

## КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

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

<sup>1</sup> Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения РАН,  
Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука  
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия,  
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru

**Аннотация:** Важным источником информации о состоянии массива горных пород является сейсмическое излучение, генерируемое геодинамическими процессами. Одной из технологий, позволяющих регистрировать и исследовать характеристики сейсмических сигналов, является микросейсмический мониторинг (МСМ). МСМ может выполняться в условиях работающего горнодобывающего оборудования, что приводит к получению данных с высоким уровнем шума. Шум, в свою очередь, влияет на точность определения параметров сейсмических событий и, как следствие, на интерпретацию полученных результатов. По этой причине возникает задача создания шумоустойчивых систем обработки данных МСМ. Представлен комплекс программ, предназначенный для обработки данных МСМ геодинамических процессов, происходящих при добыче полезных ископаемых. В его основе лежат методы усиления полезных сигналов и подавления волн-помех, разработанные авторами статьи. Приводится краткое описание функций каждого модуля комплекса и реализованных численных алгоритмов. Представлены результаты тестирования программного пакета на синтетических и полевых данных. Показано, что использование разработанного комплекса программ позволяет повысить достоверность выделяемых событий в задачах локации сейсмических источников с различными механизмами очага в условиях низкого отношения сигнал/шум. Продемонстрирована способность комплекса выделять события из заданной области геологической среды, при этом подавляя все сигналы от источников, расположенных вне ее.

**Ключевые слова:** микросейсмический мониторинг, геодинамические процессы, сейсмические события, локация источников, разработка полезных ископаемых, обработка сейсмических данных, сейсмический шум.

**Благодарность:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-77-10023).

**Для цитирования:** Азаров А. В., Сердюков А. С. Комплекс программ обработки данных микросейсмического мониторинга разработки месторождений полезных ископаемых // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 2. – С. 58–71. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_2\_0\_58.

---

## Software package for data processing in microseismic monitoring in mineral mining

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

<sup>1</sup> Chinakal Institute of Mining of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

---

**Abstract:** An important source of information on rock mass condition is seismic radiation of geodynamic events. One of the technologies to record and study seismic signals is microseismic monitoring (MM). It is possible to perform microseismic monitoring in operating mines but the data feature a high noise in this case. The noise affects the accuracy of parameters of seismic events and, as a consequence, the data interpretation quality. For this reason, it is required to create the noise-immune systems for the MM data processing. This article presents a software package meant to process MM data on geodynamic events in the course of mineral mining. The processing package uses the authorial methods of amplification of useful signals and suppression of noise waves. The article offers a brief description of functions of each module in the package and the numerical algorithms. The software package testing is described as a case-study of processing of the synthetic and field data. The developed software package allows the improved accuracy of the event identification in the problems connected with location of seismic sources with different focal mechanisms at a low signal/noise ratio. The capacity of the software package to identify events within an assigned geological medium while suppressing all signals from the sources outside this medium is illustrated.

**Key words:** microseismic monitoring, geodynamic processes, seismic events, source location, mineral mining, seismic data processing, seismic noise.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 20-77-10023.

**For citation:** Azarov A. V., Serdyukov A. S. Software package for data processing in microseismic monitoring in mineral mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(2):58-71. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_2\_0\_58.

---

### Введение

Определение состояния массива горных пород и контроль технологических операций являются важными задачами разработки месторождений твердых полезных ископаемых, направленными на повышение эффективности и безопасности их добычи. Один из способов решения указанных задач заключается в наблюдении за сейсмическими волнами, генерируемыми геодинамическим процессами, которые протекают в геологической среде и имеют техногенный или

природный характер. По сейсмическому излучению возможно прогнозировать горные удары [1], определять зоны развития сильных деформаций [2], характеристики развивающихся трещин [3], находить разломы горной породы [4] и т.д. Одной из технологий, позволяющих это делать, является микросейсмический мониторинг (МСМ).

На сегодняшний день системы МСМ активно используются на различных горнодобывающих предприятиях. Например, на угольных шахтах [5, 6], калийных

рудниках [7, 8], соляных месторождениях [9]. В работах [10, 11] приводится описание системы совместного микросейсмического и акустического мониторинга, которая успешно используется на ряде подземных рудников дальневосточного региона России. МСМ может также применяться при открытой разработке месторождений [12, 13].

Регистрация сейсмических событий при МСМ осуществляется приемниками, которые могут располагаться на дневной поверхности (наземные системы наблюдения) [6, 14, 15], на поверхности горных выработок [16] или в неглубоких скважинах, пробуренных с дневной поверхности [9] или бортов карьеров [1]. Положения приемников обычно выбираются таким образом, чтобы повысить пространственную разрешающую способность систем наблюдения. Основными задачами МСМ в ходе добычи полезных ископаемых чаще всего являются локация источников сейсмических волн, определение их энергии, спектральных характеристик и механизма очага. По найденным параметрам источников далее производится их интерпретация и составление прогноза развития геодинамических явлений.

Одной из главных проблем при использовании МСМ является шум, который маскирует полезные сигналы, приводит к ошибкам в определении параметров событий [17], затрудняет обработку и интерпретацию данных. Особенно актуальна данная проблема для наземных систем наблюдения, где может отмечаться крайне низкое соотношение сигнал/помеха. Основным источником шума, как правило, является работающее горнодобывающее оборудование, которое может генерировать высокоэнергетические волны поверхностного типа (они являются основными помехами в случае использования наземных систем наблюдения), распространяющиеся, в том

числе, и вдоль поверхности выработок, а также объемные волны-помехи. Поэтому для повышения эффективности МСМ требуются шумоустойчивые системы и алгоритмы обработки данных.

