

УДК 550.34.013.4

**СОВМЕСТНАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ  
И ПОДЗЕМНЫХ СИСТЕМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА  
ПРИ ДОБЫЧЕ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

**Г. Н. Логинов<sup>1,2,3</sup>, С. В. Яскевич<sup>1,2</sup>, А. А. Дучков<sup>1,2,3</sup>, А. С. Сердюков<sup>1,2,3</sup>**

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

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

<sup>3</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
E-mail: ss3032@yandex.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрена задача оптимизации системы наблюдений микросейсмического мониторинга месторождений твердых полезных ископаемых. Разработана методика оценки точности результатов локации гипоцентров отдельных событий. Показано преимущество комбинированной системы наблюдения с распределенными подземными приемными антеннами и дополнительными датчиками, удаленными от плоскости продуктивного пласта. Полученные результаты важны для оптимизации систем наблюдения, повышения эффективности микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых.

*Микросейсмический мониторинг, система сбора данных, обратная кинематическая задача, локация гипоцентров*

По мере роста глубины подземной разработки твердых полезных ископаемых возрастает влияние геодинамических процессов техногенного и природного происхождения. Эти процессы могут сопровождаться горными ударами, выбросами газа и угольной пыли [1–3]. Изучение сейсмичности в шахтах, рудниках, карьерах позволяет оценить напряженное состояние массива горных пород, понять закономерности его деформирования, изучить причины катастрофических проявлений геодинамических событий.

Для наблюдения и интерпретации сейсмической активности с целью прогноза опасности внезапных выбросов и горных ударов может быть использован метод пассивного микросейсмического мониторинга (МСМ) [4]. Он позволяет регистрировать высокоэнергетические события, возникающие при разрушении кровли пород, а также акустическую эмиссию в ближних зонах выполнения горных работ [5]. Энергия такой сейсмичности невысока, тем не менее, магнитуды событий позволяют регистрировать прямые вступления продольной и поперечной волн. Современная приемная сейсмическая аппаратура может фиксировать события с магниту-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 15-35-20932\_мол\_а\_вед).

дами порядка  $M = -1$ ,  $M = -2$  на расстоянии километра [6]. Регистрация сейсмических событий в ходе разработки газоносных угольных пластов выполняется сейсмоприемниками, расположенными на дневной поверхности [7] (наземная система наблюдений) либо в близлежащих штреках, как правило, сосредоточенными расстановками (подземная система) [8]. На производстве широко используются малоканальные системы наблюдений [5, 8], при этом данные от различных сетей собираются независимо друг от друга. Невозможность синхронизации затрудняет их совместную обработку. Следствием этой проблемы является невысокое пространственное разрешение при локации очагов событий. Как правило, несмотря на существенную трехмерность задачи, удается добиться приемлемой точности локации только в горизонтальной плоскости [9].

В настоящее время возможны аппаратно-программные решения, позволяющие объединить и синхронизовать потоки данных от различных сетей наблюдения, а также существенно повысить их точность и чувствительность [10]. Внедрение подобных систем требует разработки новых алгоритмов обработки данных МСМ. Актуальной задачей является оптимизация системы наблюдений с целью повышения точности локации гипоцентров микросейсмических событий.

Работа [11] была одной из первых, в которой микросейсмичность в угольных шахтах изучалась при помощи комбинированной системы наблюдений (из двух наблюдательных антенн). Авторы не исследовали влияние геометрии системы наблюдений на результаты, но по облакам полученных ими гипоцентров видно, что оно высоко. В [12] авторы изучают точность локации микросейсм при помощи поверхностной системы наблюдений, дополненной несколькими погруженными сейсмоприемниками, при этом область неоднозначности предлагается описывать эллипсоидом в силу отсутствия локальных минимумов в случае однородной скоростной модели.

В настоящей работе рассматривается задача локации гипоцентров отдельных событий по временам пробега сейсмических волн, полученных от комбинированных систем наблюдения, которые предлагаются в [9]. Выполнен численный анализ влияния геометрии системы наблюдений на точность локации гипоцентров микросейсмических событий. Полученные результаты важны для оптимизации систем наблюдений с целью повышения достоверности результатов обработки данных МСМ.

