

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ ПРИЁМНЫХ АНТЕНН НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ ГЕОФОНОВ СИСТЕМЫ «PROGNOZ-ADS»

А. В. Константинов¹, М. А. Ломов¹, А. А. Терёшкин¹, М. И. Рассказов¹, Д. И. Цой¹

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук — обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия

Аннотация: Важным направлением совершенствования системы геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS» является повышение точности определения локации сейсмоакустических событий, что позволит повысить надёжность прогнозных оценок при ведении наблюдения за потенциально опасными участками породного массива. Одним из аспектов достижения данной цели является проектирование наблюдательной сети приёмников сигналов, наиболее эффективной для конкретного участка мониторинга. Не менее приоритетной является задача разработки критерия, характеризующего точность локации и учитывающего помимо неоднородности среды качественный и количественный состав элементов наблюдательной сети. Именно комплексный учёт этих факторов позволит не только получить более точные сведения об источниках сейсмоакустических сигналов, но и косвенно оценить анизотропию горного массива при помощи создания скоростной модели распространения звуковых волн. В работе сравниваются различные конфигурации сети, их характеристики и рассматриваются возникающие проблемы при проведении такого сравнения, а также пути их решения. В качестве оценочных факторов выступают среднеквадратичная погрешность расчёта локации, чувствительность приёмников сигналов, их количество и взаимное расположение. Для исследования была разработана программа, позволяющая генерировать искусственные данные, визуализировать их в трёхмерном пространстве и рассчитывать статистические параметры.

Ключевые слова: геомеханический мониторинг, анизотропная среда, точность локации, скоростная модель, сейсмоакустический мониторинг, геодинамика, тектоническая структура, управление горным давлением.

Для цитирования: Константинов А. В., Ломов М. А., Терёшкин А. А., Рассказов М. И., Цой Д. И. Исследование конфигураций приёмных антенн наблюдательной сети геофонов системы «PROGNOZ-ADS» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 5–2. — С. 93–102. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_93.

Analysis of receiving antenna configurations in geophone network of Prognoz-ADS system

A. V. Konstantinov¹, M. A. Lomov¹, A. A. Tereshkin¹, M. I. Rasskazov¹, D. I. Tsoi¹

¹ Mining Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences — a separate division of the Federal Khabarovsk research center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

Abstract: An important direction of improving Prognoz-ADS geomechanical monitoring system is to enhance accuracy of location of seismoacoustic events. This will increase reliability of predictive estimates in monitoring potentially hazardous areas in rock mass. One of the aspects of achieving this goal is to design an observation network of signal receivers to be the most effective within a specific monitoring site. Another top-priority task is to develop a criterion for the accuracy of location with regard to rock mass heterogeneity based on the quality and quantity of elements included in the observation network. The integrated analysis of all these factors will allow more accurate information about the sources of seismoacoustic signals and can help indirectly assess anisotropy of rock mass by creating a sound-wave propagation velocity model. The article discusses and compares various network configurations, their characteristics and the related problems and solutions. The estimated factors are the mean square error, sensitivity of receivers, their number and arrangement. The research used the dedicated program with generation of artificial data, 3D visualization and statistical calculations.

Key words: geomechanical monitoring, anisotropic environment, location accuracy, velocity model, seismic and acoustic monitoring, geodynamics, tectonic structure, ground control.

For citation: Konstantinov A. V., Lomov M. A., Tereshkin A. A., Rasskazov M. I., Tsoi D. I. Analysis of receiving antenna configurations in geophone network of Prognoz-ADS system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(5–2):93–102. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_93.

Введение

Одним из ключевых элементов системы геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS» [1, 2] является распределённая наблюдательная сеть подземных цифровых приемных преобразователей — геофонов [3–5]. Актуальность данного исследования обуславливается требованиями повышения эффективности эксплуатации системы и снижения затрат на комплектующие материалы [6, 7]. Наиболее рациональным видится решение, позволяющее добиться оптимального расположения геофонов в пределах контролируемого участка шахтного поля.