В данной работе предложен комплекс программ обработки данных МСМ, в основе которого лежат разработанные авторами статьи алгоритмы повышения отношения сигнал/помеха. Особенностью созданного комплекса является то, что он подходит для обработки данных с высоким уровнем шума, которые собраны системами наблюдения с нерегулярными расстановками приемников (например, наземными с произвольной расстановкой приемников). Помимо этого программный пакет позволяет проводить обработку данных, содержащих сигналы от источников с различными механизмами очага, которые часто наблюдаются при мониторинге геодинамических процессов [18].

### **Комплекс программ обработки МСМ**

В рамках работы был разработан комплекс программ «MSM DatProc», предназначенный для обработки данных пассивного микросейсмического мониторинга геодинамических процессов в условиях интенсивных поверхностно-волновых помех. На рис. 1 представлена блок-схема разработанного комплекса.

Программный комплекс состоит из шести основных модулей:

- 1 — модуль одноканальной фильтрации;
- 2 — модуль расчета прямых задач;
- 3 — модуль поиска статических поправок;
- 4 — модуль многоканальной фильтрации;
- 5 — модуль локации и определения механизмов источников;
- 6 — модуль визуализации результатов.



Рис. 1. Блок-схема программного комплекса обработки данных микросейсмического мониторинга  
 Fig. 1. Microseismic data processing software

Обработка данных начинается с одноканальной фильтрации (модуль 1); используются полосовой фильтр и фильтр подавления гармонических сигналов. Полосовой фильтр позволяет отставить в данных сигналы, находящиеся в выбранном диапазоне частот. Второй фильтр необходим для подавления сильных гармонических сигналов, генерируемых, как правило, работающим оборудованием.

В модуле 2 производится вычисление теоретических времен пробега сейсмических волн от выбранных точек среды до каждого приемника, а также теоретических волновых полей от источников с различными механизмами, установленными в выбранные точки пространства. Данная информация необходима для дальнейшего применения методов многоканальной фильтрации (модуль 4) и методов определения параметров ис-

точников (модуль 5). Помимо этого модуль 2 используется для расчета синтетических сейсмограмм с целью тестирования как всего комплекса программ в целом, так и отдельных алгоритмов. Предоставлена возможность выбора различных методов решения уравнений распространения сейсмических волн в зависимости от типа среды. Например, для моделирования распространения упругих волн в неоднородных средах используется метод конечных разностей. Для сред, включающих в себя полости/горные выработки — метод спектральных элементов.

Модуль 3 предназначен для вычисления статических поправок теоретических времен пробега. Найденные статические поправки позволяют компенсировать ошибки, возникающие вследствие неоднозначности при выборе скоростной

модели вмещающей среды. Для работы данного модуля необходимы сигналы с низким уровнем шума от тестовых источников с известной локацией. В роли тестовых источников, например, могут выступать перфорационные взрывы.

Процедура поиска статических поправок выглядит следующим образом:

- вычисляются теоретические времена пробега от тестового источника до каждого приемника;
- к данным, содержащим тестовый сигнал, применяются временные задержки, соответствующие вычисленным теоретическим временам пробега (из-за ошибок в скоростной модели годограф волны тестового сигнала не спрямится);
- анализируя данные тестового сигнала с введенными задержками, можно вычислить дополнительные временные сдвиги, после применения которых годограф от тестового сигнала становится прямым (сигнал от источника приходит на все приемники одновременно). Дополнительные временные сдвиги находятся на основе вычисления коэффициента корреляции между сигналами на различных приемниках.

Найденные статические поправки корректно применять и для точек среды из окрестности тестового источника. Допустимые размеры окрестности зависят от скоростной модели среды, положения приемников и положения тестового источника.

В модуле 4 реализованы многоканальные методы фильтрации данных, разработанные авторами статьи. Их подробное описание приведено в работах [19] и [20]. Первый метод позволяет подавлять сигналы от источников, расположенных вне выделенной области геологической среды [19]. Второй метод дает возможность подавлять поверхностные волны помехи. Несмотря на то, что в статье [20] приведены примеры подавления поверхностных волн, предло-

женный алгоритм также подходит для фильтрации волн, распространяющихся вдоль выработок. Главным условием фильтрации при этом является различие кажущихся скоростей полезных волн и волн помех.

В модуле 5 реализованы алгоритмы локации и определения механизмов источников. Локация микросейсмических источников осуществляется на основе вычисления меры когерентности:

$$S(\mathbf{x}, \tau) = \frac{\left[ \sum_{k=1}^{k=N} u_k(t = \tau_k(\mathbf{x}) + \tau) \operatorname{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M})) \right]^2}{N \sum_{k=1}^{k=N} [u_k(t = \tau_k(\mathbf{x}) + \tau)]^2} \quad (1)$$

где  $u_k(t)$  — фильтрованная трасса с приемника  $k$ ;  $t_k(t)$  — время пробега волны от точки пространства, в которой вычисляется  $S(\mathbf{x}, \tau)$ , до приемника  $k$ ;  $N$  — количество приемников;  $\operatorname{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M}))$  — знак волны на приемнике  $k$  от источника с координатами  $\mathbf{x}$  с тензором сейсмического момента  $\mathbf{M}$ ;  $\operatorname{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M}))$  равен 1, если волна на приемник приходит в заданной фазе, -1, если волна на приемник приход в противоположной фазе.

