



**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ
НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

А. В. Гладырь, А. В. Константинов

*Институт горного дела ДВО РАН, E-mail: rush3112@mail.ru,
ул. Тургенева 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Разработан алгоритм конфигурирования наблюдательной сети системы геомеханического мониторинга горного давления и на его основе — программный модуль, позволяющий осуществлять построение карт чувствительности пространственной зоны, корректировать параметры сети сейсмоприемников. Реализована возможность построения карт при помощи уровней чувствительности неконтролируемой зоны, зоны негарантированного и гарантированного контроля, характеризующих качество детектирования сейсмоакустических сигналов геомеханической системой. Разработана методика выбора количества и мест размещения геофонов. Сформулированы направления совершенствования предложенного алгоритма.

Горный удар, геомеханический мониторинг, акустическое проявление, анизотропная среда, точность локации

**DEVELOPMENT OF THE OPTIMAL CONFIGURING ALGORITHM FOR OBSERVATIONAL
NETWORK OF GEOMECHANICAL MONITORING SYSTEM**

A. V. Gladyr and A. V. Konstantinov

*Institute of Mining, Far East Branch, Russian Academy of Sciences
E-mail: rush3112@mail.ru, ul. Turgeneva 51, Khabarovsk 680000, Russia*

Algorithm has been developed for configuring the observational network of geomechanical monitoring system of rock pressure. A software module has been developed based on the algorithm, which allows to draw sensitivity maps of the spatial zone and adjust parameters of the geophone network. Possibility of drawing maps using control levels of the uncontrolled zone, non-guaranteed and guaranteed control zones has been implemented. These zones show confidence of seismic acoustic signals location by geomechanical system. Procedure has been developed to select number and location of geophones. Main directions are formulated for further improvement of the algorithm for observation network configuring.

Rock burst, geomechanical monitoring, acoustic manifestation, anisotropic medium, location accuracy

Как показывает многолетняя практика, ведение подземных горных работ на ряде горнодобывающих предприятий осложняется повышенной удароопасностью, возникающей в связи с ростом количества и интенсивности различных геодинамических явлений [1, 2]. В данных условиях необходимы исследования, включающие изучение закономерностей геодинамических полей и процессов в области техногенного влияния горных работ с использованием сейсмических, сейсмоакустических, геодезических, сейсмодеформационных и иных методов [3, 4].

Один из перспективных методов предупреждения возникновения горных и горно-тектонических ударов — контроль геомеханического состояния удароопасного массива горных пород с применением автоматизированных систем [5–7].

К таким измерительно-вычислительным комплексам относится сейсмоакустическая система контроля горного давления “Prognoz ADS”, обеспечивающая преобразование аналоговой информации в цифровую в непосредственной близости от первичного преобразователя (геофона) и дальнейшую обработку данных мониторинга [8, 9].

Основной элемент разработанной системы — распределенная наблюдательная сеть подземных цифровых приемных преобразователей, каждый из которых состоит из первичного преобразователя пьезокерамического типа (геофон) и блока предварительной обработки акустических сигналов — цифрового приемника. Многолетнее практическое применение системы контроля горного давления “Prognoz ADS” на ряде предприятий показало, что одной из задач на стадии проектирования является задача оптимальной конфигурации подземной наблюдательной сети приемников акустических сигналов. Следует отметить, что увеличение масштаба проводимых работ и смещение их фронта требуют поэтапного расширения контролируемой пространственной зоны, и, следовательно, увеличения количества сейсмоакустических датчиков для покрытия ее наблюдательной сетью. Таким образом, по мере увеличения количества геофонов задача оптимального выбора места для их установки становится наиболее актуальной.

При построении оптимальной конфигурации наблюдательной сети необходим учет множества факторов. Однако при введении некоторых условий и ограничений решение значительно упрощается, что позволяет сформулировать методические подходы оптимального расположения геофонов в первом приближении и выделить направления для дальнейшего совершенствования разработанного подхода.

Алгоритм построения карты чувствительности наблюдательной сети является основным аналитическим алгоритмом методики выбора оптимального расположения геофонов. Он предусматривает расчет коэффициента чувствительности для пространственной зоны, представленной набором объемных доменов кубической формы, размер стороны которых допускается настраивать.