Определение благоприятных мест установки геофонов осложняется рядом факторов, включая технические ограничения оборудования и конкретные горно-геологические условия [8]. Увеличение количества приёмников может решить возникающие проблемы, но приведёт к увеличению материальных расходов на их приобретение, монтаж и техническое обслуживание. Поэтому наиболее целесообразным будет определение конфигурации наблюда-

тельной сети, позволяющей добиться требуемых качественных характеристик системы мониторинга с наименьшим количеством геофонов.

Для достижения цели была поставлена задача разработать методику оптимальной расстановки геофонов и комплекс программных средств, предназначенных для моделирования работы наблюдательной сети сейсмоприёмников как на этапе проектирования, так и в процессе эксплуатации, при расширении зоны покрытия системы мониторинга.

Описание задач и методов исследования

Весь процесс создания методики был разделён на несколько этапов:

1. Разработка математической модели чувствительности наблюдательной сети;
2. Проверка взаимной корреляции погрешности расчёта локации и тестирование модели чувствительности на различных конфигурациях антенны;
3. Апробация модели чувствительности на реальных геомеханических данных;

4. Создание программы расчёта конфигурации наблюдательной сети с автоматизацией процесса подбора параметров;

5. Разработка методики расстановки геофонов.

В прежних работах была подробно рассмотрена математическая модель чувствительности зон регистрации сейсмоакустических сигналов, разработанная для оценки наблюдательной сети в зависимости от количества и расположения геофонов [9].

В данной работе рассматриваются различные конфигурации сетей, оцениваемые эмпирической невязкой, рассчитываемой на этапе лоцирования событий, и чувствительностью отдельных участков зоны регистрации сигнала. Также будут продемонстрированы математические и программные средства, которые в последующих работах будут использоваться для разработки и апробации методики проектирования наблюдательной сети системы геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS».

Следует отметить, что разработанная модель чувствительности наблюдательной сети предусматривает разбиение участка мониторинга на кубические домены с определением относительного параметра чувствительности в их центрах. В качестве исходных данных выступают координаты скважин с установленными геофонами, величина предела чувствительности сейсмоприёмника и координаты центра домена.

Чувствительность доменов рассчитывается по следующей формуле:

$$c_0 = n \cdot \sum_{i=1}^n (1 - \sqrt{D / r_d}), \quad (1)$$

где n — количество геофонов, детектирующих сейсмоакустическое событие в доменной области; D — расстояние между центром доменной области и координатами сейсмоакустического

датчика, м; r_d — предел чувствительности сейсмоакустического датчика, м.

Схематичное изображение результатов расчёта чувствительности представлено на рис. 1.

В качестве вспомогательных средств была разработана программа, позволяющая имитировать геологическую неоднородность породного массива, проектировать различные конфигурации приёмных антенн, визуализировать их путём создания трёхмерной модели тестового участка и анализировать погрешность определения локации.

Для тестирования разработанной модели была определена кубическая зона с размером ребра — 80 м. Чтобы ограничить набор сейсмоприёмников и количество получаемых решений, в качестве мест их расположения были выбраны вершины куба.

Далее в центре куба генерировалось событие и определялись расстояния до всех геофонов с временем прихода сигнала. Так как тестирование проводилось на синтетических данных, то

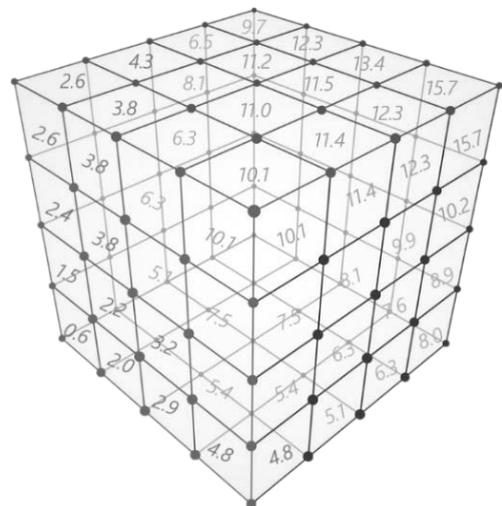


Рис. 1. Схематичное изображение геометрических доменов с эмпирическим параметром чувствительности
Fig. 1. Layout view of geometric domains with empirical sensitivity parameter

для имитации неоднородности среды время прихода сигналов искусственно подвергалось сдвигу до 5000 мкс. Данные значения варьировались между отдельными сейсмоприёмниками, но имели константные величины для конкретного геофона при расчёте всех конфигураций сети.

