

Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий

И.Ю. Рассказов¹✉, Ю.В. Федотова², П.А. Аникин², Д.С. Мигунов², А.В. Константинов²

¹Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Хабаровск, Российская Федерация

²Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение
Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук,
г. Хабаровск, Российская Федерация

✉ rasskazov@igd.khv.ru

Резюме: Рассмотрены методы и технические средства инструментальной оценки и контроля удароопасности и техногенной сейсмичности при подземной разработке рудных месторождений. Показано, что в условиях проявления горных ударов и техногенной сейсмичности ключевое значение имеет комплексный геомеханический мониторинг с применением ряда взаимодополняющих методов и технических средств. Раскрыты принципы построения измерительно-вычислительного комплекса и организации комплексного мониторинга на примере системы, созданной на геодинамических полигонах в районе Стрельцовского и Дальнегорского рудных районов. Перечислены особенности и технические характеристики измерительных и программных средств, входящих в состав системы мониторинга. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для фильтрации техногенных помех и выделения полезных сигналов, повышения точности локации и определения параметров акустически активных зон, обработки и представления данных мониторинга с использованием современных цифровых технологий. Изложены научно-методические подходы к изучению предельно напряженных сложноструктурных геосред и прогнозированию в них опасных динамических проявлений горного давления, в том числе основанные на выделении и параметризации формирующихся в удароопасном массиве геомеханических полей и очагов разрушения. Приведены результаты комплексного геомеханического мониторинга на ряде удароопасных рудников России и показана возможность эффективного управления горным давлением в удароопасных условиях.

Ключевые слова: удароопасность, массив горных пород, напряженно-деформированное состояние, сейсмоакустическая активность, геомеханический мониторинг, цифровые технологии

Благодарности: Исследования проводились с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием «Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН», финансируемого Минобрнауки России по соглашению №075-15-2021-663.

Для цитирования: Рассказов И.Ю., Федотова Ю.В., Аникин П.А., Мигунов Д.С., Константинов А.В. Совершенствование методов и средств геомеханического мониторинга на основе цифровых технологий. *Горная промышленность*. 2023;(5S):18–24. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>

Improvement of methods and means of geomechanical monitoring based on digital technologies

I.Yu. Rasskazov¹✉, Iu.V. Fedotova², P.A. Anikin², D.S. Migunov², A.V. Konstantinov²

¹Khabarovsk Federal Research Center of Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

²Mining Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences is a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

✉ rasskazov@igd.khv.ru

Abstract: The article discusses methods and technical means of instrumental assessment and control of rockburst hazard and technogenic seismicity during underground mining of ore. It is shown that in conditions of rockburst manifestation and anthropogenic seismicity, complex geomechanical monitoring with the use of a number of complementary methods and technical means is of key importance. The principles of measuring and computing complex construction and organization of integrated monitoring are disclosed using the case of a system created at the geodynamic testing sites of the area of the Streltsovsky and Dalnegorsky ore fields. The features and technical characteristics of measuring as well as software tools included in the monitoring system are listed. Algorithms and software have been developed to filter man-made interference and isolate useful signals, improve the accuracy of location and determination of parameters of acoustically active zones, processing and presentation of monitoring data using modern digital technologies. The scientific and methodological approaches to the study of extremely stressed complex-structured geological environment and the prediction of the hazardous dynamic manifestations of

rock pressure in them, including those based on the isolation and parametrization of geomechanical fields and foci of destruction formed in a rockburst hazardous rock mass, are described. The results of complex geomechanical monitoring at a number of rockburst hazardous mines in Russia are presented and the possibility of effective management of rock pressure in rockburst hazardous conditions is shown.

Keywords: rockburst hazardous, rock mass, stress-strain state, seismoacoustic activity, geomechanical monitoring, digital technologies

Acknowledgments: The research was performed using the resources of the "Center for Processing and Storage of Scientific Data of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences" Center for Collective Use of Research Equipment, funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under Agreement No.075-15-2021-663.

For citation: Rasskazov I.Yu., Fedotova Iu.V., Anikin P.A., Migunov D.S., Konstantinov A.V. Improvement of methods and means of geomechanical monitoring based on digital technologies. *Russian Mining Industry*. 2023;(5S):18–24. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-5S-18-24>

Введение

Разработка полезных ископаемых на современном этапе сопряжена с необходимостью вести горные работы в усложняющихся горно-геологических условиях и на больших глубинах. Техногенное преобразование недр в результате горных работ приводит к нарушению естественного равновесия участков земной коры и проявлению опасных геодинамических явлений в различных формах: от горных ударов до разрушительных техногенных землетрясений [1–6]. На многих подземных рудниках России и мира, зарегистрирован весь спектр динамических проявлений горного давления, вплоть до сильных с тяжелыми последствиями горных и горно-тектонических ударов [7–12].