Определение тензора сейсмического момента  $\mathbf{M}$  производится путем решения оптимизационной задачи:

$$F(\mathbf{w}) = \|\mathbf{u}_{\text{rec}} - \mathbf{u}_{\text{sum}}(\mathbf{w})\|_2^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_{\text{rec}}$  — зарегистрированное поле;

$\mathbf{u}_{\text{sum}} = \sum_{ij} w_{ij} \mathbf{u}_{ij}$  — линейная комбинация

теоретических полей от источников с различными механизмами;  $\mathbf{u}_{ij}$  — поле, генерируемое источником, имеющим тензор сейсмического момента с одной ненулевой компонентой  $M_{ij}$ ;  $w_{ij}$  — неизвестные весовые коэффициенты, которые необходимо подобрать в ходе решения оптимизационной задачи (2). Найденные коэффициенты  $w$  определяют тензор сейсмического момента и позволяют вычислить знак/фазу вступления волны на приемник.

Если в выражении (1) не учитывать  $\text{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M}))$ , то некоторые события могут быть не зарегистрированы. Происходит это по причине того, что при суммировании данных с различных приемников волны в прямой и обратной фазе от источников с различными механизмами будут компенсировать друг друга, уменьшая значение  $S(x, \tau)$ .

Алгоритм локации и определения механизма микросейсмических событий выглядит следующим образом:

1. выбор точки пространства  $x$ ;
2. вычисление меры когерентности по формуле (1) без учета коэффициента  $\text{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M}))$ ;
3. определение механизма событий для таких моментов времени  $\tau$ , что  $S(x, \tau)$  больше некоторого порогового значения;
4. суммирование по формуле (1) с учетом коэффициента  $\text{sgn}(R_k(\mathbf{x}, t, \mathbf{M}))$ , т.е. с учетом определенного механизма события.

Шаги 1–4 повторяются для всех интересующих точек пространства  $x$ . Ло-

кация событий проводится по анализу величины  $S(x, \tau)$ .

Отметим, что шаг 2 введен с целью снижения вычислительной сложности алгоритма. Такой подход позволяет не обращать тензор сейсмического момента для каждого момента времени. Недостатком при этом является то, что некоторые события с определенными механизмами могут быть пропущены при обработке. При необходимости шаг 2 может быть удален, а шаг 3 выполнен для каждого момента времени.

Модуль 6 предназначен для визуализации результатов обработки данных. Например, отрисовки сейсмограмм, спектрограмм, геометрии системы наблюдения, положения зарегистрированных источников.

### Тестирование программного комплекса обработки данных МСМ на синтетических данных

Тестирование программного комплекса производилось на синтетических данных, рассчитанных с использовани-

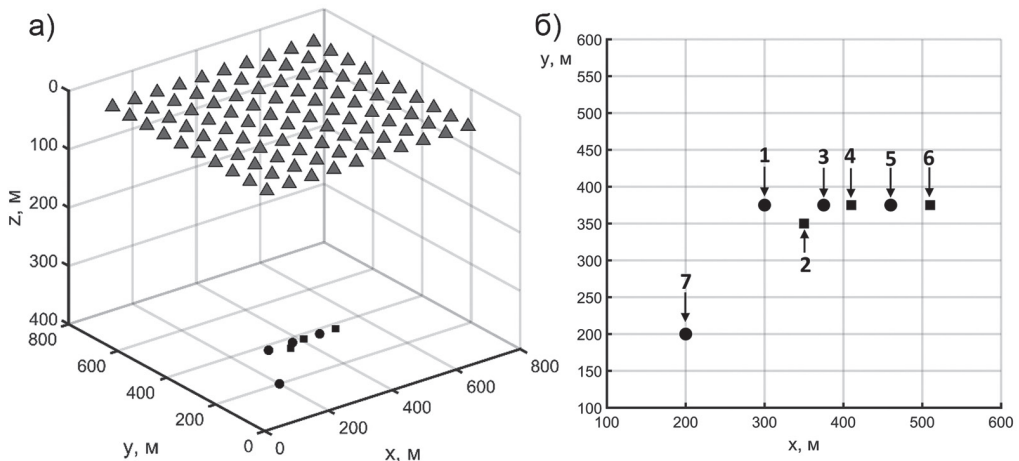


Рис. 2. 3D-модель геологической среды и поверхностная система наблюдения: 3D-среда, система наблюдения, источники объемных волн (а); источники в плоскости  $z = 400$  м: круги — источники взрывного типа (номера 1, 3, 5, 7), квадраты — источники сдвиговой дислокации (номера 2, 4, 6) (б)

Fig. 2. 3D model of the geological environment and surface observation system: 3D medium model, acquisition system, body waves sources (a); hypocenters at 400 m depth: circles — explosive sources (1, 3, 5, 7), squares — dip-slip sources (2, 4, 6) (b)

ем метода конечных разностей. Была рассмотрена 3D-модель геологической среды размерами 800×800×500 м и поверхностная площадная система наблюдения (рис. 2, а). Внутри исследуемого массива располагались несколько источников объемных волн. Дополнительно генерировались поверхностные волны-помехи типа волны Релея. Площадная система наблюдения состояла из 100 приемников, распределенных на поверхности области (плоскость  $z = 0$ ). На глубине 400 м устанавливалось 7 источников с различными механизмами (рис. 2, б): 1, 3, 5, 7 — источники взрывного типа; 2, 4, 6 — источники сдвигового типа, имеющие тензор сейсмического момента с одной ненулевой компонентой  $M_{12}$ . В точке (475, 475, 0) устанавливались источники поверхностных волн, возмущение на приемниках от которых по времени совпадало со временем прихода волн от источников объемных волн с номерами 5 и 6. В качестве формы волны в источниках был выбран импульс Риккера с центральной частотой 60 Гц.