В качестве входной информации алгоритма предполагается получение следующих данных в табличном виде и построенных на их основе абстрактных объектов:

- предел чувствительности геофона — скалярная величина, характеризующая предельное значение расстояния между источником сигнала и геофоном, при котором усредненный полезный сейсмоакустический сигнал становится неразличим на уровне шумов;
- таблица расположения реально установленных геофонов;
- таблица расположения виртуальных геофонов;
- таблица характеристик пространственных зон для построения карты чувствительности;
- графические изображения планов горизонтов подземных горных выработок.

Алгоритм расчета чувствительности для каждого из доменов выбранной пространственной зоны включает этапы.

1. Разбиение пространственной зоны на доменные области кубической формы и их инициализация.

2. Выполнение двойного цикла: внешний осуществляет проход по доменам, внутренний — по геофонам.

На каждой итерации проводятся следующие операции:

- расчет расстояния между центром доменной области и координатами сейсмоакустического датчика;
- увеличение счетчика геофонов, способных лоцировать событие в конкретной доменной области;
- увеличение предварительного значения относительной чувствительности в случае, если расстояние, рассчитанное в предыдущей операции, меньше предела чувствительности геофона.

— обнуление чувствительности домена, если количество действующих в ее пределах геофонов недостаточно (менее 4), либо корректировка параметра чувствительности домена с учетом количества первичных преобразователей;

3. Удаление доменов с нулевой чувствительностью.

Значение чувствительности для заданного домена, рассчитывается по формуле:

$$s_0 = n \sum_{i=1}^n (1 - \sqrt{D/r_d}),$$

где n — количество геофонов, детектирующих событие в домене; D — расстояния между центром домена и координатами сейсмоакустического датчика, м; r_d — предел чувствительности геофона, м.

Разработанный алгоритм реализован на языке C#, интегрирован в программный комплекс обработки и анализа сейсмоакустических данных “GeoAcoustics-ADS”, являющийся одной из важнейших составляющих системы “Prognoz ADS”.

Вызов окна данного программного модуля осуществляется из главного меню программы “GeoAcoustics-ADS” (рис. 1).