Прогноз и раннее предупреждение таких опасных геодинамических явлений представляют собой весьма сложную задачу, так как необходимо исследовать не только отдельные, локальные участки массива (целики и различные конструктивные элементы систем разработки), а всю горнотехническую систему в целом, включая и ее тектоническую структуру в увязке с региональной геодинамической обстановкой. В этих условиях для контроля и эффективного управления горным давлением необходимо применение комплекса различных теоретических и инструментальных методов [8; 12–14].

Из разработанных к настоящему времени различных методов оценки и контроля свойств и состояния массива горных пород более широко применяются геофизические методы, которые в зависимости от масштаба исследуемого участка массива горных пород подразделяются на региональные и локальные.

Надежность прогноза геодинамических явлений во многом определяется техническими характеристиками применяемых измерительных комплексов и возможностью многопараметрической оценки свойств и состояния геологической среды на различных этапах разработки месторождений. Наибольший эффект дает применение различных дополняющих друг друга методов, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга [15–19]. Создание и совершенствование таких систем, построенных на широком использовании современных цифровых технологий, является важной и актуальной научной задачей, обеспечивающей необходимый уровень безопасности при освоении недр в особо сложных и удароопасных условиях.

Методы и технические средства контроля удароопасности

Для исследования горных ударов и проявлений техногенной сейсмичности при подземной разработке удароопасных месторождений Стрельцовского рудного поля

(СРП, Юго-Восточное Забайкалье) и в Дальнегорском рудном районе (ДРР, Восточное Приморье) были созданы геодинамические полигоны, оснащенные комплексом технических средств, включающих:

- лазерные деформометры, обеспечивающие измерения вариаций уровня деформаций земной коры в частотном диапазоне от 0 до 1000 Гц, и нанобарограф (установлены в подземных павильонах на месторождениях «Антей» (СРП) и Николаевское (ДРР);

- многоканальные системы сейсмоакустического контроля горного давления «Prognoz-ADS» (АСКГД), позволяющие регистрировать и определять параметры событий сейсмоакустической эмиссии (САЭ-событий) энергией от 10 до 104 Дж в частотном диапазоне 0,5–12 кГц, установлены в подземных выработках на месторождениях «Антей», Мало-Тулукуевское (СРП) и Николаевское, Южное (ДРР);

- многоканальную систему микросейсмического мониторинга «Prognoz-S», контролирующую участок массива горных пород объемом более 12 км³ (на месторождении «Антей» установлено 12 сеймопавильонов на горизонтах с V по XIV). Система регистрирует сейсмоакустические события с энергией до 107 Дж в частотном диапазоне от 10 до 1000 Гц;

- приборы локального контроля удароопасности «Prognoz-L», которые обеспечивают регистрацию и обработку акустических сигналов в частотном диапазоне 1,0–30 кГц.

Дополнительно на полигонах устанавливались деформационные станции глубинных и контурных реперов, система деформационного мониторинга (СМД), а также некоторые другие приборы и измерительные комплексы. При анализе и интерпретации результатов мониторинга используются также данные геодезических, сейсмологических и GPS наблюдений [20].

Подобная схема построения измерительных комплексов для контроля геодинамических явлений применяется также на апатит-нефелиновых месторождениях КФ АО «Апатит», одних из наиболее удароопасных в России [16; 17].

Технические характеристики перечисленных измерительных средств совместно перекрывают частотный диапазон от первых герц до десятков килогерц, что позволяет регистрировать и определять параметры не только крупных геодинамических событий, но и их предвестников.

Применяемые приборы и оборудование интегрированы в единую наблюдательную сеть, в которой обеспечивается временная синхронизация при регистрации данных всеми входящими в систему измерительными средствами (реализованные технические решения обеспечивают точность хода системных часов на каждом из серверов сбора данных не менее 15 мс). В системе информационного обмена

используются интерфейсы и протоколы USB, RS-485, RS-485, SHDSL со скоростью передачи до 15,2 Мбит/с. Результаты мониторинга накапливаются в единой базе данных, что дает возможность отображения и анализа полученной информации с помощью единого программного комплекса. Основной интегрирующей платформой выступает программный комплекс MineFrame, предназначенный для комплексного решения широкого круга горно-геологических и технологических задач [21]. Трехмерное графическое ядро, лежащее в основе программных средств системы, позволяет работать с моделями объектов в многооконном режиме и предоставляет широкие возможности управления способами отображения и редактирования объектов горной технологии.

Для визуализации и диспетчеризации результатов геомеханического мониторинга в режиме реального времени в ИГД ДВО РАН разработана программа «GeoAcoustics 3DView», которая позволяет: отображать местоположение очагов сейсмоакустических событий, совмещенных с 3D моделью подземных горных выработок; просматривать параметры САЭ и зон их концентрации; формировать отчеты и экспортировать результаты в виде проекции на вертикальную или горизонтальную плоскость (рис. 1).

