



**ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ЛОКАЦИИ
АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
В УСЛОВИЯХ АНИЗОТРОПИИ ГОРНЫХ ПОРОД**

А. В. Гладырь, М. И. Рассказов, А. А. Терешкин, А. В. Константинов

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

На основе экспериментальных исследований установлено, что учет влияния анизотропии горных пород дает возможность улучшить качество локации на 10–20%. Показано, что в процессе обработки результатов сейсмоакустического мониторинга учитывать анизотропность в контролируемой области невозможно без специализированного программного обеспечения, реализующего скоростную модель среды распространения волн. Сформулированы подходы к ее разработке и внедрению. Это позволит повысить точность локации, и как следствие, качество и надежность прогнозных оценок при ведении геомеханического мониторинга удароопасного горного массива за счет более точной идентификации потенциально опасных сейсмоакустических активных зон.

Деформирование горных пород, геомеханический мониторинг, акустическое проявление, микросейсмическое событие, анизотропная среда, точность локации, скоростная модель

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE AUTOMATED GEOMECHANICAL MONITORING SYSTEM
LOCATION ACCURACY IN THE ROCK MASS ANISOTROPY CONDITIONS**

A. V. Gladyr, M. I. Rasskazov, A. A. Tereshkin, 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*

Based on experimental studies, it was found that taking into account the influence of rock anisotropy allows to improve the location quality by 10–20%. It is shown that for processing the results of seismoacoustic monitoring with regard to anisotropy in the controlled area, it is necessary to develop specialized software that implements a velocity model of the wave propagation medium. Approaches to its development and implementation have been formulated. This will improve the location accuracy and, as a result, the quality and reliability of forecast estimates when conducting geomechanical monitoring of a shock hazardous rock mass due to more accurate identification of potentially dangerous seismoacoustic active zones.

Rock deformation, geomechanical monitoring, acoustic manifestation, microseismic event, anisotropic environment, location accuracy, velocity model

Автоматизированные системы для осуществления непрерывного сейсмоакустического мониторинга в сочетании с развитыми средствами математического анализа относятся к одним из наиболее эффективных способов для дистанционного контроля геодинамических явлений при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, имеющих техногенную или естественную природу. В процессе практической реализации данного способа проводится развертывание наблюдательной подземной сети первичных преобразователей (геофонов или сейсмоприемников), обеспечивающей непрерывную регистрацию первичной информации о состоянии горного массива и определение на ее основе параметров сейсмоакустической активности массива. По результатам сейсмоакустических наблюдений выделяются потенциально удароопасные участки и оценивается геомеханическое состояние горного массива в пределах зоны контроля [1].

При проведении микросейсмического и сейсмоакустического мониторинга в настоящее время используются как скважинные [2–4], так и поверхностные системы наблюдений [5, 6]. Автоматизированная сейсмоакустическая система контроля горного давления “Prognoz ADS” (АСКГД) успешно применяется для геомеханического контроля состояния массива горных пород в пределах очистных блоков и участков рудничного поля. Она внедрена в производственный процесс на экспериментальном участке Кировского рудника.

“Prognoz-ADS” осуществляет непрерывную регистрацию сейсмоакустических импульсов в массиве горных пород в частотном диапазоне 0.5...12 кГц, автоматизированного формирования импульсов от одного источника, определения их параметров (энергии, координат, спектральных и иных характеристик); автоматизированного формирования взаимосвязанных во времени и пространстве событий в акустически-активные зоны (ААЗ) и представления результатов мониторинга в форме карт, графиков с применением современных программных средств 3D-визуализации. Измерительно-вычислительный комплекс позволяет выделять и контролировать параметры акустически-активных и потенциально удароопасных зон, проводить оценку геомеханического состояния массива горных пород.

Для определения координат сейсмоакустических событий с достаточной точностью необходимо при обработке данных мониторинга применять скоростную модель среды распространения волн, важность построения которой отмечается в работах [2–7]. Сложность построения такой модели для конкретного контролируемого объекта возрастает на месторождениях, представленных породами, обладающими сильно выраженными анизотропными свойствами. На естественную анизотропию пород может накладываться анизотропия, вызванная трещиноватостью, образовавшейся в ходе ведения горных работ. В связи с этим большое значение имеет проведение натурных исследований скоростных моделей горного массива в пределах контролируемых областей на этапе внедрения систем мониторинга и определение точности локации сейсмоакустических событий природного и техногенного характера, а также формулирование рекомендаций по ее повышению [8–14].

