ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2022;(12-1):106-121
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.831.32 DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_106

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И РАННЕГО ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

И.Ю. Рассказов[1], Ю.В. Федотова[2], П.А. Аникин[2], А.В. Сидляр[2], П.А. Корчак[3]

[1] Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, Хабаровск, Россия
[2] Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск, Россия, e-mail: fjulia@mail.ru
[3] Кировский филиал АО «Апатит», Кировск, Россия

Аннотация: Разрабатываемые удароопасные месторождения апатит-нефелиновых руд Хибинского массива, характеризуются сложными геомеханическими условиями. Для геомеханического мониторинга разрабатываемых месторождений используются различные системы (разночастотные сейсмические, деформационные, и т.п., регистрирующие в режиме реального времени или дискретно различные параметры изменения напряженно-деформированного состояния разрабатываемых месторождений. Рассмотрено применение сейсмоакустической системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» (разработанной ИГД ДВО РАН, г. Хабаровск). По данным системы «Prognoz-ADS», установленной в 2020 г. на Расвумчоррском руднике, проведен анализ и выявлены закономерности формирования акустически активных зон в местах концентрации напряжений, позволяющих характеризовать геомеханическое состояние удароопасных участков в массиве горных пород. В ИГД ДВО РАН ведется работа по модернизации и совершенствованию системы и ее программного обеспечения, в том числе с учетом нормативных документов Ростехнадзора. Полученные в настоящее время результаты сейсмоакустического мониторинга по данным системы «Prognoz-ADS» определяют перспективный круг задач по модернизации элементов системы и ее программного обеспечения. Дальнейшее совершенствование системы геомеханического мониторинга позволит не только повысить достоверность прогнозных критериев, но и оперативно, и эффективно контролировать и управлять геомеханическими процессами с при ведении горных работ на Расвумчоррском руднике.

Ключевые слова: удароопасность, техногенная сейсмичность, горные удары, сейсмоакустический мониторинг, точность локации событий, чувствительность системы, управляемая разгрузка массива.

Благодарность: Работа выполнена в рамках темы НИР, а также при поддержке КФ АО «Апатит». Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных Дальневосточного отделения РАН», финансируемого Российской Федерацией в лице Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 075-15-2021-663.

Для цитирования: *Рассказов И. Ю., Федотова Ю. В., Аникин П. А., Сидляр А. В., Корчак П. А.* Совершенствование автоматизированной системы геомеханического мониторинга и раннего предупреждения опасных геодинамических явлений // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12-1. – С. 106–121. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_106.

© И.Ю. Рассказов, Ю.В. Федотова, П.А. Аникин, А.В. Сидляр, П.А. Корчак. 2022.

Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena

I.Yu. Rasskazov[1], Yu.V. Fedotova[2], P.A. Anikin[2], A.V. Sidlyar[2], P.A. Korchak[3]

[1] Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia

[2] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russia, e-mail: fjulia@mail.ru

[3] Kirovsk Branch of Apatit JSC, Kirovsk, Russia

Abstract: The developed rockburst hazard deposits of apatite-nepheline ores of the Khibiny massif are characterized by complex geomechanical conditions. For geomechanical monitoring various systems are used (multi-frequency seismic, deformation, etc., recording in real time or discretely various parameters of changes in the stress-strain state of the developed deposits. Including the seismic acoustic rock pressure monitoring system «Prognoz-ADS» developed by the Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (MI FEB RAS, Khabarovsk). According to the «Prognoz-ADS» system installed in 2020 at the Rasvumchorrsky Mine, an analysis was carried out and a number of the formation patterns of acoustically active zones in places of stress concentration were revealed, allowing to characterize the geomechanical state of impact-prone areas in the rock mass. The MI FEB RAS is constantly working on the modernization and improvement of system components and software, taking into account the current regulatory documents of Rostechnadzor. The first results of seismic acoustic monitoring obtained at present according to the «Prognoz-ADS» system of the Rasvumchorrsky Mine determine a promising range of tasks for the modernization of system elements and its software. Further improvement of the geomechanical monitoring system will allow not only to increase the reliability of forecast criteria, but also to quickly and effectively control and manage geomechanical processes by unloading impact-prone sections of the rock mass at the Rasvumchorrsky Mine when identifying acoustically active zones.

Key words: rockburst hazardous, technogenic seismicity, seismic acoustic monitoring, events location accuracy, system sensitivity, controlled change of rock mass properties.

Acknowledgements: The study was carried out using the resources of the Center for Collective Use of Scientific Equipment «Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences», funded by the Russian Federation represented by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project No. 075-15-2021-663.

For citation: Rasskazov I.Yu., Fedotova Yu. V., Anikin P. A., Sidlyar A. V., Korchak P. A. Improvement of the automated system of geomechanical monitoring and early prevention of dangerous geodynamic phenomena. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(12-1):106-121. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_121_0_106.

Введение

С увеличением глубины горных работ и масштабов техногенного воздействия на массив горных пород увеличивается его сейсмический отклик как в количественном, так и в качественном выражении. Этой проблеме посвящено большое количество работ как за рубежом [1–4], так и в России [5–8].

В условиях проявления природной и техногенной сейсмичности для контроля геомеханического состояния масси-

ва горных пород и прогноза его изменений наиболее широко применяются многоканальные системы геоакустического, сейсмического и деформационного мониторинга [9—12]. Последние показали свою эффективность при изучении процессов современного разломообразования и оценки влияния активных разломов на напряженное состояние скальных массивов.

Исследования геомеханического состояния массива горных пород на основе анализа данных систем мониторинга для прогнозирования горных ударов на протяжении многих лет проводятся на удароопасных месторождениях России [13—16].

Кольский филиал АО «Апатит» (КФ АО «Апатит») разрабатывает ряд уникальных апатит-нефелиновых месторождений, которые характеризуются сложными горно-геологическими условиями и являются одними из наиболее опасных по горным ударам в России. При подземной отработке этих месторождений зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, включая горные и горно-тектонические удары. На протяжении многих лет процесс отработки сопровождается проявлениями техногенной сейсмичности [17, 18].