#### АЛГОРИТМ ЛОКАЦИИ ГИПОЦЕНТРОВ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЕГО ТОЧНОСТИ

Используемый для определения координат гипоцентров микросейсмических событий метод основан на решении обратной кинематической задачи и предусматривает минимизацию функционала невязки между наблюдаемыми и рассчитанными временами пробега (для текущего значения неизвестных параметров):

$$L(\mathbf{m}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_j} (t_{Q_{ij}}^{obs} - t_{Q_{ij}}^{syn}(\mathbf{m}))^2} \rightarrow \min_{\mathbf{m}}, \quad (1)$$

где  $t_{Q_{ij}}^{obs}$  — наблюдаемые времена прихода волн (компоненты вектора данных); индекс  $Q$  — тип волны ( $P$  или  $S$ ), приходящей из  $j$ -го источника в  $i$ -й приемник;  $N_r$  — количество приемников;  $N_j$  — количество источников;  $t_{Q_{ij}}^{syn}(\mathbf{m})$  — теоретические (модельные) времена пробега для текущего значения искомых параметров модели  $\mathbf{m}$ , рассчитанные по аналитическим формулам (в случае однородной или градиентной среды). Минимизация функционала осуществляется стандартным методом сопряженных градиентов.

Вектор неизвестных параметров  $\mathbf{m}$  зависит от постановки обратной задачи. В общем случае он может включать в себя параметры скоростной модели среды (как правило, слоистой или однородной). В этой работе мы сосредоточены на определении координат гипоцентров и вектор параметров модели имеет вид  $\mathbf{m} = (\tau_{0j}, \mathbf{x}_j)$ . Он включает в себя неизвестные времена в очаге  $\tau_{0j}$  и координаты гипоцентров  $\mathbf{x}_j$ .

Точность локации гипоцентров событий связана с устойчивостью решения обратной задачи (1) относительно возмущений данных времен пробега. Она обусловлена поведением функционала невязки  $L(\mathbf{m})$  в окрестности минимума (в неоднородных моделях может быть несколько минимумов). Устойчивость решения обратной задачи может быть исследована путем многократной инверсии зашумленных данных. К данным (временам прихода волн) добавляется множество реализаций гауссовского случайного шума  $n_k(0, \varepsilon)$  с нулевым средним и дисперсией  $\varepsilon$ , которая соответствует типичной точности определения времен прихода прямых волн. Для каждой реализации зашумленных данных решается обратная кинематическая задача расчета вектора модельных параметров  $\mathbf{m}_k$ . Полученное таким образом множество решений характеризует точность решения обратной задачи. Подобное исследование проводится для различных конфигураций систем наблюдения с целью поиска оптимальной расстановки приемников, позволяющей добиться приемлемой точности (первые метры) локации гипоцентров.

Рассмотрим множество гипоцентров микросейсмических событий, соответствующих разным реализациям зашумленных данных  $t_k^{obs}$ . Для каждой реализации шума находится вектор параметров модели  $\mathbf{m}_k$ , включающий координаты гипоцентра  $\mathbf{x}_{jk}$ . По множеству реализации инверсии ( $K$ ) можно найти его наиболее вероятное положение, вычислив среднее по полученным координатам:

$$\bar{\mathbf{x}}_j \equiv \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{x}_{jk}.$$

Оценить точность локации гипоцентра можно по среднеквадратическому отклонению от множества полученных решений от среднего:

$$\sigma_{xj} \equiv \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\mathbf{x}_{jk} - \bar{\mathbf{x}}_j)^2}.$$

Для иллюстрации предложенного метода проведена серия численных экспериментов по сравнению разрешающей способности нескольких систем наблюдений, которые могут использоваться при шахтной добыче твердых полезных ископаемых, например угля.

### ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Система микросейсмических наблюдений состоит из нескольких групп сейсмоприемников (геофонов), одна из которых представляет собой компактную линейную оперативную антенну небольшой длины [8], другие — распределенную сеть сейсмических приемников [10], расположенных в продуктивном пласте (рис. 1). Эту систему наблюдений могут дополнять сейсмоприемники на дневной поверхности или на удаленных по глубине горизонтах (рис. 3, 4).

Синтетические данные  $t_{Qij}^{syn}$  рассчитывались для однородной скоростной модели. Такие модели, несмотря на ожидаемую физическую неоднородность среды, применяются в практике на сегодняшний день [7]. Нами также использовалась однородная модель со скоростями продоль-

ной и поперечной волн  $V_p = 2.5$  км/с,  $V_s = 1$  км/с, которые соответствуют скоростям распространения упругих волн в угле. Начальное приближение для координат гипоцентров выбиралось случайно в объеме, характерном для рассматриваемой задаче ( $\pm 500$  м по глубине, горизонтальные координаты ограничены границами выработки).