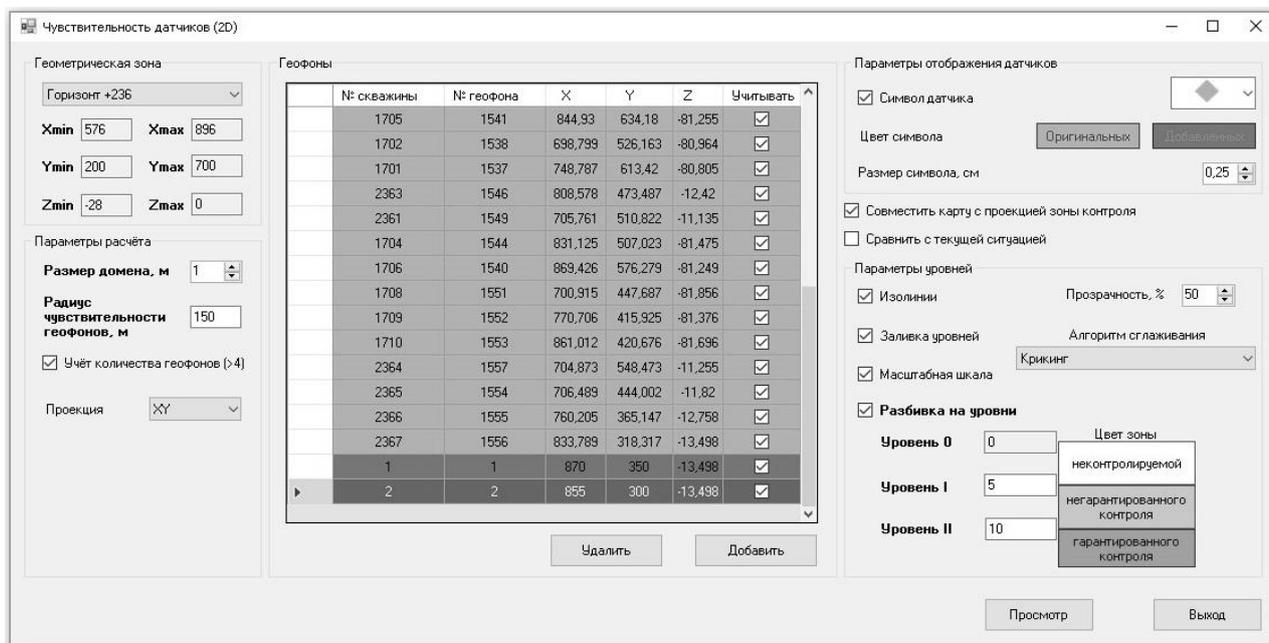


Рис. 1. Интерфейс программного модуля расчета чувствительности доменов

Отображение карт чувствительности предусматривает два основных режима.

Режим 1 заключается в выборе некоторого максимального значения, характеризующего предельное значение параметра чувствительности доменов конкретного месторождения или его участка. Далее загружается предварительно настроенная пользователем цветовая схема, содержащая набор уровней процентных значений и соответствующих им цветов, выраженных в модели RGB. На основе заданных параметров производится интерполяция по дискретному набору величин чувствительности, в ходе которой определяются промежуточные цветовые значения.

На рис. 2 представлена текущая ситуация на одном из контролируемых участков горнодобывающего предприятия с активным ведением добычных работ, сформированная при помощи градиентных переходов.

2. Последовательно определяются координаты участков, подлежащих контролю, и с помощью второго режима проверяется их вхождение в зону гарантированного контроля. Возьмем для проверки участок ВТО 32 (БДО) и точку с координатами 850, 350. Как следует, из текущей ситуации, представленной на рис. 3, данный участок принадлежит зоне негарантированного контроля.

3. Для каждого из участков, не удовлетворяющего условиям гарантированного контроля, моделируется ситуация перераспределения зон чувствительности доменов путем последовательного добавления, удаления или перемещения геофонов.