В условиях этих месторождений был выполнен большой объем исследований горных ударов и испытано множество различных методов и технических средств оценки и контроля удароопасности. Здесь была установлена (одной из первых в России) автоматизированная система контроля сейсмичности массива, которая после модернизации успешно работает до сих пор [19].

Вместе с тем, для раннего предупреждения опасных геодинамических явлений необходимо применение комплекса измерительных средств с более высокой «разрешающей способностью», которые обеспечивали бы не только регистрацию крупных сейсмических событий, но их предвестников.

Одними из основных задач обеспечения эффективности работы таких средств являются точное определение параметров источников акустической эмиссии и обеспечение необходимой чувствительности системы на основании рационального расположения приемников в массиве [20, 21].

Методы и объект исследований

На месторождениях, разрабатываемых КФ АО «Апатит», для контроля удароопасности выполняются исследования по применению геоакустического метода с оборудованием и программным обеспечением, разработанным в Институте горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИГД ДВО РАН), Хабаровск. Так, для локальной экспресс-оценки состояния контура выработок разработан портативный прибор, обеспечивающий измерение параметров АЭ в высокочастотном диапазоне («Prognoz L») [22]. Региональный контроль удароопасности в пределах одного или нескольких очистных блоков осуществляется с применением автоматизированной системы контроля горного давления (АСКГД) «Prognoz ADS» [23].

АСКГД предназначена для непрерывной регистрации в массиве горных пород импульсов сейсмоакустической эмиссии (являющихся следствием упругого разрушения горных пород) в частотном диапазоне 0,2...12 кГц, определения их параметров (энергии, координат, спектральных и иных характеристик акустических событий) и представления результатов мониторинга в виде каталогов, карт, графиков с применением современных программных средств 3D визуализации и диспетчеризации.

В системе применяется достаточно развитое оригинальное программное

обеспечение, разработанное сотрудниками ИГД ДВО РАН. Часть программ отвечает за работу подземной части системы, ее настройку, регистрацию событий, размещение информации о них в базах данных и т.д. Поверхностный программный комплекс системы позволяет выделять и контролировать параметры акустически-активных и потенциально удароопасных зон, проводить оценку геомеханического состояния массива горных пород для раннего предупреждения опасных геодинамических явлений. Также разработана специальная программа для оптимизации наблюдательной сети и повышения точности локации очагов сейсмоакустических событий. При учете структурных особенностей контролируемого массива и правильной расстановке датчиков, ошибка в определении местоположения очагов не превышает первых метров.

На рудниках КФ АО «Апатит» первая система была установлена в 2015 г. на экспериментальном участке блока 7/10 Кукисвумчоррского крыла Объединенного Кировского рудника с целью оценить возможность и перспективность применения данных систем для наблюдений в условиях разрабатываемых месторождений Хибинского массива [24]. На основе анализа, полученных за четыре года результатов работы АСКГД-К и рекомендаций, представленных в методике контроля горного давления, Комиссией по горным ударам от 24.12.2018 вынесено решение о возможности использования системы «Prognoz-ADS» на рудниках КФ АО «Апатит» и разработке проекта АСКГД-Р для мониторинга центральной части шахтного поля Расвумчоррского рудника.

В феврале 2020 г. АСКГД-Р прошла опытно-промышленные испытания на

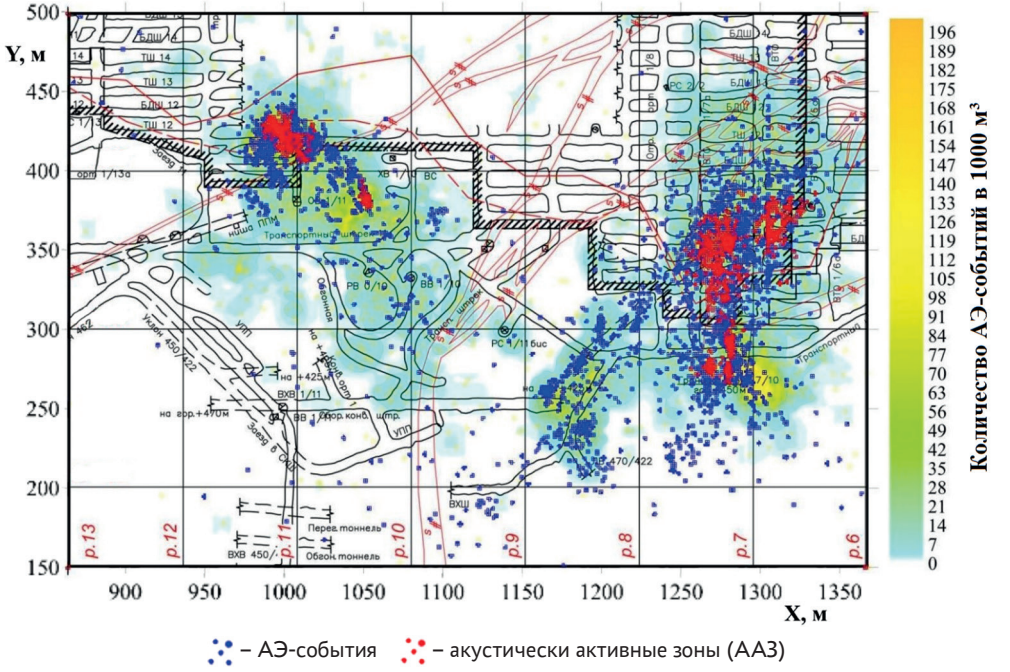

Рис. 1. Акустическая активность района мониторинга Расвумчоррского рудника за период с февраля 2020 г. по ноябрь 2021 г. в проекции на горизонт 450 м

Fig. 1. Acoustic activity of monitoring area of Rasvumchorrsky Mine for period from February 2020 to November 2021 projected onto horizon 450 m

руднике и передана службе в промышленную эксплуатацию.