Для расчетов синтетических сейсмограмм использовалась горизонтально-слоистая среда. Верхняя граница области являлась свободной. На оставшихся 5 границах вводился поглощающий слой, позволяющий убрать отраженные волны.

Рассчитанные синтетические сейсмограммы суммировались с шумом. В качестве шума использовались реальные записи микросейсмической активности, зарегистрированной на дневной поверхности во время выполнения операции гидроразрыва на нефтяном месторождении. Записи шума добавлялись к рассчитанному синтетическим сигналам. Отношение сигнал/шум составляло -17,56 дБ.

Обработка синтетических данных проходила в предположении, что скоростные характеристики среды неизвестны. На практике такая ситуация может

встречаться достаточно часто. При этом предполагается, что имеется сигнал от тестового источника, с помощью которого будут найдены статические поправки времен пробега, компенсирующие ошибку выбора вмещающей среды.

Дополнительно в данном примере рассматривается тестовый источник поверхностных волн, необходимый для реализации алгоритма подавления поверхностных волн.

Рассмотрим последовательно этапы обработки данных. На первом шаге применяется полосовой фильтр с полосой пропускания сигнала от 10 до 90 Гц. На втором шаге выбирается приближенная скоростная модель среды и производится поиск статических поправок с использованием тестового источника. В качестве приближения среды применяется однородная модель со скоростью продольных волн 2250 м/с. Данная скорость подбирается так, чтобы теоретический годограф волны в однородной среде был максимально близким к годографу тестового источника. Источник взрывного типа, установленный в точке (410, 375, 400), использовался как тестовый. По нему были найдены статические поправки времен пробега. Также на данном шаге производился поиск фазовых поправок поверхностных волн с использованием тестового источника, установленного в точке (475, 475, 0). Третий шаг заключается в применении фильтра поверхностных волн [19] и проекционного фильтра к обрабатываемым данным [20].

На рис. 3 приведены результаты обработки данных. В левом столбце данные содержали низкий уровень шума, справа высокий. На всех рисунках отображена следующая мера:

$$D(\mathbf{x}) = \sum_{\tau: S(\mathbf{x}, \tau) > h} S(\mathbf{x}, \tau),$$

т.е. суммируем все временные срезы, на которых мера  $S(\mathbf{x}, \tau)$  превысила некоторое пороговое значение  $h$ .

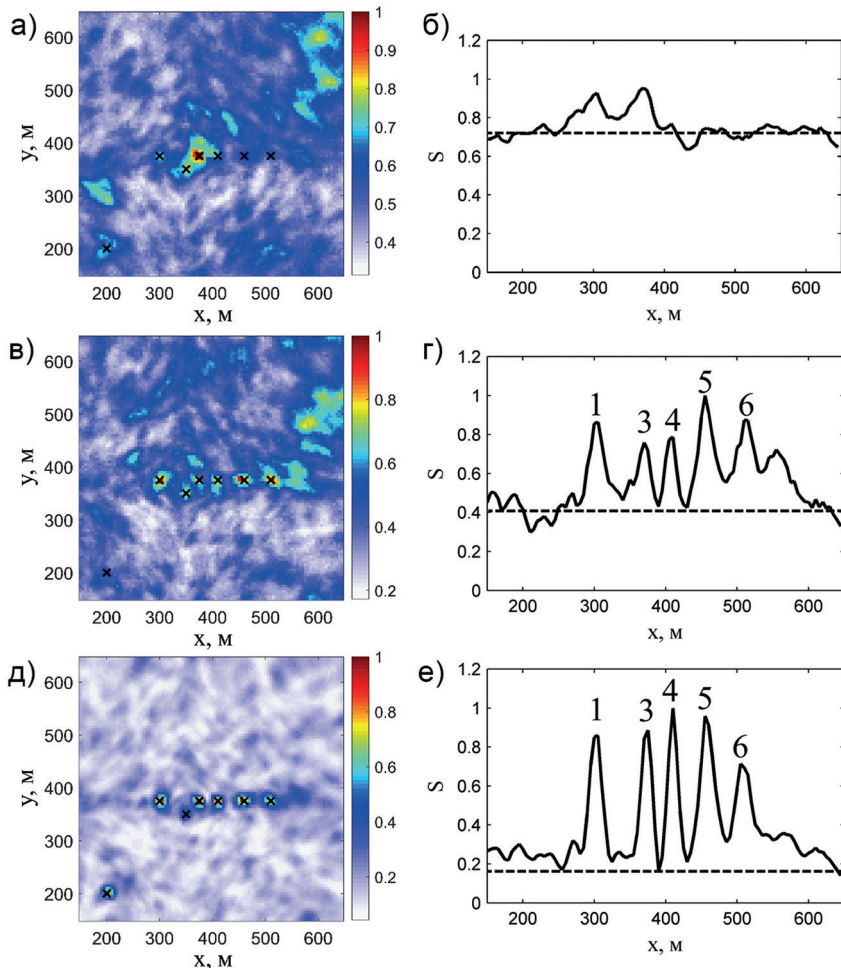


Рис. 3. Результаты локации микросейсмических событий: к данным применялся полосовой фильтр (а, б); к данным применялся полосовой фильтр и фильтр поверхностных волн (в, г); к данным применялся полосовой фильтр, фильтр поверхностных волн и проекционный фильтр (д, е)