В 2018 г. в зоне контроля АСКГД проведена серия тестовых взрывов. Решались следующие задачи: определение качества локации АСКГД, уточнение зон уверенной и неуверенной регистрации сейсмоакустических сигналов, установление степени влияния анизотропии горного массива на точность локации.

В рамках экспериментальных исследований осуществлено 18 тестовых взрывов на 10 пунктах. С помощью автоматического алгоритма формирования событий организовано 15 событий, что соответствует 83 % от их общего числа. Число событий, у которых средняя квадратичная погрешность превышает допустимую техническими характеристиками АСКГД, равно 6. Таким образом, количество событий, лоцированных с допустимой точностью, соответствует 64 % от их общего числа. В расчетах принято, что скорость распространения акустических волн в горном массиве составляет 6000 м/с и равномерна во всех направлениях. Это усредненное значение подобрано опытным путем и позволяет выполнять расчеты для данного месторождения с допустимой погрешностью. Очевидно, что с целью повышения качества локации требуется построение скоростной модели контролируемого участка для более детального описания скоростей прохождения волн.

На практике скоростная модель для обработки показателей микросейсмического и сейсмоакустического мониторинга строится на основе обработки данных акустического каротажа. Затем она калибруется по данным от перфорационных взрывов, для которых известно точное положение источника. Построение скоростной модели для участка массива, где установлена АСКГД для учета анизотропных свойств среды, является сложной задачей для практической реализации по ряду объективных причин, связанных с производственным процессом [15].

С практической точки зрения наиболее целесообразно создание скоростной модели с привлечением механизма анализа данных от самих сейсмоакустических событий. При этом анизотропные свойства среды могут быть определены одновременно с положениями гипоцентров лоцируемых сейсмоакустических событий. В качестве входной информации для построения скоростной модели рассматриваем: координаты источников событий, координаты сейсмоакустических датчиков и время регистрации первого вступления продольной волны от тестового взрыва каждым датчиком.

Для каждого тестового взрыва найдено соотношение расстояния от источника взрывного воздействия и разницы времени прихода на каждый из первичных преобразователей (рис. 1). Рис. 1а свидетельствует о незначительной вариации скорости распространения по трассам от источника до соответствующего первичного преобразователя. Для сравнения на рис. 1б показаны результаты тестового взрыва, расположенного в массиве с выраженными анизотропными свойствами. Для взрыва № 1 среднее значение скорости составило 5948 м/с, № 7 — 6569 м/с, среднее квадратическое отклонение для взрыва № 1 — 202.76, № 7 — 541.8. Пунктирной линией обозначена взаимосвязь разницы времени прохода и расстояния от источника до первичного преобразователя при заданном среднем значении скорости прохождения волн.

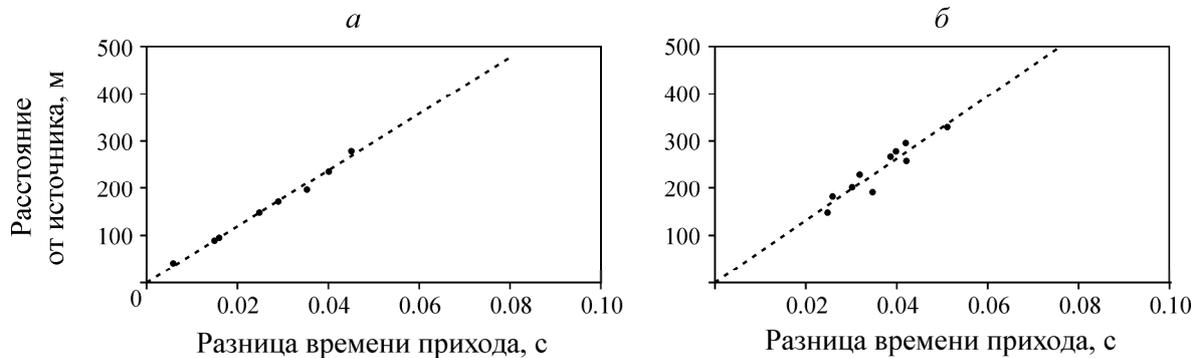


Рис. 1. Зависимость расстояния до источника от разницы времен прихода первого вступления на первичный преобразователь для тестовых взрывов: а — взрыв № 1; б — взрыв № 7

В результате анализа серии тестовых взрывов выявлено, что расчетные скорости прохождения волн всех зарегистрированных событий варьируют от 4647 до 6460 м/с, а средняя скорость прохождения волн через массив составила 6026 м/с, что соответствует экспериментально определенному среднему значению.