В тектоническом отношении район расположения АСКГД-Р представляет собой сложный нарушенный массив. В первую очередь подобное состояние вызвано наличием серии окисленных зон, истинная мощность которых на разных участках достигает 10 м, падение на СЗ и ЮВ под углами 60 — 70°. Породы нарушенных зон очень слабые (категория по прочности VI), раздробленные и перемятые (категория по трещиноватости — 5, $I_{тр}$ > 15 шт./пог.м), слабоустойчивые (категория по устойчивости — 3). Коэффициент крепости по шкале проф. Протодьяконова f = 3 — 5. Помимо зон шпреуштейнизации на данном участке распространены тектонические трещины диагонального, радиального и субширотного направления, преимущественно крутопадающие, как правило, приоткрытые и выполненные вторичными минералами, местами окисленные. В паводковый период обводненность массива может быть значительной за счет проникновения атмосферных осадков по окисленным зонам и трещинам.

На рис. 1 показана карта акустической активности, построенная по результатам мониторинга АСКГД-Р с февраля 2020 г. по ноябрь 2021 г. в проекции на горизонт 450 м.

По данным, приведенным на рис. 1 видно, что в этот период наблюдений в пределах области мониторинга состояния массива АСКГД-Р сформировались несколько зон акустической активности (ААЗ), в том числе приуроченные к зонам разрывных нарушений.

Выполненный анализ базы данных системы мониторинга с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», [25] показал, что интенсификация сейсмических событий в 2021 г. (рис. 2), регистрируемых Расвумчоррской системой контроля состояния массива КФ АО «Апатит» (АСКСМ-Р) и сейсмоакустических импульсов, регистрируемых системой АСКГД-Р в южной части месторождения «Апатитовый Цирк» в районе Р.5÷8, отмечалась в феврале-марте, как правило, после производства взрывных работ в блоке 5/8 отм. +425 м.

По данным АСКГД-Р в период с января по март выявлено 7 акустически активных зон, 6 из которых расположены в данном районе. Примечательно, что все ААЗ сформированы в марте. Эти данные соответствуют данным АСКСМ-Р, где также в марте 2021 г. наблюдалось повышенное количество сейсмических событий и дважды устанавливалась первая степень региональной удароопасности согласно действующей в КФ АО «Апатит» методике.

Так, 23.03.2021 в 10:05:43 на месторождении «Апатитовый цирк» АСКСМ-Р зарегистрировано сейсмическое событие с энергией 2,73E+07 Дж с координатами Р.6+4 м, М.239 м, Z = 448 м, (284 м от поверхности). После данного события была зафиксирована серия афтершоковых сейсмических событий в энергетическом диапазоне от 1,00E+02 до 1,00E+04 Дж.

На отметке +425 м, в СКШ, СКШ2 и заезде в СКШ визуальным осмотром сотрудников СППГУ рудника выявлено отслоение закола в секторе кровли в нише электрооборудования на СКШ в районе узла перегрузки с КО2. Формирование его обусловлено нахождением в зоне влияния сейсмодинамических нагрузок от производства взрывных работ на отметке +425 м блока 5/8. По информации работников, находящихся в момент сейсмического события на СКШ и в разнарядке УДДК, был слышен сильный звук в массиве со стороны заезда в СКШ с отметки +425 м, напоминающий взры-

вание вееров глубоких скважин (без образования воздушной волны) и серия нескольких достаточно сильных щелчков после. При этом в районе узла перегрузки СКШ/СКШ2 ранее было отмечено наличие нескольких трещин по набрызг-бетонному креплению, образовавшихся в январе 2018 г. в результате горно-тектонического удара. На горизонте 470 м между Р.6÷Р.9 (ЮОШ и ЮОШ1) установлено наличие очагов динамического заколообразования на заездах в выработки откаточных ортов 7 и 6Б, данные выработки погашены, доступ перекрыт. В процессе обследования данного участка со стороны отработанного пространства, отмечались периодически происходящие в массиве горных пород щелчки, различные по интенсивности и уровню высвобождаемой энергии.

Системой АСКГД-Р на 23.03.2021 в пределах зоны мониторинга была выделена акустически активная зона на горизонте +470 м.

Необходимо отметить, что в сложных горно-геологических условиях разработки удароопасных месторождений

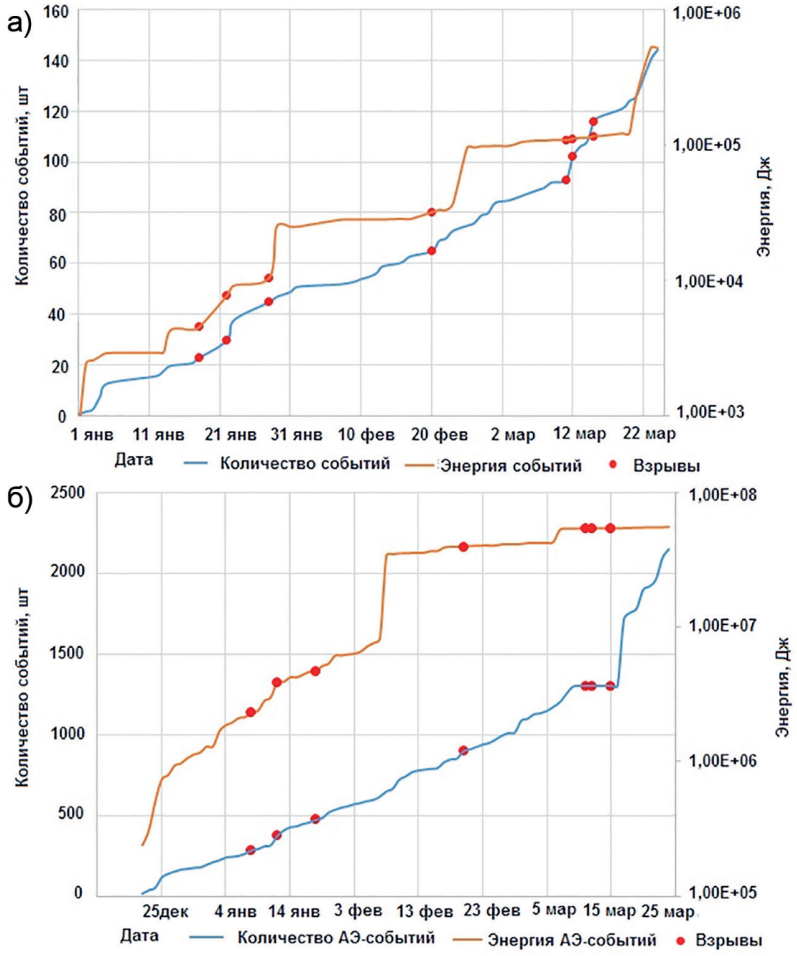

Рис. 2. Кумулятивные кривые сейсмической энергии и взрывы, зарегистрированные системами: АСКСМ-Р (а) и АСКГД-Р (б)

Fig. 2. Cumulative seismic energy curves and explosions recorded by systems: ASMSM-R (a) and AMPMS-R (b)

предъявляются повышенные требования к системам мониторинга состояния массива, в частности к их программным средствам, обеспечивающим как прием и распознавание сигналов, так и их обработку, анализ и визуализацию полученных результатов.