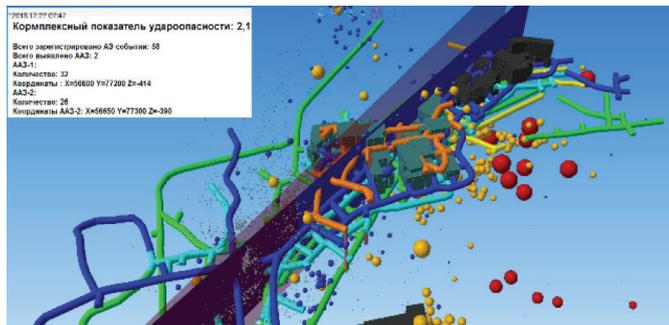


Рис. 1
Визуализация результатов геомеханического мониторинга в программе «GeoAcoustics 3DView»

Fig. 1
Visualization of the geomechanical monitoring results in the 'GeoAcoustics 3DView' software suite

Важным элементом системы комплексного геомеханического мониторинга является АСКГД «Prognoz-ADS», которая в отличие от микросейсмических станций регистрирует более слабые (с энергией от 10 Дж) сейсмоакустические события, которые часто выступают предвестниками опасных геодинамических явлений. Кроме того, в процессе геоакустического контроля более четко прослеживается характер геомеханических процессов в массиве горных пород.

На рис. 2 представлены карты акустической активности, построенные по результатам мониторинга на месторождении «Апатитовый цирк», разрабатываемом Расвумчоррским рудником КФ АО «Апатит», где установлена хорошая корреляция данных, зарегистрированных системой «Prognoz-ADS» и сейсмической системой рудника (АСКСМ-Р). При этом акустическая система регистрирует значительно большее число событий (более чем на порядок), что дает возможность надежно определять границы потенциально удароопасного участка и более обоснованно применять методы снижения удароопасности.

Для эффективного применения геоакустических систем в условиях действующего рудника потребовалось решение проблемы помехозащищенности и выделения полезных