Для оценки степени влияния абсолютного значения средней скорости прохождения сейсмоакустических сигналов через породный массива на точность определения координат источника сделан пересчет локационных координат источника с учетом изменения средней скорости при прохождении сейсмоакустических сигналов для каждого из тестовых взрывов. Уточнение скоростей прохождения волн через массив позволило существенно повысить точность определения координат тестовых взрывов. Таким образом, количество достоверно лоцированных источников увеличилось до 17 и составило 95 % от их общего числа.

Экспериментальные исследования показали, что в процессе обработки результатов сейсмоакустического мониторинга для повышения качества локации следует учитывать влияние анизотропности горного массива в пределах контролируемого участка АСКГД. Для этого требуется разработать специализированное программное обеспечение, решающее задачи создания и уточнения скоростной модели массива. Такая скоростная модель должна строиться на основе результатов экспериментальных измерений и постоянно корректироваться по мере поступления новых данных.

Сформулируем основные подходы к проектированию скоростной модели (рис. 2).

1. Контролируемая область разбивается на произвольные домены в виде кубов с длиной стороны, задаваемой пользователем. В качестве начального приближения рекомендуется длину стороны выбирать на уровне 5–10 м.

2. Для каждого куба строится годограф скоростей в локальной системе координат, где центром локальной системы координат принимается центр куба, а направление осей совпадает с направлением осей глобальной системы координат. Годограф скоростей описывается характеристическим эллипсоидом, представленным набором его параметров. Поскольку на этапе инициализации скоростной модели экспериментальные данные не получены, требуется задать начальное приближение этого эллипсоида. Для рассматриваемого случая рекомендуется использовать эллипс, характеризующий изотропную скоростную модель с выявленной средней скоростью прохождения волн равной 6 026 м/с.

3. В описании годографа скоростей для каждого куба сохраняется набор экспериментальных данных, показывающий нормальное направление вектора распространения волны по каждому проведенному измерению и скалярное значение скорости для данного направления. По мере поступления экспериментальных данных информация о векторах распространения и значениях скоростей пополняется и происходит пересчет параметров характеристического эллипсоида после каждого добавления новых данных. Расчет его параметров осуществляется методом наименьших квадратов.

Разработанная скоростная модель используется для уточнения скорости распространения волн по расчетным трассам от источника сейсмоакустического импульса до каждого из геофонов и представлена следующим алгоритмом.

1. Рассчитываются предварительные координаты источника сейсмоакустического импульса для среднего значения скорости, принятого для данной зоны контроля. В этом случае используется значение скорости равное 6026 м/с.

2. По предварительным координатам источника, координатам установленных геофонов и заданной структуре разбиения контролируемого пространства на домены выполняется сегментно-линейное описание трассы распространения волны для каждого геофона.

3. По имеющимся данным о времени и скорости распространения на каждом из сегментов трассы проводится пересчет координат источника сейсмоакустического события, где для каждой трассы распространения принимается значение скорости, полученной из пространственной скоростной модели.

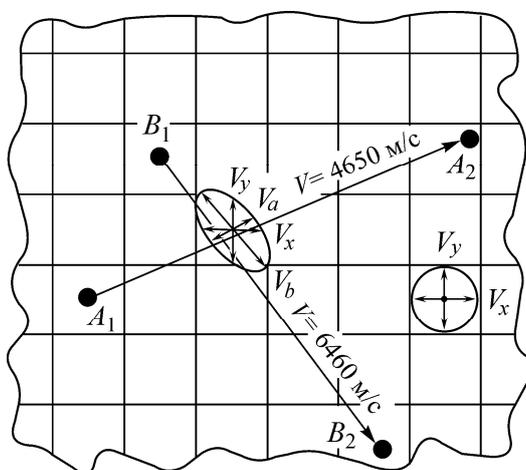


Рис. 2. Графическое представление подходов к проектированию скоростной модели (плоская задача)

ВЫВОДЫ

По результатам тестовых взрывов на опытном участке Объединенного Кировского рудника осуществлена регистрация имитационного сейсмоакустического воздействия средствами автоматизированной системы контроля горного давления “Prognoz ADS” в условиях анизотропного горного массива.

Установлено влияние анизотропии горных пород на качество локации. Предварительный анализ показал, что учет влияния анизотропии позволяет улучшить качество локации на 10–20 %.