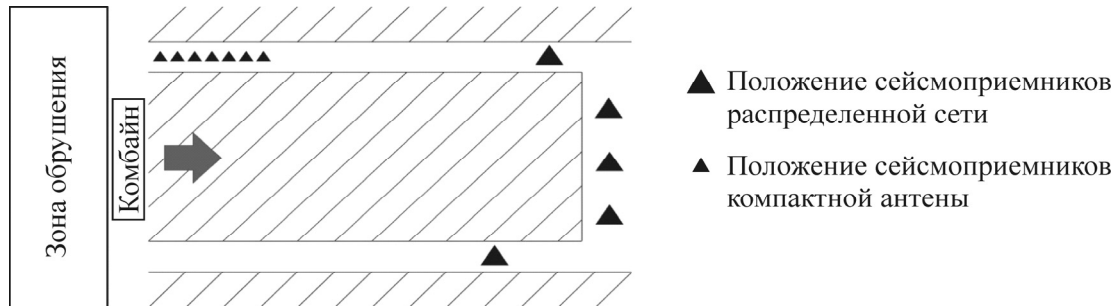


Рис. 1. Схематическое изображение системы сейсмических наблюдений на участке очистных работ

В данном исследовании сеть наблюдений на уровне глубины выработки состоит из двух систем наблюдений:

— две компактные антенны: одна, удаленная на 200 м от предполагаемой области концентрации микросейсмических событий, расположенная сбоку от выемочного столба, вторая — удаленная на 1.5 км от него. Длина антенн 300 м. Обе расположены на глубине разрабатываемого пласта и включают по 6 сейсмоприемников (рис. 2а);

— компактная антенна, удаленная на 200 м от предполагаемой области концентрации микросейсмических событий, и распределенная сеть из восьми сейсмоприемников, расставленных на базе длиной 500 м, шириной 200 м, на удалении 1500 м от области микросейсмических событий, также в конце выемочного столба (рис. 2б).

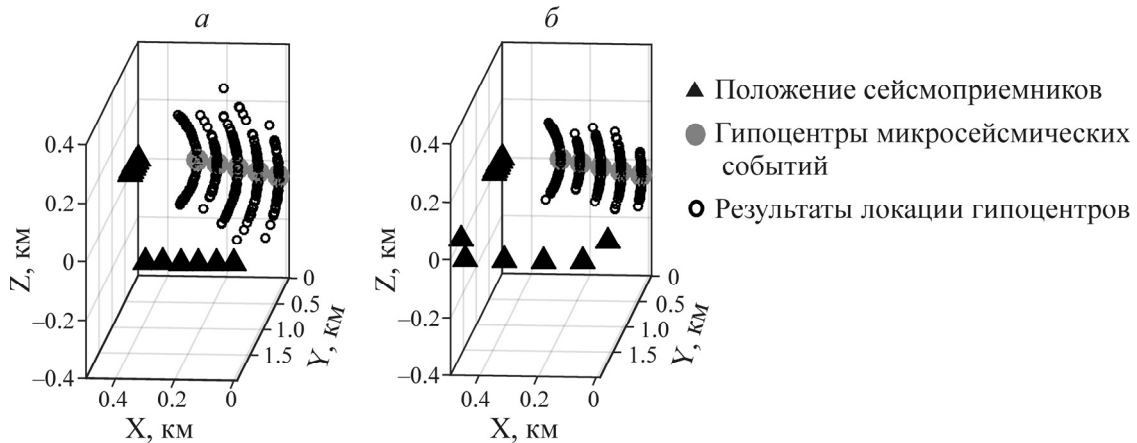


Рис. 2. Результат определения координат гипоцентров тестовых микросейсмических событий двумя подземными антеннами: а — компактная линейная антенна в конце выемочного столба; б — распределенная приемная антенна в конце выемочного столба

Эта сеть используется либо независимо, либо дополняется данными от отдельного сейсмоприемника, расположенного выше выработки. Последний удаляется (по глубине) на 100 м либо на 300 м. Такой приемник может являться частью стационарной сейсмической сети в области выработки.

Область пассивной акустической эмиссии или активных деформаций представлена серией гипоцентров, расставленных в линию, что может соответствовать геологическому разлому [13]. От них рассчитаны времена пробега прямых  $P$ - и  $S$ -волн. Во данные времен пробега вносился шум с дисперсией 1 мс и нулевым средним. Моменты срабатывания источников эмиссии задавалось случайным образом. Предлагаемый подход может быть применен и в неоднородных скоростных моделях. При этом целесообразно использовать методику моделирования микросейсмических данных, рассмотренную в [14].