Fig. 3. The results of microseismic events hypocenters location: data is processed by band-pass filter (a, b); data is processed by band-pass and surface wave suppression filters (v, g); data by band-pass, surface wave suppression and projection filters (d, e)

На рис. 3 а, в, д приведено значение меры когерентности в плоскости  $z = 400$  м. На рис. 3 б, г, е представлена мера когерентности на прямой  $y = 375$  м (в плоскости  $z = 400$  м), где расположены источники 1, 3, 4, 5, 6, цифры у максимумов соответствуют номерам источников из рис. 2. Пунктирной линией показано среднее значение меры  $S$  во всей области. В рассмотренном синтетическом примере применение только поло-

совой фильтрации не дает возможность локализовать события, так как явных пиков в значениях  $S$  не наблюдаются (см. рис. 3, а, б). Использование фильтра поверхностных волн улучшает результат — значение меры когерентности в точках расположения источников возрастает (см. рис. 3, в, г). Тем не менее фоновое значение меры когерентности остается высоким, что может приводить к регистрации ложных событий.

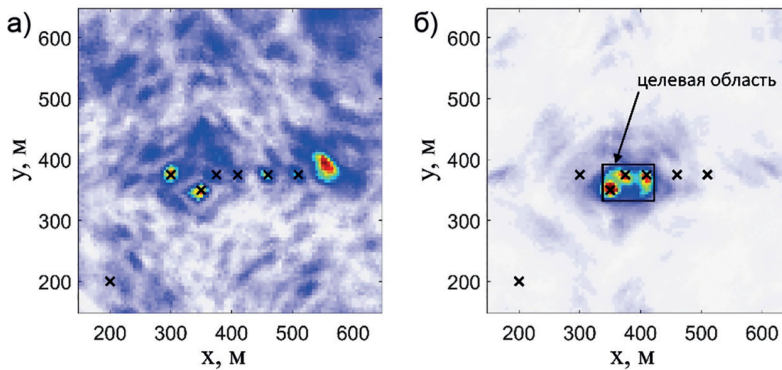


Рис. 4. Результаты локации микросейсмических событий взрывного типа: к данным применялся полосовой фильтр и фильтр поверхностных волн (а); к данным применялся полосовой фильтр, фильтр поверхностных волн и проекционный фильтр (б)

Fig. 4. The results of explosive sources location: data is processed by band-pass and surface wave suppression filters (a); data by band-pass, surface wave suppression and projection filters (b)

На рис. 3, д, е представлен результат, где к данным дополнительно применялся проекционный фильтр. Как видно, все события удалось обнаружить. При этом фоновое значение меры когерентности было снижено в два раза. По этой причине можно сделать вывод, что использование алгоритмов, реализованных в разработанном программном комплексе, позволяет повысить достоверность выделяемых сейсмических событий.

В заключение рассмотрим пример применения проекционного фильтра, при котором требуется регистрировать сейсмические события от источников, попадающих внутрь выделенной области геологической среды. В качестве целевой области выберем прямоугольную призму  $60 \times 60 \times 90$  м (на рис. 4, б приведена ее проекция на плоскость  $xu$ ), в которую попадают источники с номерами 2, 3, 4. При этом в данном примере будем считать, что все источники имеют взрывной механизм очага. На рис. 4, а приведен результат локации, в котором к данным применялась только полосовая фильтрация. На рис. 4, б представлен результат локации после применения к данным проекционного фильтра с заданной целевой областью. Как видно,

все три события внутри целевой области хорошо определяются, в то время как на рис. 4, а события с номером 3 и 4 не определились.

### Обработка реальных данных микросейсмического мониторинга

При помощи разработанного программного комплекса были обработаны данные микросейсмического мониторинга гидравлического разрыва пласта (ГРП) на нефтяном месторождении Узень (Казахстан). Данные были предоставлены компанией АО «Технологии обратных задач». На рис. 5 изображена наземная система наблюдения, которая использовалась при мониторинге. Регистрация микросейсмической эмиссии при производстве ГРП осуществлялась на дневной поверхности с помощью сейсмической антенны из 48 приемников с использованием станции SGD-SHF48. Частота оцифровки сейсмических записей 1000 Гц (1 мс).

Информация о скоростной модели среды отсутствовала. Была известна только средняя скорость распространения продольных волн, которая составляла 1958–2104 м/с. По этой причине в каче-

стве приближения была выбрана однородная модель среды со скоростью продольных волн 2100 м/с. Поперечные волны не использовались при обработке. Статические поправки были найдены с помощью записи перфорационного взрыва, выполненного в скважине на глубине 1260 м. Для удобства была введена локальная система координат с началом в устье скважины. В новых координатах перфорация располагалась в точке (-30, 20, 1260).

