. \quad (5)$$

Пространство данных является прямой суммой подпространств  $\mathbf{V}$  и ортогональной части  $\mathbf{V}^\perp$ :

$$\mathbf{D} = \mathbf{V} \oplus \mathbf{V}^\perp. \quad (6)$$

Суть предлагаемого метода заключается в оценке проекции вектора данных  $\hat{\mathbf{u}}(\omega) = (\hat{u}_1(\omega), \dots, \hat{u}_k(\omega), \dots, \hat{u}_N(\omega))^T$  на подпространство  $\mathbf{V}$ . Оператор ортогональной проекции задается следующей матрицей:

$$\mathbf{P} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (7)$$

где  $\mathbf{A}$  — матрица размером  $N$  на  $M$ , столбцы которой образованы векторами  $v_n \in S$ .

Предложенная процедура фильтрации реализуется в три шага. На первом шаге выполняется преобразование Фурье для каждой трассы:

$$u_k(t) \rightarrow \hat{u}_k(\omega). \quad (8)$$

Далее для каждой частоты применяется проектор, чтобы получить вектор данных в частотной области  $\hat{\mathbf{u}}(\omega) = (\hat{u}_1(\omega), \dots, \hat{u}_k(\omega), \dots, \hat{u}_N(\omega))^T$ :

$$\hat{\mathbf{u}}^F = \mathbf{P} \hat{\mathbf{u}}. \quad (9)$$

На последнем шаге выполняется обратное преобразование Фурье над  $\hat{u}_k(\omega)$ , чтобы получить фильтрованные трассы во временной области.

Если расстояние между источниками мало, то соответствующие векторы (3) становятся практически линейно зависимыми, что приводит к высокому числу обусловленности матрицы  $\mathbf{A}$  и, как следствие, численной неустойчивости процедуры обращения  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$  в формуле (7). Для решения этой проблемы предлагается вычислять псевдообратную матрицу к матрице  $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ .

#### ПРИМЕРЫ РАБОТЫ ФИЛЬТРА НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Пусть имеется двумерная область пространства, которая содержит четыре источника взрывного типа (рис. 1). Среда является однородной со скоростью продольных волн 3 000 м/с. Источники 1 и 2 расположены внутри целевой области пространства; источники 3 и 4 — вне ее. В качестве формы импульса источников используется импульс Риккера с центральной частотой 50 Гц. Все четыре источника излучают импульс одновременно. Линейная система наблюдения расположена на прямой  $y = 0$ . Расстояние между приемниками 20 м. Расчет синтетических сейсмограмм проводился на основе решения уравнений упругости с помощью подхода, изложенного в работах [4, 5].



Рис. 1. Модель, используемая для получения синтетических сейсмограмм

Синтетические сейсмограммы (вертикальная компонента смещения) изображены на рис. 2а. Номера около каждой волны соответствуют номерам источников из рис. 1. Для построения проекционного оператора (7) выбраны девять источников внутри целевой области (рис. 1). В этом примере полагаем, что все источники имеют тип центра расширения и используем только фазо-

вую информацию сигнала, т. е. в формуле (4) амплитуды  $A$  принимались равными 1. Таким образом, пространство решений  $V$  натягивается на набор векторов  $S = \{\mathbf{v}^j | j = 1, \dots, 9\}$ , где  $\mathbf{v}^j$  — вектор фаз, порожденный  $j$ -м целевым источником. Результат фильтрации приведен на рис. 2б.

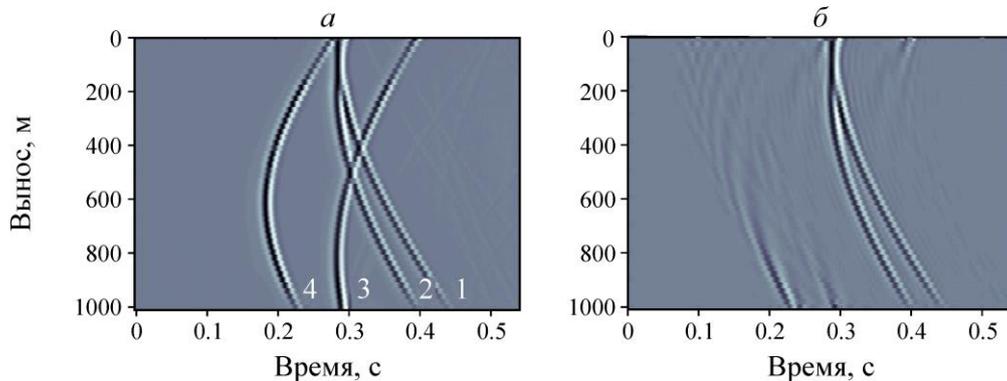


Рис. 2. Фильтрация синтетических данных: *а* — синтетическая сейсмограмма; *б* — результат фильтрации

Видно, что в результате фильтрации были подавлены Р-волны от источников, которые находились вне целевой области. Отметим, что амплитуда волны от четвертого источника на выносе 900–1000 м подавлена меньше, чем при более малых значениях выноса. Причина этого заключается в том, что при больших значениях выноса угол прихода волны (распределение фаз на приемниках) становится близким к углам прихода от волн, порождаемых целевыми источниками.