Результаты исследований

Для повышения качества оценки текущего геомеханического состояния участка массива и прогноза его изменений, в ИГД ДВО РАН ведется работа по модернизации и совершенствованию компонентов АСКГД и ее программного обеспечения. Полученные в настоящее время результаты сейсмоакустического мониторинга определяют перспективный круг задач, направленных на повышение эффективности контроля удароопасности с применением АСКГД и программного комплекса «GeoAcoustics-ADS» на участке Расвумчоррского рудника (в пределах разрезов Р7–Р11). С этой целью разработан алгоритм автоматического определения координат акустических событий и проведена его апробация в среде математического программирования MatLab, а также осуществлена программная реализация в ПО «GeoAcoustics-ADS» алгоритма оптимизации наблюдательной сети для повышения точности и надежности сейсмоакустического контроля. Также выполнен рогноз точности локации зоны мониторинга и определена чувствительность пространственной зоны в пределах наблюдательной сети геофонов системы «Prognoz ADS».

Ниже рассмотрены некоторые полученные результаты.

Расчеты точности локации событий проводились для разных групп датчиков АСКГД-Р. Дополнительно было проведено сравнение аналитических (метод наименьших квадратов) и численных (перебор по сетке) методов локации, используемых для расчета в программе «GeoAcoustics-ADS» [26–28].

Полученные результаты показали, что расчет координат АЭ-событий лучше производить по максимальной длине приемной антенны. Наихудшая точность локации выделяется при расчете координат по 4-м ближайшим геофонам (порядка 42% объема зоны контроля с погрешностью менее 10 м). При локации по 5 ближайшим геофонам точность локации (менее 10 м) увеличивается до 54% объема зоны контроля. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при расчете по 6—10 ближайшим геофонам в приемной антенне АЭ-событий. В этом случае порядка 63—65% точек в зоне контроля имеют погрешность локации менее 10 м.

Результаты сравнения показывают, что использование численных методов перебора по сетке позволяет значительно повысить точность локации, в особенности для АЭ-событий, расположенных на границе и за пределами зоны контроля. Это позволило выдвинуть гипотезу, что для снижения скорости расчета координат АЭ-событий численными методами требуется их комплексное использование с аналитическими методами, что позволяет в десятки раз уменьшать зону поиска источника трещинообразования в массиве горных пород.

Для проверки этой гипотезы были проведены расчеты локации прогнозируемой ошибки аналитическими (метод наименьших квадратов) и численными (перебор по сетке) методами с постоянной скоростью (6000 м/с) и перебором с шагом 25 м/с. Расчеты проводились для зоны контроля системы «Prognoz ADS» Расвумчоррского рудника, увеличенной на 50 м от крайних геофонов. Результаты показали, что совместное использование перебора скорости и численных методов расчета, позволяет увеличивать объем зоны уверенной регистрации (уча-

стки с ошибкой локации менее 10 м) на 10—15% по сравнению аналитическими методами расчета.

На рис. 3 представлено распределение прогнозируемой ошибки для антенны из 6 датчиков в проекции на объемную модель Расвумчоррского рудника. Также показаны места расположения геофонов и результаты сейсмоакустического мониторинга.

Локация АЭ-событий с избыточным количеством сигналов (6 и более) характеризуется получением координаты со значением среднеквадратического отклонения ошибки (невязки), отличной от нуля. Снижение невязки расчета для таких событий возможно за счет создания трехмерной скоростной модели месторождения.

В отличие от сейсмических систем, применение данного метода для акустической системы «Prognoz-ADS» (в отличие от сейсмических) даст меньшую эффективность ввиду необходимости более высокой точности 3D-модели из-за меньшего объема зоны контроля и высокой анизотропией массива.

Поэтому для системы «Prognoz-ADS» повышение точности локации АЭ-событий с избыточным количеством сигналов (6 и более) целесообразно применять только математические процедуры (операции), позволяющие снижать невязку расчета. Перед и в процессе реализации данного подхода предполагалось, что он может дать высокую эффективность ввиду крайне высокой анизотропии массива горных пород в зоне контроля. Для сейсмических же систем целесообразнее повышать точность расчета координат за счет создания трехмерной скоростной модели месторождения.

Для АСКГД-Р разработана программа «AntennaCalc», которая позволяет оценивать различные конфигурации приемных сетей геофонов в заданной пространственной зоне, а именно производить расчет прогнозных значений погрешности локации. Разработанный и протестированный алгоритм в программе «AntennaCalc» был адаптирован для его использования в программном комплексе «GeoAcoustics-ADS». В частности, был исключен ряд специфических возможностей, представляющих на данном этапе лишь исследовательский интерес. Была значительно повышена производительность производимых расчетов с

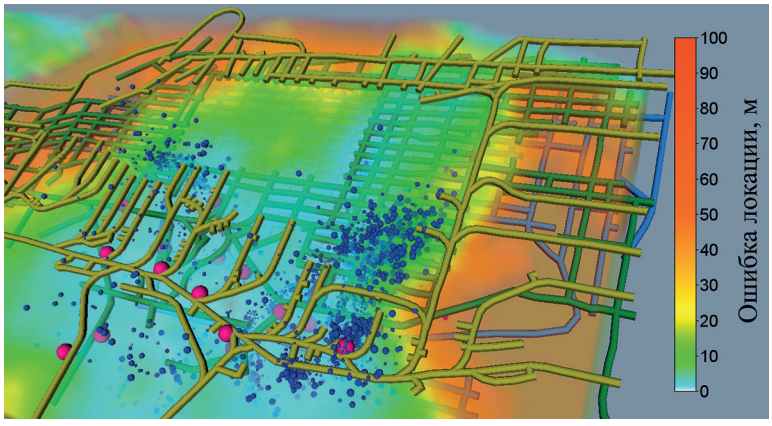

Рис. 3. Распределение прогнозируемой ошибки локации (м) для антенны из 6 датчиков в проекции на объемную модель Расвумчоррского рудника

Fig. 3. Distribution of predicted location error (m) for an antenna of 6 sensors in the projection onto 3D model of Rasvumchorrsky Mine

использованием по возможности целочисленных операций и реализации распараллеливания вычислений в многопоточном режиме.