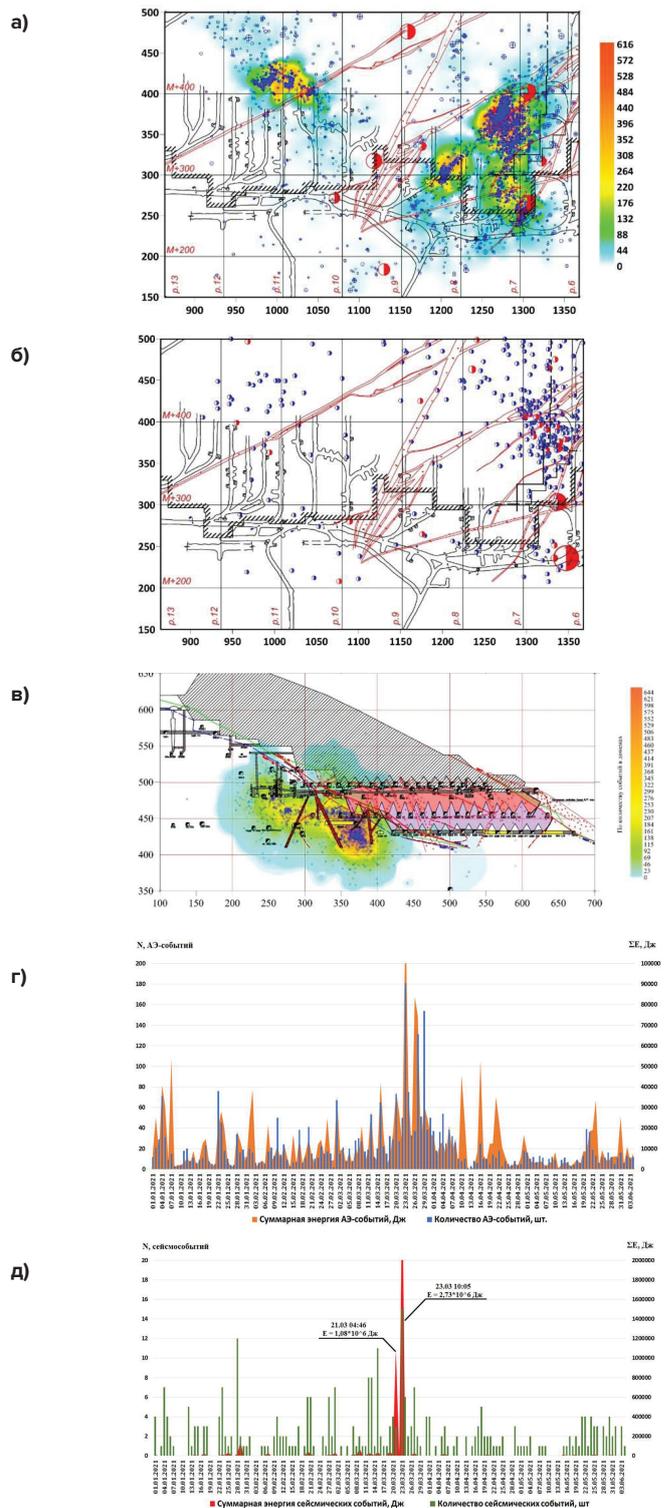


Рис. 2
Результаты комплексного геомеханического мониторинга участка массива месторождения «Апатитовый цирк» с февраля по июнь 2021 г. в проекции на горизонте 450 м: а, б – карты акустической и сейсмической активности; в – разрез по линии 6 с результатами геоакустического мониторинга участка месторождения; г, д – графики изменения количества и энергии акустических (г) и сейсмических (д) событий

Fig. 2
Results of complex geomechanical monitoring of the Apatite Circus deposit rock mass section from February to June 2021 within a cross-section down to the level of 450 m: а, б – maps of acoustic and seismic activity; в – section along Line 6 with the results of geoacoustic monitoring of the deposit section; г, д – graphs of changes in the quantity and energy of the acoustic (г) and seismic (д) events

сигналов (от естественной акустической эмиссии) в общем потоке регистрируемых событий, что стало возможным только при использовании современной микропроцессорной элементной базы и цифровых технологий.

В системе «Prognoz-ADS» фильтрация помех производится как на аппаратном, так и на программном уровне.

В первом случае при интенсивных помехах происходит автоматическое повышение порога регистрации событий у ближайших датчиков. Во втором случае применяются специальные алгоритмы и программное обеспечение. При этом используются различные критерии и фильтры выделения полезного сигнала – от простых, таких как длительность, амплитуда, спектральные характеристики, до более сложных, позволяющих учитывать комплекс признаков естественных и техногенных сигналов. Для автоматизации этого процесса применяются методы интеллектуального анализа и машинного обучения.

Важным достоинством геоакустических систем является также точность локации очагов микроразрушений. При правильно организованном мониторинге и развитой сети датчиков ошибка локации часто не превышает 1–2 м. Здесь важную роль играют конфигурация приемной антенны и учет структурных особенностей массива в зоне контроля. Для конфигурирования наблюдательной сети в ИГД ДВО РАН разработано специальное программное обеспечение Antenna Calc. С его помощью можно определить оптимальную расстановку датчиков и оценить возможную ошибку в определении координат в зависимости от числа приемных преобразователей, расстояния между ними и энергии регистрируемых событий.

Результаты исследования удароопасности по данным комплексного геомеханического мониторинга

Применение комплекса разномасштабных методов и технических средств оценки и контроля удароопасности на ряде опасных по горным ударам месторождений позволило получить представительные данные о характере геомеханических процессов на стадии подготовки опасных геодинамических явлений. Установлено, что важной особенностью поведения удароопасного массива является формирование в нем активных зон (потенциальных очагов геодинамических явлений), в пределах которых происходит процесс кластеризации источников микроразрушений. Нами разработана оригинальная методика для выделения и анализа формирующихся очагов, базирующаяся на теории случайных графов с использованием установленной компоненты связности [22]. Для определения параметров акустически активных зон предложен алгоритм кластеризации DBSCAN, основанный на плотности данных. Одним из преимуществ алгоритма является возможность обнаружения кластеров, имеющих сложную форму, обусловленную геометрией выработанного пространства, контурами геологических и разломных структур.

Состояние массива в пределах потенциально удароопасных участков оценивается с применением комплексного показателя $K_{уд}$ в состав которого входит ряд наиболее значимых прогностических признаков. По данным многолетних шахтных наблюдений установлено, что к основным признакам подготовки горного удара относятся: рост числа САЭ-событий в 2 и более раз (N_{AE}); уменьшение среднеквадратичного расстояния (R_{MR}) от источника до центра формирующейся очаговой зоны; рост суммарной энергии (E_{AE}) более чем на 80%; сокращение временного интервала

между САЭ-событиями (t_{ST}) и снижение скорости миграции (v_{OZ}) эпицентра очаговой зоны до 8 м/сут. На этой основе разработан комплексный показатель удароопасности ($K_{уд}$), который определяется как отношение нормированных (к данным за пять предыдущих суток) значений суммарной энергии и числа САЭ-событий в активной зоне к произведению нормированных значений расстояния, времени между последующими событиями и скорости миграции центра зоны акустической активности:

$$K_{уд} = \frac{\bar{E}_{AE} \cdot \bar{N}_{AE}}{\bar{R}_{MR} \cdot \bar{t}_{ST} \cdot \bar{v}_{OZ}},$$

где E_{AE} – суммарная энергия САЭ-событий в очаговой зоне (связанных между собой событий), Дж; N_{AE} – количество САЭ-событий в очаговой зоне; R_{MR} – расстояние между последующими САЭ-событиями, м; t_{ST} – время между последующими САЭ-событиями, с; v_{OZ} – скорость миграции центра очаговой зоны, м/сут.