Далее, с целью проверки корректной работы программного комплекса, была произведена обработка записи перфорационного взрыва, расположенного в 10 м ниже от взрыва, по которому были найдены статические поправки. На рис. 6 изображена мера когерентности в плоскости  $z = 1270$  м. На рис. 6, а представлена локация, которая проводилась без учета статических поправок. Как видно, энергия не локализовалась и событие не обнаружилось. На рис. 6, б

мера когерентности вычислялась с учетом статических поправок, что позволило определить локацию события.

На следующем шаге проводилась обработка двадцатиминутной записи данных микросейсмического мониторинга ГРП. С помощью полосового фильтра в данных были пропущены сигналы в диапазоне от 20 до 90 Гц. Фильтр поверхностных волн не использовался, так как отсутствовала информация о скоростном строении верхней части геологического разреза и не было тестовых источников поверхностных волн. Перед локацией сейсмических источников к данным применялся только проекционный фильтр.

На рис. 6, в приведены результаты локации, полученные при обработке минутного интервала данных, на котором были зарегистрированы самые сильные сейсмические события. Как видно, форма области наиболее плотной локализации сейсмической энергии на пло-

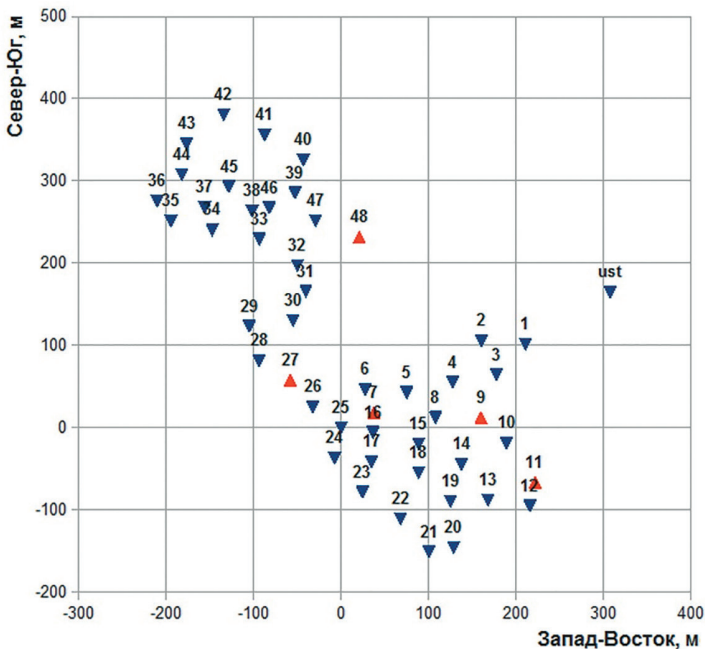


Рис. 5. Наземная система наблюдения, используемая при микросейсмическом мониторинге ГРП  
 Fig. 5. The surface-based microseismic hydraulic fracturing monitoring acquisition system

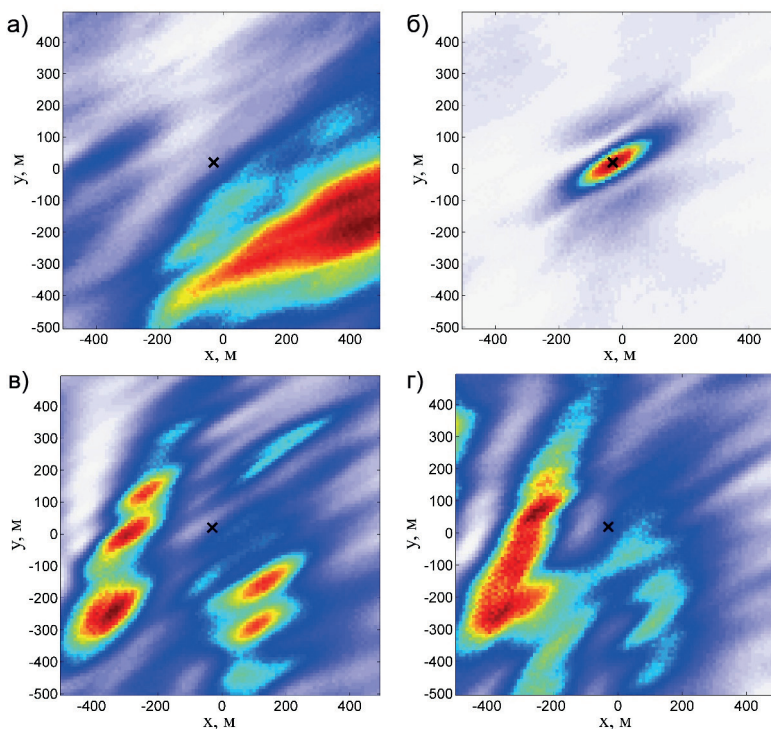


Рис. 6. Мера когерентности в горизонтальной плоскости на глубине 1260 м. Локация перфорационного взрыва: без учета статистических поправок (а); взрыва с учетом статических поправок (б). МСМ гидроразрыва: обрабатывался минутный интервал данных (в); обрабатывался двадцатиминутный интервал данных (г)

Fig. 6. The coherence at 1260 m depth, explosive source location (perforation): without static corrections (a); with static corrections (b). Hydraulic fracturing location results: the one minute records procession results (v); twenty minutes records procession results (g)

скости в большей степени схожа с сейсмическими событиями, которые наблюдаются при локации перфорационных взрывов, представленных на рис. 6, б. На рис. 6, г представлены результаты локации, полученные при обработке всего двадцатиминутного интервала данных.