Расчет погрешности локации и визуализация результатов выполнены в виде отдельного программного модуля, написанного на языке C# с применением вспомогательного программного обеспечения Surfer компании Golden Software. Элементы пользовательского интерфейса разделяются на блоки с параметрами пространственной зоны и геофонов, блок параметров алгоритма расчета и настройки построения карт с отображением погрешностей локации.

Данные по пространственным зонам и геофонам загружаются из базы данных «GeoAcoustics-ADS». Имеется возможность добавления новых временных зон и геофонов. Одной из самых важных характеристик алгоритма, задаваемой пользователем, является величина размера домена, значительно влияющая на скорость и точность производимого расчета. В качестве визуальных параметров построения карт выступают характеристики отрисовки геофонов, цветовой шкалы и непосредственно самих цветовых уровней, наложенных на двумерную подложку пространственной зоны.

Программный модуль имеет дополнительную возможность экспорта результатов расчета в файл с расширением .xls, содержащим рассчитанные координаты источника, погрешности определения локации и информацию о приемной антенне для каждого домена пространственной зоны. Результатом работы программного модуля является растровое изображение пространственной зоны с нанесенными погрешностями локации и геофонами.

Созданный алгоритм и его программная реализация позволяют получить оценку эффективности эксплуатируемой наблюдательной сети геофонов, спроектировать расширение сети или разработать новую конфигурацию при помощи механизма добавления геофонов.

Разработанные средства продолжат активно совершенствоваться с целью получения более достоверного прогноза погрешностей локации и повышения эффективности эксплуатации приемной сети геофонов.

В качестве дополнительного инструмента оценки эффективности работы наблюдательной сети в программе «Geo Acoustics-ADS» был реализован алгоритм расчета с использованием модели чувствительности [28, 29]. По сути, используется безразмерная величина, характеризующая чувствительность наблюдательной сети в рассчитываемых геометрических доменах.

$$s_0 = n\sum_{i=1}^{n}\left(1-\sqrt{\frac{D}{r_д}}\right),$$

где n — количество геофонов, детектирующих сейсмоакустическое событие в доменной области; D — расстояния между центром доменной области и координатами сейсмоакустического датчика, м; $r_д$ — предел чувствительности сейсмоакустического датчика, м.

Оценка приемной сети геофонов может осуществляться в двух режимах.

Первый режим (градиентных уровней) — заключается в выборе некоторого максимального значения чувствительности, характеризующего предельное значение этой величины в пределах исследуемого 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 кодировки. Пример построенной карты с

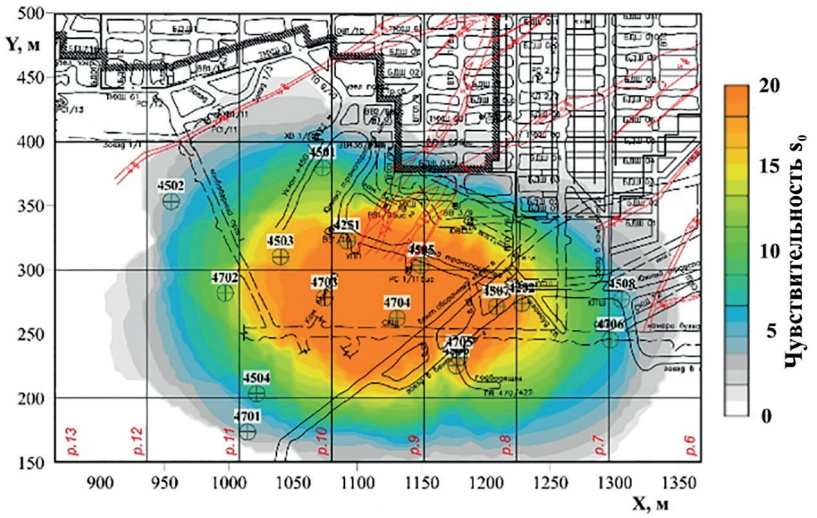

Рис. 4. Пример распределения чувствительности с применением режима градиентных уровней
Fig. 4. An example of sensitivity distribution using the mode gradient levels

использованием первого режима (в рассмотренном примере использован размер домена 1000 м^3) приведен на рис. 4.

Второй режим предполагает разбиение выбранной пользователем пространственной зоны на 3 характерные области:

- неконтролируемую зону, в пределах которой регистрируемые события могут быть лоцированы после улучшения характеристик геофонов, либо после увеличения их количества в непосредственной близости от источника;
- зону негарантированного контроля, в окрестности которой события могут быть лоцированы с точностью, находящейся на границе допустимых технических характеристик системы мониторинга;
- зону гарантированного контроля с достаточно достоверным определением параметров регистрируемых событий, точность которых удовлетворяет техническим характеристикам системы мониторинга.

Построение карт чувствительности для заданной контролируемой зоны позволяет получить представление об эффективности расстановки геофонов в условиях работающей системы сейсмоакустического мониторинга, либо смоделировать изменение параметров зоны в условиях новой конфигурации.

Стоит отметить, что для получения объективной оценки с использованием рассмотренных подходов их следует рассматривать в совокупности, а также по возможности учитывать иные методы, включая анализ разрывных нарушений, формы и типа горных выработок, характеристик горных пород и другие.

Заключение

Применение установленной на Расвумчоррском руднике сейсмоакустической системы «Prognoz-ADS» позволили выявить ряд акустически активная зон, являющихся признаками концентрации высоких напряжений в массиве горных пород и предвестниками формирующихся очагов опасных геодинамических явлений.