Количественные значения показателя, при которых устанавливается категория «Опасно», определяются методами дискретного анализа и математической статистики с применением интервальных алгоритмов распознавания образов. Так, для условий месторождения «Антей» критическая величина показателя удароопасности составила 5,11 ($K_{уд} > 5,11$). При этом надежность прогнозов динамических проявлений составила 84,4%.

Экспериментально подтверждено значительное влияние деформационных полей на процесс подготовки и реализации опасных геодинамических явлений. При этом на удароопасных рудниках в последние годы все чаще наблюдается проявление триггерного эффекта, когда геодинамические явления инициируются относительно слабыми воздействиями от технологических взрывов или других источников сейсмических волн. Например, серия разрушительных толчков на месторождении Николаевское (Приморский край) в марте 2016 г. была вызвана землетрясением магнитудой 4 балла, эпицентр которого располагался в 30 км к юго-востоку на побережье Японского моря. Роль волновода сыграл новейший дуговой разлом между месторождением и эпицентром [23]. Двумя годами позже, в ноябре 2018 г., взрывные работы на этом же месторождении спровоцировали крупное сейсмическое событие энергией порядка 10^6 Дж на глубине более 900 м от поверхности (на 100 м ниже участков ведения горных работ), которое вызвало разрушения горных выработок на нижнем горизонте и сопровождалось многочисленными афтершоковыми сотрясениями массива, регистрируемыми в течение двух суток после первого, самого мощного, толчка.

Представительные экспериментальные данные о влиянии сейсмических волн на геомеханическое состояние удароопасного массива получены в условиях месторождения «Антей». Установлено, что на отдельных тектонически нарушенных участках массива после прохождения длиннопериодных сейсмических волн от удаленных землетрясений в 2,5–3 раза и более повышается сейсмоакустическая активность, увеличивается как количество, так и энергия регистрируемых событий. На рис. 3 показано изменение параметров деформационного поля в момент регистрации сейсмических волн крупного удаленного землетрясения.

В результате волнового воздействия на массив произошло увеличение более чем в 3 раза числа сейсмоакустических событий. Почти в 4 раза (с 639 до 2399 Дж) выросла их суммарная энергия.

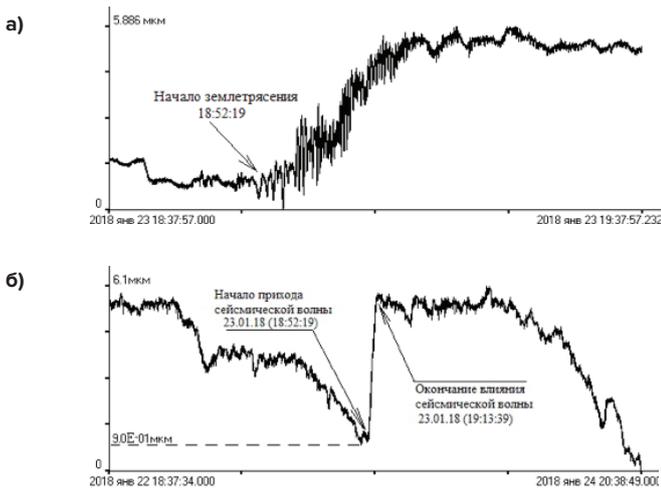


Рис. 3
Влияние сейсмических волн от землетрясения в заливе Аляска 23.01.2018 на изменение числа и энергии САЭ-событий в массиве месторождения «Антей»:
 а – участок записи момента вступления сейсмической волны;
 б – запись деформографа за сутки до и после землетрясения;

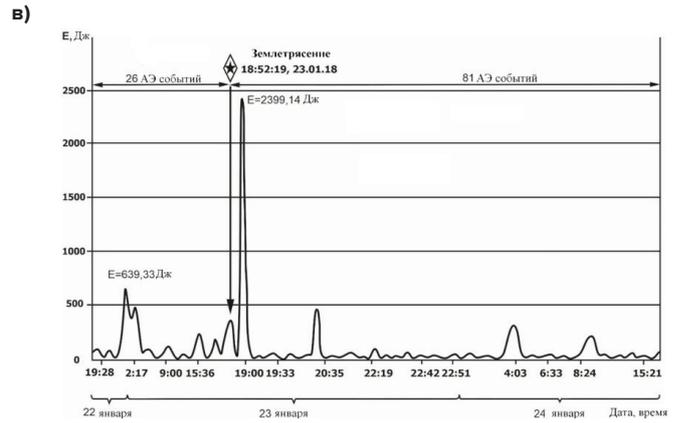


Fig. 3
The influence of seismic waves from the earthquake in the Gulf of Alaska on 23.01.2018 on the change in the number and energy of SAE events within the rock mass of the Antey deposit:
 а – the recording site of the moment of the seismic arrival;
 б – the recording of the strainmeter a day before and a day after the earthquake;
 в – the change in seismic activity in Stopes 1102 and 1302