Затем были сгенерированы различные комбинации геофонов таким образом, чтобы каждая состояла из не менее 4 сейсмоприёмников, образующих зону покрытия с ненулевым объёмом. Варианты конфигураций с плоской антенной в данной работе не рассматриваются.

На следующем этапе были произведены расчёты локации сгенерированных событий для различных конфигураций наблюдательной сети. Лоцирование событий производилось

при помощи метода равномерного поиска с использованием в качестве функции потерь среднеквадратичного отклонения по времени прихода сигнала (невязки) [10–12]. Формула расчёта невязки выглядит следующим образом:

$$S = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (t_D - t_{iD})^2}, \quad (2)$$

где n — количество геофонов, зарегистрировавших событие; t_D — разность времен прихода сигнала, рассчитываемое при регистрации сигнала, мкс; t_{iD} — расчётная разность времен прихода сигнала, мкс,

$$t_{iD} = \frac{d_i - d_{\min}}{c} \cdot 10^6,$$

где d_1 — расстояние между скважиной с установленным — м геофоном

Таблица 1

Результаты определения локации для различных приёмных антенн
Resultant data on locations from different receiving antennas

X	Y	Z	Ошибка расчёта, м	Невязка, мкс	Объём антенны, м ³	Количество геофонов
40	45	45	7,071	96,629	170667	5
40	35	45	7,071	107,997	85333	4
50	35	35	12,247	114,744	85333	4
40	45	40	5,000	120,125	170667	5
45	45	35	8,660	123,348	170667	5
40	45	40	5,000	132,429	85333	4
35	35	45	8,660	135,649	85333	4
45	45	40	7,071	158,563	85333	4
35	45	50	12,247	164,541	85333	4
40	45	45	7,071	319,246	256000	5
35	50	45	12,247	346,763	170667	5
35	45	45	8,660	370,818	170667	5
45	45	30	12,247	391,886	170667	5
40	45	35	7,071	399,304	170667	5
40	45	35	7,071	420,571	256000	5
40	40	45	5,000	465,105	256000	5
45	45	35	8,660	520,772	341333	6
40	45	40	5,000	521,401	341333	6
40	45	40	5,000	539,386	426667	7
40	40	35	5,000	542,716	256000	5

и сейсмоакустическим событием, m ; d_{\min} — расстояние от сейсмоакустического события до ближайшего геофона, зарегистрировавшего сигнал, m ; c — скорость распространения сигнала, $m/сек$.

Результаты расчётов конфигураций приёмных антенн

Параметры рассчитанных конфигураций наблюдательной сети с наимень-

шим параметром невязки приведены в табл. 1 и графически представлены на рис. 2.

Из расчётов можно сделать следующие выводы:

– Все рассчитанные решения в рассматриваемом примере, независимо от количественного состава антенны, удовлетворяют допустимым параметрам работы системы в конкретном примере;

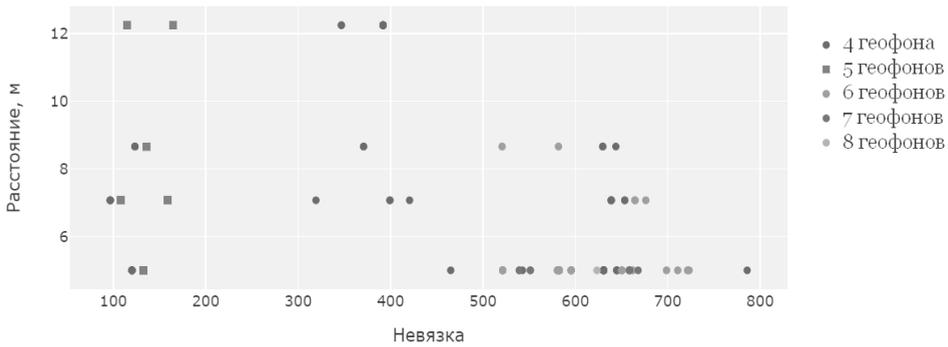


Рис. 2. Результаты расчётов конфигураций, сгруппированные по количеству элементов
Fig. 2. Configuration designs grouped by the number of elements