По результатам проведенных исследований установлено, что расчет коор-

динат АЭ-событий лучше производить по максимальной длине приемной антенны. Наихудшая точность локации выделяется при расчете координат по четырем ближайшим геофонам (до 42% объема зоны контроля с погрешностью менее 10 м). При локации по 5 ближайшим геофонам точность локации (менее 10 м) увеличивается до 54% объема зоны контроля. Наилучшие результаты могут быть достигнуты при расчете по 6—10 ближайшим геофонов в приемной антенне АЭ-событий, при этом до 65% точек в зоне контроля имеют погрешность локации менее 10 м.

В качестве дополнения для антенны из четырех геофонов предложен подход фильтрации событий с прогнозируемой ошибкой локации более 20 м, позволяющий частично очистить БД и удалить из нее порядка 32% АЭ-событий с погрешностью расчета более 10 м. Отдельно стоит отметить, что этот подход позволит также отфильтровать порядка 80—95% событий от работы бурового оборудования. Практика показывает, что в своем подавляющем большинстве такие акустические импульсы либо не позволяют точно определить координату АЭ события, либо определяют ее с высокой погрешностью, так как сигналы малых амплитуд от бурового оборудования, регистрируемые чаще всего четырьмя датчиками на фоне их непрерывного потока, обладают большей погрешностью регистрации времени прихода сигнала и, следовательно, низкой точностью локации.

Установлено, что расчет координат АЭ-событий для приемной антенны, состоящей из пяти геофонов, целесообразно осуществлять с перебором скорости для получения решения с нулевой невязкой. Перебор скорости позволяет увеличить зону контроля с уверенной точностью расчета координат на 20—30%: в этом случае погрешность локации менее 10 м будет для 90% событий в зоне контроля, погрешность менее 5 м — для 85% событий.

Для акустической системы «Prognoz-ADS» повышение точности локации АЭ-событий с избыточным количеством сигналов (6 и более) обеспечивается применением только математических процедур (операций), позволяющих снижать невязку расчета. Рекомендуется совместное использование численных методов локации и перебора скорости, что дает возможность увеличивать объем зоны уверенной регистрации (участки с ошибкой локации менее 10 м) на 10—15% по сравнению аналитическими методами расчета.

Для снижения скорости расчета координат АЭ-событий численными методами требуется их комплексное использование с аналитическими методами, позволяющее в десятки раз уменьшать зону поиска источника трещинообразования в массиве горных пород.

В комплекс программных средств «GeoAcoustics-ADS» внедрены новые алгоритмы для оценки эффективности приемной антенны. Разработан и реализован алгоритм определения точности локации, позволяющий рассчитать и визуализировать прогнозные значения погрешностей локации в пределах исследуемой зоны. Внедрен алгоритм расчета чувствительности пространственной зоны и добавлена возможность создания карт чувствительности, характеризующих плотность распределения элементов наблюдательной сети.

В целом, несмотря на положительные результаты применения геоакустических систем для контроля удароопасности, наш опыт и опыт многих других ученых, занимающихся в данном направлении, показывает, что для повышения достоверности прогнозных оценок необходимо применение нескольких разномасштабных дополняющих друг друга методов

и технических средств, которые были бы интегрированы в единую систему комплексного геомеханического мониторинга. Такие системы комплексного мониторинга позволяют регистрировать и анализировать широкий спектр параметров, изменяющихся во времени и пространстве геофизических полей, включая их энергетические, спектральные и иные характеристики.

При этом важно регистрировать и определять параметры не только крупных геодинамических событий, но их предвестников. Для этого необходимо применение измерительных средств как регионального, так и локального контроля, технические характеристики которых совместно перекрывают частотный диапазон от первых Гц до десятков килогерц. При этом применяемые приборы и оборудование интегрируются в единую наблюдательную сеть, в которой обеспечивается временная синхронизация при регистрации данных всеми входящими в систему измерительными средствами.

Авторы выражают признательность А.Ю. Моторину, ведущему геофизику СППГУ КФ АО «Апатит», за предоставленные материалы, а также коллегам, за помощь в проведении данных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Foulger G. R., Wilson V. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J.* Global review of human-induced earthquakes // Earth-Science Reviews. 2017, vol. 178, pp. 438—514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

2. *Marcak H., Mutke G.* Seismic activation of tectonic stresses by mining // Journal Seismology. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139—1148.

3. *Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z.* Case histories of rockbursts at metal mines // Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation. Chapter 3. 2018, pp. 47—92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2.

4. *Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L.* Rockburst mechanism research and its control // International Journal of Mining Science and Technology. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 829—837.

5. *Адушкин А. А.* Развитие техногенно-тектонической сейсмичности в Кузбасе // Геология и геофизика. — 2018. — Т. 59. — № 5. — С. 709—724. DOI: 10.15372/GiG20180510.

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

7. *Batugin A., Kolikov K., Ivannikov A., Ignatov Yu., Krasnoshtanov D.* Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas / Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM-2019. 2019, vol. 19, book 1.3. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3.

8. *Баранов С. В.*, *Моторин А. Ю.*, *Шебалин П. Н.* Пространственное распределение повторных толчков в условиях техногенной сейсмичности // Физика Земли. — 2021. — № 4. — С. 91—100. DOI: 10.31857/S0002333721040025.

9. *Козырев А. А.*, *Савченко С. Н.*, *Панин В. И.*, *Семенова И. Э.*, *Рыбин В. В.*, *Федотова Ю. В.*, *Козырев С. А. и др.* Геомеханические процессы в геологической среде горно-технических систем и управление геодинамическими рисками. — Апатиты: КНЦ РАН, 2019. — 431 с. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

10. *Бабелло В. А., Бейдин А. В., Овсейчук В. А., Смолич С. В.* Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — С. 41—54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.

11. *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. 2019, vol. 5, pp. 1—15. DOI: 10.1155/2019/9732606.

12. *Zhang F., Yang Y., Pahlavan L.* Evaluation of Acoustic Emission Source Localization Accuracy in Concrete Structures // Structural Health Monitoring. 2020, vol. 6, pp. 2063 — 2074, DOI: 10.1177/1475921720915625.