Исследование триггерного эффекта представляет научный и практический интерес, открывая возможность для разработки эффективных методов снижения удароопасности (методов управляемой разгрузки). ИГД ДВО РАН были проведены экспериментальные работы по управляемой разгрузке участка массива месторождения Николаевское и включали в себя бурение веера из 3 скважин в район формирующегося очага горного удара, установленного по результатам комплексного мониторинга, и последующее сотрясательное взрывание. На начальном этапе в районе очаговой зоны наблюдалось кратковременное повышение сейсмоакустической активности с последующим ее снижением и перемещением потенциально опасной зоны вглубь массива.

Результаты проведенных экспериментов в целом показали эффективность управления напряженным состоянием массива.

Заключение

Проблема предупреждения горных ударов и снижение геодинамического риска на удароопасных месторождениях на протяжении многих лет является одной из наиболее сложных в мировой науке и горной практике. Это связано с многофакторностью условий и причин возникновения геодинамических событий, высокой неоднородностью свойств и состояния массивов горных пород, подвергающихся интенсивным техногенным воздействиям при их разработке, а также пока недостаточной изученностью процессов и явлений в предельно напряженных геосредах и природно-технических системах.

С позиций горной геомеханики и подземной геотехнологии особенно важна необходимость оперативного получения комплекса данных (микросейсмических, геоакустических, электромагнитных, деформационных и др.), объективно отражающих геомеханическое состояние техногенно трансформируемых природно-технических систем. Получение новых экспериментальных данных, их анализ и интерпретация в сочетании с информацией об особенностях геодинамических полей и процессов, в том

числе полученных с применением методов интеллектуального анализа, создают условия для изучения целого ряда лишь недавно открытых явлений и эффектов и раскрытия механизма формирования очагов подготовки опасных геодинамических явлений.

Для раннего предупреждения горных ударов и опасных проявлений техногенной сейсмичности наиболее эффективно применение различных дополняющих друг друга методов и измерительных средств, объединенных в единую систему комплексного геомеханического мониторинга, в которой обеспечивается временная синхронизация при регистрации данных в частотном диапазоне от первых герц до десятков килогерц, что позволяет регистрировать и определять параметры не только крупных геодинамических событий, но и их предвестников.

С использованием современных цифровых технологий разработаны алгоритмы и программное обеспечение для фильтрации техногенных помех и выделения полезных сигналов, повышения точности локации источников САЭ и определения параметров акустически активных зон, обработки и представления данных мониторинга.

На основе анализа и обобщения представительного объема экспериментальных данных и многолетних наблюдений предложен подход к оценке удароопасности массива горных пород, базирующийся на выявлении и контроле акустически активных зон (потенциальных очагах горных ударов). Для оценки состояния массива в пределах потенциально удароопасных участков предложен комплексный показатель Куд, в состав которого входит ряд наиболее значимых прогностических признаков.

Высокая разрешающая способность системы комплексного мониторинга, анализ деформационных полей и учет триггерного эффекта позволяют обосновать и применить высокоэффективные методы снижения геодинамического риска на основе направленного управления геомеханическими процессами (включая способы управляемой разгрузки сотрясательным взрыванием) в предельно напряженном сложнопостроенном массиве горных пород.