#### ПРИМЕРЫ РАБОТЫ ФИЛЬТРА НА ПОЛУСИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Стандартный подход для тестирования методов фильтрации заключается в добавлении шума на основе статистических моделей к сигналу. В действительности такой подход не совсем корректен, так как позволяет проверить возможность метода фильтрации подавлять реальный шум. Реальный шум часто является нестационарным и может коррелировать на различных приемниках. Рассмотрим экспериментальные полевые данные, полученные в результате микросейсмического мониторинга операций гидроразрыва пласта на нефтяном месторождении. Следуя [6], представим запись сейсмического поля на каждом приемнике в качестве реального шума. Выбранный интервал записи по времени совпадает с операцией по закачке жидкости. Предполагаем, что эти данные не содержат полезный сигнал, т. е. сигнал, приходящий из целевой области. После этого записанный шум, умноженный на различный коэффициент, добавляется к синтетическому сигналу. На рис. 3а изображена система наблюдения, которая использовалась при микросейсмическом мониторинге операций ГРП. Поверхностная система наблюдения состояла из 42 нерегулярно расставленных приемников (рис. 3а).

Далее рассмотрим способ получения синтетического сигнала, к которому добавлялся шум. В процессе гидроразрыва пласта выполнялись перфорационные взрывы. Запись перфорации после полосовой фильтрации изображена на рис. 3б. Введем декартову систему координат с началом отчета в точке, совпадающей с устьем скважины. В данной системе координат перфорация находилась в точке  $\mathbf{r} = (x, y, z) = (-30, 20, 1260)$ . Теперь рассмотрим микросейсмический источник, смещенный относительно перфорационного взрыва на 80 м по оси  $x$  и на 50 м по оси  $y$ , т. е. имеет координаты  $(-110, 70, 1260)$ . Чтобы получить синтетический сигнал от заданной точки, введем соответствующие временные задержки к трассам перфорационного взрыва. Задержки определяются как разницы во временах пробега Р-волн между источником, расположенным в точке перфорации и смещенным источником. Для вычисления времени пробега использовалась однородная среда со скоростью 2400 м/с. По аналогии с работой [6] получившийся синтетический сигнал складывался с записью шума, умноженного на различные коэффициенты. На рис. 4а шум умножен на 2, на рис. 4в — на 5.

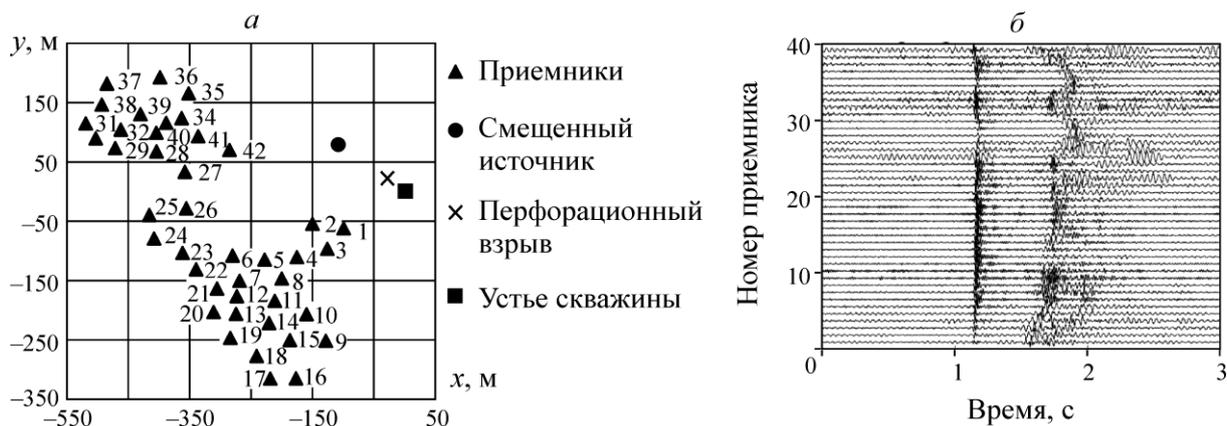


Рис. 3. *а* — система наблюдения, расположение устья скважины, перфорационного взрыва и смещенного источника (вид сверху); *б* — запись перфорационного взрыва после полосовой фильтрации

В качестве целевой области использовался куб со стороной 200 м вокруг окружающей точку перфорации. Внутри целевой области выбраны 16 целевых точек на расстоянии 50 м друг от друга в горизонтальной плоскости 1260 м. На рис. 4*б,г* приведены результаты фильтрации полусинтетических данных с добавленным шумом, умноженным на множители 2 и 5 соответственно. Видно, что предложенный метод усиливает полезный сигнал.