13. *Раимжанов Б. Р.*, *Хасанов А. Р.*, *Фарманов О. Э.* Исследование геодинамического состояния массива горных пород с целью прогнозирования горных ударов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 10. — С. 29 — 41. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.

14. *Айнбиндер И. И.*, *Овчаренко О. В.* Особенности геомеханического состояния массива горных пород на глубоких горизонтах рудников «Интернациональный» и «Мир» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 11. — С. 57 — 69. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

15. *Менгель Д. А.* Результаты инструментального прогноза удароопасности на шахте «Соколовская» методом акустической эмиссии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 149 — 160. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-149-160.

16. *Tereshkin A. A.*, *Rasskazov I. Yu.*, *Anikin P. A.*, *Gladyr A. V.*, *Migunov D. S.* and *Rasskazov M. I.* Improvement of technology and procedures of local rockburst hazard control // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, vol. 773, article 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012062.

17. *Korchak P.* Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit» // E3S Web of Conferences. 2018, vol. 56, no. 6, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602023.

18. *Жукова С. А.*, *Журавлева О. Г.*, *Онуприенко В. С.*, *Стрешнев А. А.* Особенности сейсмического режима массива горных пород при отработке удароопасных месторождений Хибинского массива // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 7. — С. 5 — 17. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.

19. *Корчак П. А.*, *Жукова С. А.*, *Меньшиков П. Ю.* Становление и развитие системы мониторинга сейсмических процессов в зоне производственной деятельности АО «Апатит» // Горный журнал. — 2014. — № 10. — С. 42 — 46.

20. *Ахметсафина Р. З.* Локация акустического источника в однородной среде // Робототехника и техническая кибернетика. — 2016. — № 2. — С. 52 — 55.

21. *Гладырь А. В.*, *Рассказов М. И.*, *Терешкин А. А.*, *Константинов А. В.* Опытное исследование точности локации автоматизированной системы геомеханического мониторинга в условиях анизотропии горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — № 1. — С. 78 — 83. DOI: 10.15372/FPVGN2019060113.

22. *Rasskazov I. Y., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Zhelnin D. O.* New-generation portable geoacoustic instrument for rockburst hazard assessment // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 614 — 623.

23. *Anikin P., Kursakin G., Fedotova I.* Improvement of the automated seismic and acoustic monitoring system «Prognoz-ADS» main elements // E3S Web of Conferences. 2020, vol. 192, article 04014. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204014.

24. *Гладырь А. В.*, *Корчак П. А.*, *Стрешнев А. А.*, *Рассказов М. И.*, *Терешкин А. А.* Установка автоматизированной системы контроля горного давления «Prognoz-ADS» на опытном участке Объединенного Кировского рудника АО «Апатит» // Маркшейдерия и недропользование. — 2019. — № 4(102). — С. 52 — 56.

25. *Прохоров К. В.*, *Гладырь А. В.*, *Рассказов М. И.* Центр коллективного пользования «Центр исследования минерального сырья» // Горная промышленность. — 2020. — № 4. — С. 120 — 124. — DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-120-124.

26. *Gladyr A., Konstantinov A., Tereshkin A., Miroshnikov V.* Development of mathematical algorithm for seismoacoustic signals identification using local geomechanical control means // E3S Web of Conferences. 2019, no. 129, article 01014 DOI: 10.1051/e3sconf/201912901014.

27. *Гладырь А. В.*, *Константинов А. В.* Разработка алгоритма оптимальной конфигурации наблюдательной сети системы геомеханического мониторинга // Фундаментальные и

прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 1. — С. 71—77. DOI: 10.15372/FPVGN2019060112.

28. *Константинов А. В., Ломов М. А., Терешкин А. А., Рассказов М. И., Цой Д. И.* Исследование конфигураций приемных 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.

29. *Константинов А. В., Рассказов М. И., Цой Д. И.* Математические и программные средства оценки распределенной сети геофонов системы геомеханического мониторинга «Prognoz-ADS» // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2021. — № 2. — С. 26—33. DOI 10.21440/0536-1028-2021-2-26-33. ГИАБ

REFERENCES

1. Foulger G. R., Wilson V. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth-Science Reviews*. 2017, vol. 178, pp. 438—514. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.07.008.

2. Marcak H., Mutke G. Seismic activation of tectonic stresses by mining. *Journal Seismology*. 2013, vol. 17, no. 4, pp. 1139—1148.

3. Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. Case histories of rockbursts at metal mines. *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Chapter 3. 2018, pp. 47—92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2.

4. Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018, vol. 28, no. 5, pp. 829—837.

5. Adushkin V. V., Technogenic tectonic seismicity in Kuzbass. *Russian Geology and Geophysics*. 2018, vol. 59, no. 5, pp. 709—724. DOI: 10.15372/GiG20180510.

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

7. Batugin A., Kolikov K., Ivannikov A., Ignatov Yu., Krasnoshtanov D. Transformation of the geodynamic hazard manifestation forms in mining areas. *Proceedings of the 19th International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference SGEM-2019*. 2019, vol. 19, book 1.3. DOI: 10.5593/sgem2019/1.3.

8. Baranov S. V., Motorin A. Y., Shebalin P. N. Spatial distribution of triggered earthquakes in the conditions of mining-induced seismicity. *Fizika Zemli*. 2021, no. 4, pp. 91—100. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0002333721040025.

9. Kozyrev A. A., Savchenko S. N., Panin V. I., Semenova I. E., Rybin V. V., Fedotova YU. V., Kozyrev S. A., etc. *Geomekhanicheskie protsessy v geologicheskoy srede gornotekhnicheskikh sistem i upravlenie geodinamicheskimi riskami* [Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management], Apatity, KNTs RAN, 2019, 431 p. DOI: 10.37614/978.5.91137.391.7.

10. Babello V. A., Beydin A. V., Smolich S. V., Ovseychuk V. A. Assessment of rock mass behavior based on its geology analysis and stress state modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 12, pp. 41—54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.

11. 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*. 2019, vol. 5, pp. 1—15. DOI: 10.1155/2019/9732606.

12. Zhang F., Yang Y., Pahlavan L. Evaluation of Acoustic Emission Source Localization *Accuracy in Concrete Structures. Structural Health Monitoring*. 2020, vol. 6, pp. 2063—2074, DOI: 10.1177/1475921720915625.