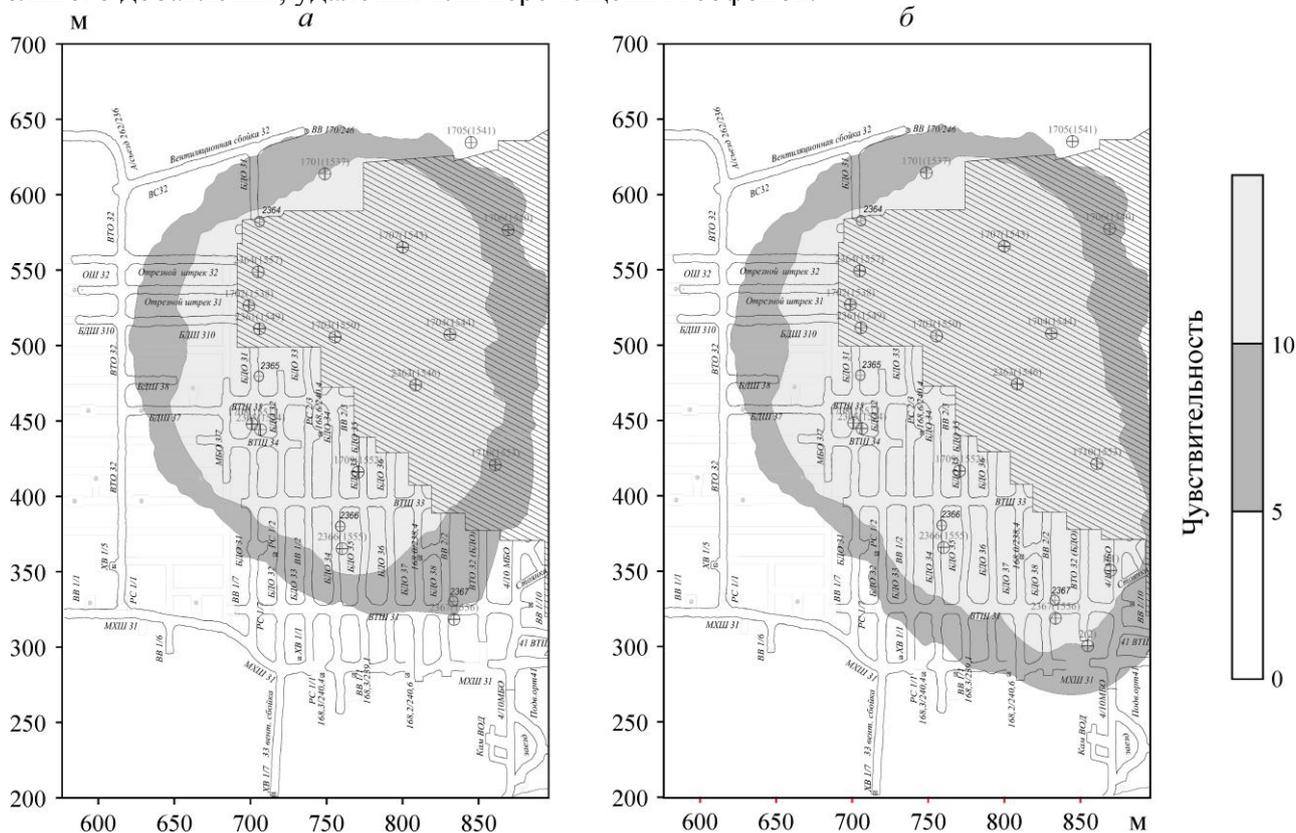


Рис. 3. Распределение чувствительности доменов, полученное при помощи контрольных уровней: *а* — на текущий момент; *б* — после расширения наблюдательной сети

Предлагаемый алгоритм построения карт чувствительности и методика выбора оптимальных мест установки геофонов в шахтном поле обеспечивают решение важной практической задачи, однако в связи с заранее принятыми ограничениями требуют дальнейшего совершенствования и модернизации. Рассмотрим некоторые из возможных направлений дальнейшего развития предлагаемого подхода.

— учет анизотропных свойств породного массива, вызванных физико-механическими свойствами горных пород и наличием выработанных пространств [10, 11]. В данной работе делается допущение, что весь участок представляет собой изотропную среду, что сильно упрощает расчетную модель. Для решения этой задачи требуется более совершенное математическое описание доменов, например, с помощью скоростной модели, созданной с применением результатов опытных измерений.

— учет объемных характеристик приемных антенн. Точность локации события снижается, если его зафиксировали геофоны, лежащие в одной плоскости (плоская антенна) [12]. В таком случае необходимо учитывать ситуацию плоской антенны и не допускать такого расположения датчиков, либо ввести дополнительный корректирующий чувствительность коэффициент, который будет характеризовать объем антенны.

— автоматизация выбора мест оптимального размещения геофонов. Требуется исключить ручной подбор мест для установки геофонов, поскольку он связано с субъективным суждением лица, осуществляющего проектирование. На первоначальном этапе следует разработать алгоритм, позволяющий проводить наиболее эффективную установку геофонов в автоматическом режиме, а затем рассмотреть вопрос о подборе значений уровней чувствительности для зон гарантированного и негарантированного контроля без участия пользователя.

— трехмерная математическая модель зоны чувствительности. В разработанной методике при расчете карт чувствительности предлагается двумерная геометрическая модель структуры доменов. Данное ограничение связано с наличием исключительно плоских планов горизонтов шахтного поля. Однако применение достаточного количества планов горизонтов для разных высотных отметок позволит использовать псевдотрехмерные модели шахтного поля с объемным представлением выходной информации. На дальнейшем этапе для получения более полных данных о контролируемых объектах следует рассмотреть возможность создания программного решения, обладающего функциональностью по взаимодействию с существующими трехмерными геометрическими моделями.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый алгоритм построения карт чувствительности для заданной контролируемой зоны позволяет получить представление об эффективности расстановки геофонов в условиях системы сейсмоакустического мониторинга, либо моделировать изменение параметров зоны в условиях новой конфигурации.

Разработанная методика выбора оптимальных мест установки геофонов в шахтном поле дает возможность сформулировать рекомендации по оптимальному расширению зоны контроля системы мониторинга на основе результатов выполнения последовательных этапов моделирования обновленных конфигураций подземной наблюдательной сети.