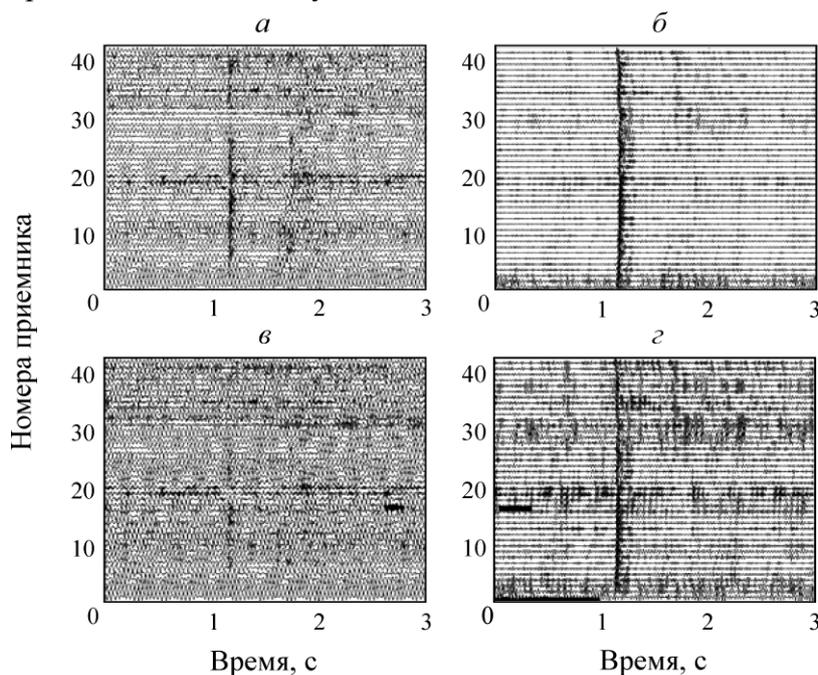


Рис. 4. Полусинтетические данные и результаты обработки: *а, в* — полезный сигнал с различным уровнем добавленного шума после полосовой фильтрации (*а* — шум, умноженный на коэффициент 2; *в* — на 5); *б, г* — соответствующие сейсмограммы после фильтрации (предложенным методом)

## ВЫВОДЫ

Предложен метод фильтрации микросейсмических данных, основанный на использовании информации о распределении фаз сигналов на приемниках. На синтетических данных показано, что он позволяет подавлять волны от источников, расположенных вне выделенной области пространства, на полусинтетических — реальный сейсмический шум и значительно повышать соотношение сигнал/шум.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Serdyukov S. V., Azarov A. V., Dergach P. A., and Duchkov A. A.** Equipment for microseismic monitoring of geodynamic processes in underground hard mineral mining, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 634–640. [Сердюков С. В., Азаров А. В., Дергач П. А., Дучков А. А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 192–200.]
2. **Forghani-Arani F., Batzle M., Behura J., Willis M., Haines S. S., and Davidson M.** Noise suppression in surface microseismic data, *The Leading Edge*, 2012, vol. 31, no. 12, pp. 1496–1501.
3. **Forghani-Arani F., Willis M., Snieder R., Haines S. S., Behura J., Batzle M., and Davidson M.** Dispersion analysis of passive surface-wave noise generated during hydraulic-fracturing operations, *Journal of Applied Geophysics*, 2014, vol. 111, pp. 129–134.
4. **Azarov A. V., Serdyukov A. S., and Nikitin A. A.** Numerical modeling of microseismic noise in the block-hierarchical heterogeneous environments, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2015, no. 9, pp. 328–335. [Азаров А. В., Сердюков А. С., Никитин А. А. Численное моделирование микросейсмического шума в блочно-иерархических неоднородных средах // ГИАБ. — 2015. — № 9. — С. 328–335.]
5. **Kurlenya M. V., Serdyukov A. S., Azarov A. V., and Nikitin A. A.** Numerical modeling of wavefields of microseismic events in underground mining, *Journal of Mining Science*, 2015, vol. 51, no. 4, pp. 689–695. [Курленя М. В., Сердюков А. С., Азаров А. В., Никитин А. А. Численное моделирование волновых полей от микросейсмических событий при подземной добыче полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2015. — № 4. — С. 61–69.]
6. **Chambers K., Kendall J. M., Brandsberg-Dahl S., and Rueda J.** Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity, *Geophysical Prospecting*, 2010, vol. 58, no. 5, pp. 821–830.