13. Raimjanov B. R., Khasanov A. R., Farmanov O. E. Analysis of geodynamic behavior of rock mass for the purpose of rock burst prediction. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 29—41. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_29.

14. Aynbinder I. I., Ovcharenko O. V. Geomechanical behavior of deep-level rock mass in Internatsionalny and Mir mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 57 — 69. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-11-0-57-69.

15. Mengel' D.A. The results of rock burst prediction on the sokolovskaya underground mining by the acoustic emission method. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 149 — 160. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-149-160.

16. Tereshkin A. A., Rasskazov I. Yu., Anikin P. A., Gladyr A. V., Migunov D. S. and Rasskazov M. I. Improvement of technology and procedures of local rockburst hazard control. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021, vol. 773, article 012062. DOI: 10.1088/1755-1315/773/1/012062.

17. Korchak P. Investigation of regularities of brittle fracture formation around mine workings in overstressed rocks at the mines of Kirovsk branch of JSC «Apatit». *E3S Web of Conferences*. 2018, vol. 56, no. 6, article 02023. DOI: 10.1051/e3sconf/20185602023.

18. Zhukova S. A., Zhuravleva O. G., Onuprienko V. S., Streshnev A. A. Seismic behavior of rock mass in mining rockburst-hazardous deposits in the Khibiny Massif. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 7, pp. 5 — 17. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_7_0_5.

19. Korchak P. A., Zhukova S. A., Menshikov P. Yu. Formation and development of a system for monitoring seismic processes in the area of production activity of JSC «Apatit». *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 10, pp. 42 — 46. [In Russ].

20. Akhmetsafina R. Z. Location of an acoustic source in a homogeneous medium. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2016, no. 2, pp. 52 — 55. [In Russ].

21. Gladyr A. V., Rasskazov M. I., Tereshkin A. A., Konstantinov A. V. Experimental research of the automated geomechanical monitoring system location accuracy in the rock mass anisotropy conditions. *Fundamental and applied issues of mining*. 2019, no. 1, pp. 78 — 83. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2019060113.

22. Rasskazov I. Y., Migunov D. S., Anikin P. A., Gladyr A. V., Tereshkin A. A., Zhelnin D. O. New-generation portable geoacoustic instrument for rockburst hazard assessment. *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 614 — 623.

23. Anikin P., Kursakin G., Fedotova I. Improvement of the automated seismic and acoustic monitoring system «Prognoz-ADS» main elements. *E3S Web of Conferences*. 2020, vol. 192, article 04014. DOI: 10.1051/e3sconf/202019204014.

24. Gladyr A. V., Korchak P. A., Streshnev A. A., Rasskazov M. I., Tereshkin A. A. Installation of the automated system «Prognoz-ADS» for controlling the ground pressure on the test site of the JSC «Apatit»'s Joint Kirovskiy mine. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2019, no. 4(102), pp. 52 — 56. [In Russ].

25. Prokhorov K. V., Gladyr A. V., Rasskazov M. I. «Centre for mineral research» core shared research facilities. *Russian Mining Industry*. 2020, no. 4, pp. 120 — 124. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-120-124.

26. Gladyr A., Konstantinov A., Tereshkin A., Miroshnikov V. Development of mathematical algorithm for seismoacoustic signals identification using local geomechanical control means. *E3S Web of Conferences*. 2019, no. 129, article 01014 DOI: 10.1051/e3sconf/201912901014.

27. Gladyr A., Konstantinov A., Development of the optimal configuring algorithm for observational network of geomechanical monitoring system. *Fundamental and applied issues of mining*. 2019, vol. 6, no. 1, pp. 71 — 77. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2019060112.

28. Konstantinov A. V., Rasskazov M. I., Tsoi D. I. Analysis of receiving antenna configurations in geophone network of «Prognoz-ADS» system. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 5-2, pp. 93 — 102. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_93.

29. Konstantinov A. V., Rasskazov M. I., Tsoy D. I. Mathematical tools and software for the distributed geophone network of «Prognoz-ADS» geomechanical monitoring system. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2021, no. 2, pp. 26 — 33. [In Russ]. DOI 10.21440/0536-1028-2021-2-26-33.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рассказов Игорь Юрьевич — чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, директор, Хабаровский ФИЦ ДВО РАН, e-mail: adm@igd.khv.ru, ORCID ID: 0000-0002-2215-6642,
Федотова Юлия Викторовна[1] — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: fjulia@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8008-9612,
Аникин Павел Анатольевич[1] — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник, e-mail: pav.anik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3694-6044,
Сидляр Александр Владимирович[1] — канд. техн. наук, научный сотрудник, e-mail: alex-igd@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9619-4334,
Корчак Павел Анатольевич — начальник службы прогноза и предотвращения горных ударов, Управление главного инженера, Кировский филиал АО «Апатит», e-mail: pkorchak@phosagro.ru, ORCID ID: 0000-0002-8641-8971,
[1] Институт горного дела ДВО РАН.
Для контактов: Федотова Ю.В., e-mail: fjulia@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.Yu. Rasskazov, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Director, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia, e-mail: adm@igd.khv.ru, ORCID ID: 0000-0002-2215-6642,
Yu.V. Fedotova[1], Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: fjulia@mail.ru, ORCID ID: 0000-0001-8008-9612,
P.A. Anikin[1], Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, e-mail: pav.anik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-3694-6044,
A.V. Sidlyar[1], Cand. Sci. (Eng.), Researcher, e-mail: alex-igd@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9619-4334,
P.A. Korchak, Head of Service for Predicting and Prevention of Rock Bursts, Chief Engineer Office, Kirovsk Branch of Apatit JSC, 184250 Kirovsk, Russia, e-mail: pkorchak@phosagro.ru, ORCID ID: 0000-0002-8641-8971,
[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: Yu.V. Fedotova, e-mail: fjulia@mail.ru.

Получена редакцией 25.03.2022; получена после рецензии 11.08.2022; принята к печати 10.11.2022.
Received by the editors 25.03.2022; received after the review 11.08.2022; accepted for printing 10.11.2022.