Список литературы

- Jiang F.F., Zhou H., Liu C., Sheng J. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines. *China Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2019;38(5):956–972.
- Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(5):829–837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>
- Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
- Петухов И.М., Егоров П.В., Винокур Б.Ш. *Предотвращение горных ударов на рудниках*. М.: Недра; 1984. 230 с.
- Мельников Н.Н., Козырев А.А., Панин В.И. Техногенная сейсмичность – опасный антропогенный фактор при ведении горных работ в высоконапряженных массивах. *Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2015;(5):425–433.
- Кочарян Г.Г., Будков А.М., Кишкина С.Б. Об инициировании тектонических землетрясений при подземной отработке месторождений. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2018;(4):34–43. <https://doi.org/10.15372/FTPRPI20180405>
- Scott D.F., Williams T.J., Friedel M.J. *Investigation of a rock-burst site, Sunshine Mine, Kellogg, Idaho*. Krakow: Balkema: Rotterdam; 1997, pp. 311–315. Available at: <https://www.cdc.gov/NIOSH/mining/UserFiles/works/pdfs/irbs.pdf>
- Рассказов И.Ю. *Контроль и управление горным давлением на рудниках Дальневосточного региона*. М.: Горная книга; 2008. 329 с.
- He M., Xia H., Jia X., Gong W., Zhao F., Liang K. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012;4(2):97–114. <https://doi.org/10.3724/SPJ.1235.2012.00097>
- Durrheim R.J. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research. In: *Proceedings of the SME Annual meeting and exhibition, 21–24 February 2010, Phoenix, Arizona*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2010, pp. 156–171.
- Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
- Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. и др. *Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками*. Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук; 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
- Петухов И.М., Батугина И.М. *Геодинамика недр*. М.: Недра; 1999. 287 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/25997>
- Stewart R.A., Reimold W.U., Charlesworth E.G., Ortlepp W.D. The nature of a deformation zone and fault rock related to a recent rockburst at Western Deep Levels Gold Mine, Witwatersrand Basin, South Africa. *Tectonophysics*. 2001;337(3-4):173–190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00028-2)
- Рассказов И.Ю., Петров В.А., Гладырь А.В., Тюрин Д.В. Геодинамический полигон Стрельцовского рудного поля: практика и перспективы. *Горный журнал*. 2018;(7):17–21. <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.02>
- Шабаров А.Н., Цирель С.В., Морозов К.В., Рассказов И.Ю. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах. *Горный журнал*. 2017;(9):59–64. <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.09.11>
- Абрашитов А.Ю., Шабаров А.Н., Корчак П.А., Куранов А.Д. Опыт взаимодействия с горным предприятием при решении проблем геодинамической безопасности. *Горный журнал*. 2023;(5):40–48. <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.06>
- Мельников Н.Н. (ред.) *Методы и системы сейсмодинамического мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. Новосибирск: СО РАН; 2009. Т. 1, 304 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21804>
- Мельников Н.Н. (ред.) *Методы и системы сейсмодинамического мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов*. Новосибирск: СО РАН; 2010. Т. 2, 261 с. Режим доступа: <https://www.geokniga.org/books/21803>
- Шевчук Р.В., Маневич А.И., Акматов Д.Ж., Урманов Д.И., Шакиров А.И. Современные методы, методики и технические средства мониторинга движений земной коры. *Горная промышленность*. 2022;(5):99–104. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>
- Лукичев С.В., Наговицын О.В., Семенова И.Э., Белгородцев О.В. Подходы к решению задач проектирования и планирования горных работ в системе MINEFRAME. *Горный журнал*. 2015;(8):53–58. <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.12>
- Guzev M.A., Rasskazov I.Yu., Tsitsiashvili G.Sh. Algorithm of potentially burst-hazard zones dynamics representation in massif of rocks by results of seismic-acoustic monitoring. *Procedia Engineering*. 2017;191:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.151>
- Рассказов И.Ю., Саксин Б.Г., Усиков В.И., Потапчук М.И. Геодинамическое состояние массива пород Николаевского полиметаллического месторождения и особенности проявления удароопасности при его освоении. *Горный журнал*. 2016;(12):13–19. <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.03>

References

- Jiang F.F., Zhou H., Liu C., Sheng J. Progress, prediction and prevention of rockbursts in underground metal mines. *China Journal of Rock Mechanic Engineering*. 2019;38(5):956–972.
- Manchao H., Fuqiang R., Dongqiao L. Rockburst mechanism research and its control. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2018;28(5):829–837. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.09.002>
- Keneti A., Sainsbury B.A. Review of published rockburst events and their contributing factors. *Engineering Geology*. 2018;246:361–373. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.10.005>
- Petukhov I.M., Egorov P.V., Vinokur B.Sh. *Rockburst prevention on Mine's*. Moscow: Nedra; 1984. 230 p. (In Russ.)
- Melnikov N.N., Kozыrev A.A., Panin V.I. Technogenic seismicity is a dangerous anthropogenic factor in mining operations in highly stressed massifs. *Geoekologiya, Inzhenernaya Geologiya, Gidrogeologiya, Geokriologiya*. 2015;(5):425–433. (In Russ.)
- Kocharyan G.G., Budkov A.M., Kishkina S.B. Initiation of tectonic earthquakes during underground mining. *Journal of Mining Science*. 2018;54(4):561–568. <https://doi.org/10.1134/S1062739118044014>
- Scott D.F., Williams T.J., Friedel M.J. *Investigation of a rock-burst site, Sunshine Mine, Kellogg, Idaho*. Krakow: Balkema: Rotterdam; 1997, pp. 311–315. Available at: <https://www.cdc.gov/NIOSH/mining/UserFiles/works/pdfs/irbs.pdf>
- Rasskazov I.Yu. *Control and management of mining pressure at the mines of the Far Eastern region*. Moscow. Gornaya kniga; 2008. 329 p. (In Russ.)
- He M., Xia H., Jia X., Gong W., Zhao F., Liang K. Studies on classification, criteria and control of rockbursts. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012;4(2):97–114. <https://doi.org/10.3724/SPJ.1235.2012.00097>
- Durrheim R.J. Mitigating the risk of rockbursts in the deep hard rock mines of South Africa: 100 years of research. In: *Proceedings of the SME Annual meeting and exhibition, 21–24 February 2010, Phoenix, Arizona*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2010, pp. 156–171.