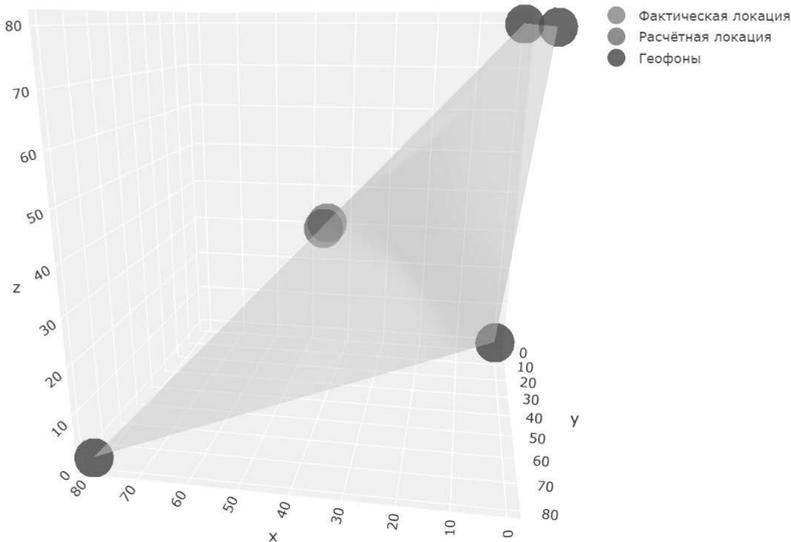


Рис. 3. Локация события: синим показано местоположение геофонов, красным — расчётное положение события, зелёным — истинное
Fig. 3. Location of event: blue — location of geophones; red — calculated location of event; green — actual location of event

– Решение с наименьшей невязкой хоть и даёт вполне допустимые результаты локации события, но не является наиболее достоверным;

– Конфигурации с большим количеством элементов могут демонстрировать меньшую невязку и сопоставимую ошибку определения локации, что отрицательно влияет на эффективность эксплуатации системы в целом;

– Наименьшие невязки получаются при расчёте конфигураций с 4 и 5 геофонами.

Рассмотрим одну из конфигураций наблюдательной сети, состоящей из 4 геофонов, с наименьшей ошибкой расчёта, представленную на рис. 3.

По величине показателя невязки данное решение является 6. На рис. 4 приведена карта чувствительности для сечения, параллельного плоскости XZ, на котором находится рассчитанное сейсмоакустическое событие.

Для сравнения рассмотрим также приёмную антенну с 7 геофонами, имеющую большую зону покрытия и аналогичную ошибку расчёта в 5-м,

как и предыдущее решение. Характеристика данной сети представлена на рис. 5.

Заметим, что невязка в данном случае не может использоваться в качестве единственного критерия степени достоверности рассчитываемой наблюдательной сети. Сравнительная характеристика рассчитанных событий приведена в табл. 2.

Как следует из таблицы 2, невязка данных решений отличается более чем в 5 раз, а объём зоны покрытия — почти в 5 раз. При этом качество обеих конфигураций для рассматриваемого события находится на одинаково приемлемом уровне.

Авторам видится, что перед поиском корреляции рассматриваемых параметров требуется создание математического описания рассматриваемой структуры породного массива и модернизация используемого в настоящее время алгоритма локации. Это позволит получить улучшенный критерий качества локации событий, менее чувствительный к неоднородности структуры