Анализируя результаты, можно увидеть, что зарегистрированная микросейсмическая активность локализована в областях, удаленных к западу от местоположения перфорации.

### Выводы

Дано описание комплекса программ «MSM DatProc», предназначенного для обработки данных микросейсмическо-

го мониторинга геодинамических процессов. В рамках созданного комплекса реализованы новые методы подавления помех, разработанные авторами статьи.

На синтетических примерах показана способность комплекса программ обнаруживать сейсмические источники с различными механизмами очага в условиях высокого уровня шума. Показано, что использование разработанных алгоритмов позволяет повысить достоверность выделяемых событий. Продемонстрирована способность комплекса выделять события из заданной области геологической среды, при этом подавляя все сигналы от источников, расположенных вне ее. Приведены результаты апро-

бации программного комплекса на полевых данных МСМ гидроразрыва пласта на нефтяном месторождении. Так как принцип работы алгоритма не зависит от типа наблюдаемых событий, геометрии и па-

раметров системы наблюдения, предложенный программный комплекс может быть применен и при мониторинге геодинамических процессов на месторождениях твердых полезных ископаемых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассказов М. И., Гладырь А. В., Терешкин А. А., Цой Д. И. Сейсмоакустическая система контроля горного давления на подземном руднике «Мир» // Проблемы недропользования. — 2019. — № 2 (21). — С. 56 — 61.

2. Гладырь А. В., Курсакин Г. А., Рассказов М. И., Константинов А. В. Разработка метода выделения опасных участков в массиве горных пород по данным сейсмоакустических наблюдений // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 21 — 32. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32.

3. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs // Fuel. 2019, vol. 242, pp. 195 — 210.

4. Шарапов И. Р., Феофилов С. А. Наземные пассивные микросейсмические мониторинги при изучении, разработке и эксплуатации недр в нефтегазовой и горнодобывающей отраслях // Приборы и системы разведочной геофизики. — 2021. — № 3. — С. 10 — 19.

5. Разумов Е. Е., Рукавишников Г. Д., Мулев С. Н., Простов С. М. Анализ сейсмической активности массива при ведении горных работ на шахте «Комсомольская» АО «Воркутауголь» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 1. — С. 104 — 114. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_104.

6. Verdon J. P., Kendall J. M., Butcher A., Luckett R., Baptie B. J. Seismicity induced by longwall coal mining at the Thoresby Colliery, Nottinghamshire, UK // Geophysical Journal International. 2018, vol. 212, no. 2, pp. 942 — 954.

7. Злобина Т. В. Влияние ширины и высоты выработки на проявления микросейсмической активности в калийных рудниках // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 8. — С. 136 — 145. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145.

8. Верхоланцева Т. В., Дягилев Р. А. Изучение влияния закладочных работ на сейсмический режим калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 12. — С. 115 — 123.

9. Trifu C. I., Shumila V. Microseismic monitoring of a controlled collapse in Field II at Osnele Mari, Romania // Pure and Applied Geophysics. 2010, vol. 167, no. 1, pp. 27 — 42.

10. Рассказов Н. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Изд-во «Горная книга», 2008. — 329 с.

11. Гладырь А. В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 6. — С. 220 — 234.

12. Романов В. В., Мальский К. С., Дронов А. Н. Использование записей микросейсмических колебаний при изучении влияния массовых взрывов на состояние горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 5. — С. 293 — 300.

13. Маловичко Д. А., Линч Р. Э. Микросейсмический мониторинг бортов карьеров // Горное эхо. — 2006. — № 2. — С. 21.

14. Cesca S., Grigoli F. Full waveform seismological advances for microseismic monitoring // Advances in Geophysics. 2015, vol. 56, pp. 169 — 228.

15. Sen A. T., Cesca S., Bischoff M., Meier T., Dahm T. Automated full moment tensor inversion of coal mining-induced seismicity // Geophysical Journal International. 2013, vol. 195, no. 2, pp. 1267 — 1281.

16. Jiang Z., Li Q., Hu Q., Chen J., Li X., Wang X., Xu Y. Underground microseismic monitoring of a hydraulic fracturing operation for CBM reservoirs in a coal mine // *Energy Science & Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 986 – 999.

17. Mueller M., Thornton M., Eisner L. Uncertainty in surface microseismic monitoring // *ASEG Extended Abstracts*. 2013, no. 1, pp. 1 – 4.

18. Ломакин И. С. Деформирование и разрушение несущих элементов камерной системы разработки в условиях слоисто-неоднородного строения породного массива. Дис. ... канд. тех. наук. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2015. – 197 с.

19. Azarov A. V., Serdyukov A. S., Gapeev D. N. Research note: Frequency domain orthogonal projection filtration of surface microseismic monitoring data // *Geophysical Prospecting*. 2020, vol. 68, no. 2, pp. 382 – 392.

20. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data // *Geophysics*. 2019, vol. 84, no. 1, pp. A19 – A24. **MIAB**

## REFERENCES

1. Rasskazov M. I., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., & Tsoi D. I. Seismoacoustic rock pressure control system at the Mir underground mine. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 2 (21), pp. 56 – 61. [In Russ].

2. Gladyr A. V., Kursakin G. A., Rasskazov M. I., Konstantinov A. V. Method to detect hazardous areas in rock mass from seismoacoustic observations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 21 – 32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-21-32.