На рис. 2 представлены результаты локации гипоцентров пяти микросейсмических событий по временам регистрации прямых волн системами наблюдений, состоящими из двух антенн ( $a$  и  $b$ ) и расположенными на уровне глубины выработки без дополнения их удаленным датчиком.

Из результатов, представленных на рис. 2, видно, что для обеих систем наблюдений определение глубины гипоцентров является неустойчивым, о чем свидетельствует широкий разброс установленных координат гипоцентров (отмеченных серыми маркерами). Такие системы не обладают разрешением, достаточным для определения глубины гипоцентров. Система наблюдений из двух компактных антенн может также приводить к значительным ошибкам в горизонтальных координатах гипоцентров. Количественная характеристика ошибок локации приведена в таблице.

Оценки точности определения координат гипоцентров тестовых микросейсмических событий для системы наблюдений

Номер события	Среднеквадратическое отклонение $\sigma_x$ , м				
	Рис. 2а	Рис. 2б	Рис. 3а	Рис. 3б	Рис. 4
1	139.6	37.0	85.8	7.3	0.8
2	102.2	35.2	92.2	6.2	0.7
3	72.0	32.6	79.7	7.8	0.8
4	47.8	32.5	79.7	9.3	0.9
5	32.4	19.0	80.6	6.9	0.8

В следующем варианте системы наблюдений для повышения точности определения глубины гипоцентров добавлен сейсмоприемник, удаленный на 100 м от плоскости продуктивного пласта (рис. 3). Такая ситуация моделирует расположение сейсмического датчика на соседнем горизонте рудника или на поверхности.

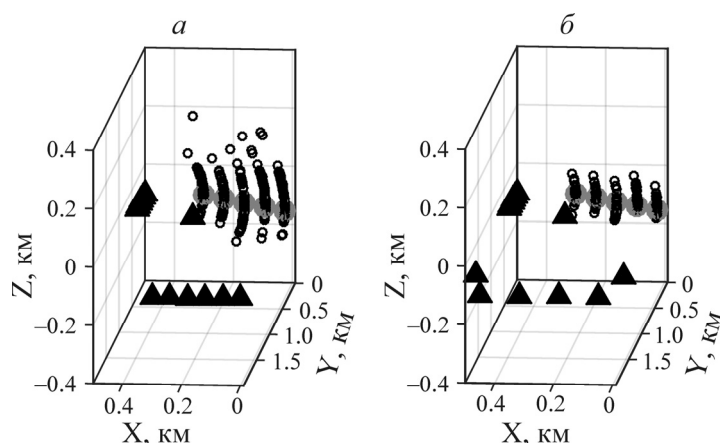


Рис. 3. Результаты определения координат гипоцентров тестовых микросейсмических событий с дополнительным наземным сейсмическим приемником, удаленным на 100 м от плоскости продуктивного пласта:  $a$  — компактная линейная антенна в конце выемочного столба;  $b$  — распределенная приемная антенна в конце выемочного столба; условные обозначения см. на рис. 2

Для системы наблюдений из двух коротких антенн очевидно улучшение точности в горизонтальной плоскости (рис. 3а), но точность определения глубины микросейсмического события остается в пределах сотни метров. Лучшие результаты дает система наблюдений, когда одна из антенн установлена вблизи конца выемочного столба (типа б). Дополнение такой системы удаленным датчиком обеспечивает повышение точности определения глубины гипоцентров до 7 м. Оценки точности определения гипоцентров тестовых микросейсмических событий с дополнительным наземным сейсмическим приемником, удаленным на 100 м от плоскости продуктивного пласта, приведены в таблице.

Далее к рассматриваемым системам наблюдений был добавлен сейсмоприемник, удаленный на 300 м от плоскости продуктивного пласта (рис. 4). Такая ситуация моделирует расположение сейсмического датчика на удаленном горизонте рудника или на дневной поверхности. На рис. 4 представлены результаты локаций гипоцентров микросейсмических событий.