11. Simser B.P. Rockburst management in Canadian hard rock mines. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019;11(5):1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.07.005>
12. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V., Fedotova Yu.V. et al. *Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Science; 2019. 431 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
13. Petukhov I.M., Batugina I.M. *Geodynamics of the subsurface*. Moscow: Nedra; 1999. 287 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/25997>
14. Stewart R.A., Reimold W.U., Charlesworth E.G., Ortlepp W.D. The nature of a deformation zone and fault rock related to a recent rockburst at Western Deep Levels Gold Mine, Witwatersrand Basin, South Africa. *Tectonophysics*. 2001;337(3-4):173–190. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(01\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(01)00028-2)
15. Rasskazov I.Yu., Petrov V.A., Gladyr A.V., Tyurin D.V. Geodynamic test site in the Streltsovsky ore field: Practice and prospects. *Gornyi Zhurnal*. 2018;(7):17–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2018.07.02>
16. Shabarov A.N., Tsirel S.V., Morozov K.V., Rasskazov I.Yu. Concept of integrated geodynamic monitoring in underground mining. *Gornyi Zhurnal*. 2017;(9):59–64. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2017.09.11>
17. Abrashitov A.Yu., Shabarov A.N., Korchak P.A., Kuranov A.D. Dealing with geodynamic safety challenges in cooperation with a mining company: A case-study. *Gornyi Zhurnal*. 2023;(5):40–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2023.05.06>
18. Melnikov N.N. (ed.) *Methods and instruments for seismic-and-deformation monitoring of technogenic earthquakes and rock-bursts*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. Vol. 1, 304 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/21804>
19. Melnikov N.N. (ed.) *Methods and instruments for seismic-and-deformation monitoring of technogenic earthquakes and rock-bursts*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2009. Vol. 2, 261 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/21803>
20. Shevchuk R.V., Manevich A.I., Akmatov D.Zh., Urmanov D.I., Shakirov A.I. Modern methods, techniques and technical means of monitoring movements of the Earth crust. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):99–104. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-99-104>
21. Lukichev S.V., Nagovitsyn O.V., Semenova I.E., Belogorodtsev O.V. Mine planning and design in MINEFRAME. *Gornyi Zhurnal*. 2015;(8):53–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2015.08.12>
22. Guzev M.A., Rasskazov I.Yu., Tsitsiashvili G.Sh. Algorithm of potentially burst-hazard zones dynamics representation in massifs of rocks by results of seismic-acoustic monitoring. *Procedia Engineering*. 2017;191:36–42. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.151>
23. Rasskazov I.Yu., Saksin B.G., Usikov V.I., Potapchuk M.I. Rock mass geodynamics and mining-induced rockbursting at Nikolaev complex deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2016;(12):13–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/gzh.2016.12.03>

Информация об авторах

Рассказов Игорь Юрьевич – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, директор, Хабаровский федеральный исследовательский центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, e-mail: rasskazov@igd.khv.ru

Федотова Юлия Викторовна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Аникин Павел Александрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Мигунов Дмитрий Сергеевич – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Константинов Александр Владимирович – научный сотрудник, Институт горного дела Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Хабаровского федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук

Информация о статье

Поступила в редакцию: 30.09.2023

Поступила после рецензирования: 22.11.2023

Принята к публикации: 30.11.2023

Information about the authors

Igor Yu. Rasskazov – Dr. Sci (Eng.), Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Director, Khabarovsk Federal Research Center of Far Eastern branch of Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation; e-mail: adm@igd.khv.ru

Iuliia V. Fedotova – PhD. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of digital methods for research of natural-technical systems, Federal State Budgetary Institution of Science of the Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Pavel A. Anikin – PhD. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Laboratory of Geomechanics, Federal State Budgetary Institution of Science of the Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Dmitry S. Migunov – Researcher, Laboratory of Mining Geophysics, Federal State Budgetary Institution of Science of the Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Alexander V. Konstantinov – Researcher, Laboratory of Geomechanics, Federal State Budgetary Institution of Science of the Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, a separate division of the Khabarovsk Federal Research Center of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk, Russian Federation

Article info

Received: 30.09.2023

Revised: 22.11.2023

Accepted: 30.11.2023