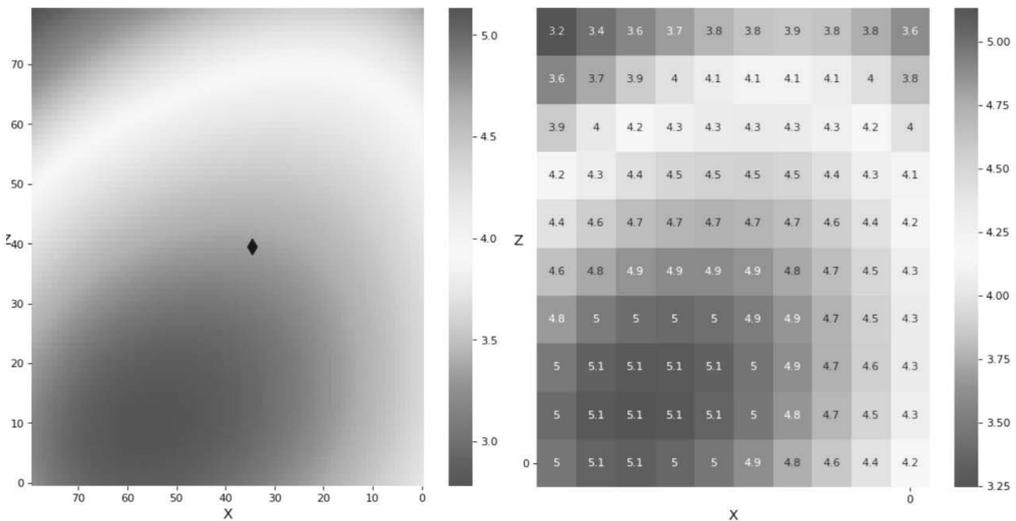


Рис. 4. Карта чувствительности наблюдательной сети для решения 1
Fig. 4. Observation network sensitivity map for solution 1

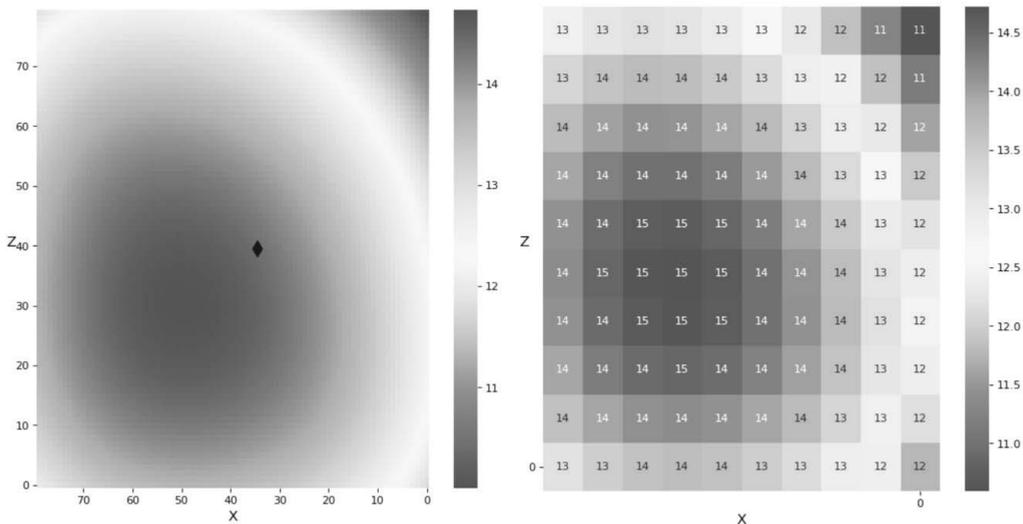


Рис. 5. Карта чувствительности наблюдательной сети для решения 2
 Fig. 5. Observation network sensitivity map for solution 2

Таблица 2
 Характеристики рассчитанных событий
 Table 2. Characteristics of calculated events

№	X	Y	Z	S	n	V, м	c	d, м
1	40	45	40	132	4	85333	4,74	5,0
2	35	40	40	668	7	423667	14,61	5,0

среды и не зависящий от количества приёмников в антенне [13, 14]. Работа по усовершенствованию алгоритма локации с учётом анизотропии среды и неоднородности скорости распространения сигналов ведётся, и по завершению результаты будут объединены с представленными в данной работе [15].

Заметим, что приведённые расчёты учитывают лишь единственное расположение источника и не могут применяться для проверки возможности определения локации в каждой точке зоны мониторинга по причине огромных вычислительных мощностей на моделирование таких процессов. Данную проблему планируется решить, ограничив зону мониторинга областью с достаточным уровнем чувствительности. Помимо этого, не учитываются

особенности применяемых в системе «Prognoz-ADS» однокомпонентных датчиков, а именно их ориентация в пространстве.

Заключение

Разработка методики расстановки геофонов является сложной и нетривиальной задачей, в которой требуется учитывать множество факторов. В настоящее время разработана модель чувствительности, позволяющая оценивать взаимное расположение отдельных элементов сети. В данной работе мы выполнили сравнение различных конфигураций. Анализ показал, что эмпирическая невязка не может применяться в качестве единственного критерия достоверности определения локации события. Требуется создание

комплексного критерия, учитывающего неоднородность и чувствительность участков склонных к проявлению опасных геодинамических проявлений.