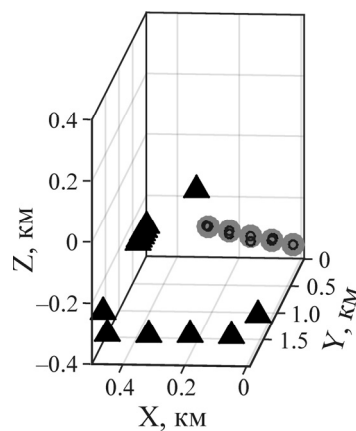


Рис. 4. Результат определения гипоцентров событий в случае использования поверхностного приемника, удаленного на 300 м от плоскости продуктивного пласта: распределенная приемная антенна в конце выемочного столба (результаты с компактной антенной выглядят аналогично); условные обозначения см. на рис. 2

Из рис. 4 видно, что точность локаций значительно возрастает. Высокую точность, достаточную для решения практических задач (первые метры), дают обе рассматриваемые комбинации подземных приемных антенн. Представлены результаты для одной системы наблюдений с распределенной антенной. Полученные координаты гипоцентров по зашумленным данным не выходят за область маркера, обозначающего действительное положение события. В сравнении с предыдущими примерами, представленным на рис. 2 и 3, такое улучшение является значительным. Среднеквадратическое отклонение локаций гипоцентров находится в пределах метра. В таблице представлены оценки точности определения координат гипоцентров.

Полученные гипоцентры микросейсмических событий не группируются в местах, отличных от действительных положений гипоцентров, что косвенно говорит о том, что задача унимодальная и минимум функционала совпадает с реальным положением гипоцентра.

Далее рассмотрим распределение среднеквадратических отклонений по площади для обсужденных сетей наблюдений (рис 5, 6). Значения среднеквадратических отклонений позволяют оценить точность локаций по всей площади выемочного столба. Для двух компактных антенн погрешность при определении положения гипоцентров составляет более чем 100 м, добавление удаленного на 100 м сейсмоприемника улучшает ситуацию, но приемлемая точность достигается при добавлении сейсмоприемника, удаленного на 300 м. Для системы наблюдений с рас-

пределенной антенной точность заметно выше, но так же, как и в случае с системой наблюдений из нескольких компактных антенн, погрешность определения координат гипоцентров уменьшается до первых метров при удалении сейсмоприемника на 300 м.

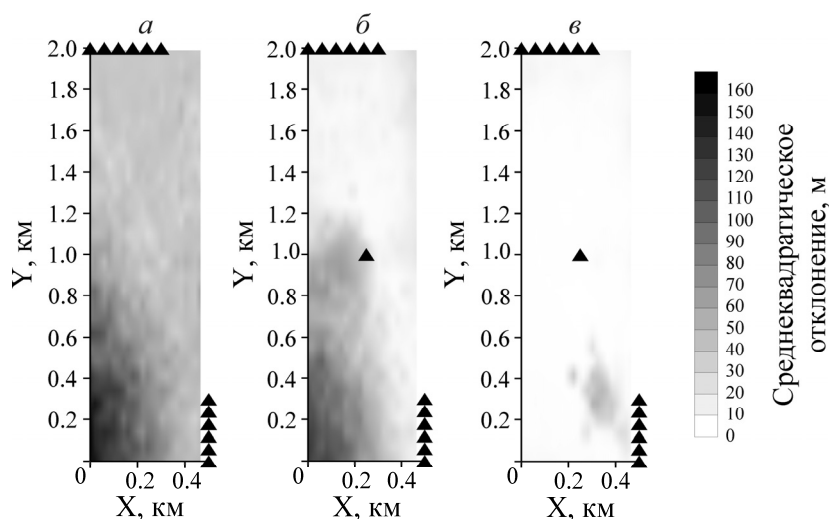


Рис. 5. Среднеквадратические отклонения локаций гипоцентров микросейсмических событий для систем из двух распределенных антенн: *a* — без удаленного сейсмоприемника; *б* — с удаленным на 100 м сейсмоприемником; *в* — с удаленным на 300 м сейсмоприемником