Сформулированы подходы к проектированию скоростной модели анизотропного горного массива. Реализация и последующее внедрение данной модели в существующие программно-аппаратные средства геомеханического мониторинга даст возможность повысить точность локации и в итоге — качество и надежность прогнозных оценок за счет более точной идентификации потенциально опасных сейсмоакустических активных зон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Rasskazov I. Yu.** Control and management of rock pressure in the mines of the Far Eastern region, Moscow, Gornaya kniga, 2008, 329 pp. [**Рассказов И. Ю.** Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горная книга, 2008. — 329 с.]
2. **Rutledge J. and Soma N.** Using reflected phases to improve depth resolution of microseismic source locations from single-well observations, Presented at Unconventional Resources Technology Conference, 2013, URTEC 1578994.
3. **Hayles K., Horine R. L., Checkles S., and Blangy J. P.** Comparison of microseismic results from the Bakken Formation processed by three different companies, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011.
4. **Aleksandrov S. I., Mishin V. A., and Burov D. I.** Ground-based microseismic monitoring of hydraulic fracturing: quality control and prospects, Exposition. Oil. Gas, 2014, no 2. [**Александров С. И., Мишин В. А., Буров Д. И.** Наземный микросейсмический мониторинг гидроразрыва пласта: контроль качества и перспективы // Экспозиция. Нефть Газ. — 2014. — № 2.]
5. **Chambers K., Kendall M., Brandsberg-Dahl S., and Rueda J.** Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity, Geophysical Prospecting, 2010, 58.
6. **Shmakov F. D.** Method for processing and interpreting data of ground-based microseismic monitoring of hydrocarbon deposits, Tehnologiya Seismorazvedki, 2012, no. 3, pp. 65–72. [**Шмаков Ф. Д.** Методика обработки и интерпретации данных наземного микросейсмического мониторинга месторождений углеводородов // Технологии сейсморазведки. — 2012. — № 3. — С. 65–72.]
7. **Eisner L., Duncan P., Heigl W. M., and Keller W. R.** Uncertainties in passive seismic monitoring, The Leading Edge, 2009, vol. 28, doi: 10.1190/1.3148403.
8. **Zhang H., Sarkar S., Toksoz M. N., Kuleli H. S., and Al-Kindy F.** Passive seismic tomography using induced seismicity at a petroleum field in Oman, Geophysics, 2009, vol. 74, no. 6, doi: 10.1190/1.3253059.
9. **Zimmer U., Bland H., Du J., Warpinski N., Sen V., and Wolfe J.** Accuracy of microseismic event locations recorded with single and distributed downhole sensor arrays, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2009.
10. **Jansky J., Plicka V., and Eisner L.** Feasibility of joint 1D velocity model and event location inversion by the neighbourhood algorithm, Geophysical Prospecting, 2010, vol. 58, doi: 10.1111/j.1365-2478.2009.00820.x.
11. **Abel J. S., Coffin S., Hur Y., and Taylor S.** An analytic model for microseismic event location estimate accuracy, First Break, 2011, vol. 29.

12. **Usher P. J., Angus D. A., and Verdon J. P.** Influence of a velocity model and source frequency on microseismic waveforms, Some Bakken microseismic implications for microseismic locations: Geophysical Prospecting, 2013, vol. 61, doi: 10.1111/j.1365-2478.2012.01120.x.
13. **Vernik L. and Nur A.** Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks, Geophysics, 1992, vol. 57, doi: 10.1190/1.1443286.
14. **Vernik L. and Liu X.** Velocity anisotropy in shales: A petrophysical study, Geophysics, 1997, vol. 62, doi: 10.1190/1.1444162.
15. **Rasskazov I. Yu., Tsirel S. V., Rozanov A. O., Tereshkin A. A., and Gladyr A. V.** Using of seismo-acoustic monitoring data to determine the nature of the development of the source of destruction of the rock mass, Journal of Mining Science, 2017, no. 2, pp. 29–37. [**Рассказов И. Ю., Цирель С. В., Розанов А. О., Терешкин А. А., Гладырь А. В.** Использование данных сейсмоакустических наблюдений для определения характера развития очага разрушения породного массива // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 29–37.]
16. **Gladyr A. V.** Integration of microseismic and geoacoustic data of geomechanical control, Mining Information Analytical Bulletin, 2017, no. 6, pp. 220–234. [**Гладырь А. В.** Система интеграции микросейсмических и геоакустических данных геомеханического контроля // ГИАБ. — 2017. — № 6. — С. 220–234.]
17. **Gladyr A. V.** Development of methods for identification of background seismoacoustic radiation based on the method of non-parametric density estimation, Mining Information Analytical Bulletin, 2016, no. S21, pp. 51–60. [**Гладырь А. В.** Разработка методики идентификации фонового сейсмоакустического излучения на основе метода непараметрической оценки плотности // ГИАБ. — 2016. — № S21. — С. 51–60.]