Приведённые результаты также обуславливают необходимость учёта неоднородности среды при определении оптимальной конфигурации наблюдательной сети. Данная конфигурация должна отвечать требуемой точности расчёта координат сейсмоакустических событий, а её зона покрытия должна охватывать все участки, подлежащие геомеханическому мониторингу.

Последующие исследования предполагают разработку скоростной модели для конкретного контролируемого объекта и совершенствование алгоритма локации с разработкой критерия, характеризующего точность определения локации и учитывающего неоднородность среды. Авторы планируют

усовершенствовать методику, используемую в настоящее время в системе «Prognos-ADS». В качестве основных нововведений для расчёта оптимальной конфигурации и локации событий будут использоваться буферные карты чувствительности и скорости распространения сигнала, динамически рассчитываемые индивидуально для каждого объекта мониторинга. Такое решение позволит не только улучшить качество локации событий и снизить экономические затраты на установку и эксплуатацию сети геофонов, но и повысить производительность расчётов, что позволит более оперативно реагировать на текущую геодинамическую ситуацию контролируемого объекта, повысить безопасность горнотехнического персонала и минимизировать возможный ущерб материальным средствам предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рассказов И. Ю.* Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона. — М.: Горная книга. — 2008. — 329 с.
2. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. — Новосибирск, Изд-во СО РАН. — Т.1, 2018, Т.2, 2019.
3. *Rutledge J. and Soma N.* Using reflected phases to improve depth resolution of microseismic source locations from single-well observations / Unconventional Resources Technology Conference. — 2013. — URTeC 1578994.
4. *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.
5. *Chambers K., Kendall M., Brandsberg-Dahl S., Rueda J.* Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity // Geophysical Prospecting. — 2010. — 58 p.
6. *Рассказов И. Ю., Потапчук М. И., Курсакин Г. А., Болотин Ю. И., Сидляр А. В., Рассказов М. И.* Прогнозная оценка удароопасности массива горных пород при отработке глубоких горизонтов Николаевского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 4. — С. 96—102.
7. *Рассказов И. Ю., Петров В. А., Гладырь А. В., Тюрин Д. В.* Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы // Горный журнал. 2018. — № 7. — С. 17—21.
8. *Gladyr A. V., Rasskazov I. Yu., Konstantinov A. V.* The calculation parameters for the effective seismic sensors placements to monitor burst-hazard rock massif / CEUR Workshop Proceedings. ITHPC 2019 — Short Paper Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing. — 2019. — С. 90—96.

9. *Гладырь А. В., Константинов А. В., Ломов М. А. Sensor Sensitivity. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019616530 11.06. 2019.*
10. *Рассказов И. Ю., Искра А. Ю., Кянно К. А. Алгоритмы и программное обеспечение для локации источников акустической эмиссии в системе геомеханического мониторинга // Горный информационно-аналитический бюллетень. — S15. — 130–142. — 2007.*
11. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 431 с.*
12. *Ахметсафина Р. З. Локация акустического источника в однородной среде // Робототехника и техническая кибернетика. — 2. — 52–55. — 2016.*
13. *Zhang F, Yang Y, Pahlavan L. Evaluation of Acoustic Emission Source Localization Accuracy in Concrete Structures // Structural Health Monitoring. — 2020.*
14. *Dong L, Zou W, Sun D, Tong X, Li X, Shu W, Some Developments and New Insights for Microseismic /Acoustic Emission Source Localization, Shock and Vibration. — 9732606. — 2019.*
15. *Konstantinov A., Gladyr A., Rasskazov M. Designing an improved geoacoustic event location algorithm in the “Prognoz-ADS” system / E3S Web of Conferences. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2020). — P. 04013. — 2020. [IJAAS](#)*