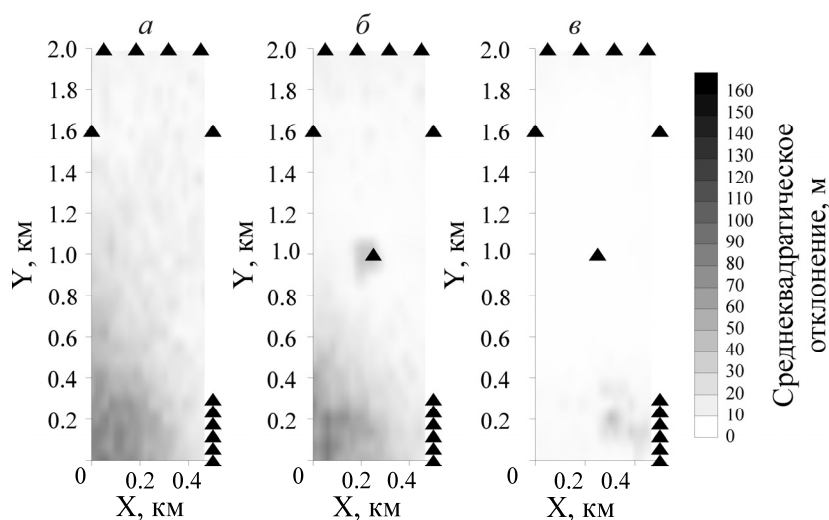


Рис. 6. Среднеквадратические отклонения локаций гипоцентров микросейсмических событий для систем из локальной и распределенной антенн: *a* — без удаленного сейсмоприемника; *б* — с удаленным на 100 м сейсмоприемником; *в* — с удаленным на 300 м сейсмоприемником

## ВЫВОДЫ

Предложена простая методика количественной оценки разрешающей способности системы микросейсмических наблюдений, которая может быть использована для оптимизации микросейсмического мониторинга геодинамических процессов для конкретных объектов (геометрии доступного подземного пространства) и геологических условий (разломы, зоны сейсмических активизаций и т. д.).

Результаты численных исследований модельной задачи микросейсмического мониторинга угольного пласта показали, что использование комбинированных наземно-подземных систем с

распределенными антеннами наблюдений существенно повышает точность определения координат гипоцентров микросейсмических событий по сравнению с подземными системами, расположенными вблизи области событий.

Для получения требуемой на практике точности локации микросейсмических событий при разработке угольных пластов достаточно использовать комбинированную систему из двух распределенных подземных антенн и дополнительного приемника, удаленного от плоскости продуктивного пласта на несколько сотен метров.

Перспективным направлением усовершенствования предлагаемого подхода оценки точности локации является рассмотрение неоднородных скоростных моделей сред, сейсмической анизотропии, различных механизмов источников.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jiang F.-X., Miao X.-H., Wang C.-W., Song J.-H., Deng J.-M., and Meng F. Predicting research and practice of tectonic-controlled coal burst by microseismic monitoring, Journal of China Coal Society, 2010, Vol. 35, No. 6.
2. Булат А. Ф., Усаченко Б. М., Соколовский В. Н. Методическое пособие по комплексной геофизической диагностике породного массива и подземных геотехнических систем. — Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины, 2004.
3. Гребенкин С. С., Житленок Д. М., Керкез С. Д., Подкопаев С. В. Инженерные методы предотвращения газодинамических явлений. — Донецк, 2001.
4. Захаров В. Н. Мониторинг сейсмоакустических процессов и прогноз гео- и газодинамических явлений при подземной разработке месторождений // Науч. труды УкрНИМИ НАН Украины. — 2009. — № 5. — Ч. 1.
5. Иванов Б. М., Филиппов Ю. А., Индыло С. В., Колесов А. В. Сейсмоакустическое сопровождение производственных процессов и газодинамических явлений в угольных шахтах // ГИАБ. — 2007. — № 3.
6. Baig A., Urbancic T. Magnitude determination, event detectability, and assessing the effectiveness of microseismic monitoring programs in petroleum applications, CSEG Recorder, 2010, Vol. 35, No. 2.
7. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Лескова Е. В., Фатеев А. В., Сёмин А. Ю. Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физ. мезомеханика. — 2009. — Т. 12. — № 1.
8. Писецкий В. Б., Власов В. В., Черепанов В. П., Абатурова И. В., Зудилин А. Э., Патрушев Ю. В., Александрова А. В. Прогноз устойчивости горного массива на основе метода сейсмической локации в процессах строительства подземных сооружений // In Engineering Geophysics. — 2014.
9. Ge M. Efficient mine microseismic monitoring, International Journal of Coal Geology, 2005, Vol. 64, No. 1.
10. 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. — № 1.
11. Luo X., Hatherly P. Application of microseismic monitoring to characterise geomechanical conditions in longwall mining, Exploration Geophysics, 1998, Vol. 29, No. 3/4.
12. Coccia, S., Lizeur, A., Bigarre, P., Contrucci, I., & Klein, E. Accurate 3D location of mine induced seismicity in complex near-field underground conditions, In 8. International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines (RaSIM 8), Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Obninsk, 2013.
13. Яскевич С. В., Гречка В. Ю., Дучков А. А. Обработка данных микросейсмического мониторинга геодинамических событий с учетом сейсмической анизотропии массива горных пород // ФТПРПИ. — 2014. — № 6.
14. 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.