3. Li L., Tan J., Wood D. A., Zhao Z., Becker D., Lyu Q., Chen H. A review of the current status of induced seismicity monitoring for hydraulic fracturing in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Fuel*. 2019, vol. 242, pp. 195 – 210.

4. Sharapov I. R., Feofilov S. A. Ground passive microseismic monitoring in the study, development and operation of subsoil in the oil and gas and mining industries. *Pribory i sistemy razvedochnoy geofiziki*. 2021, no. 3, pp. 10 – 19. [In Russ].

5. Razumov E. E., Rukavishnikov G. D., Mulev S. N., Prostov S. M. Seismic activity in rock mass during mining operations in Vorkutaugol's Komsomolskaya Mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 1, pp. 104 – 114. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_1\_0\_104.

6. Verdon J. P., Kendall J. M., Butcher A., Lockett R., Baptie B. J. Seismicity induced by longwall coal mining at the Thoresby Colliery, Nottinghamshire, UK. *Geophysical Journal International*. 2018, vol. 212, no. 2, pp. 942 – 954.

7. Zlobina T. V. Influence of width and height of rooms on microseismic activity in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 136 – 145. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-136-145.

8. Verkholantseva T. V., Diaghilev R. A. Influence of backfilling on seismic activity in potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 12, pp. 115 – 123. [In Russ].

9. Trifu C. I., Shumila V. Microseismic monitoring of a controlled collapse in Field II at Ocnele Mari, Romania. *Pure and Applied Geophysics*. 2010, vol. 167, no. 1, pp. 27 – 42.

10. Rasskazov N. *Kontrol' i upravlenie gornym davleniem na rudnikakh Dal'nevostochnogo regiona* [Control and management of rock pressure in the mines of the Far East region], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2008, 329 p.

11. Gladyr A. V. Integration of microseismic and geoacoustic data of geomechanical monitoring. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 6, pp. 220 – 234. [In Russ].

12. Romanov V. V., Malsky K. S., Dronov A. N. Application of seismic vibration records in studies of mass blasting effect on excavations in mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2016, no. 5, pp. 293 – 300. [In Russ].

13. Malovichko D. A., Linch R. E. Microseismic monitoring of quarry sides. *Gornoe ekho*. 2006, no. 2, pp. 21. [In Russ].

14. Cesca S., Grigoli F. Full waveform seismological advances for microseismic monitoring. *Advances in Geophysics*. 2015, vol. 56, pp. 169 – 228.

15. Sen A. T., Cesca S., Bischoff M., Meier T., Dahm T. Automated full moment tensor inversion of coal mining-induced seismicity. *Geophysical Journal International*. 2013, vol. 195, no. 2, pp. 1267 – 1281.

16. Jiang Z., Li Q., Hu Q., Chen J., Li X., Wang X., Xu Y. Underground microseismic monitoring of a hydraulic fracturing operation for CBM reservoirs in a coal mine. *Energy Science & Engineering*. 2019, vol. 7, no. 3, pp. 986 – 999.

17. Mueller M., Thornton M., Eisner L. Uncertainty in surface microseismic monitoring. *ASEG Extended Abstracts*. 2013, no. 1, pp. 1 – 4.

18. Lomakin I. S. *Deformirovanie i razrushenie nesushchikh elementov kamernoy sistemy razrabotki v usloviyakh sloisto-neodnorodnogo stroeniya porodnogo massiva* [Deformation and destruction of the load-bearing elements of the chamber development system in the conditions of the layered-heterogeneous structure of the rock mass], Candidate's thesis, Perm, 2015, 197 p.

19. Azarov A. V., Serdyukov A. S., Gapeev D. N. Research note: Frequency domain orthogonal projection filtration of surface microseismic monitoring data. *Geophysical Prospecting*. 2020, vol. 68, no. 2, pp. 382 – 392.

20. Serdyukov A. S., Yablokov A. V., Duchkov A. A., Azarov A. A., Baranov V. D. Slant f-k transform of multichannel seismic surface wave data. *Geophysics*. 2019, vol. 84, no. 1, pp. A19 – A24.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Азаров Антон Витальевич – научный сотрудник,  
Институт горного дела им. Н.А. Чинакала  
Сибирского отделения РАН, e-mail: antonazv@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,

Сердюков Александр Сергеевич – канд. физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН,  
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,  
ORCID ID: 0000-0035-8563-5708.

**Для контактов:** Сердюков А.С., e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.V. Azarov, Researcher,  
Chinakal Institute of Mining  
of Siberian Branch of Russian Academy  
of Sciences, 630091, Novosibirsk, Russia,  
e-mail: antonazv@mail.ru,  
ORCID ID: 0000-0001-6967-4239,

A.S. Serdyukov, Cand. Sci. (Phys. Mathem.),  
Senior Researcher, Trofimuk Institute  
of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian,  
Siberian Branch of Russian Academy  
of Sciences, 630090, Novosibirsk, Russia,  
e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru,  
ORCID ID: 0000-0035-8563-5708.

**Corresponding author:** A.S. Serdyukov, e-mail: aleksanderserdyukov@ya.ru.

Получена редакцией 29.08.2022; получена после рецензии 05.10.2022; принята к печати 10.01.2023.  
Received by the editors 29.08.2022; received after the review 05.10.2022; accepted for printing 10.01.2023.