REFERENCES

1. *Rasskazov I. Yu. Kontrol' i upravlenie gornym davleniem na rudnikah Dal'nevostochnogo regiona [Control and management of rock pressure in the mines of the Far East region]. Moscow: Gornaya kniga. 2008. 329 p. [In Russ]*
2. *Geomekhanicheskie polya i processy: eksperimental'no-analiticheskie issledovaniya formirovaniya i razvitiya ochagovyh zon katastroficheskikh sobytij v gornotekhnicheskikh i prirodnyh sistemah [Geomechanical fields and processes: experimental and analytical investigations of the formation and development of focal zones of catastrophic events in mining and natural systems]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN. T.1, 2018, T.2, 2019. [In Russ]*
3. *Rutledge J. and Soma N. Using reflected phases to improve depth resolution of microseismic source locations from single-well observations. Unconventional Resources Technology Conference. 2013. URTEC 1578994.*
4. *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.*
5. *Chambers K., Kendall M., Brandsberg-Dahl S., Rueda J. Testing the ability of surface arrays to monitor microseismic activity. Geophysical Prospecting. 2010. 58 p.*
6. *Rasskazov I. Yu., Potapchuk M. I., Kursakin G. A., Bolotin Yu. I., Sidlyar A. V., Rasskazov M. I. Predictive assessment of the rock burst hazard of a rock mass during the development of deep horizons of the Nikolaevskoe deposit. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2012. no. 4. pp. 96–102. [In Russ]*
7. *Rasskazov I. Yu., Petrov V. A., Gladyr' A. V., Tyurin D. V. Geodynamic polygon of the Streltsovsky ore field: practice and prospects. Gornyj zhurnal. 2018. no. 7. pp. 17–21. [In Russ]*
8. *Gladyr A. V., Rasskazov I. Yu., Konstantinov A. V. The calculation parameters for the effective seismic sensors placements to monitor burst-hazard rock massif. CEUR Workshop Proceedings. ITHPC 2019 Short Paper Proceedings of the 5th International Conference on Information Technologies and High-Performance Computing. 2019. pp. 90–96.*
9. *Gladyr' A. V., Konstantinov A. V., Lomov M. A. Sensor Sensitivity. Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM no. 2019616530 11.06. 2019. [In Russ]*

10. Rasskazov I. Yu., Iskra A. Yu., Kyanno K. A. Algorithms and software for locating acoustic emission sources in the geomechanical monitoring system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2007. S15. pp. 130–142. [In Russ]

11. *Geomekhanicheskie processy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami* [Geomechanical processes in the geological environment of mining engineering systems and management of geodynamic risks]. Apatity: KNC RAN, 2019. 431 p. [In Russ]

12. Ahmetsafina R. Z. Acoustic source location in a homogeneous environment. *Robototekhnika i tekhnicheskaya kibernetika.* 2016. 2. pp. 52–55. [In Russ]

13. Zhang F., Yang Y., Pahlavan L. Evaluation of Acoustic Emission Source Localization Accuracy in Concrete Structures. *Structural Health Monitoring.* 2020.

14. Dong L., Zou W., Sun D., Tong X., Li X., Shu W., Some Developments and New Insights for Microseismic. Acoustic Emission Source Localization, Shock and Vibration. 9732606 p. 2019.

15. Konstantinov A., Gladyr A., Rasskazov M. Designing an improved geoaoustic event location algorithm in the “Prognoz-ADS” system. *E3S Web of Conferences. VIII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources” (PCDG 2020).* P. 04013. 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Константинов Александр Викторович*¹ — научный сотрудник, alex-sdt@yandex.ru;

*Ломов Михаил Андреевич*¹ — младший научный сотрудник;

*Терёшкин Андрей Александрович*¹ — научный сотрудник;

*Рассказов Максим Игоревич*¹ — научный сотрудник;

*Цой Денис Игоревич*¹ — научный сотрудник;

¹ Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук — обособленное подразделение Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, Хабаровск, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Konstantinov A. V.*¹, researcher, e-mail: alex-sdt@yandex.ru

*Lomov M. A.*¹, junior researcher;

*Tereshkin A. A.*¹, researcher;

*Rasskazov M. I.*¹, researcher;

*Tsoi D. I.*¹, researcher;

¹ Mining Institute of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences — a separate division of the Federal Khabarovsk research center, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia.

Получена редакцией 27.01.2021; получена после рецензии 26.03.2021; принята к печати 10.04.2021.

Received by the editors 27.01.2021; received after the review 26.03.2021; accepted for printing 10.04.2021.