Представлены направления дальнейшего совершенствования предлагаемого подхода и варианты по возможному решению возникающих проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- 1. Rasskazov I. Yu., Saksin B. G., Petrov V. A., and Prosekin B. A.** Geomechanical conditions and features of the dynamic manifestations of rock pressure at the Antey deposits, *Journal of Mining Science*, 2012, no. 3, pp. 3–13. [Рассказов И. Ю., Саксин Б. Г., Петров В. А., Просекин Б. А. Геомеханические условия и особенности динамических проявлений горного давления на месторождении Антей // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 3–13.]
- 2. Manchao H., Fuqiang R., and Dongqiao L.** Rockburst mechanism research and its control, *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, 28.5, 829–837.
- 3. Rasskazov I. Yu.:** Control and management of mining pressure in the mines of the Far Eastern region, Moscow, Gornaya kniga, 2008, 329 p. [Рассказов И. Ю. Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горная книга. — 2008. — 329 с.]
- 4. Shan-chao Hu, Yun-liang Tan, Jian-guo Ning, Wei-Yao Guo, and Xue-sheng Liu.** Multiparameter Monitoring and Prevention of Fault-Slip Rock Burst, *Shock and Vibration* 2017.7580109:8, 2017 <https://doi.org/10.1155/2017/7580109>.
- 5. Gladyr A. V.** System of integration of microseismic and geoacoustic data of geomechanical control, *ГИАБ*, 2017, no. 6, pp. 220–234. [Гладырь А. В. Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // ГИАБ. — 2017. — № 6. — С. 220–234.]

6. **Shabarov A. N., Tsirel S. V., Morozov K. V., and Rasskazov I. Yu.** The concept of integrated geodynamic monitoring of underground mining, *Journal of Mining Science*, 2017, no 9, pp. 59–64. [**Шабаров А. Н., Цирель С. В., Морозов К. В., Рассказов И. Ю.** Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах // ФТПРПИ. — 2017. — № 9. — С. 59–64.]
7. **Konstantinov A.** Development of Multi-Channel Portable Impact Control Device for Local Assessment of The State of The Edge Parts of The Rock Massif, VII International Scientific Conference Problems of Complex Development of Georesources. Khabarovsk, 2018, 02024.
8. **Rasskazov M. I., Anikin P. A., Migunov D. S., Tereshkin A. A., Gladyr A. V., and Tsoy D. I., Lomov M. A.** Automated Seismic Acoustic Pressure Monitoring System at the Underground Mine World, *Innovative Directions in the Design of Mining Enterprises*, St. Petersburg, 2017, pp. 95–101. [**Рассказов М. И., Аникин П. А., Мигунов Д. С., Терешкин А. А., Гладырь А. В., Цой Д. И., Ломов М. А.** Автоматизированная система сейсмоакустического контроля горного давления на подземном руднике мир // Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий. — СПб, 2017. — С. 95–101.]
9. **Rasskazov M. I., Gladyr A. V., Katella E. A., and Miroshnikov V. I.** Development of a multi-level system for complex geodynamic monitoring of the impact hazard of a rock mass, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2014, no. 9, pp. 113–120. [**Рассказов М. И., Гладырь А. В., Кателла Е. А., Мирошников В. И.** Разработка многоуровневой системы комплексного геодинамического мониторинга удароопасности массива горных пород // ГИАБ. — 2014. — № 9. — С. 113–120.]
10. **Vernik L. and Nur A.** Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks, *Geophysics*, 1992, vol. 57, doi: 10.1190/1.1443286.
11. **Vernik L. and Liu X.** Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study, *Geophysics* 1997, vol. 62, doi: 10.1190/1.1444162.
12. **Rasskazov I. Yu., Iskra A. Yu. and Kyanno A. A.** Algorithms and software for location of sources of acoustic emission in the system of geomechanical monitoring, *Mining Information Analytical Bulletin*, 2007, no. 15, pp. 130–142. [**Рассказов И. Ю., Искра А. Ю., Кянно А. А.** Алгоритмы и программное обеспечение для локации источников акустической эмиссии в системе геомеханического мониторинга // ГИАБ. — 2007. — № 15. — С. 130–142.]